

*Javni razpis za spodbujanje raziskovalcev na začetku kariere 2.0*

## KONČNO POROČILO

### Podatki o upravičencu

Naziv upravičenca:	Geološki zavod Slovenije
Sedež upravičenca/poslovna enota:	Dimičeva ulica 14, 1000, Ljubljana
Odgovorna oseba (zastopnik):	Dr. Miloš Bavec

### Podatki o operaciji

Številka pogodbe o sofinanciranju operacije:	C3330-17-529011
Operacija (e-MA št.):	OP20.01262
Vodenje računovodstva: ločeno stroškovno mesto:	1150031
Naziv operacije:	Uporaba georadarja za ugotavljanje ranljivosti podzemne vode zaradi vplivov kmetijske dejavnosti
Obdobje izvajanja (od do):	01.06.2017 – 31.07.2020
Ime in priimek raziskovalca(ke)	Marjana Zajc
Sodelujoči gospodarski subjekt (naziv in naslov/poslovna enota)	Vitrum laser inženiring d.o.o. Slovenska cesta 8a, 1234 Mengeš
Kohezijska regija izvajanja:	Zahod

## Vsebinsko poročilo

1.	Predstavitev problematike, namena in ciljev raziskovalnega projekta	3
2.	Georadarske meritve	6
2.1.	Metoda georadarja	6
2.2.	Izvajanje georadarskih meritev na terenu	7
3.	Predstavitev doseženih rezultatov	9
3.1.	Ugotavljanje debeline in horizontov tal	9
3.2.	Ugotavljanje zakraselosti podpovršja	18
3.2.1.	Vrtače s kmetijskimi površinami	18
3.2.2.	Njiva na kraških tleh	26
3.3.	Ugotavljanje spremembe matične podlage	29
3.4.	Ugotavljanje zadrževalnih lastnosti tal	32
3.5.	Ugotavljanje višine podzemne vode	35
4.	Vpliv različnih faktorjev na georadarske rezultate	37
4.1.	Vlažnost tal	37
4.2.	Sestava matične podlage	37
4.3.	Površinsko stanje območja	38
4.4.	Frekvenca uporabljene antene	38
5.	Sodelovanje z gospodarskim subjektom in skladnost rezultatov s predmetom, cilji in namenom javnega razpisa	39
6.	Razširjanje raziskovalnih rezultatov	40
	ZAKLJUČKI	43
	LITERATURA	43

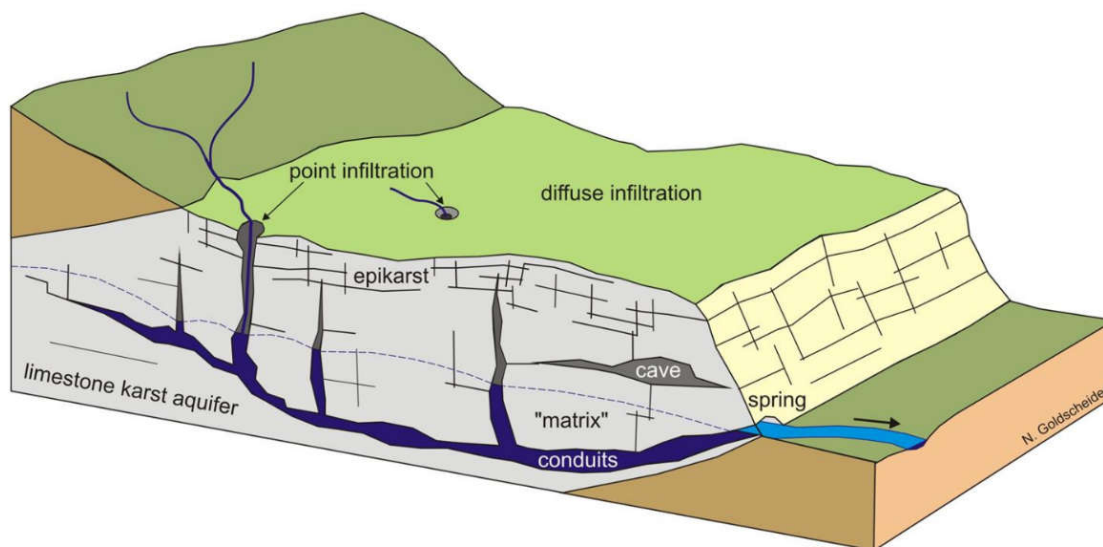
## 1. Predstavitev problematike, namena in ciljev raziskovalnega projekta

V okviru raziskovalnega projekta smo testirali neinvazivno georadarsko metodo na kmetijskih površinah Zahodne Slovenije za določevanje različnih parametrov, uporabnih za natančnejše določevanje ocene ranljivosti podzemne vode. Tematika raziskovalnega projekta spada pod prednostno področje S4 Naravni in tradicionalni viri za prihodnost, natančneje pod točko Trajnostna pridelava hrane. Rezultati bodo pripomogli k cilju III., saj bodo pomagali pri zagotavljanju dolgoročno vzdržnih pogojev za razvoj slovenskemu prostoru prilagojenih kmetijskih praks. Glede na Uredbo o varstvu voda pred onesnaževanjem z nitrati iz kmetijskih virov (Uradni list RS, št. 113/09) je kot ranljivo območje namreč določeno celotno območje Slovenije. Dosežena dognanja bodo prispevala k fokusnemu področju II., saj smo z našimi raziskavami pridobili ključne informacije, potrebne za razvoj tehnologij za trajnostno rastlinsko proizvodnjo. Rezultati raziskav projekta bodo v prihodnje omogočili razvoj rešitev na območjih s povečano ranljivostjo podzemne vode za izboljšanje stanja okolja, kar je nujno potrebno za celotno družbo.

Z uporabo georadarja smo informacije o stanju podpovršja posameznih pridelovalnih površin znotraj Zahodne Slovenije pridobili brez samega poseganja v okolje. S tem smo prispevali k doseganju dobrega kemijskega in ekološkega stanja voda, kar je tudi tretji specifični cilj prednostne osi 2.6 OP Boljše stanje okolja in biotske raznovrstnosti. Pod obrazložitvijo tega specifičnega cilja je namreč navedeno, da je doseganje dobrega stanja voda v Sloveniji še vedno izziv, kot glavno obremenitev pa Načrt upravljanja voda Republike Slovenije za obdobje 2016-2021 navaja razpršeno onesnaževanje zaradi spiranja s kmetijskih zemljišč. Glavni predmet raziskav so bile vrhnje plasti tal ter njihova sledljivost v prostoru in določevanje globine podzemne vode, ki sta oba pomembna faktorja pri določevanju ranljivosti podzemnih voda. Podatki o značilnostih vrhnjih plasti (debelina tal, horizonti, zrnavaost, prisotnost diskontinuitet, kot so razpoke, prelomi ipd.), ki predstavljajo zaščito pred prenosom onesneževal s površja v podzemne vode, so ključnega pomena pri zmanjševanju vpliva kmetijstva na okolje ter pri zagotavljanju trajnostne pridelave hrane. Ti podatki so bili pridobljeni na neinvaziven način, saj pri georadarski metodi fizično poseganje v okolje ni prisotno.

Kakovost podzemne vode je izrednega pomena tako v smislu oskrbe s pitno vodo kot tudi v industriji in kmetijstvu. Predstavlja namreč največjo zalogo pitne vode, ki pa ni neomejena, zaradi česar je skrbno in trajnostno upravljanje z ranljivo podzemno vodo še toliko bolj pomembno (Astis, 2004). Neoporečna pitna voda je nujno potrebna za naše zdravje, zato je zagotovitev njene kakovosti in zadostne količine glavna naloga upravljanja z vodnimi viri (Žabar et al., 2014). Naravna ranljivost vodonosnika je produkt več dejavnikov, ki vplivajo na prodiranje onesnažila v sistem ter na njegovo prostorsko in časovno razširjanje in redčenje (Žabar et al., 2014). Med drugim so pri teh procesih pomembni tako vrsta tal in litologija kot tudi struktura tal. Ocena naravne ranljivosti, ki je izrednega pomena pri načrtovanju rabe okolja (Žabar et al., 2014), je torej v veliki meri odvisna od lastnosti zaščitne vrhnje plasti in njene zadrževalne sposobnosti (MOP, 2009; 2015). Infiltrirana voda namreč onesnažila izpira skozi vrhno zaščitno plast v spodajležečo kamnino nezasičene cone. Daljši kot je čas zadrževanja v vrhnjih plasteh, dlje so onesnažila izpostavljena različnim razgradnim procesom in absorpciji, zato jih posledično podzemno vodo doseže manjša količina (Ravbar, 2007). Čas prehoda onesnažila je poleg značilnosti vrhnjih plasti odvisen tudi od globine nivoja podzemne vode, zato je tudi to eden ključnih podatkov pri ocenjevanju ranljivosti (Žabar et al., 2014). Ranljivost podzemnih voda je torej pogojena s strani naravnih hidrogeoloških lastnosti (MOP, 2009), obremenjevanje podzemnih voda z onesnažili pa povečujejo še različni človeški vplivi. Vir obremenitev posameznih ekosistemov, ki so odvisni od podzemne vode, je med drugimi intenzivno kmetijstvo z uporabo pesticidov in umetnih gnojil (MOP, 2015), kot ena največjih obremenitev pa glede na Operativni program 2014-2020 ostaja razpršeno onesnaževanje iz kmetijstva.

Za ocenjevanje in kartiranje naravne ranljivosti podzemne vode obstaja več metod (npr. SINTACS, EPIK, PI, COS, Slovenski pristop), ki se med sabo razlikujejo. Vsaka od teh ima svoje prednosti in slabosti, glavne razlike med njimi pa se kažejo v parametrih, ki jih vključujejo pri določevanju ranljivosti (Ravbar, 2007). Kljub razlikam pa so vsem metodam skupni parametri, ki opisujejo vrhno zaščitno plast ter položaj nivoja podzemne vode. Pri določevanju debeline plasti in globine do podzemne vode se uporabljajo točkovne informacije (t.j. podatki iz vrtin, piezometrične meritve, izkopi), ki so pridobljene na terenu in se interpolirajo na celotno obravnavano območje. Zaradi heterogenosti geoloških in hidroloških pogojev v okolju pa točkovne informacije predstavljajo poenostavljeno sliko in ne odražajo dejanskega stanja. Debelina vrhnje plasti se lahko namreč drastično spremeni že na majhni razdalji, sploh na območju krasa (Ravbar, 2007, slika 1.1).



Slika 1.1. Kompleksna zgradba kraškega sveta s prikazano točkovno in razpršeno infiltracijo onesnažil in njihovim prenosom do podzemne vode (Goldscheider in Drew, 2007).

Glede na to, da je ta podatek eden ključnih informacij pri ocenjevanju vpliva kmetijstva na ranljivost podzemne vode, je pri določevanju lastnosti vrhnjega sloja potrebna večja natančnost. Prav tako globina do podzemne vode zaradi spreminjanja tako vertikalnih kot horizontalnih hidrogeoloških pogojev v prostoru ni enakomerna, zato ni nujno, da točkovne informacije iz vodnjakov, piezometrov in kapacitivnih sond prikazujejo realno stanje. Posledica je lahko višja ali nižja ocena ranljivosti podzemne vode od dejanske, kar pa v nobenem primeru ni ugodno za zagotavljanje trajnostne rabe kmetijskih površin. Razširitev mreže orodij za natančnejše določevanje teh količin bi pomenilo dodatno poseganje v okolje, zato smo v okviru našega projekta izvajali georadarske meritve, ki podajo zvezne informacije o debelini vrhnjih plasti in globini podzemne vode, pri čemer pa so obstoječi točkovni merilci in/ali izkopi služili le kot umeritveni reperji.

Poleg omenjenega lahko z georadarsko metodo pridobimo tudi podatke o prisotnosti drugih diskontinuitet v plitvem podpovršju, kot so razpoke, prelomi in kraški pojavi, kar še dodatno pripomore k celovitemu poznavanju stanja območja in dinamike pronicanja vode ter s tem tudi onesnažil do podzemne vode. Za zagotavljanje trajnostne rabe obdelovalnih površin in pridelovanja hrane je nujno dobro poznavanje hidrogeoloških lastnosti tal. Z zveznim sledenjem nivoju podzemne vode in debeline vrhnje plasti lahko z georadarsko metodo določimo tudi prisotnost potencialno kritičnih območij v smislu zadrževanja vode plitvo pod površjem ter tako s pomočjo odvodnjavanja preprečimo previsoko vsebnost vlage v zemljini ali celo poplavljanje rodovitnih tal. Na drugi strani pa je možno določiti tudi morebitne cone povečanega odtekanja vode in izsuševanja območij znotraj posameznih polj, kjer lahko z načrtnim namakanjem ali dodajanjem drobnozrnate frakcije v zemljini zopet vzpostavimo optimalne razmere za uspevanje poljščin. V sklopu projekta smo tako z

integracijo georadarskih podatkov s hidrogeološkimi parametri in pedološkimi analizami tal prišli do celostne analize izbranih kmetijskih površin Zahodne Slovenije, ki bo pripomogla k trajnostni pridelavi hrane in omogočila natančnejšo oceno ranljivosti podzemne vode, s tem pa ohranjanje ali izboljšanje kakovosti pitne vode v Sloveniji.

Na območju Zahodne Slovenije pri ocenjevanju ranljivosti podzemnih vod največji izziv predstavlja kraški svet. Iz kraških vodonosnikov črpamo skoraj polovico količine vode, potrebne za vodooskrbo v Sloveniji, ob suši pa tudi več, zato so izredno pomemben vir (Brečko Grubar in Plut, 2001 v Ravbar, 2007). Pogosto je tu vrhnji zaščitni sloj prsti zelo tanek, zato je prehod onesnažil do podzemne vode tudi precej hiter. K temu pripomore tudi prisotnost razpok in kraških kanalov, preko katerih sta površje in podzemna voda neposredno povezana, saj omogočajo hitro gibanje infiltrirane vode ter raztopljenih snovi (Žabar et al., 2014; Ravbar, 2007). Posledično veljajo podzemne vode kraških vodonosnikov za izredno visoko ranljive (MOP, 2009). Izrazita heterogenost debeline vrhnje plasti onemogoča določevanje realne ocene funkcije zaščitnega sloja prsti, saj lahko le-ta nastopa v manjših krpah in globokih žepih, zato lahko s točkovnim merjenjem debeline tega sloja pridemo do zelo različnih informacij (Ravbar, 2007). Problem reši uporaba georadarja, saj poda zvezne podatke o spreminjanju debeline vrhnje plasti v prostoru, kakor tudi informacije o prisotnosti podzemnih kraških pojavov.

Za ugotavljanje debeline vrhnje plasti kmetijskih površin in globine do nivoja podzemne vode smo georadarske meritve izvajali v različnih razmerah, pridobljene rezultate pa umerjali s točkovnimi podatki iz vrtin in izkopov. Integracija z litološkimi in hidrogeološkimi podatki je podala natančnejšo sliko hidrološkega cikla, ki vpliva na ranljivost podzemne vode in trajnostno uporabo izbranih pridelovalnih zemljišč. Za potrebe določevanja prevelikega ali zadrževanja ali odtekanja vode pa so bile ključnega pomena terminsko strateške meritve, planirane pred in po večjih padavinskih dogodkih. Pri tem smo georadarske meritve izvajali na kmetijskih površinah z različnimi litološkimi lastnostmi, razmeram na terenu pa smo prilagodili tako uporabljeno opremo kot tudi način procesiranja pridobljenih radargramov. Zaradi različnih terenskih lokacij, konfiguracij opreme in načina tako pridobivanja kot tudi integracije podatkov ter s tem visoko interdisciplinarne narave raziskav, smo rezultate objavili v več člankih ter jih predstavili na različnih konferencah na temo geologije, hidrologije, geofizike, varstva okolja in tudi agronomije.

V sklopu naših raziskav smo sodelovali z Oddelkom za agronomijo Biotehnične fakultete, Inštitutom za oljkarstvo ZRS Koper ter Geografskim inštitutom Antona Melika ZRC SAZU.

V nadaljevanju sledi opis izvajanja georadarskih meritev na terenu, obdelave podatkov ter glavnih ugotovitev pri uporabi georadarja za raziskovanje podpovršja kmetijskih površin.

## 2. Georadarske meritve

### 2.1. Metoda georadarja

Georadar spada med neinvazivne geofizikalne metode za raziskovanje plitvega podpovršja, ki se v svetu vedno pogosteje uporablja znotraj področij hidrogeologije in agronomije (Kirsch, 2009; Allred et al., 2008). V Sloveniji so druge geofizikalne metode za oceno ranljivosti podzemne vode sicer že bile uporabljene (npr. Projekt ASTIS; Astis, 2004), vendar pa je prednost uporabe georadarja pred drugimi geofizikalnimi metodami v njegovi lahki in mobilni opremi ter v hitrih in neinvazivnih načinih pridobivanja informacij o podpovršju (Zajc, 2015). Metoda temelji na oddajanju elektromagnetnih signalov v podpovršje, kjer se le-ti ob prisotnosti reflektorjev (meje med plastmi z različnimi elektromagnetnimi lastnostmi, gladina podzemne vode, razpoke, prelomi idr.) in drugih objektov (npr. cevi, kabli, prazni prostori, kraški pojavi) odbijejo nazaj proti površju. Z merjenjem dvojnega časa potovanja signalov (iz površja v globino do točke odboja ter nazaj do površja) se nam izrisuje t.i. radargram. S poznavanjem ali hitrosti potovanja v materialu ali njegove dielektrične lastnosti časovno skalo potovanja signala pretvorimo v globinsko, pri tem pa za umerjanje uporabimo znane globine diskontinuitet. Sam globinski doseg je v največji meri odvisen od uporabljene frekvence antene – višja, kot je frekvenca, manjši je doseg in boljša je resolucija rezultatov (Zajc, 2015). Izbira primerne antene je torej ključnega pomena za uspešne georadarke meritve. V okviru projekta smo imeli na razpolago terenski voziček z antenami različnih frekvenc (250MHz, 500MHz in 800MHz), s čimer smo zagotovili dovolj široko izbiro za primerno izvajanje raziskav na izbranih kmetijskih površinah z različnimi pogoji (Slika 2.1). Pri tem nam je bilo v veliko pomoč sodelovanje z gospodarskim subjektom Vitrum laser d.o.o., kjer smo imeli na razpolago vso potrebno terensko opremo ter tudi računalniško in programsko opremo.



Slika 2.1. Georadarska oprema proizvajalca MALÅ z antenami različnih frekvenc, v lasti podjetja Vitrum laser d.o.o.

## 2.2. Izvajanje georadarskih meritev na terenu

Pred samim izvajanjem georadarskih meritev je bilo potrebno dobro poznavanje terenskih razmer izbranega območja, zato je bil izveden predhodni ogled lokacije. Poleg tega je bila potrebna tudi analiza že obstoječih podatkov geologije, pedologije in topografije območja, ki so vplivali tako na izbiro frekvence georadarske antene kot tudi na konfiguracijo in potek profilov na terenu. Pri tem so nam bili v pomoč različni viri informacij, kot je geološka karta, pedološka karta, sedimentološke analize tal, izkopi tal, satelitski posnetki, gerki, popisi bližnjih vrtin in hidrogeološki podatki.

Pri periodičnem izvajanju meritev vzdolž istih profilov je bilo potrebno območje meritev geografsko natančno opredeliti, zakoličiti začetne in končne točke profilov ter jim izmeriti koordinate. V primerih, ko ti količki niso ovirali lastnikov parcel, smo jih pustili do naslednjih meritev. Zaradi postopkov obdelovanja kmetijskih površin so količki bili pogosto v napoto, zato smo jih po meritvah odstranili, trase profilov pa natančno popisali, fotografirali in izmerili. Da smo jih lahko naslednjič ponovno posneli v isti konfiguraciji, je bilo na terenu potrebno profile vezati vsaj na eno temeljno oz. referenčno točko (npr. mejni kamen, večje drevo, prometni znak, obcestni količek, električni drog...), katere lokacija se skozi čas ni spreminjala (slika 2.2). To nam je omogočilo periodično merjenje istih profilov tudi v primeru, ko se je okolica spremenila zaradi zaraščanja, spreminjanja velikosti parcel in drugih posegov človeka v prostor.



Slika 2.2. Primeri določitve referenčnih točk na terenu. Levo – mejni kamen; sredina – drevo, desno – vrtina.

V primeru merjenja georadarskih profilov za potrebe izdelave 3D modela območja so morali biti profili med sabo vzporedni ter posneti dovolj blizu skupaj, da je bila omogočena korektna interpolacija pri 3D izrisu in je bilo zajetih dovolj podatkov (slika 2.3). Ker so se pri tem določevale, količile in posnele le končne točke profilov, so morali le-ti potekati v ravni liniji, zato smo si pri postavitvi mreže profilov pomagali z metrom in kompasom. V primeru ko pred začetkom merjenja profila z začetne točke ni bila vidna končna točka profila (zaradi izbočenosti terena, velike razdalje, slabe vidljivosti), je bilo merjenje v ravni liniji oteženo, zato smo pri tem potrebovali vmesne točke ali pa pomočnika, ki je usmerjal operaterja georadarja. V nasprotnem primeru pa pri merjenju v sadovnjakih in vinogradih ni bilo možno prosto določevati potekov profilov, ampak so bili le-ti posneti tam, kjer je razvrščenost dreves in trt omogočala prehod z georadarjem, t.j. med posameznimi vrstami. Meritve smo izvajali v dogovoru z lastniki parcel in v času, ko na njivah ni bilo pridelkov oz. rastja, da pri prehajanju preko raziskovalnega območja ne bi ustvarjali škode. Pogosto so bili zaradi več ciljev raziskav (doseči tako čim večjo globino kot tudi čim boljše ločljivost rezultatov) isti profili posneti s tremi različnimi frekvencami anten. Kako so poleg le-teh različni faktorji, kot so vlažnost tal, sestava tal in matične podlage ter površinsko stanje območja, vplivali na izvajanje meritev in kvaliteto rezultatov, je opisano v poglavju 4.



Slika 2.3. Določevanje vzporednih profilov za 3D model območja. Zgoraj – postavljene tarče na končnih točkah; spodaj – postavljeni količki na končnih točkah vzporednih profilov.



### 3. Predstavitev doseženih rezultatov

#### 3.1. Ugotavljanje debeline in horizontov tal

##### Namen

Eden primarnih ciljev raziskovalnega projekta je bil z georadarjem na neinvaziven način določiti debelino vrhnjih plasti kmetijskih površin ter poskusiti ločiti posamezne horizonte tal. Ti namreč vplivajo na zadrževalno sposobnost tal ter s tem na dinamiko pronicanja vode in onesnažili do podzemne vode. V ta namen smo georadarsko metodo najprej testirali na območjih, kjer so talni profili že bili izvedeni in je sestava tal že bila znana.

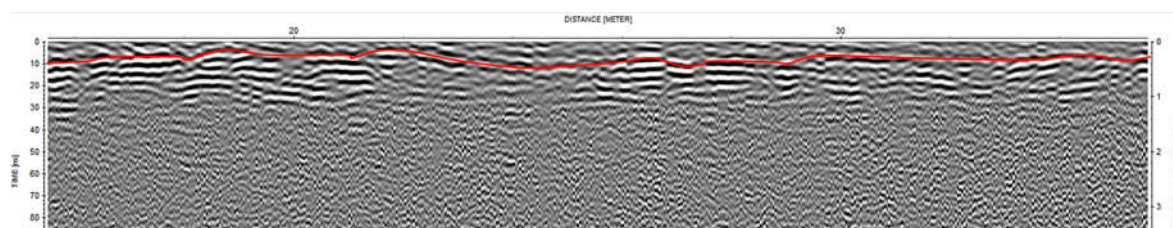
Na območju Goriških Brd smo tako izvedli georadarske meritve na izbranih lokacijah, ki so opisane v doktorski disertaciji dr. Matjaža Glavana z naslovom 'Vpliv spremenjene rabe zemljišč na količino in kakovost vode v reki Reki v Goriških Brdih in reki Dragonji' (Glavan, 2011). Pridobljene rezultate smo primerjali s sedimentološkimi podatki in pedološkimi popisi tal različnih tipov kmetijskih zemljišč (tabela 3.1.1). Izbrali smo lokacije v vinogradu, sadovnjaku, na travniku in nekdanji njivi, profile pa posneli v sušnem in mokrem obdobju z vsemi tremi antenami (250 MHz, 500 MHz in 800 MHz).

Tabela 3.1.1. Podatki o pedoloških izkopih (Glavan, 2011)

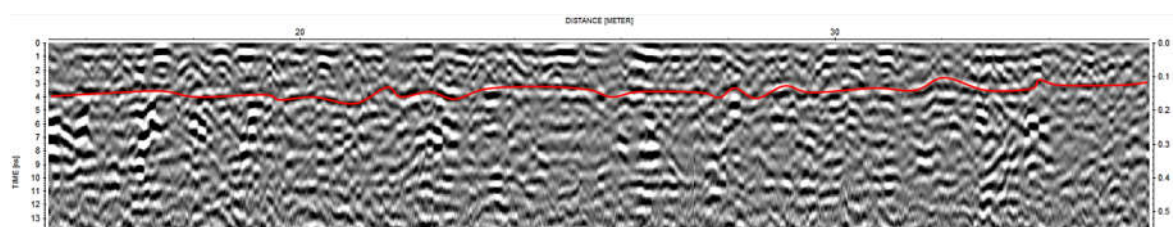
<b>Brda1</b>				
<i>Debelina</i>	<i>Horizont</i>	<i>Oblika spodnje meje</i>	<i>Razločnost meje</i>	<i>Vlažnost ob opisu</i>
0-0.5 cm	Ol (sprstenina)	valovita	ostra 0-2 cm	suh
0-10/55cm	Ah	žepasta	ostra 0-2 cm	nekoliko vlažen
10-55+ cm	CRA ali RCA	/	/	nekoliko vlažen
<i>Matična podlaga</i>	lapornat apnenec			
<i>Opis tal</i>	rendzina na lapornatem apnencu, srednje globoka do globoka			
<i>Lokacija</i>	Hrib, zgornji del pobočja, ravna oblika mikroreliefa, izkop: valovita in nagnjena površina, vegetacija zelo motena, <b>travnik</b>			
<b>Brda6</b>				
<i>Debelina</i>	<i>Horizont</i>	<i>Oblika spodnje meje</i>	<i>Razločnost meje</i>	<i>Vlažnost ob opisu</i>
0-23 cm	Ap (sprstenina)	ravna	jasna 2-5 cm	nekoliko vlažen
23-55 cm	A2	ravna	postopna 5-15 cm	nekoliko vlažen
55+ cm	CA	/	/	
<i>Matična podlaga</i>	aluvij			
<i>Opis tal</i>	obrečna tla, karbonatna, srednje globoka			
<i>Lokacija</i>	Dolina, rečna terasa, vinogradniška terasa, dno, najnižji del doline, ravna oblika mikroreliefa, izkop: ravna in nagnjena površina, oranje - rigolanje, <b>vinograd</b>			
<b>Brda7</b>				
<i>Debelina</i>	<i>Horizont</i>	<i>Oblika spodnje meje</i>	<i>Razločnost meje</i>	<i>Vlažnost ob opisu</i>
0-15 cm	Ap (sprstenina)	valovita	jasna 2-5 cm	vlažen
15-43 cm	P	ravna	ostra 0-2 cm	nekoliko vlažen
43-100+ cm	I	/	/	vlažen
<i>Matična podlaga</i>	meljast aluvij			

<i>Opis tal</i>	rečna evtrična tla, karbonatna, globoka			
<i>Lokacija</i>	Dolina, najnižji del doline, ravna oblika mikoreliefa, izkop: valovita površina, namakanje, izsuševanje, gnojenje, oranje, <b>intenzivni sadovnjak</b>			
<b>Brda8</b>				
<i>Debelina</i>	<i>Horizont</i>	<i>Oblika spodnje meje</i>	<i>Razločnost meje</i>	<i>Vlačnost ob opisu</i>
0-12 cm	Ah (sprstenina)	ravna	ostra 0-2 cm	vlažen
12-30/35 cm	I	valovita	jasna 2-5 cm	vlažen
30/35-56 cm	II	valovita	postopna 5-15 cm	vlažen
56-100+ cm	III	žepasta	postopna 5-15 cm	vlažen
100+ cm	C	/	/	
<i>Matična podlaga</i>	karbonatni aluvij			
<i>Opis tal</i>	obrečna evtrična, neoglejena, karbonatna, globoka			
<i>Lokacija</i>	Dolina, dno, najnižji del doline, ravna oblika mikoreliefa, izkop: ravna površina, oranje, <b>vinograd</b>			
<b>Brda10</b>				
<i>Debelina</i>	<i>Horizont</i>	<i>Oblika spodnje meje</i>	<i>Razločnost meje</i>	<i>Vlačnost ob opisu</i>
0-1 cm	Ah (sprstenina)	valovita	ostra 0-2 cm	nekoliko vlažen
1-24 cm	Ap	valovita	jasna 2-5 cm	nekoliko vlažen
24-45+ cm	BrzC	/	/	nekoliko vlažen
<i>Matična podlaga</i>	apnenec			
<i>Opis tal</i>	rjava pokarbonatna tla na apnencu, antropogena, srednje globoka			
<i>Lokacija</i>	Njivska terasa, srednji del pobočja, konveksna in terasasta oblika mikoreliefa, izkop: nagnjena in terasasta površina, vegetacija zelo motena, travnik, <b>nekoč njiva</b>			

## Rezultati



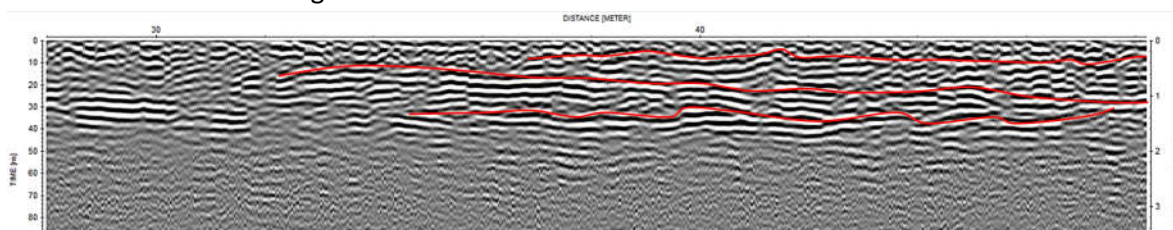
Slika 3.1.1. Brda 1 – travnik, 250 MHz, po dežju (15 – 36 m)



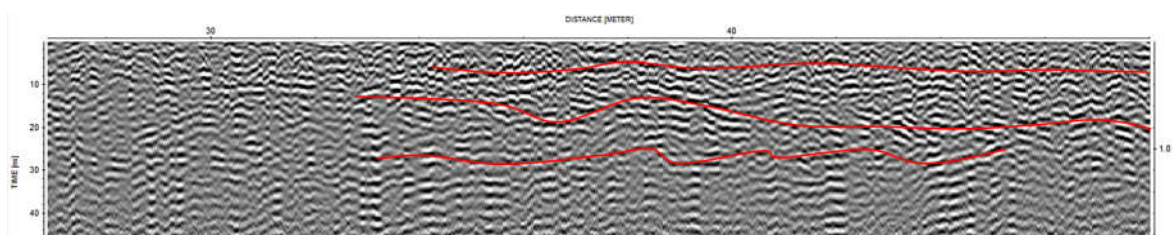
Slika 3.1.2. Brda 1 – travnik, 800 MHz, po dežju (15 – 36 m)

Vidna je meja med zemljino in trdno matično podlago (lapornat apnenec). V izkopu je določen horizont na globini 10-55+ cm, na radargramu pa je najbolj razločno vidna na profilu, posnetem z 800 MHz anteno po dežju (slika 3.1.2) in poteka na globini 10-20 cm.

### Brda 6 – vinograd



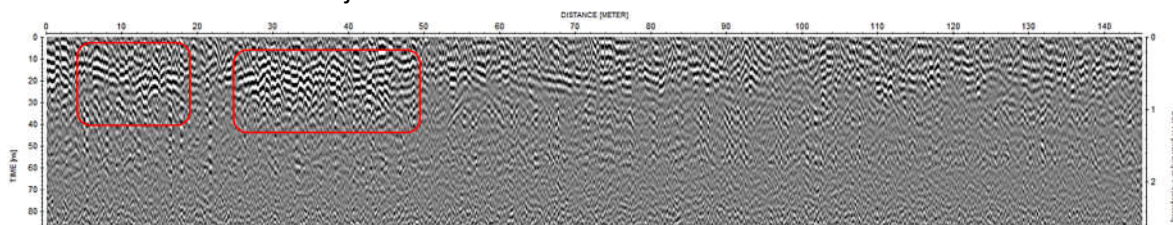
Slika 3.1.3. 250 MHz, po dežju (28 – 48 m)



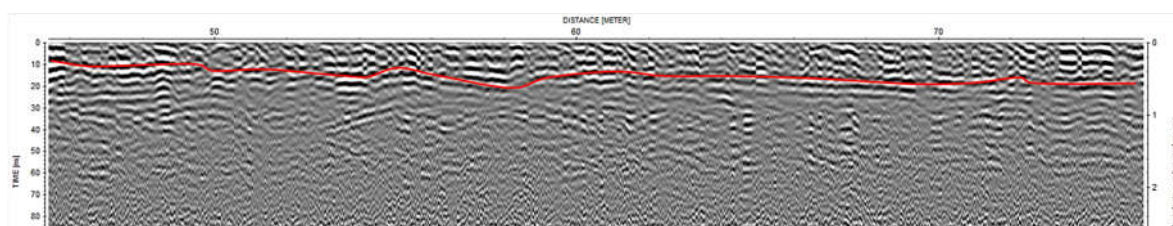
Slika 3.1.4: 500 MHz, po dežju (27 – 48 m)

Na radargramih je mogoče določiti tri diskontinuitete, ki so spet najbolj razločno vidne na profilih, posnetih na mokrih tleh (slika 3.1.3, 3.1.4). Ponekod so diskontinuitete prekinjene, kar je lahko posledica večjega dušenja signala, z višjo frekvenco pa dobimo rezultate z boljšo ločljivostjo. Na profilu, posnetem s 500 MHz (slika 4), je tako mogoče ločiti meje med horizonti na globini med 20 in 30 cm (v izkopu 23 cm), na globini 50 – 80 cm (v izkopu 55 cm, postopna meja 5-15 cm) ter na globini 100 – 120 cm (v izkopu tako globoko ni podatka, verjetno gre za plast znotraj aluvija).

### Brda 7 – sadovnjak



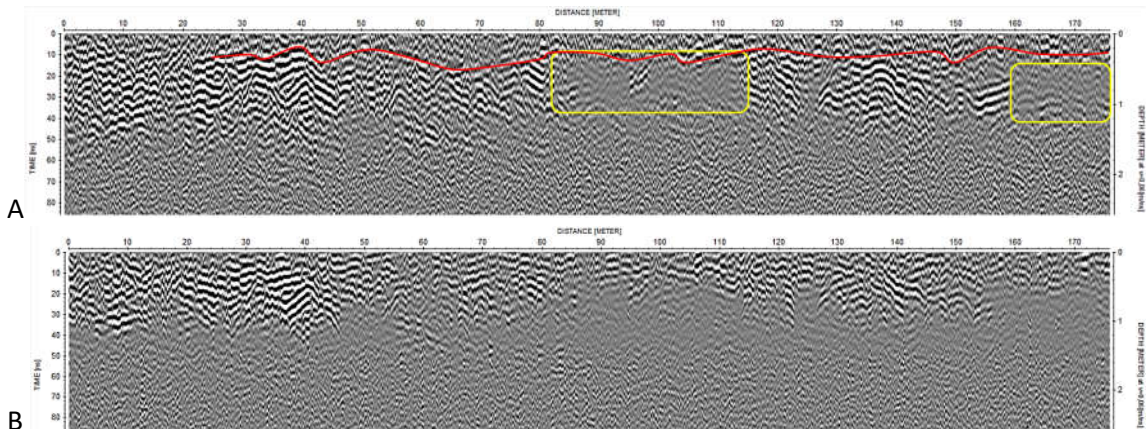
Slika 3.1.5: 250 MHz, po dežju (145 m)



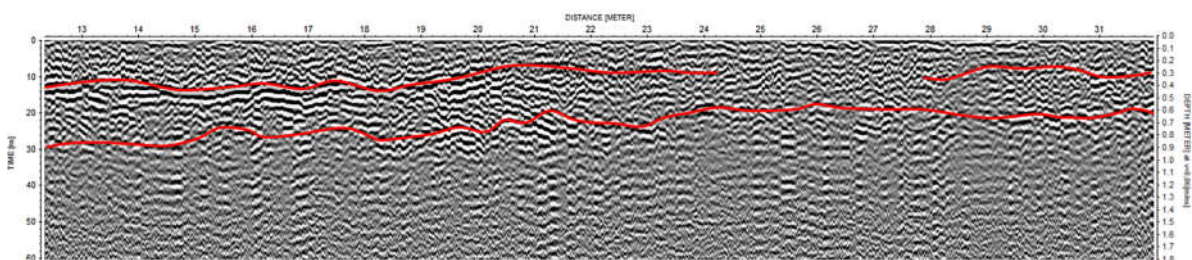
Slika 3.1.6: 250 MHz, po dežju (45 – 76 m)

Razločnejša diskontinuiteta je vidna na profilih, posnetih po dežju. Pri pogledu celotnega profila sta vidni dve območji močnejših odbojev (rdeča okvirja na sliki 3.1.5), ki lahko kažeta na mesta trše podlage v primerjavi s preostalim profilom. Pri povečanem pogledu (slika 3.1.6) je vidna zvezna diskontinuiteta, ki poteka na globini okoli 25 – 45 cm (v izkopu 43 cm), ki najverjetneje predstavlja mejo z matično podlago (meljast aluvij).

### Brda 8 – vinograd



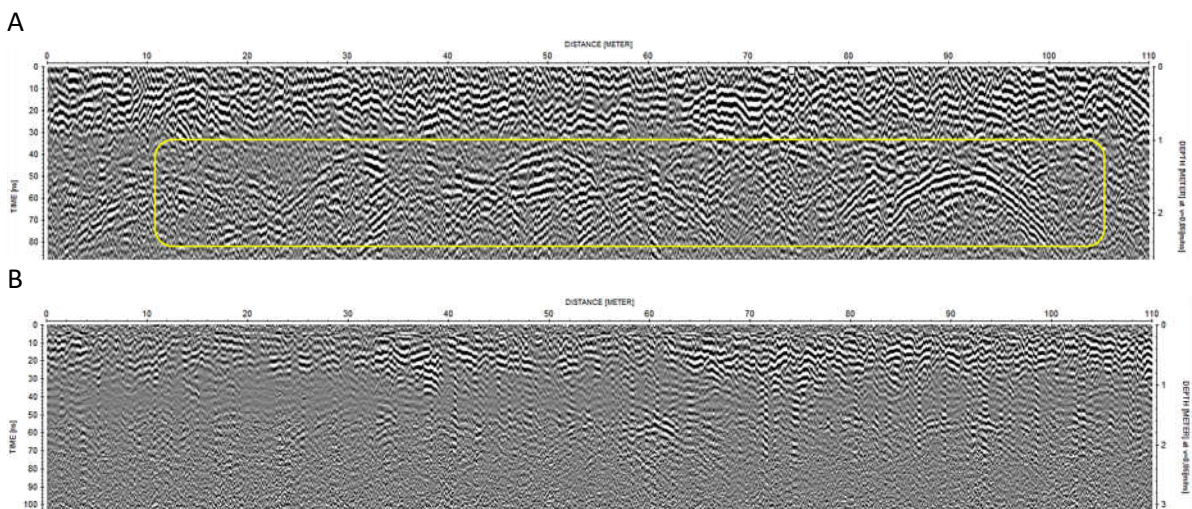
Slika 3.1.7: A – 250 MHz, po dežju (176 m); B – 250 MHz v sušnem obdobju (176 m)



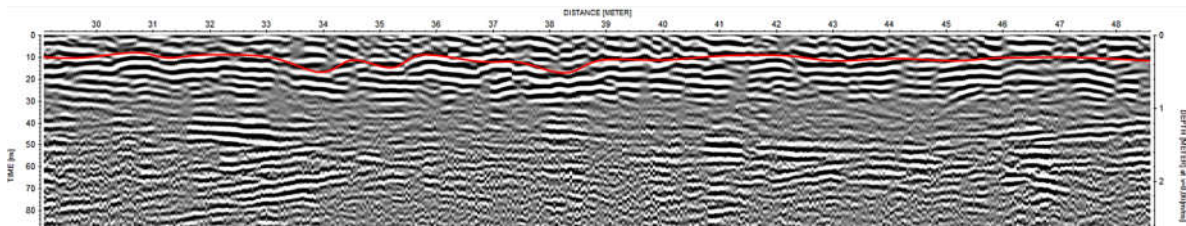
Slika 3.1.8: 500 MHz, po dežju (12 – 32 m)

Vzdolž profilov so vidne spremembe zaradi dušenja signala, ki bolj izstopajo na profilih, posnetih po dežju (slika 3.1.7). Močno dušenje lahko opazimo na treh območjih, in sicer na dolžini 84 – 94 m, 100 – 114 m in 160 – 176 m (rumeni okvirji na sliki 3.1.7A). Ta območja najverjetneje vsebujejo več glinene frakcije, kjer se voda po dežju najbolj zadržuje. Posledično dušenje v sušnem obdobju ni tako izrazito (slika 3.1.7B). Poleg tega sta na profilih vidni tudi dve diskontinuiteti (slika 3.1.8), prva na globini okoli 20 – 40 cm (v izkopu 30 – 35 cm), druga pa na globini okoli 60 – 100 cm (v izkopu 56 cm). Območje, kjer odbojev več ni videti, najverjetneje predstavlja matično podlago, karbonatni aluvij.

### Brda 10 – nekdanja njiva



Slika 3.1.9: A – 250 MHz, po dežju (110 m); B – 250 MHz v sušnem obdobju (110 m)



Slika 3.1.10: 250 MHz, po dežju (29 – 49 m)

Tudi na teh profilih so odboji bolj izraziti na profilih, posnetih po dežju (slika 3.1.9). S tem pa so izrazitejši tudi močni zračni odboji, ki se kažejo v obliki hiperbol v spodnjem delu profila (rumen okvir na sliki 3.1.9A) in so posledica bližine dreves. Pri povečanju profila je vidna tudi diskontinuiteta na globini okoli 20 – 60 cm (v izkopu 45+ cm), ki verjetno predstavlja mejo z matično podlago (apnenec).

Georadarska metoda se je izkazala za uporabno pri določevanju posameznih talnih horizontov na območju različnih kmetijskih površin (travniki, vinograd, sadovnjak, nekdanja njiva), vendar vseh horizontov na vseh lokacijah ni bilo mogoče določiti. Razlog je lahko v dejstvu, da imajo posamezni horizonti preveč podobne elektromagnetne lastnosti, kar pomeni, da na mejah med njimi ne dobimo odbojev. Možno pa je tudi, da je debelina nekaterih horizontov manjša od vertikalne ločljivosti uporabljene opreme. V vseh primerih je bilo možno določiti diskontinuiteto, ki predstavlja mejo z matično podlago in dobro sovпада z globinskimi podatki iz pedološkega izkopa. Izkop predstavlja točkasti vir podatkov, pri georadarskih rezultatih pa dobimo informacije o prostorskem razširjanju posameznih plasti. Iz radargramov je razvidno, da vzdolž profilov debeline posameznih plasti precej nihajo. Glede na to, da je ta podatek eden ključnih informacij pri ocenjevanju vpliva kmetijstva na ranljivost podzemne vode, daje pri določevanju debeline vrhnjega sloja georadarska metoda natančnejše rezultate od izkopa.

Uporaba anten z različnimi centralnimi frekvencami omogoča tako globlji doseg kot tudi boljše ločljivost. Za najbolj uporabni sta se izkazali 250 in 500 MHz anteni, pri določevanju zelo plitvih horizontov pa je bila ključna uporaba 800 MHz antene (Brda 1, slika 3.1.2).

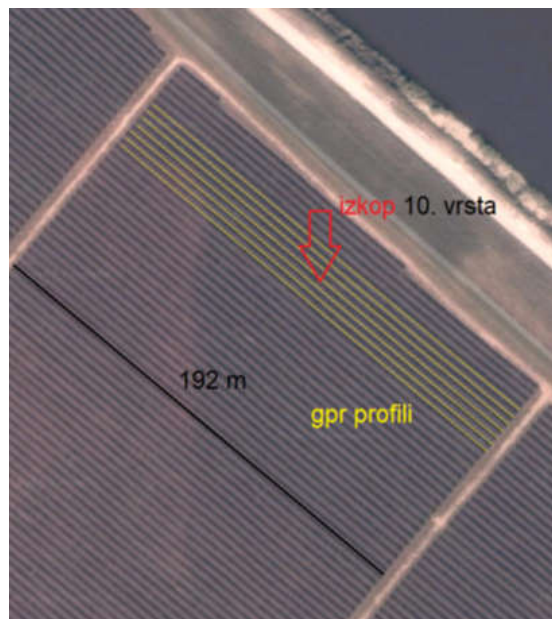
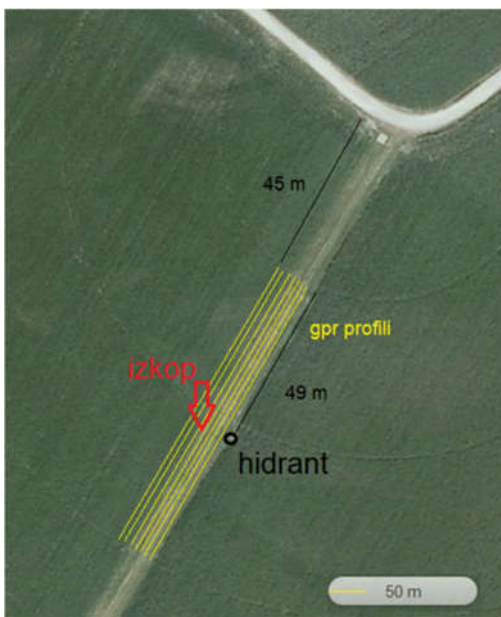
Primerjava istih profilov, posnetih pri različni vlažnosti tal, je pokazala, da je boljši kontrast in s tem boljše izražene diskontinuitet na profilih, ki so bili posneti po dežju. Glede na to, da gre za flišna območja, je razlog verjetno v tem, da se voda zadržuje na lezakah oziroma med posameznimi horizonti in tako poudari spremembo pri prehodu signalov iz enega v drug horizont (ki bi ga drugače v suhem obdobju bilo težko zaznati zaradi prevelike podobnosti v elektromagnetnih lastnostih materiala). V teh primerih so horizonti z višjo vsebnostjo gline nastopali globlje, zato ni bilo tako močnega dušenja signala v plitvejšem delu. Kadar prevladuje drobnozrnata frakcija v vrhnjih delih, pa le-ta povzroči močnejše dušenje signala in slabši globinski doseg. Raziskovalni projekt smo skupaj z dognanji teh testnih meritev predstavili na 5. Slovenskem geološkem kongresu, ki je potekal 3.-5.10.2018 v Velenju (Zajc in Urbanc, 2018).

Po uspešnih testnih meritvah, smo nadaljevali z georadarskimi meritvami na lokacijah s še ne poznano sestavo tal (njiva in sadovnjak, slika 3.1.11) tudi z namenom, da preverimo možnost določitve prostorskega spreminjanje lastnosti tal s pomočjo 3D georadarskega modela. V sodelovanju z Biotehniško fakulteto Univerze v Ljubljani, ki je na teh mestih izvedla tudi talno profiliranje in sedimentološke analize vzorcev, smo primerjavo rezultatov predstavili na 24. Posvetovanju slovenskih geologov, ki je potekalo 29.11.2019 v prostorih Naravoslovnotehniške fakultete v Ljubljani (Zajc et al., 2019), v teku pa je tudi priprava znanstvenega članka.

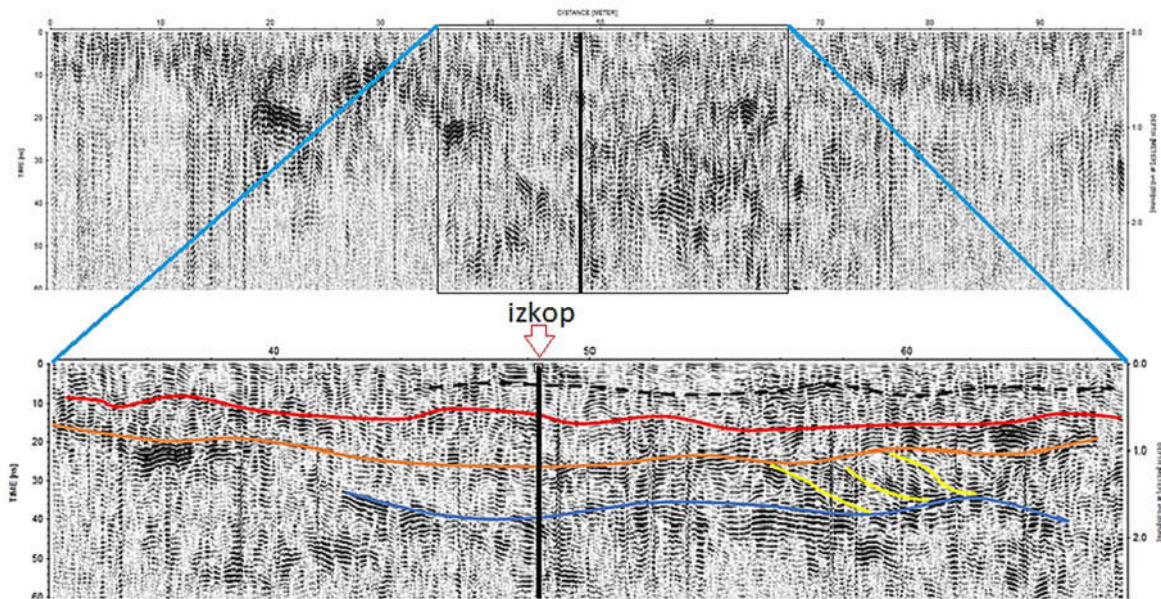


Slika 3.1.11: Georadarske meritve s 500 MHz anteno. Levo – prazna njiva; desno – sadovnjak.

V okolici talnega izkopa je bilo za potrebe izdelave 3D modela območja posnetih več vzporednih georadarskih profilov (slika 3.1.12). Pri primerjavi rezultatov s talnim profiliranjem smo ugotovili, da so bili z georadarjem ponovno pravilno določeni posamezni horizonti tal in meja z matično podlago (sliki 3.1.13 in 3.1.14). Pri tem smo s podatki iz izkopa primerjali georadarski profil, ki je bil posnet najbližje izkopu (slika 3.1.15), nato pa za potrebe analize prostorskega razširjanja horizontov preverili še horizontalne reze 3D modela na različnih globinah (sliki 3.1.16 in 3.1.17).

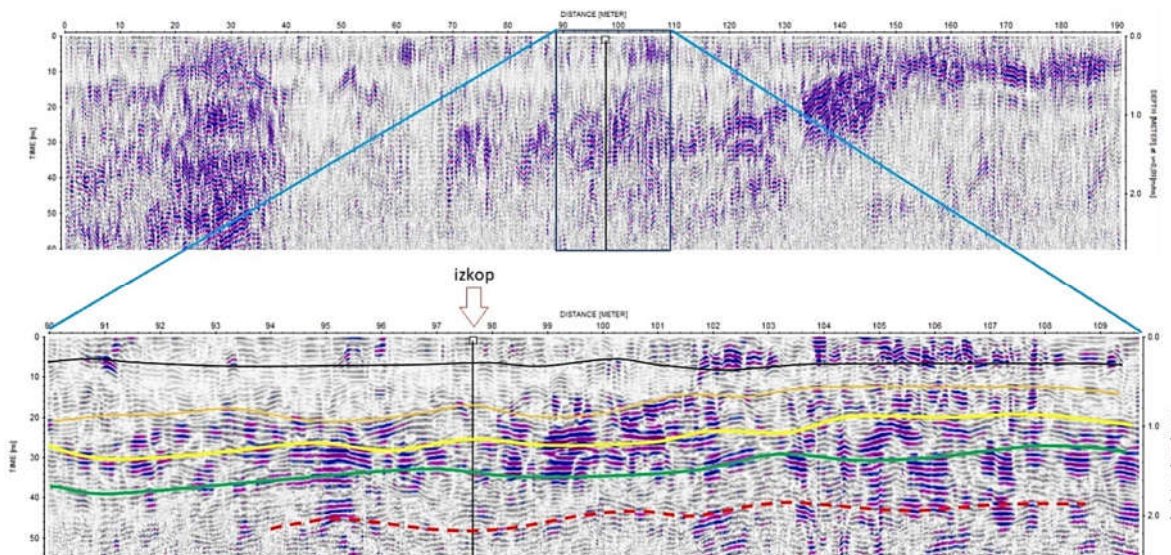


Slika 3.1.12: Vzporedni georadarski profili v okolici izkopa. Levo – prazna njiva; desno – sadovnjak.



Slika 3.1.13: Najbližji georadarski profil izkopu na prazni njivi. Zgoraj – cel profil; spodaj – del profila okoli izkopa.

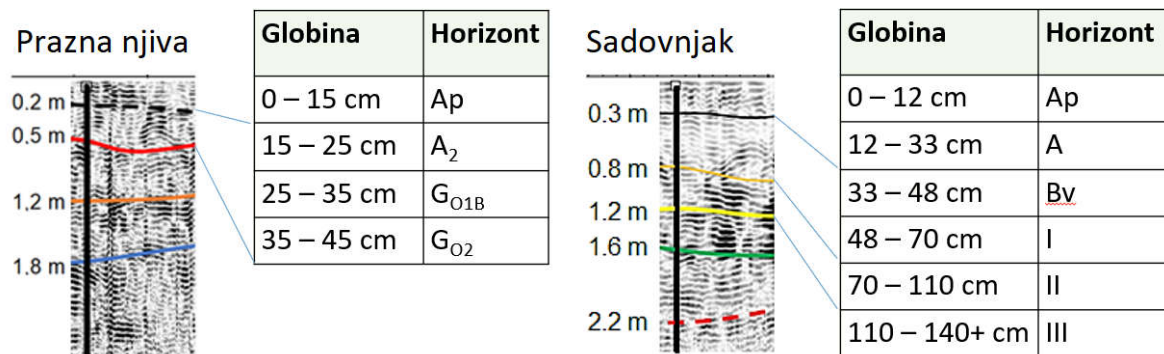
Na zgornjem profilu slike 3.1.13 lahko vidimo, da na prvem in zadnjem delu profila ne dobimo odbojev v globini, medtem ko v okolici izkopa v srednjem delu profila dobimo globlje in močnejše odboje. To lahko pomeni, da v primerjavi z robnimi deli profila ta osrednji del vsebuje bolj debelozrnate sedimente in manjšo vsebnost glinene frakcije ter s tam manj vode, saj je na tem delu dušenje signala manjše. Vidnih je več zveznih linearnih, čeprav mestoma prekinjenih, reflektorjev, ki kažejo na meje med posameznimi horizonti.



Slika 3.1.14: Najbližji georadarski profil izkopu v sadovnjaku. Zgoraj – cel profil; spodaj – del profila okoli izkopa.

Na zgornjem profilu slike 3.1.14 pa lahko vidimo na prvih 40 m profila močne odboje ter večji globinski doseg kot na preostalem profilu. Na dolžini profila 40 m – 70 m gre bolj ali manj za območje brez odbojev, kar lahko kaže na visoko vsebnost glinene frakcije in/ali vode, vsaj v zgornjem delu. To namreč povzroča močno dušenje signala, zaradi česar je zelo omejen globinski doseg. Na dolžini 70 m – 130 m so razmere pretežno enakomerne, pri tem pa se na globini 1-2 m kažejo močnejši linearni reflektorji. V zadnjem delu profila se ti reflektorji dvignejo v plitvejše dele, pod njimi pa več ne

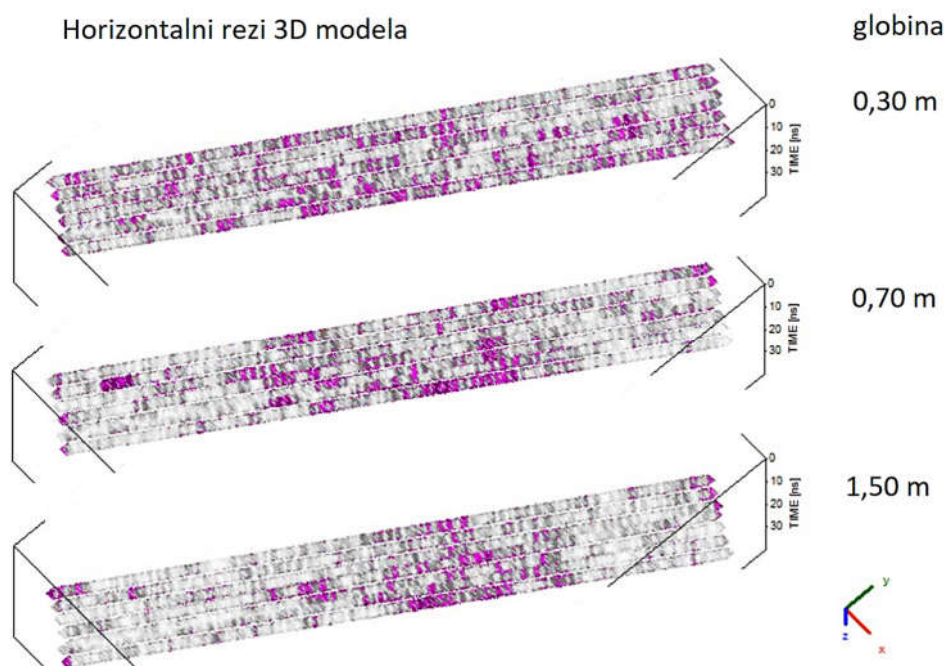
dobimo novih informacij. V tem delu so odboji močnejši, saj je zaradi plitvejšje lege tu dušenje signala manjše.



Slika 3.1.15: Primerjava georadarskih rezultatov z globinami, določenimi v izkopih. Levo – prazna njiva; desno – sadovnjak.

Pri primerjavi georadarskih rezultatov in podatkov iz izkopov (slika 3.1.15) vidimo, da lahko z georadarjem pridobimo podatke o pod površju globlje kot s samim izkopom. Horizonti, katere je možno določiti v georadarskih profilih, pa morajo biti dovolj dobro izraženi, t.j. morajo imeti dovolj različne elektromagnetne lastnosti od sosednjih, da na njihovih mejah pride do odbojev. Prav tako mora biti njihova debelina večje od ločljivosti uporabljene antene, da jih z georadarjem sploh lahko zaznamo.

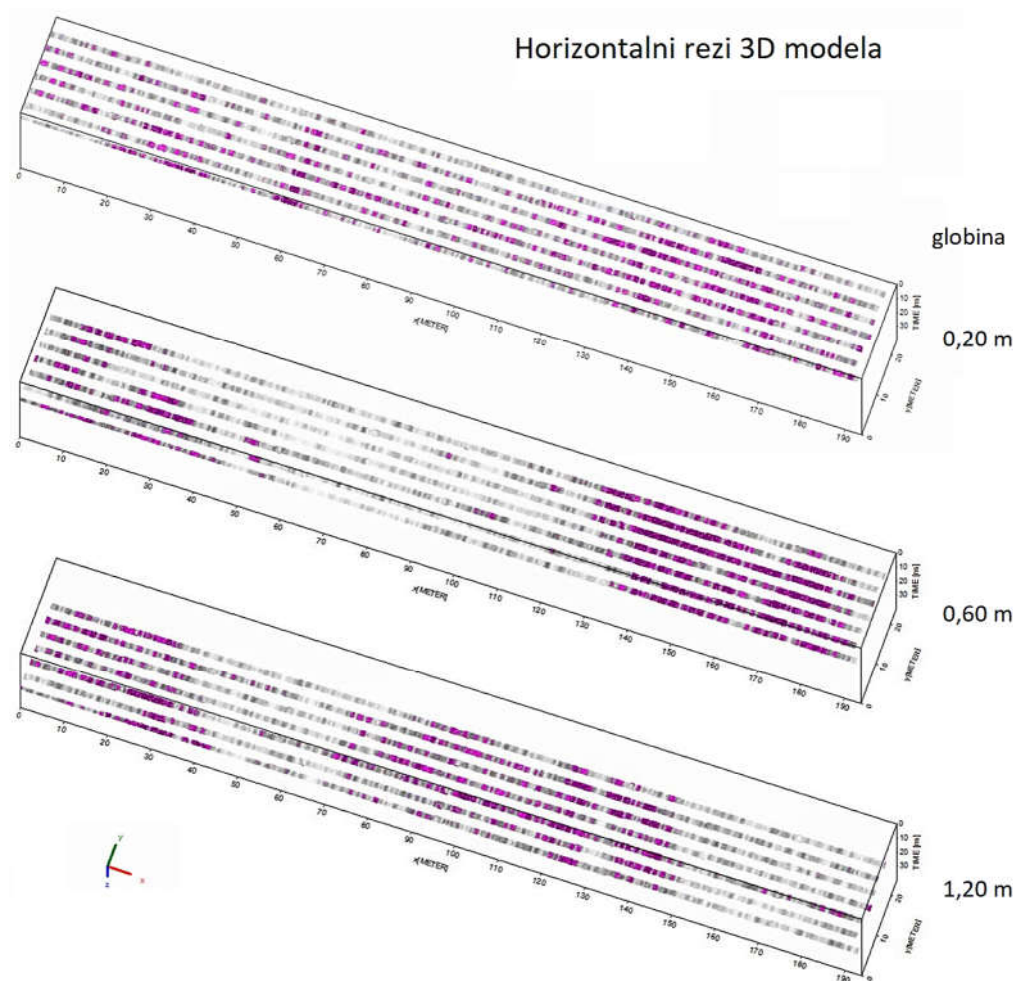
Prostorsko razširjanje horizontov smo preverili tudi lateralno z združitvijo vzporednih profilov v 3D model območja. Na sliki 3.1.16 lahko vidimo primerjavo horizontalnih rezov na različnih globinah, in sicer na 0,30 m, 0,70 m in 1,50 m. Tu vidimo, da se situacija, prikazana na profilu, posnetem neposredno ob izkopu, kaže tudi na sosednjih profilih. Na celotnem območju gre torej za močnejše odboje in večji globinski doseg v osrednjem delu območja, ki pa se z globino zoži, čeprav tik pod površjem situacija izgleda precej enakomerna. Takšna situacija lahko pomeni, da voda v osrednjem delu hitreje drenira in pronica v globlje predele in s tem v podzemno vodo, saj imajo tukaj tla manjšo zadrževalno sposobnost.



Slika 16: Primerjava horizontalnih rezov 3D modela na različnih globinah na prazni njivi.



V primeru sadovnjaka dobimo z analizo horizontalnih rezov drugačno sliko. Z globino se namreč situacija spreminja zaradi nihanja vpadov posameznih horizontov, poleg tega se spreminjajo tudi lastnosti tal, saj je dušenje signala vzdolž profilov različno. Čeprav pod površjem tudi tukaj ni videti večjih lateralnih odstopanj, se z globino območja močnejših in šibkejših odbojev spreminjajo. To kaže na spremenljive razmere v podpovršju tega območja sadovnjaka, ki vplivajo tako na pronicanje vode skozi vrhno plast kot tudi prenos onesnažil in hranil v globlje predele. Tako spremenljive razmere potrjujejo tudi dejstvo, da podatki, pridobljeni samo iz izkopa na terenu, ne morejo predstavljati dejanskega stanja podpovršja širšega območja. Le-ti prikazujejo le točkovno situacijo, ki pa se lahko v prostoru tako vertikalno kot tudi lateralno precej hitro spremeni.



Slika 3.1.17: Primerjava horizontalnih rezov 3D modela na različnih globinah v sadovnjaku.

### Zaključki

Rezultati so pokazali, da lahko z uporabo georadarja ugotovimo prisotnost potencialno kritičnih območij, kot so območja zadrževanja vode v plitvem podpovršju z visoko vsebnostjo gline ali območja hitrejšega drenaže vode. Tako lahko optimiziramo precizno kmetijstvo in ciljno gnojenje glede na spreminjanje razmer podpovršja kmetijskih površin. Ta metoda se je torej izkazala za koristno pri neinvazivnih raziskavah, potrebnih za zagotovitev optimalnih pogojev za rast pridelkov, s čimer lahko povečamo kmetijsko produktivnost in zmanjšamo vpliv kmetijstva na podzemno vodo.

### 3.2. Ugotavljanje zakraselosti pod površja

#### 3.2.1 Vrtače s kmetijskimi površinami

##### Namen

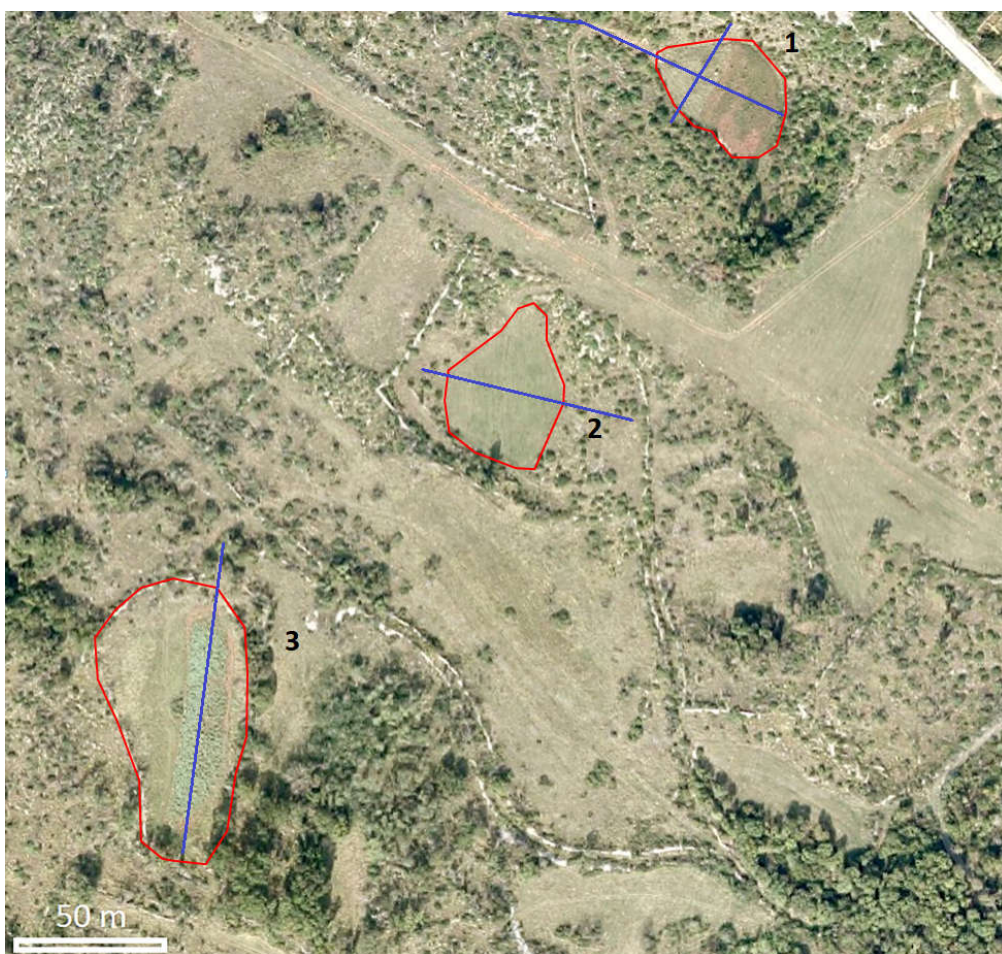
Z georadarskimi meritvami znotraj vrtač smo želeli preveriti, ali je mogoče določiti zgradbo vrtač in sestavo vrhnje plasti na dnu vrtač, kjer se nahajajo kmetijske površine. Kmetijska dejavnost na krasu lahko namreč močno vpliva na kakovost podzemne vode, saj lahko zaradi zakraselosti apnenca onesnažila hitreje preidejo v podzemno vodo.

Z georadarsko metodo smo izvedli meritve preko več vrtač na območju okoli črpališča Klariči pri Brestovici ter pri naselju Matavun (tabela 3.2.1). Meritve preko vrtače Jurjev dol smo primerjali tudi z rezultati meritev ERT, katere so izvedli na Geografskem inštitutu Antona Melika.

Tabela 3.2.1: Podatki o meritvah v posameznih vrtačah

<b>Klariči 1</b>	Z vodnjakom	Število profilov: 4
		Potek profilov: vzdolžni in prečni
		Uporabljene antene: 250 in 500 MHz
	(travnik / en del njiva)	sušno obdobje
<b>Klariči 2</b>	S travnikom	Število profilov: 2
		Potek profilov: vzdolžni
	(travnik / sveže pokošen)	Uporabljene antene: 250 in 500 MHz
		sušno obdobje
<b>Klariči 3</b>	Z njivo	Število profilov: 3
		Potek profilov: vzdolžni
	(njiva ob opazovalnici)	Uporabljene antene: 250 in 500 MHz
		sušno obdobje
<b>Matavun</b>	Jurjev dol	Število profilov: 3
		Potek profilov: vzdolž in prečno na vrtačo (kot ERT profili)
	(travnik / občasno pašnik za konje)	Uporabljene antene: 250 in 500 MHz
		sušno obdobje
<b>Matavun</b>	Vrtača 3a	Število profilov: 6
		Potek profilov: vzdolž in prečno na vrtačo
	(travnik / pašnik za ovce)	Uporabljene antene: 250, 500 in 800 MHz

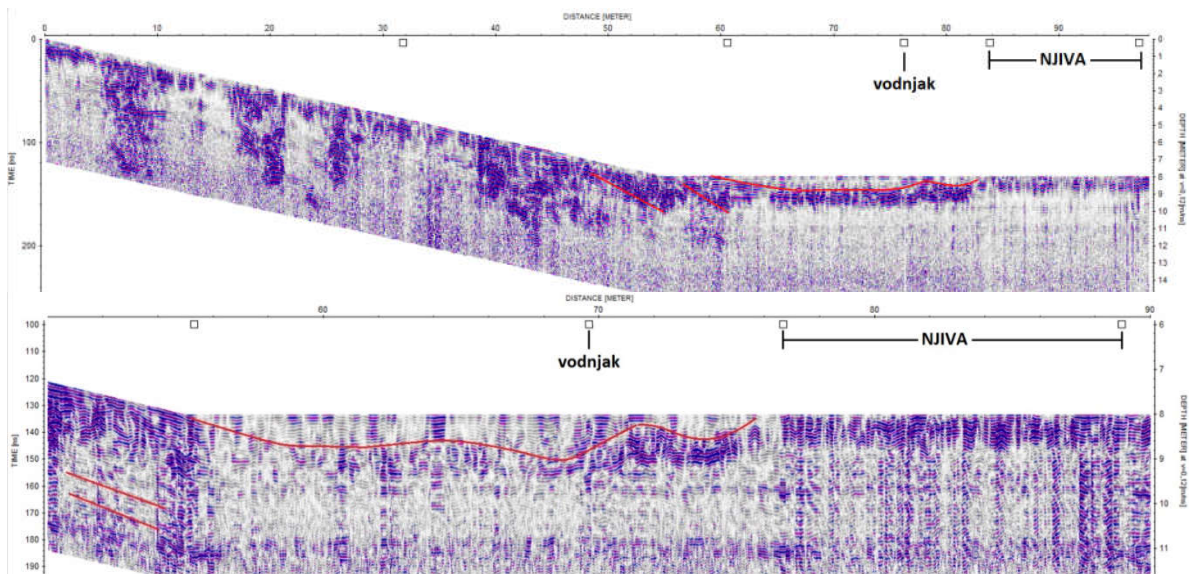
		sušno obdobje
<b>Matavun</b>	Vrtača 3b	Število profilov: 6
		Potek profilov: vzdolž in prečno na vrtačo
	(travnik / pašnik za ovce)	Uporabljene antene: 250, 500 in 800 MHz
		sušno obdobje, zamrznjena zemlja



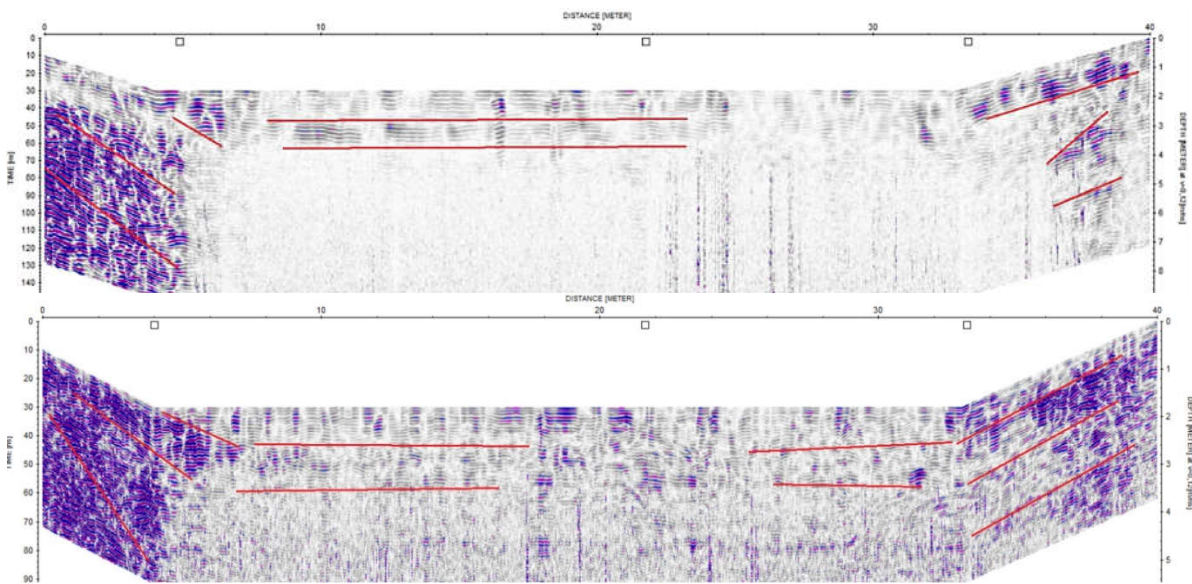
Slika 3.2.1: Lokacija vrtač v bližini črpališča Klariči z označenimi poteki profilov

## Rezultati

### Klariči 1 – vrtača z vodnjakom

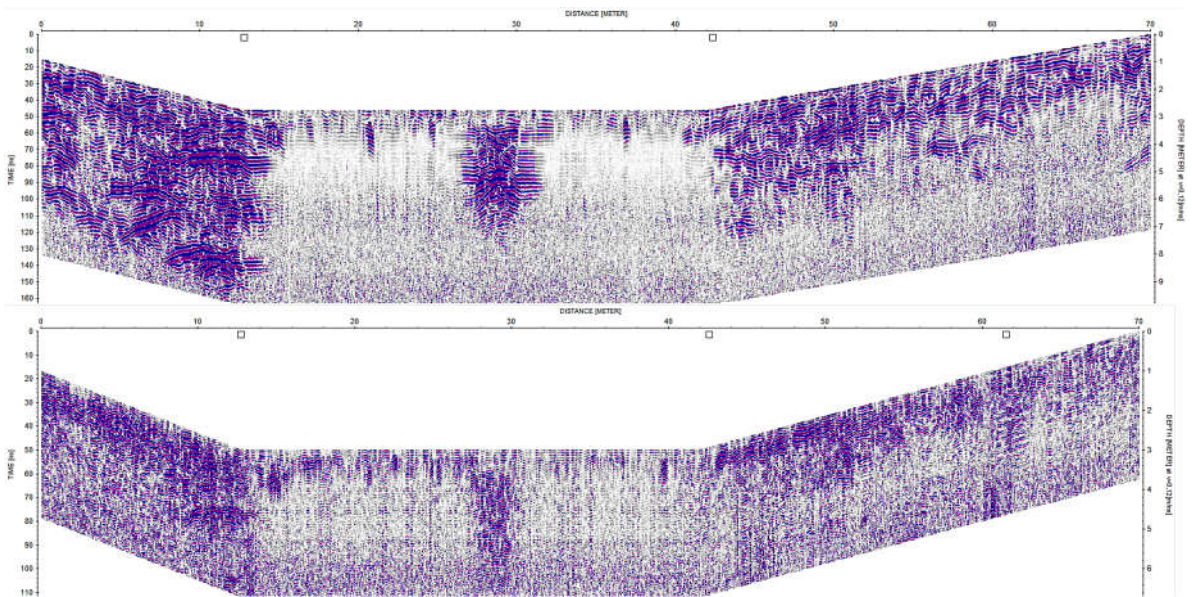


Slika 3.2.2: 250 MHz (zgoraj) in 500 MHz (spodaj, 50 – 90 m), vzdolžni profil SZ-JV



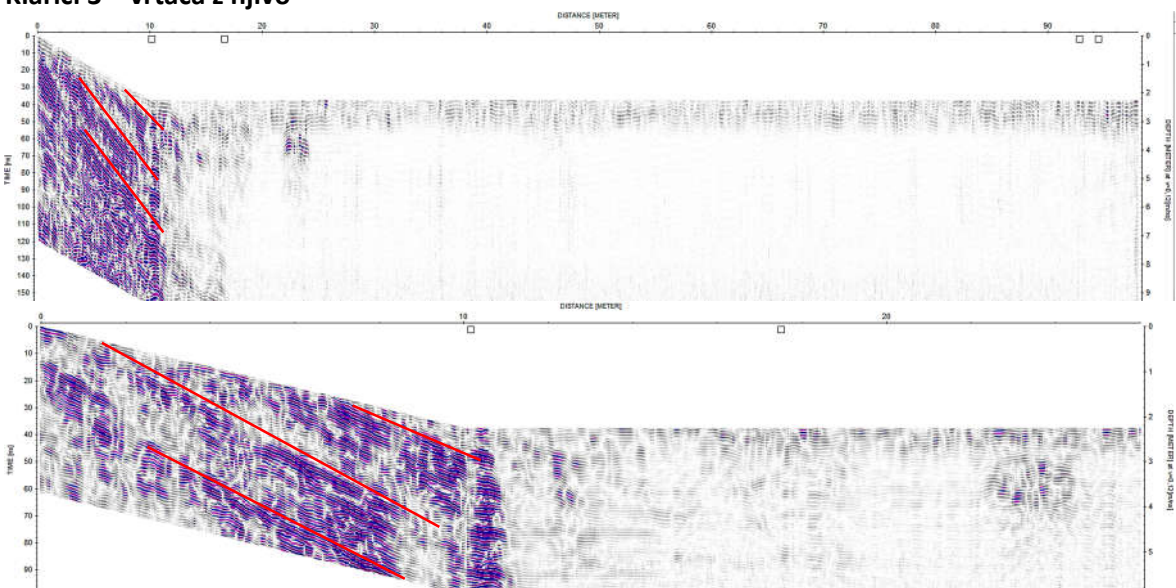
Slika 3.2.3: Isti profil posnet z 250 MHz (zgoraj) in s 500 MHz (spodaj) anteno, prečni profil JZ-SV

### Klariči 2 – vrtača s travnikom



Slika 3.2.4: Isti profil posnet z 250 MHz (zgoraj) in s 500 MHz (spodaj) anteno, vzdolžni profil SZ-JV

### Klariči 3 – vrtača z njivo



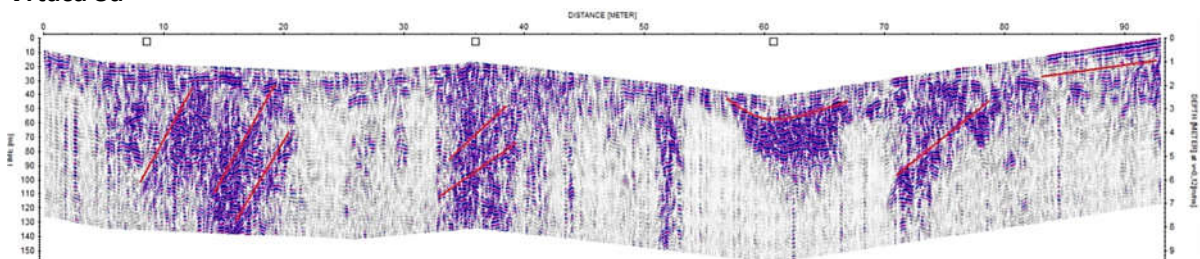
Slika 3.2.5: Isti profil posnet z 250 MHz (zgoraj) in s 500 MHz (spodaj, 0 – 26 m) anteno, vzdolžni profil S-J

Na profilih, posnetih na območju vseh treh vrtač pri črpališču Klariči, je vidna močna sprememba v odbojih pri prehodu iz položnega roba vrtač na izravnano, s sedimentom zapolnjeno dno vrtač. Na predelu robov, kjer so vidni močni odboji, namreč nastopa trša kamnina, v katerem je mogoče določiti tudi diskontinuitete, ki najverjetneje predstavljajo navidezni vpad plastnatosti apnenca (rdeče linije na radargramih). Takoj, ko iz robnih delov preidemo v izravnani del in na kmetijsko površino, pa se začne območje z močnim dušenjem signala, saj ni videti več praktično nobenih odbojev. Mestoma se še pojavljajo manjša območja z močnimi odboji, ki pa lahko kažejo na prisotnost večjega kosa kamnine. Sedimenti, ki zapolnjujejo dna vrtač, so drobnozrnati in imajo dobro sposobnost vezanja vode, zaradi česar povzročajo močno dušenje signala.

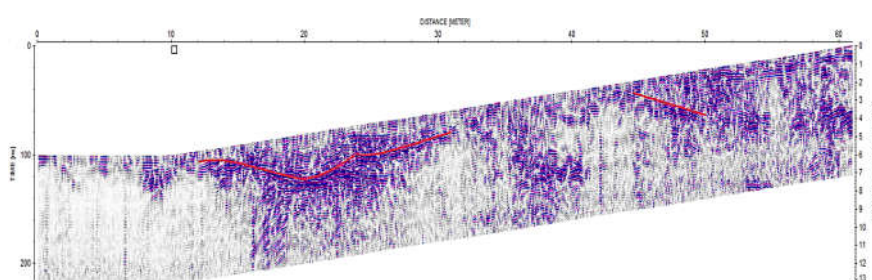


Slika 3.2.6: Lokacija vrtač 3a in 3b ter potek profilov.

### Vrtača 3a



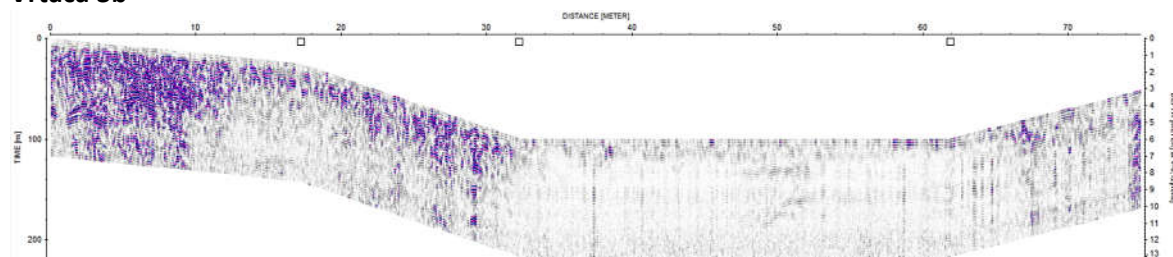
Slika 3.2.7: 250 MHz vzdolžni profil JZ-SV



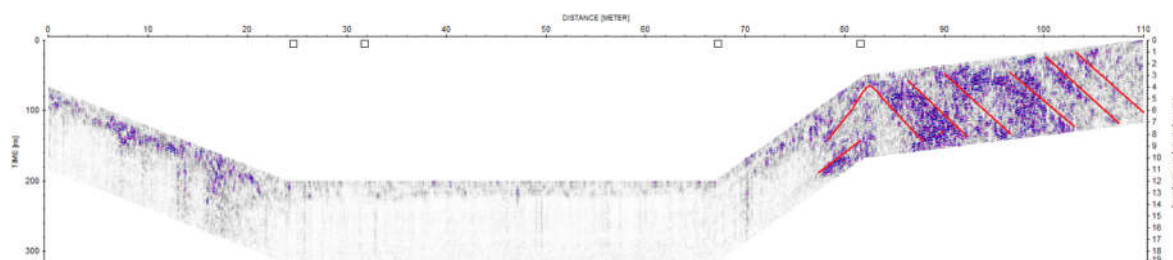
Slika 3.2.8: 250 MHz prečni profil SZ-JV

Iz radargramov na slikah 3.2.7 in 3.2.8 je razvidno, da na območju vrtače 3a nastopajo tako mesta z močnejšimi odboji (trša kamnina) kot mesta brez odbojev. Slednji kažejo na prisotnost sedimentov, ki zaradi vsebnosti visokega deleža glinene frakcije povzročajo močno dušenje signala. To se pojavlja na območjih depresij znotraj vrtače, kjer so lahko odložene plasti sedimenta. Lahko pa na teh delih gre tudi za (sub)vertikalne kraške kanale, zapolnjene s sedimentom in/ali območja močno pret rtega apnenca. Na predelih, kjer je kamnina trdna in povzroča močne odboje signala, je mogoče določiti tudi plastnatost in druge diskontinuitete (razpoke, rdeče linije na slikah 3.2.7 in 3.2.8).

### Vrtača 3b

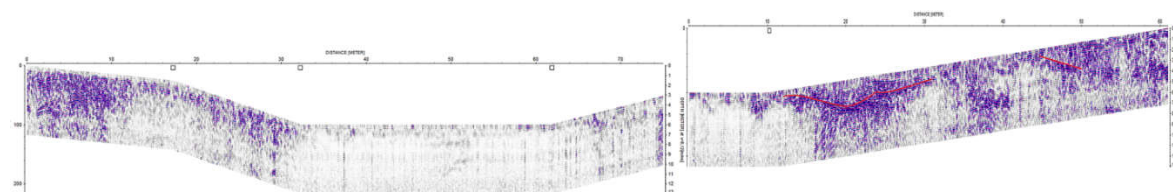


Slika 3.2.9: 250 MHz prečni profil SV-JZ



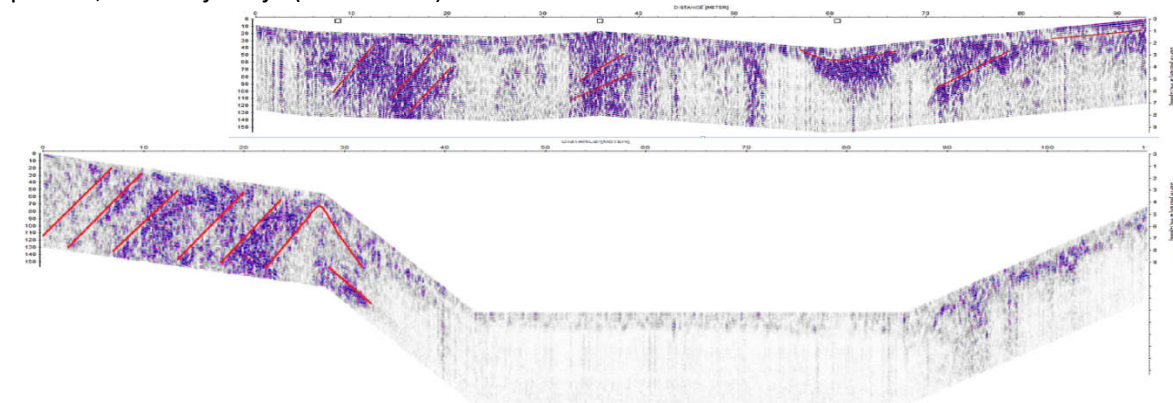
Slika 3.2.10: 250 MHz vzdolžni profil SV-JZ

Podobno kot pri vrtači 3a, je tudi pri vrtači 3b jasno vidna razlika med območjem, kjer nastopajo trše kamnine na robovih vrtače (močni odboji na koncih profilov) in območjem, kjer so najverjetneje prisotne plasti sedimenta (izravnano dno vrtače brez odbojev). Na vzdolžnem profilu je mogoče določiti tudi plastnatost oz. razpokanost kamnine. Pri združitvi obeh prečnih profilov (3a na sliki 3.2.8 in 3b na sliki 3.2.9) lahko vidimo, da sta vrtači 3a in 3b, ki sta ločeni z rahlo dvignjenim robom, po katerem poteka kamniti zid, pravzaprav povezujeta (slika 3.2.11). Območje brez odbojev, ki predstavlja dno vrtače, se tako iz vrtače 3b nadaljuje v vrtačo 3a.



Slika 3.2.11: Združitev prečnih profilov vrtače 3a in 3b SZ-JV

Prav tako lahko primerjamo oba vzdolžna profila obeh vrtač (3a na sliki 3.2.7 in 3b na sliki 3.2.10). Če jih postavimo v isto smer in merilo, vidimo, da se vpadi diskontinuitet, določenih na posameznih profilih, dobro ujemajo (slika 3.2.12).



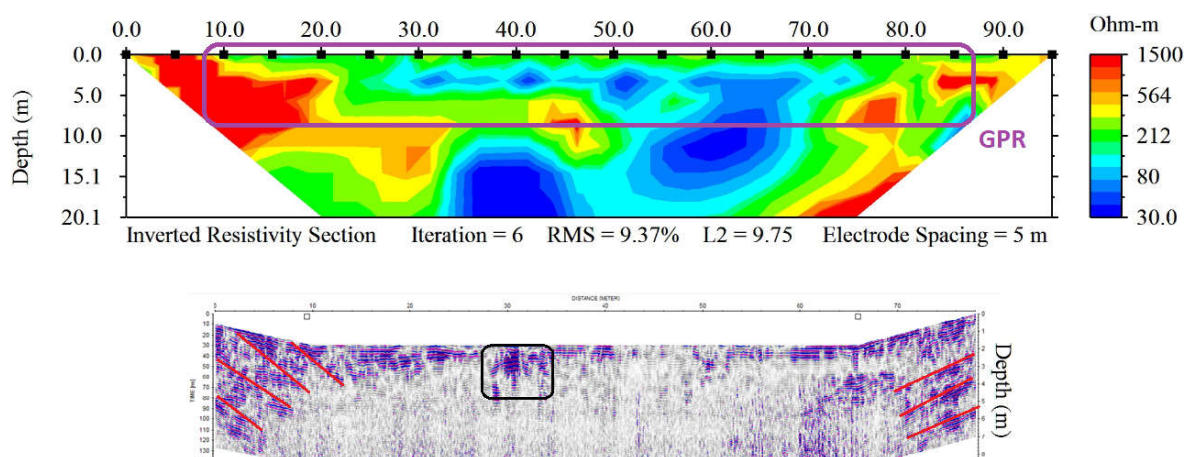
Slika 3.2.12: Primerjava vzdolžnih profilov vrtače 3a in 3b SV-JZ



Slika 3.2.13: Lokacija vrtače Jurjev dol in potek profilov

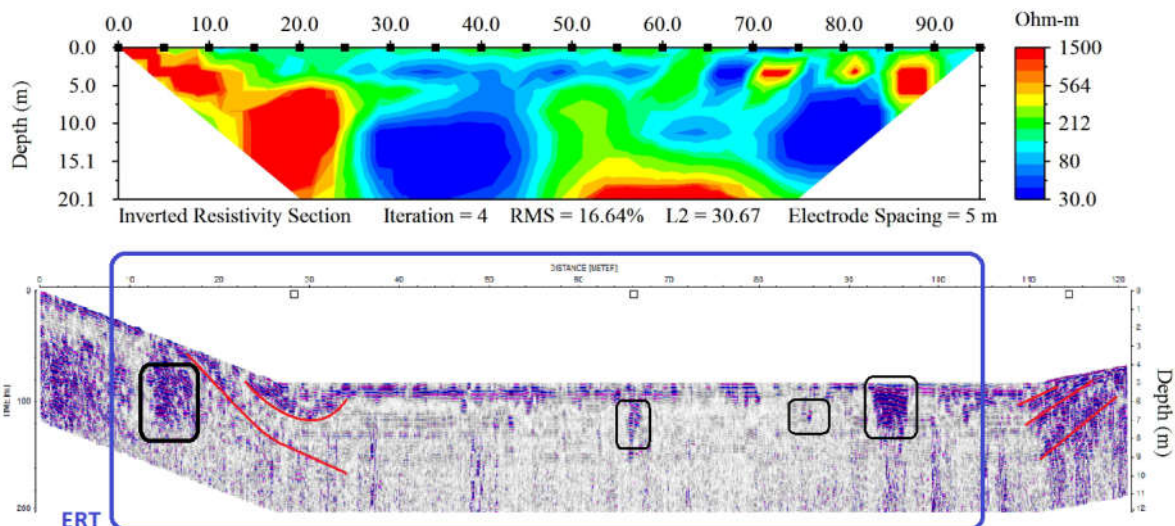
### Vrtača Jurjev dol

Istočasno z georadarskimi meritvami so bile izvedene tudi ERT meritve s strani Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU. Posneta sta bila dva profila – vzdolžni (121 m) in prečni (78 m) (slika 3.2.13). Zaradi slabe prehodnosti terena na končnih delih prečnega profila je georadarski profil krajši od ERT profila (95 m), zaradi omejitve z dolžino kabla pa je vzdolžni ERT profil (100 m) krajši od georadarskega.



Slika 3.2.14: Primerjava ERT profila (zgoraj) in georadarskega profila z 250 MHz (spodaj) – prečni profil Z-V





Slika 3.2.15: Primerjava ERT profila (zgoraj) in georadarskega profila z 250 MHz (spodaj) – vzdolžni profil S-J

Iz slik 3.2.14 in 3.2.15 je razvidno, da na območju, kjer ERT rezultati kažejo na prisotnost trših kamnin (višja upornost), tudi na radargramih nastopajo močnejši odboji. Obe metodi nam torej podata podobne informacije o mestih, kjer je za pričakovati trše kamnine, ki so na obrobju vrtače, oz. mehkejše sedimente, ki nastopajo na območju izravnane dna vrtače. Znotraj teh sedimentov je vidnih tudi nekaj območij, kjer najverjetneje nastopajo posamezni večji kosi kamnin (črni okvirji na slikah 3.2.14 in 3.2.15, katerim na ERT pripadajo manjša rdeča območja). Z ERT metodo dobimo večji globinski doseg (do 20 m, georadar z 250 MHz do 5 m), z radargamov pa je mogoče razbrati posamezne strukturne oblike, in sicer plastnatost apnenca (rdeče linije na slikah 3.2.14 in 3.2.15), ki na obeh straneh vpadajo proti sredini vrtače.

### Zaključki

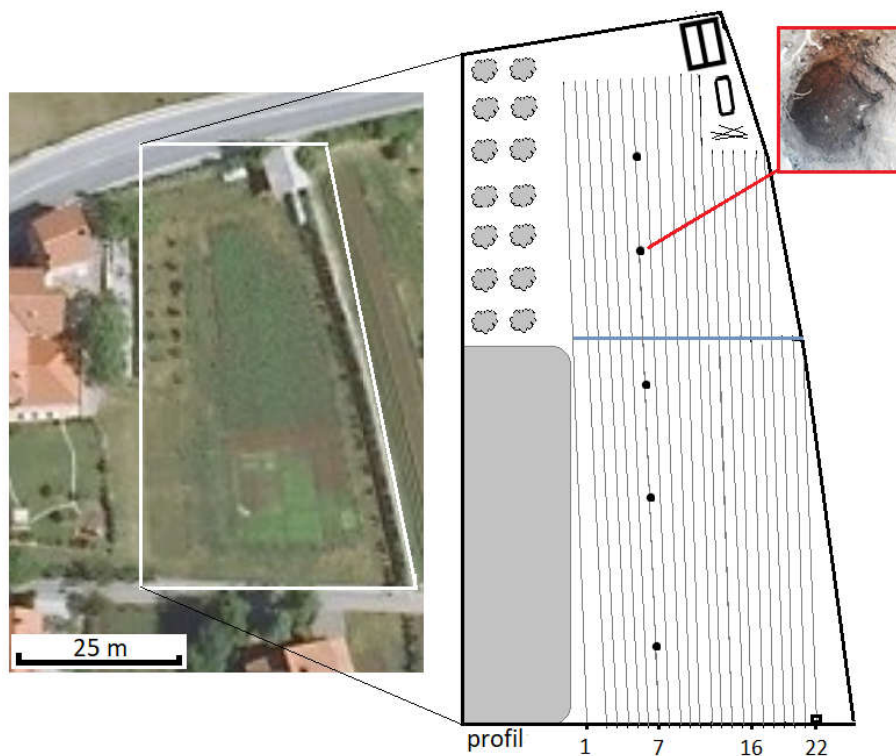
Na radargramih, posnetih na različnih vrtačah, je mogoče ločiti območja močnejših odbojev od območij brez odbojev. Posledično lahko vidimo, kje nastopajo trše kamnine in kje so nanese sedimenti ali pa so morda prisotne (sub)vertikalne kraške oblike, ki so zapolnjene s sedimenti in povzročajo dušenje signala. Na območjih trših kamnin je mogoče določiti potek diskontinuitet, ki lahko predstavljajo plasti ali razpoke znotraj kamnine, znotraj sedimentov pa praktično ne dobimo nobenih informacij. Slednje kaže na to, da tu nastopajo drobnozrnati sedimenti in imajo tla dobre zadrževalne sposobnosti.

Čeprav so bile uporabljene vse tri antene, najboljše rezultate daje 250 MHz antena. Za natančnejše določevanje vpadov diskontinuitet je primerna tudi 500 MHz, uporaba 800 MHz pa v teh primerih ni smiselna, saj je globinski doseg zelo omejen. Ker je bil globinski doseg na izravnane sedimentnem dnu vrtač že v sušnih obdobjih zelo omejen, v mokrem obdobju te meritve niso bile izvedene, saj bi bilo dušenje signala še večje.

### 3.2.2. Njiva na kraških tleh

#### Namen

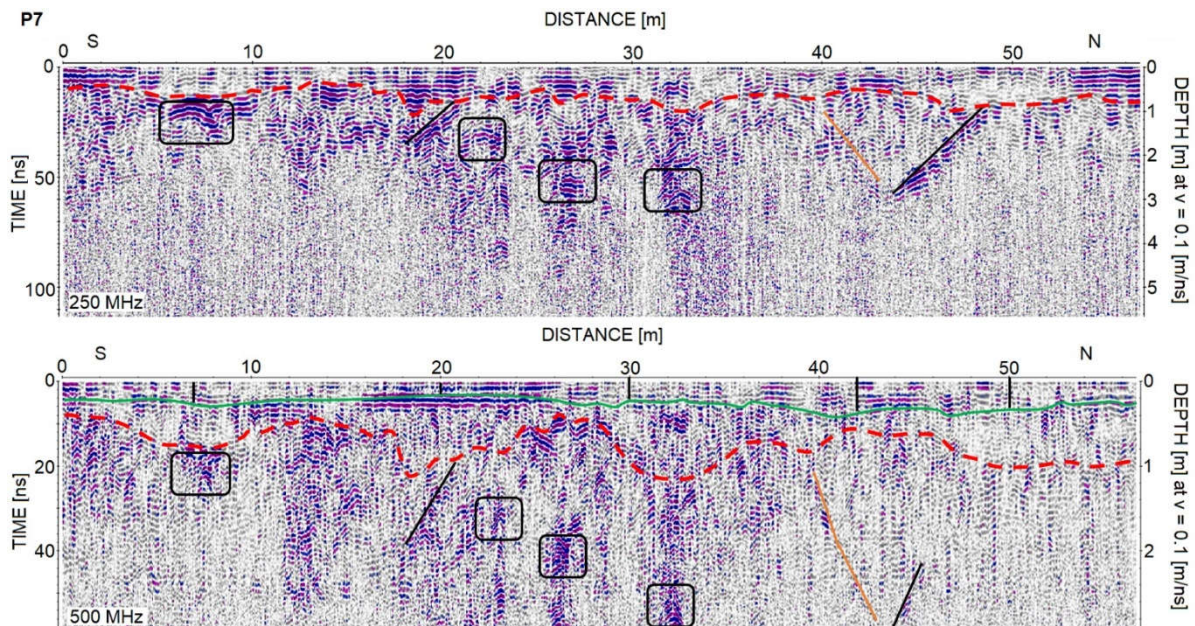
Prisotnost kmetijskih površin na kraških tleh lahko močno poveča možnost onesnaženja podzemne vode. Georadarske raziskave so bile izvedene na problematični njivi na območju kraškega vodonosnika, na kateri je bilo mestoma vidna upočasnjena rast rastlin in tudi območja popolnoma brez rasti, čeprav je bilo enakomerno tretirano in gnojeno na enak način kot okoliške njive. Predvidevali smo, da je slabo uspevanje rastlin posledica hitrejšega odtokanja vode in hranil kot na okoliških njivah, kjer ni opaziti slabše rasti. Pri raziskavi smo uporabili anteni dveh frekvenc, in sicer 250 MHz in 500 MHz, kateri sta se pri raziskavah vrtač izkazali za najbolj smiselni. Med sabo vzporedni profili so bili posneti preko celotne njive z razmikom enega metra z namenom določiti debelino vrhnjega sloja ter morebitno zakraselost matične podlage. Debelina vrhnjega sloja je bila preverjena tudi z manjšimi izkopi na petih točkah vzdolž profila 7 (slika 3.2.16). Glede na podatke iz geološke karte območja (Jurkovšek, 2013) plastnatost apnenca na tem območju pada za okoli 20° proti jugu.



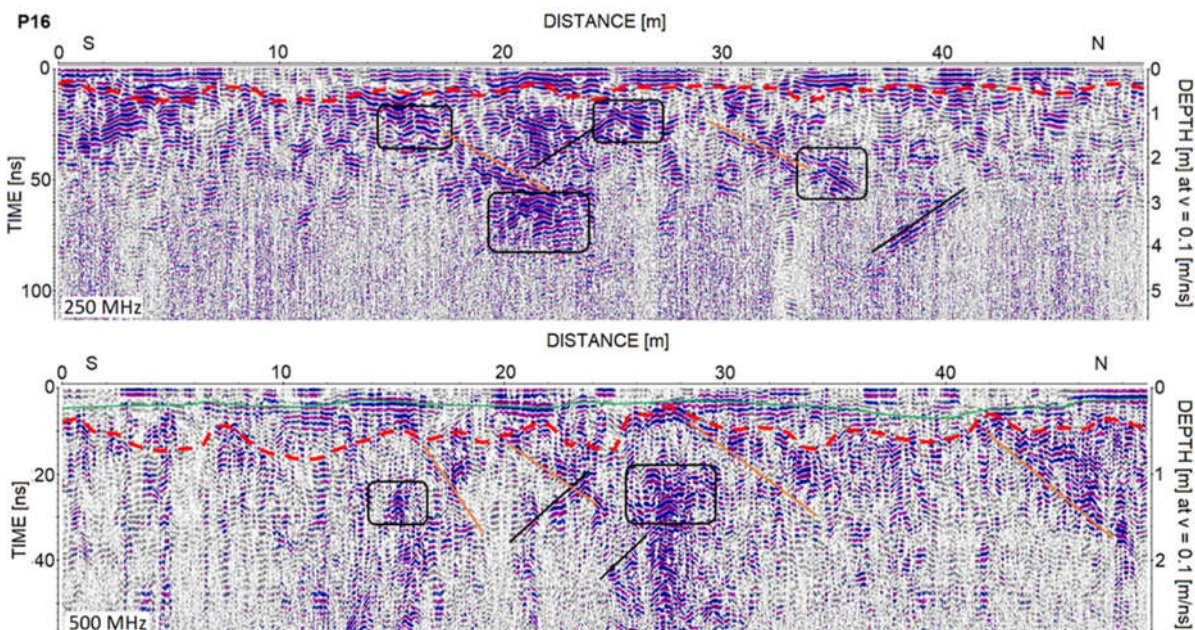
Slika 3.2.16. Satelitski posnetek območja njive z vidno slabšo rastjo na južnem delu ter izris poteka profilov in lokacije izkopov (po Zajc in Urbanc, 2019).

#### Rezultati

Rezultati so pokazali, da je mogoče na georadarskih profilih določiti različne diskontinuitete in anomalije, kar prikazujeta profila 7 in 16 na slikah 3.2.17 in 3.2.18. Iz interpretacije profilov je razvidno, da je vrhnji sloj zemljine precej tanjši, kot je bilo sprva mišljeno. V izkopih izmerjena debelina variira od 17 do 32 cm, kar sovпада z georadarskimi interpretacijami profilov, posnetih s 500 MHz anteno. Zaradi slabše ločljivosti podatkov tega v profilih z 250 MHz anteno ni mogoče določiti.



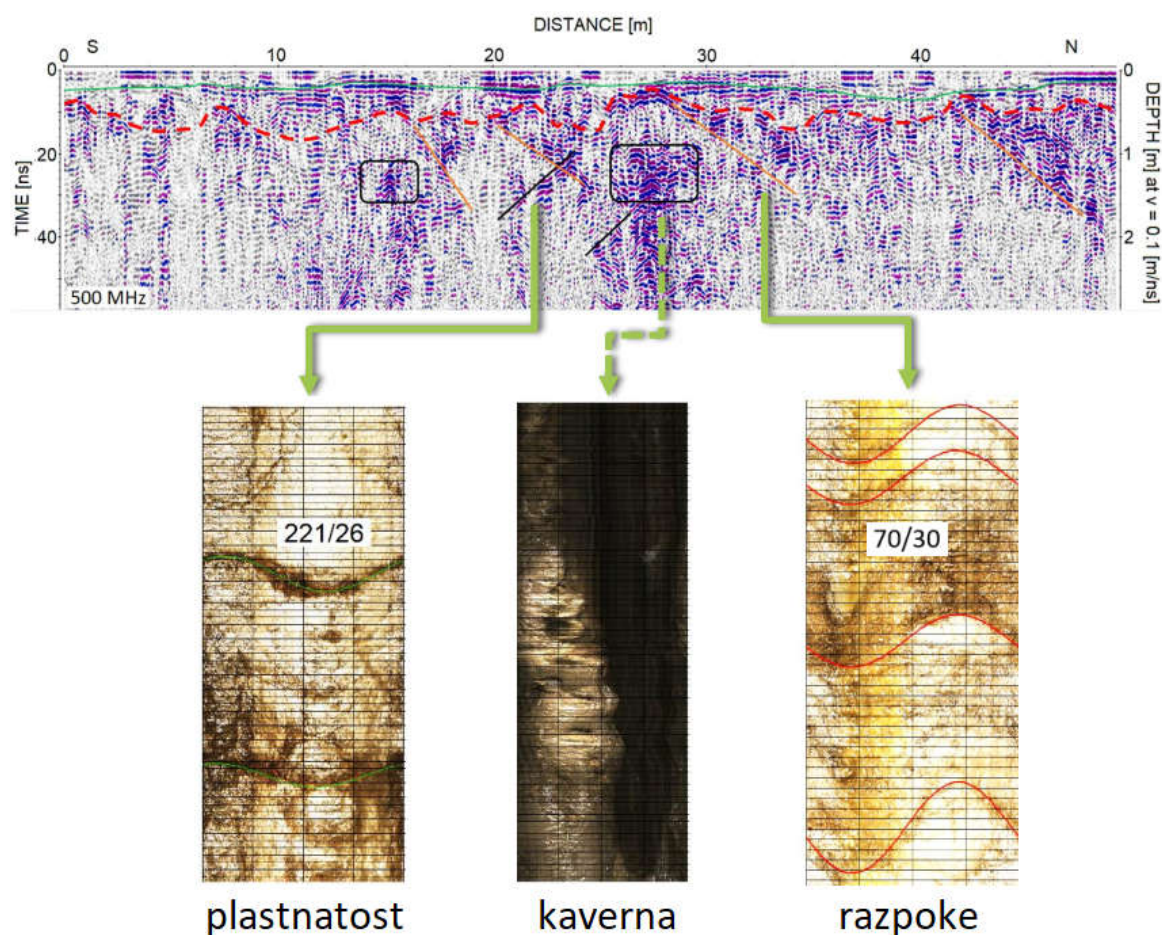
Slika 3.2.17. Interpretacija profila 7, posnetega z 250 MHz anteno (zgoraj) in 500 MHz anteno (spodaj). Črne vertikalne linije prikazujejo debelino vrhnje plasti, pridobljene z izkopi, zelena linija mejo med vrhno plastjo in apnencem, rdeča črtkana linija mejo zakraselosti apnenca, poševne linije prisotnost diskontinuitet, črni okvirji pa lokalne anomalije (Zajc in Urbanc, 2019).



Slika 3.2.18. Interpretacija profila 16, posnetega z 250 MHz anteno (zgoraj) in 500 MHz anteno (spodaj). Zelena linija predstavlja mejo med vrhno plastjo in apnencem, rdeča črtkana linija mejo zakraselosti apnenca, poševne linije prisotnost diskontinuitet, črni okvirji pa lokalne anomalije (Zajc in Urbanc, 2019).

Pod vrhno plastjo zemljine nastopa območje brez odbojev, ki najverjetneje predstavlja manj kompaktno cono spodaj ležečega apnenca. Pod tem delom pa znotraj apnenca nastopajo tako linearne diskontinuitete z različnimi vpadi kot tudi lokalne točkaste anomalije. Primerjava vpadov teh diskontinuitet s podatki iz geološkega kartiranja in bližnje vrtine Štorje-1/12 je pokazala, da gre tako za plastnatost apnenca kot tudi za več družin razpok, ki so lahko mestoma tudi razširjene in zato omogočajo hitrejšo prehajanje površinske vode v globlje dele. Na predelih, kjer se različni seti

diskontinuitet sekajo, lahko pride tudi do formiranja kraških kanalov in kavern. Ti se lahko kažejo kot območja močnejših točkastih odbojev (črni okvirji na slikah 3.2.17 in 3.2.18), katere je bilo mogoče določiti pri podobnih vzorcih v prejšnjih georadarskih študijah kraških pojavov (Zajc et al., 2015). Da na tem območju res nastopajo diskontinuitete različnih vpadov in večje kaverne, je mogoče videti tudi v optičnem posnetku vzdolž bližnje vrtine (slika 3.2.19).



Slika 3.2.19. Primerjava georadarskih rezultatov z zapisom optičnega pregledovalnika v vrtini Štorje-1/12.

Pri določevanju linearnih reflektorjev, ki predstavljajo različne diskontinuitete znotraj apnenca smo pridobili boljše rezultate z 250 MHz, saj je omogočila globlji doseg. Na drugi strani pa je uporaba 500 MHz antene podala natančnejše podatke o debelini vrhnjega sloja oz. meji med sedimentom zgoraj in matično kamnino spodaj. Glede na to, da je površina horizontalna, bi lahko ta meja predstavljala tudi mejo med apnencem, ki je bil v preteklosti izpostavljen na površini, ter nanešenim materialom za izravnavo terena.

Glede na pridobljene rezultate je slabša rast na tem območju najverjetneje posledica kombinacije tankega površinskega sloja in močno zakraselega spodaj ležečega apnenca. Kot je razvidno na sliki 3.2.16, vegetacija najslabše uspeva na jugu raziskovanega območja, kjer je tudi najtanjša vrhnja plast. Takšne razmere omogočajo hitrejšo drenažo vode, ta pa s sabo do podzemne vode odnese tudi hranila in onesnažila, ki so posledica kmetijske dejavnosti na površini. Na tem območju je zato možnost onesnaženja podzemne vode še dodatno povečana.

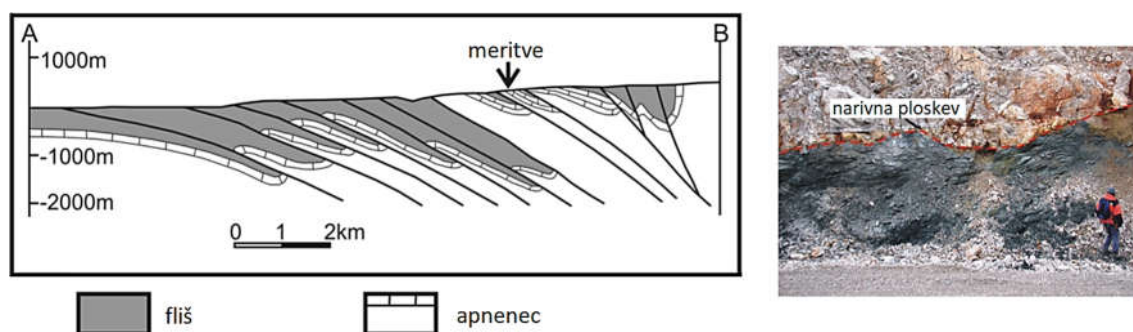
## Zaključki

Iz georadarskih rezultatov na območju krasa je razvidno, da kmetijske površine, ki so locirane na izravnanih dneh vrtač, ne povečujejo možnosti onesnaževanja podzemne vode, kadar je tu prisotna debelejša vrhnja plast, ki lahko deluje kot bariera za prehod onesnažil do podzemne vode. V primeru ko so v kraškem okolju kmetijske površine locirane neposredno na zakraselem apnencu, katerega pokriva le tanjša plast preperine, pa se ogroženost podzemne vode močno poveča, saj omogočajo kraški pojavi in razpokanost matične kamnine lažji prehod vode in onesnažil do podzemne vode. Ugotovitve georadarskih meritev za potrebe zaščite podzemne vode na kraškem območju smo predstavili na konferenci IWAGPR 2019 (International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar) v Haagu na Nizozemskem, ki je potekala v sklopu dogodka NSG19 (Near Surface Geoscience '19), katerega je organiziral EAGE (European Association of Geosciences and Engineers). Rezultate uporabe georadarja na krasu smo predstavili tudi na 27. Mednarodni krasoslovni šoli »Klasični kras« s podnaslovom »Kraška hidrogeologija – raziskovalni trendi in uporaba izsledkov«, ki je potekala od 17. do 21.6.2019 na Inštitutu za raziskovanje krasa ZRC SAZU in v Kulturnem domu Postojna. V teku je tudi priprava znanstvenega članka.

### 3.3. Ugotavljanje spremembe matične podlage

#### Namen

Velik vpliv na prehajanje površinske vode skupaj s hranili in onesnažili v podzemno vodo ima poleg debeline in sestave vrhnje plasti tudi tip matične podlage. Zaradi tektonsko izredno kompleksne zgradbe nastopajo na ozemlju Slovenije nagubana, tektonsko pretrta in narinjena območja, kjer lahko v podpovršju pride do menjavanja tipa matične podlage. Kadar se na terenu lastnosti tal določujejo le točkovno z izkopi in vrtinami, takšnih lateralnih sprememb namreč ne moremo zaznati in jih posledično tudi ne moremo upoštevati pri določevanju ocene ranljivosti podzemne vode. Primer takšne narivne zgradbe je t.i. kraški rob. Predstavlja izrazito geomorfološko stopnjo, znotraj katere nastopa 11 narivnih prelomov. Pri narivanju so se znotraj narivne cone formirali trije različni scenariji, in sicer narinjenost apnenca na apnenec, apnenca na fliš ali pa fliša na fliš (slika 3.3.1). Da bi preverili, v koliki meri je mogoče z georadarjem določiti spremembo matične podlage, smo z 250 MHz anteno posneli nove profile na območju kraškega roba, kjer so v preteklosti že bili posneti isti profili s 50 MHz anteno tipa RTA, ki jo ima v lasti Naravoslovnotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani. Na tem območju gre za konfiguracijo, kjer je apnenec narinjen na fliš.



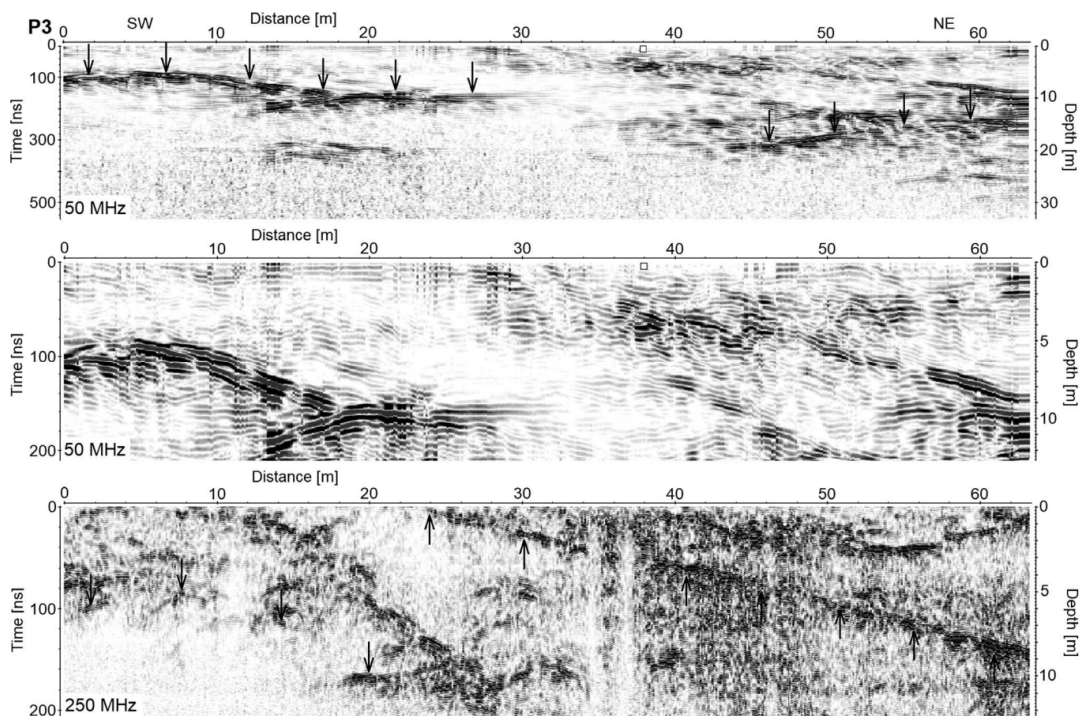
Slika 3.3.1. Levo – profil narivne zgradbe kraškega roba z označeno lokacijo meritev, desno – izdanek narivne ploskve z apnencem zgoraj in flišem spodaj (po Zajc et al., 2018).

## Rezultati

Na slikah 3.3.2 in 3.3.3 sta prikazana profila 3 in 4, in sicer njuna primerjava rezultatov, pridobljenih s 50 MHz in z 250 MHz anteno. Prva omogoča precej globlji globinski doseg, druga pa zagotavlja boljšo ločljivost podatkov. Kot je razvidno iz slik, z nižjefrekvenčno anteno v nekaterih primerih ni bilo mogoče dobiti rezultatov z zadovoljivo ločljivostjo. Posledično meje med apnenecem in flišem ni bilo mogoče natančno določiti v zgornjih predelih profilov, kjer narivna ploskev poteka blizu površja. Merjenje z višjefrekvenčno anteno je bilo zato bistvenega pomena za natančnejše določevanje spreminjanja matične podlage.

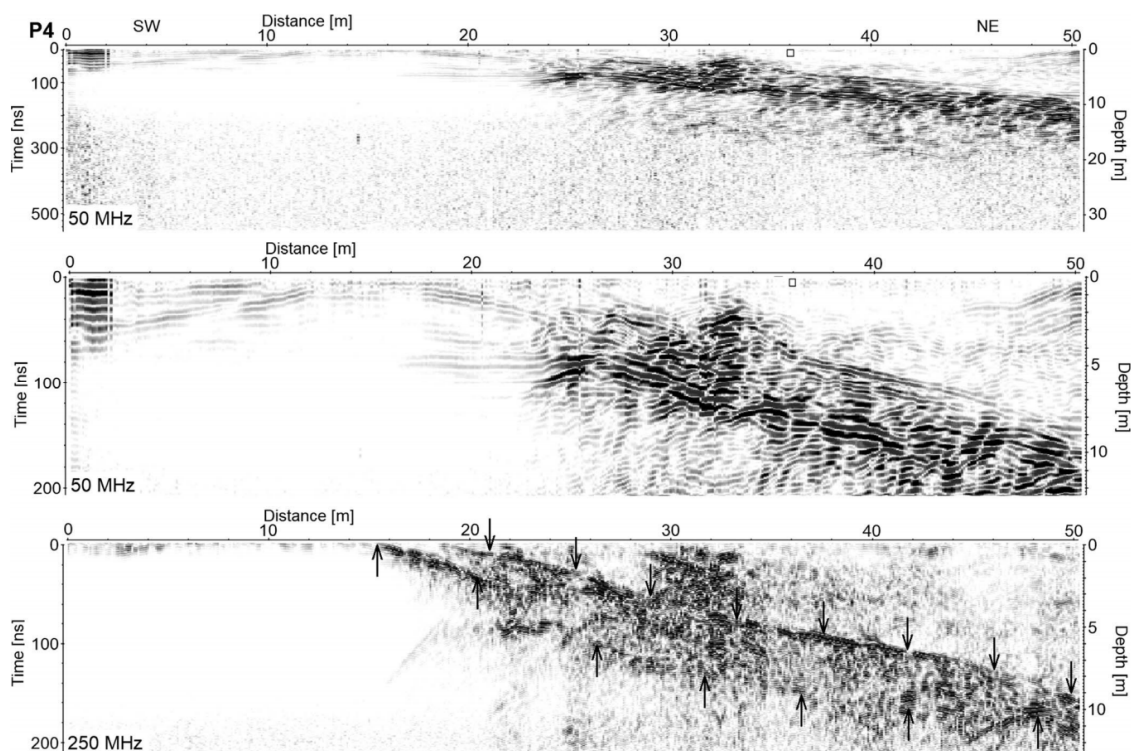
Narivna ploskev je na vseh profilih dobro vidna in se kaže v obliki močno izraženega, zveznega in neprekinjenega reflektorja, ki je posledica odbojev signalov na prehodu iz zgorajležečega apnenca v spodajležeče flišne plasti. Linearni reflektorji nastopajo tudi znotraj apnenčevih plasti in predstavljajo ali plastnatost ali pa razpoke, medtem ko znotraj fliša ne dobimo praktično nobenih odbojev. Razlog za to je v visokem dušenju signalov znotraj fliša, ki preprečuje prehod signalov globlje v podpovršje. To je dobro vidno predvsem na predelih, kjer fliš nastopa že na površju, saj v teh primerih ne dobimo nobene uporabne informacije o stanju podpovršja (prvih 14 m profila P4 na sliki 3.3.3).

Kot je razvidno iz slike 3.3.2, daje profil P3, posnet z anteno frekvenca 50 MHz, informacije o podpovršju do globine približno 30 m, z anteno frekvenca 250 MHz pa do 12 m. Preko celotnega profila je viden linijski reflektor, ki predstavlja narivnico (puščice navzdol) s prekinitvijo na odseku med približno 32 m do 38 m profila. S povečanjem prvih 12 m globine in primerjavo z istim profilom, posnetim z 250 MHz anteno, lahko opazimo veliko razliko v ločljivosti. Profil P3, posnet z 250 MHz anteno, kaže znotraj apnenca tudi prisotnost diskontinuitete (puščice navzgor), ki se začne na površini približno pri dolžini 23 m in doseže globino približno 8 m na koncu profila. Tudi nad to diskontinuiteto je v zadnjih 20 m profila vidna plitva konkavna oblika. Oboje je lahko posledica tektonsko povzročenih deformacij in plastnatosti apnenca.



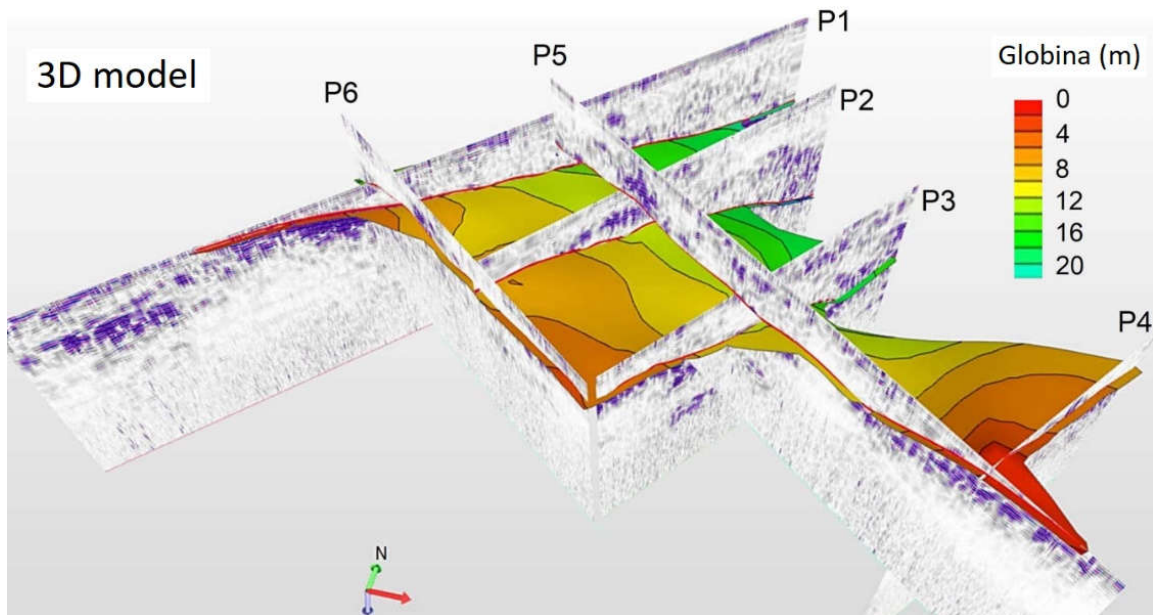
Slika 3.3.2. Profil P3. Zgoraj - posnet z anteno 50 MHz; sredina - povečava prvih 12 m globine profila 50 MHz; spodaj - posnet z anteno 250 MHz. Puščice navzgor označujejo mesto diskontinuitete znotraj apnenca, puščice navzdol pa označujejo potek narivne ploskve (Zajc et al., 2018).

Tudi na sliki 3.3.3 prikazuje profil P4 razliko v ločljivosti med 50 MHz in 250 MHz anteno. Tu lahko vidimo, da geometrije in lokacije, kjer meja med apnencem in flišem pride do površja, ni mogoče natančno določiti samo na podlagi profila 50 MHz, saj je ločljivost v zgornjih 4 m prenizka. Na profilu P4, posnetim z 250 MHz, lahko veliko natančneje vidimo naravno mejo (puščice navzgor), poleg tega pa tudi vzporedni linearni reflektor (puščice navzdor), ki se nahaja približno 3 m nad njo. Ta reflektor predstavlja plast znotraj apnenca, katerega pa ni mogoče ločiti od narivne meje v profilu 50 MHz. Brez podatkov iz profila 250 MHz bi tako lahko interpretacija privedla do napačne določitve globine do flišne plasti.



Slika 3.3.3. Profil P4. Zgoraj - posnet z anteno 50 MHz; sredina - povečava prvih 12 m globine profila 50 MHz; spodaj - posnet z anteno 250 MHz. Puščice navzdol označujejo mesto diskontinuitete, puščice navzgor označujejo potek narivne ploskve (Zajc et al., 2018).

Poleg posameznih interpretacij georadarskih profilov so bili profili uporabljeni tudi za izdelavo 3D modela, da bi geometrijo narivne ploskve tudi prostorsko natančneje opredelili (slika 3.3.4). S povezovanjem profilov v 3D model namreč dobimo boljšo prostorsko vizualizacijo ter pridobimo več informacij o geometriji narivnega kontakta na širšem območju. Konstrukcija 3D modela je tudi način preverjanja, kako dobro se globine narivnega kontakta ujemajo pri sečiščih z drugimi profili. Iz 3D modela na sliki ---- je razvidno, da se globine na sečiščih posameznih profilov dobro ujemajo.



Slika 3.3.4. 3D model po združitvi profilov P1 do P6 z označeno mejo med apnencem in flišem ter interpolirano naravno ploskvijo (Zajc et al., 2018).

### Zaključki

Pri določevanju sprememb matične podlage se je izkazalo, da lahko georadar z uporabo anten primernih frekvenc poda zelo natančne podatke o poteku meje med različnimi tipi kamnin. Z izdelavo 3D modela dobimo tudi boljšo vizualizacijo prostorskem razširjanju in geometriji meje. Kljub temu takšne georadarske meritve niso primerne v vseh okoliščinah. Zaradi močnega dušenja signala znotraj flišnih plasti na predelih, kjer fliš nastopa neposredno na površju, s to metodo ne dobimo uporabnih informacij, saj je globinski doseg zelo omejen. Pridobljene rezultate smo objavili v znanstvenem članku (Zajc et al., 2018).

## 3.4. Ugotavljanje zadrževalnih lastnosti tal

### Namen

Naravna ranljivost vodonosnika je produkt več dejavnikov, ki vplivajo na prodiranje onesnažil v sistem ter na njegovo prostorsko in časovno razširjanje in redčenje (Žabar et al., 2014). Med drugim so pri teh procesih pomembni tako vrsta tal in litologija kot tudi struktura tal. Ocena naravne ranljivosti, ki je izrednega pomena pri načrtovanju rabe okolja (Žabar et al., 2014), je torej v veliki meri odvisna od lastnosti zaščitne vrhnje plasti in njene zadrževalne sposobnosti (MOP, 2009; 2015). Infiltrirana voda namreč onesnažila izpira skozi vrhno zaščitno plast v spodajležečo kamnino nenasičene cone. Daljši, kot je čas zadrževanja v vrhnjih plasteh tal, dlje so onesnažila izpostavljena različnim razgradnim procesom in absorpciji, zato jih posledično podzemno vodo doseže manjša količina (Ravbar, 2007). Čas prehoda onesnažil je poleg značilnosti vrhnjih plasti odvisen tudi od globine nivoja podzemne vode, zato je tudi to eden ključnih podatkov pri ocenjevanju ranljivosti (Žabar et al., 2014). Namen uporabe georadarja je bil torej pridobiti zvezne prostorske informacije o strukturnih lastnostih tal, ki vplivajo na dinamiko zadrževanja in odtekanja vode s hranili. Meritve so bile izvedene na kmetijskih površinah, kjer so se pri analizi satelitskih posnetkov in pri terenskih ogledih znotraj istih parcel pokazala manjša območja s slabšim uspevanjem rastlin.



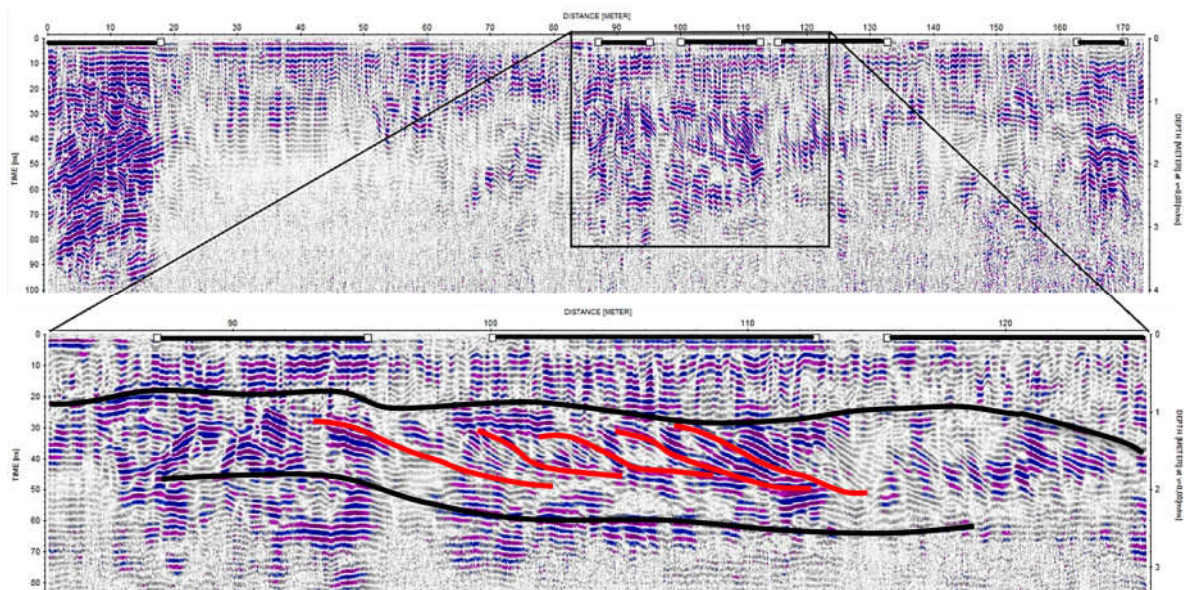
## Rezultati

Na območju njive z deteljo je bilo že na terenskem ogledu očitno, da vzdolž njive prihaja do sprememb v sestavi tal, saj so bile dobro vidne spremembe v rastju (slika 3.4.1).



Slika 3.4.1. Njiva z območji slabše rasti, fotografirano z obeh strani njive.

Rezultati snemanja vzdolž te njive so pokazali območja z boljším in slabším globinskim dosegom. Ker gre za medzrnski vodonosnik, so tukaj tla sestavljena iz aluvialnih nanosov, kjer se menjavajo plasti nanešenih sedimentov z različno zrnastjo. Da prihaja do vertikalnih sprememb v zrnivosti tal, se vidi v prisotnosti več linearnih reflektorjev, ki predstavljajo meje med sedimentnimi nanosi (črne krivulje na sliki 3.4.2). Ti lahko vzdolž profila tudi izklinjajo, pojavljajo pa se značilne strukture rečnih nanosov (rdeče krivulje na sliki 3.4.2).



Slika 3.4.2. Profil, posnet po njivi z območji omejene rasti (črne horizontalne linije), označenimi plastmi (črne krivulje) in strukturami nanešenih sedimentov (rdeče linije).

Da prihaja tukaj tudi do lateralnih sprememb v sestavi tal, pa pričajo območja z različno stopnjo dušenja signala. Kjer je dušenje slabše in je posledično globinski doseg večji, gre za prisotnost bolj debelozrnatih sedimentov, vsaj v vrhnjem delu. Tukaj je sposobnost zadrževanje vode slabša, kar pomeni, da vode hitreje odteče, zaradi česar pride do hitrejšega izsuševanja vrhnjega sloja. Na drugi strani pa območja z močnejšim dušenjem signala kažejo na prisotnost drobnozrnatega sedimenta, ki vsebuje večji delež glinene frakcije. Na teh predelih je sposobnost zadrževanja vode boljša, kar pomeni, da se tla tudi v sušnih obdobjih ne izsušijo tako hitro. To se vidi tudi na boljšemu uspevanju rastlin. Pri primerjavi georadarskih rezultatov z dejanskim stanjem na njivi po daljšem sušnem obdobju opazimo, da območja z globljim dosegom in slabšim dušenjem signala sovpadajo s predeli slabše rasti, katerih odseki so na sliki 3.4.2 označeni s horizontalnimi črnimi linijami. Meritve istega profila po deževnem obdobju so dale slabše rezultate v smislu globinskega dosega in ločljivosti podatkov, kar kaže na to, da je glinena frakcija prisotna povečini v vrhnjem delu tal.

## Zaključki

Z zveznim sledenjem posameznim talnim horizontom v prostoru smo lahko z georadarsko metodo določili prisotnost kritičnih območij v smislu zadrževanja vode plitvo pod površjem ali hitrejšega odtekanja vode in osuševanja tal. S pomočjo teh podatkov lahko z ustreznimi ukrepi pravočasno preprečimo previsoko ali prenizko vsebnost vlage v zemljini. Z načrtnim namakanjem, ciljnim gnojenjem ali spreminjanjem deležev posameznih frakcij v tleh bo tako mogoče zopet vzpostaviti optimalne razmere za uspevanje rastlin, pri čemer pa podzemna voda ne bo dodatno obremenjena.

### 3.5. Ugotavljanje višine podzemne vode

#### Namen

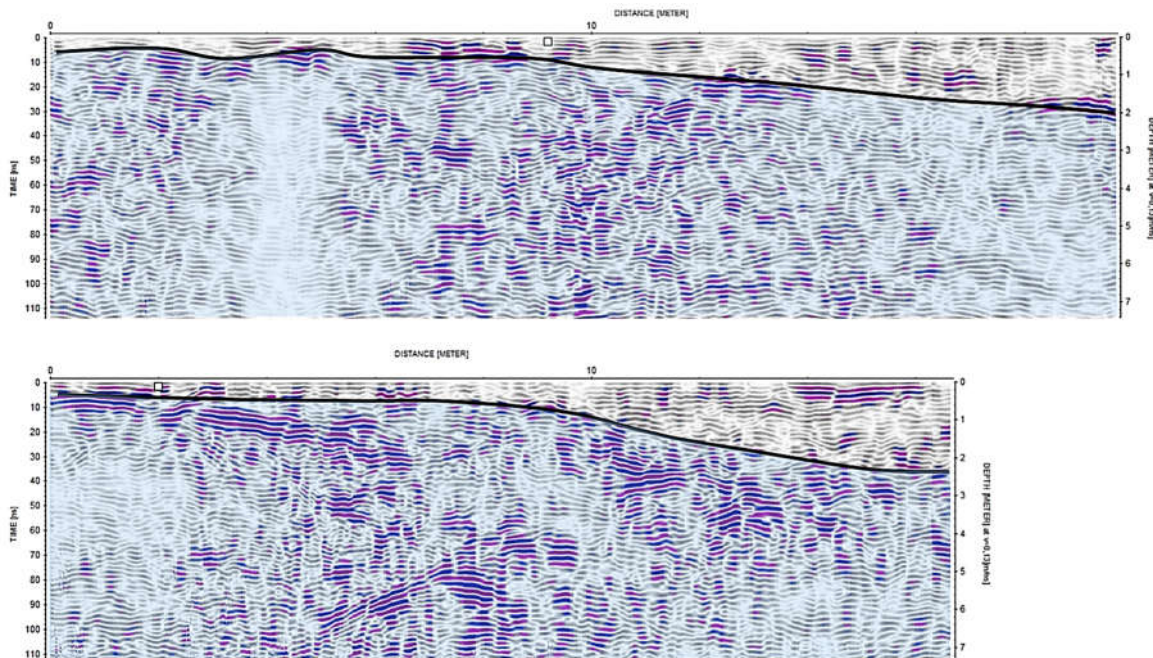
Prehod onesnažil je poleg značilnosti vrhnjih plasti odvisen tudi od globine nivoja podzemne vode, zato je tudi to eden ključnih podatkov pri ocenjevanju ranljivosti (Žabar et al., 2014). Pri določevanju globine do podzemne vode se uporabljajo točkovne informacije (t.j. podatki iz vrtin in piezometrične meritve), ki so pridobljene na terenu in se interpolirajo na celotno obravnavano območje. Zaradi heterogene geološke in pedološke sestave tal in matične kamnine se hidrogeološki pogoji spreminjajo, s tem pa tudi gladina podzemne vode. Z georadarskimi meritvami smo preverili potek gladine podzemne vode v bližini reke, in sicer z namenom, da bi sledili njeni gladini z oddaljevanjem od rečne struge Triglavske Bistrice.



Slika 3.5.1. Začetek prečnega profila tik ob strugi reke.

#### Rezultati

Posneti so bili tako profili vzdolž struge kot tudi prečni profili z začetkom neposredno ob strugi reke in potekom preko travnika v hribino (slika 3.5.1). Na prečnih profilih na sliki 3.5.2 je vidna zvezna linija vzdolž celotnega profila, ki najprej poteka tik pod površjem, v drugi polovici profilov pa se začne navidezno poglobljati. Ta linija najverjetneje predstavlja gladino podzemne vode, ki tik ob rečni strugi nastopa neposredno pod površjem, njeno poglobljanje pa je navidezno, saj je le posledica dviganja terena, medtem ko izris profila ostaja horizontalen. Iz georadarskih rezultatov je razvidno, da na tem območju podzemna voda nastopa zelo plitvo pod površjem in se izliva v rečno strugo. Glede na to, da so tla sestavljena iz fluvioglacialnih sedimentov, kjer v vrhnjem delu nastopajo pretežno prodnati nanosi, je tukaj drenaža vode zelo dobra. V takšnih primerih je ogroženost podzemne vode zelo visoka.



Slika 3.5.2. Interpretacija dveh prečnih profilov, posnetih od rečne struge v hribino. Črna linija predstavlja gladino podzemne vode.

## Zaključki

Georadarske meritve za potrebe določevanja gladine podzemne vode so smiselne v primerih, kjer le-ta nastopa dovolj plitvo pod površjem, da jo še lahko zaznamo z nizkofrekvenčnimi antenami. To v kraških vodonosnikih ni vedno možno, se je pa izkazalo za primerno metodo v medzrnskih vodonosnikih. Z meritvami v mreži preko celotnega območja lahko dobimo 3D model gladine podzemne vode podobno kot v primeru določevanja meje med različnimi kamninami. S tem lahko natančneje določimo dinamiko napajanja vodonosnika. Prav tako so podatki o globini podzemne vode uporabni za boljšo oceno ranljivosti podzemne vode, saj samo interpolacija podatkov iz vrtnic ne daje dovolj preciznih modelov.

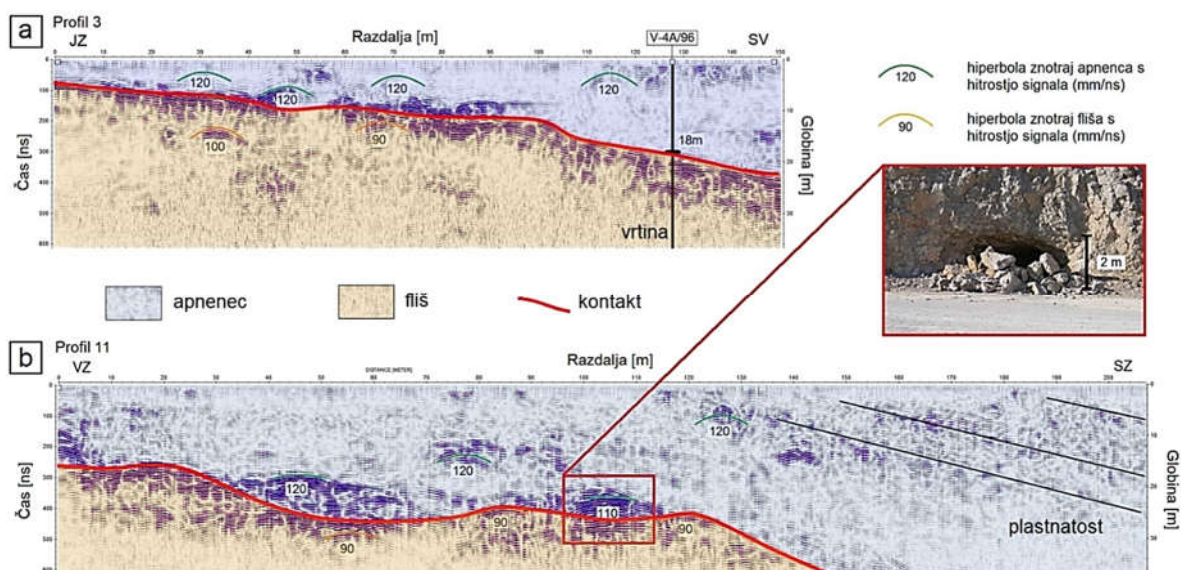
## 4. Vpliv različnih faktorjev na georadarske rezultate

### 4.1. Vlažnost tal

Voda ima v primerjavi s kamninami in sedimenti zelo visoko dielektričnost. Voda, ki je lahko tako prosta kot tudi kristalno vezana, lahko že v majhnih količinah močno dvigne dielektričnost sedimenta ali kamnine, v kateri se nahaja, in s tem bistveno zmanjša globinski doseg. Posledično lahko visoka vlažnost ponekod daje zelo slabe rezultate, še posebej kadar je visoka vsebnost glinene frakcije v vrhnjem sloju. V tem primeru so meritve smiselne le v sušnih obdobjih. Po drugi strani pa zaradi zadrževanja na mejah med sedimentnimi plastmi lahko prisotnost vode tudi bolje loči posamezne horizonte. Slednje je možno, kadar ni visoke vsebnosti gline v vrhnjem sloju, saj bi bilo v nasprotnem primeru dušenje signala previsoko. V primeru, da je v tleh voda prisotna skozi vse leto, pa so najbolj smiselne meritve v obdobju, ko so tla zamrznjena, saj je dielektričnost ledu okoli desetkrat manjša od dielektričnosti vode. Poleg tega razmočenost terena otežuje ali celo onemogoča izvajanje georadarskih meritev.

### 4.2. Sestava matične podlage

Globinski doseg in ločljivost rezultatov sta v veliki meri odvisna od elektromagnetnih lastnosti materiala, znotraj katerega izvajamo meritve. Sestava matične kamnine in njeno stanje v smislu zakraselosti, razpokanosti, vlažnosti in preperelosti namreč močno vplivata na hitrost potovanja signalov skozi pod površje, stopnjo dušenja signala in sipanje signala. Homogena trdna in suha kamnina omogoča globlji doseg kot drobnozrnat sediment z visoko vsebnostjo glinene frakcije. V primeru meritev na suhem zakraselem apnencu so v profilih tako dobro vidne kraške jame, razpoke, plastnatost ter meje z drugimi kamninami (slika 4.1). Podobno lahko meje med različnimi tipi sedimentov in talnih horizontov ločimo tudi v primeru aluvijskih in glaciofluvialnih nanosov, kjer vrhnji deli niso zaglinjeni. V primeru drobnozrnatih sedimentov, ki vsebujejo veliko gline, pa so meritve smiselne le v zelo sušnih obdobjih, saj dobimo v nasprotnem primeru zaradi visoke stopnje dušenja signala zelo omejen globinski doseg.



Slika 4.1. Georadarski rezultati na kraškem apnencu (Zajc, 2020).

#### 4.3. Površinsko stanje območja

Čeprav je lahko matična podlaga enaka, dobimo pri merjenju preko več različnih tipov kmetijskih zemljin različne rezultate. Na njih vplivajo razlike v vrsti rastja, način obdelovanja vrhnjega sloja ter tudi prisotnost jarkov in robov med posameznimi njivami. Zaradi teh različnih terenskih pogojev je bolje meritve izvajati na posameznih njivah in jih kasneje združevati v večji model. Težko je tudi izvajati meritve hkrati preko več kmetijskih površin, saj jih je najbolje izvajati v času, ko so površine prazne oz. na način, da ne vplivamo na rastle in količino pridelkov, različne kulture pa uspevajo v različnih obdobjih. Najbolje je, da so njive pred meritvami pokošene in/ali izravnane, saj v primeru prevelike hrapavosti in neenakomernega površja ne moremo zagotoviti dobrega stika med anteno in tlemi, posledično pa prihaja do izgube signala. Kot že prej omenjeno, meritve omejujejo tudi stoječe vode, ki se po dežju zadržujejo na površini (slika 4.2A). Neugoden je tudi razmočen teren, zaradi katerega se je težje premikati z georadarsko opremo po terenu, pri tem pa prihaja tudi do napak v meritvah, saj se kolo z odometrom ne vrti enakomerno (slika 4.2B).



Slika 4.2. Neugodno površinsko stanje za georadarske meritve. A – stoječe vode na površini; B – oteženo premikanje z georadarsko opremo.

#### 4.4. Frekvenca uporabljene antene

Zaradi svoje vsestranskosti, visoke učinkovitosti in nedestruktivne narave je metoda georadarja zelo uporabna za potrebe raziskovanja podpovršja, vendar pa je za njeno najboljšo izkoriščenost in aplikativnost nujna uporaba anten različnih frekvenc. Višja, kot je frekvenca uporabljene antene, manjši je globinski doseg in boljša je ločljivost rezultatov. Antene višjih frekvenc imajo tako manjši globinski doseg in omogočajo boljše ločljivost rezultatov, zato so primernejše za uporabo pri iskanju in raziskovanju pojavov manjših dimenzij plitveje pod površjem (določevanje lastnosti vrhne plasti tal). Na drugi strani pa antene nižjih frekvenc omogočajo globlji doseg, kar je še posebej uporabno pri raziskavah regionalnih in lokalnih geoloških značilnosti podpovršja. Z njimi lahko namreč pridobimo podatke o prisotnosti in prostorski orientaciji različnih tipov diskontinuitet, ki med drugim vplivajo na oblikovanje in stabilnost površja, pogojujejo hidrogeološko dinamiko vodonosnikov ter podajo informacije o prostorski razsežnosti posameznih stratigrafskih členov in podzemnih kraških pojavov. Pogosto daje najboljše rezultate kombinacija meritev z visokimi in nizkimi frekvencami, sploh v primeru, ko v prostoru sledimo določenim pojavom, ki se iz podpovršja dvigajo do površja. Za zagotovitev rezultatov čim boljše kakovosti je zato pred začetkom georadarskih raziskav potrebno preučiti območje meritev in na podlagi želenih rezultatov izbrati primeren tip opreme in meritve izvesti v najbolj ugodnih terenskih razmerah.

## **5. Sodelovanje z gospodarskim subjektom in skladnost rezultatov s predmetom, cilji in namenom javnega razpisa**

Sodelovanje raziskovalne organizacije Geološkega zavoda Slovenije je preko raziskovalke dr. Marjane Zajc z gospodarskim subjektom Vitrum laser potekalo nemoteno, tekoče in brez zapletov. Iz obeh strani je bila uporabljena ista georadarska oprema, kar je zahtevalo dobro organizacijo in komunikacijo za usklajevanje terenskih meritev. Poleg zagotovitve terenske opreme so bili zaposleni na podjetju Vitrum laser vedno pripravljene sodelovati tudi pri georadarskih meritvah in reševanju logističnih težav na terenu. Sodelovanje na raziskovalnem projektu je tako Geološkemu zavodu Slovenije kot tudi raziskovalki in podjetju Vitrum laser prineslo nove izkušnje, potrebne za nadaljnje delo na tem področju. Ker predhodnega sodelovanja med raziskovalno organizacijo in gospodarskim subjektom v smislu sodelovanja na skupnih projektih še ni bilo, je raziskovalni projekt za obe strani deloval kot odskočna deska na novo področje, pri čemer je raziskovalka dobila neprecenljiv vpogled v delovanje obeh sfer.

Poznavanje problematike in znanstveni pristop pri oblikovanju metodologije s strani raziskovalnega sveta se je preko tega projekta povezal s praktičnim reševanjem problemov ter izvedbo konkretnih postopkov s strani gospodarskega subjekta. Možnosti aplikacije georadarja v hidrogeologiji in varstvu okolja se povečujejo, prav tako je vedno večja tudi potreba po neinvazivnih metodah raziskovanja plitvega podpovršja. Vitrum laser bo tako lahko z uporabo georadarske metode na področju kmetijstva razširil svojo ponudbo na trgu.

Znotraj raziskovalne organizacije, ki poleg hidrogeologije pokriva tudi druga področja, kot so regionalna geologija, geohazard in mineralne surovine, pa je namembnost uporabe georadarja praktično neomejena. Raziskovalna organizacija bo s pridobljenim praktičnim znanjem in z nadaljnjim sodelovanjem z gospodarskim subjektom lahko širila predmet svojih raziskav tudi na druga področja, kjer je uporaba te metode smiselna.

Sodelovanje je tako ključnega pomena za razvoj gospodarstva, saj si je Vitrum laser z vpogledom v raziskovalno okolje in obstoječo problematiko povečal možnosti pri prijavih na različne razpise v prihodnje, istočasno pa to vpliva tudi na konkurenčnost slovenskega gospodarstva. S pridobljenimi izkušnjami in referencami ter nadaljnjim vključevanjem v raziskovalne projekte si bo na trgu še povečal kredibilnost.

Vitrum laser je v začetku raziskovalnega projekta na Geološkem zavodu Slovenije zaposlenim predstavil svoje podjetje in obseg metodologije, ki jo uporabljajo pri svojem delu. Poleg opreme za georadarske raziskave je Vitrum laser tako že v teku raziskovalnega projekta raziskovalni organizaciji nudil tudi druge storitve, kot so npr. lasersko 3D skeniranje in fotogrametrija, kar bo nadaljeval tudi v prihodnje. Te storitve so za Geološki zavod Slovenije izredno zanimive, zaželeno ali pri določenih geoloških raziskavah celo nujne, kar zagotavlja nadaljnje sodelovanje tudi v prihodnje. Z diseminacijo rezultatov in omenjanju gospodarskega subjekta kot partnerja v raziskovalnem projektu ter uporabi njihovega logotipa pri predstavitvah rezultatov se je povpraševanje za njihove storitve na trgu povečalo.

## 6. Razširjanje raziskovalnih rezultatov

Z namenom informiranja javnosti je raziskovalni projekt predstavljen na spletni strani Geološkega zavoda Slovenije. Pod zavihkom Projekti > Razvojni projekti so objavljeni podatki o vsebini, trajanju in sofinanciranju projekta z logotipoma Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport ter Evropskega sklada za regionalni razvoj, dodani pa so še plakati in predstavitve iz znanstvenih konferenc, vabljenega predavanja ter predstavitve metode in preliminarnih rezultatov na Biotehniški fakulteti, ki prav tako vsebujejo logotipe in zapis o sofinanciranju. Povezava do spletne strani projekta:

[https://www.geo-zs.si/?option=com\\_content&view=article&id=343](https://www.geo-zs.si/?option=com_content&view=article&id=343)

Plakat, ki predstavlja tematiko, cilje in obliko sofinanciranja projekta (velikost A0), je izobešen tudi v prostorih Geološkega zavoda Slovenije.

Vsa komunikacijska in informacijska gradiva so označena z logotipoma Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport ter Evropskega sklada za regionalni razvoj. V primeru, ko je vsebina v angleškem jeziku, so uporabljeni logotipi v angleški verziji. Dokumenti, ki niso namenjeni javnosti (interni dokumenti), z logotipi niso opremljeni.

V času trajanja raziskovalnega projekta smo aktivno sodelovali na domačih in tujih konferencah, objavljali članke in prispevke tako v domačih kot tujih strokovnih, znanstvenih in poljudnoznanstvenih revijah. Projekt smo predstavili na raznih domačih in mednarodnih sestankih, dogodkih in portalih (Research Gate), uporabo metode georadarja za raziskave podzemne vode pa predstavili tudi v obliki vabljenega predavanja na izobraževalnem seminarju Društva tehničnih vodij. Tako projekt kot tudi preliminarne rezultate smo predstavili še na vodenih ekskurzijah in v vodičih. Glavne rezultate projekta bomo objavili tudi v več raziskovalnih člankih, ki so že v delu in bodo objavljeni v visoko rangiranih znanstvenih revijah. Dosedanje objave so iz bibliografije raziskovalke za obdobje 2017 – 2020 izpisane iz SICRIS baze.

SICRIS izpis

**Dr. Marjana Zajc [33141]**

**Osebna bibliografija za obdobje 2017-2020**

### ČLANKI IN DRUGI SESTAVNI DELI

#### 1.01 Izvirni znanstveni članek

1. WU, Kaijun, ARAMBULO RODRIGUEZ, Gabriela, ZAJC, Marjana, JACQUEMIN, Elodie, CLÉMENT, Michiels, DE COSTER, Albéric, LAMBOT, Sébastien. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote sensing of environment*. [Print ed.]. 9 str., online first. ISSN 0034-4257. DOI: [10.1016/j.rse.2019.111456](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111456). [COBISS.SI-ID [2966101](https://www.cobiss.si/urn:nbn:si:coibis:2966101)], [JCR, SNIP, WoS do 12. 7. 2020: št. citatov (TC): 2, čistih citatov (CI): 2]

2. ZAJC, Marjana, GOSAR, Andrej, CELARC, Bogomir. GPR Study of a Thrust-fault in an Active Limestone Quarry (SW Slovenia). *Journal of environmental & engineering geophysics*. 2018, vol. 23, no. 4, str. 457-468. ISSN 1083-1363. DOI: [10.2113/JEEG23.4.457](https://doi.org/10.2113/JEEG23.4.457). [COBISS.SI-ID [2872405](https://www.cobiss.si/urn:nbn:si:coibis:2872405)], [JCR, SNIP, WoS do 10. 8. 2020: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, Scopus do 10. 8. 2020: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1]

3. MATOŠ, Bojan, ZAJC, Marjana, KORDIĆ, Branko, TOMLJENOVIC, Bruno, GOSAR, Andrej. Quaternary fault activity in the SW Pannonian Basin : GPR surveying in Bilogora (NE Croatia). *Geological Quarterly*. 2017, vol. 61, no. 1, str. 18-36. ISSN 1641-7291. DOI: [10.7306/gq.1308](https://doi.org/10.7306/gq.1308).



[COBISS.SI-ID [1275742](#)], [JCR, SNIP, WoS do 12. 4. 2020: št. citatov (TC): 4, čistih citatov (CI): 4, Scopus do 29. 2. 2020: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 3]

4. VERBOVŠEK, Timotej, KOŠIR, Adrijan, TERAN, Maša, ZAJC, Marjana, POPIT, Tomislav. Volume determination of the Selo landslide complex (SW Slovenia) : integrating field mapping, ground penetrating radar and GIS approaches. *Landslides : Journal of the international consortium on landslides*. [Print ed.]. 2017, vol. 14, iss. 3, str. 1265-1274. ISSN 1612-510X. DOI: [10.1007/s10346-017-0815-x](#). [COBISS.SI-ID [1322334](#)], [JCR, SNIP, WoS do 10. 8. 2020: št. citatov (TC): 4, čistih citatov (CI): 0, Scopus do 10. 8. 2020: št. citatov (TC): 6, čistih citatov (CI): 2]

#### 1.04 Strokovni članek

5. ZAJC, Marjana. Uporaba georadarja za določanje geoloških struktur plitvo pod površjem. *Mineral & gradnja*. junij 2020, št. 3, str. 22-24. ISSN 2670-6946. [COBISS.SI-ID [20940291](#)]

#### 1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

6. WU, Kaijun, ARAMBULO RODRIGUEZ, Gabriela, ZAJC, Marjana, JACQUEMIN, Elodie, CLÉMENT, Michiels, LAMBOT, Sébastien. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. V: *10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 8 - 12 September 2019, The Hague, Netherlands*. Houten: European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2019. 5 str. <https://bit.ly/2PeuLkf>. [COBISS.SI-ID [2974293](#)]

7. ZAJC, Marjana, URBANC, Janko. Using GPR on a problematic agricultural field for groundwater protection in a karst environment. V: *10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 8 - 12 September 2019, The Hague, Netherlands*. Houten: European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2019. 5 str. <https://bit.ly/2qiiJhs>. [COBISS.SI-ID [2974549](#)]

8. ZAJC, Marjana, RMAN, Nina. Ground penetrating radar for detecting subsurface features of active gas vents - mofettes in Slovenia. V: *17th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 18 - 21, 2018, Rapperswil, Switzerland*. [S. l.]: IEEE Xplore Digital Library, 2018. Str. 399-404. ISBN 978-1-5386-5777-5. DOI: [10.1109/ICGPR.2018.8441650](#). [COBISS.SI-ID [2949461](#)]

9. ZAJC, Marjana, POGAČNIK, Željko, GOSAR, Andrej. GPR for detecting interlayer slides in turbidites - Anhovo (W Slovenia). V: JEMEC AUFLIČ, Mateja (ur.), MIKOŠ, Matjaž (ur.), VERBOVŠEK, Timotej (ur.). *Advances in landslide research : proceedings of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic Balkan Region, 11-13 October 2017, Ljubljana, Slovenia*. Ljubljana: Geological Survey of Slovenia, 2018. Str. 37-42. ISBN 978-961-6498-58-6. [COBISS.SI-ID [2868053](#)]

10. ZAJC, Marjana, GOSAR, Andrej, CELARC, Bogomir. Low-frequency ground penetrating radar survey for limestone - flysch thrust-fault analysis (Karstic thrust edge, SW Slovenia). V: *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Edinburgh, UK 28 - 30 June 2017 : proceedings*. Red Hook, NY: IEEEExplore, cop. 2017. Str. 1-6. ISBN 978-1-5090-5484-8. [COBISS.SI-ID [2659157](#)], [Scopus do 10. 8. 2020: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 0]

11. ZAJC, Marjana, GOSAR, Andrej, CELARC, Bogomir. Application of ground-penetrating radar for thrust-fault analysis within a karstic environment (Karstic thrust edge, SW Slovenia). V: ROŽIČ, Boštjan (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports*. 23. posvetovanje slovenskih geologov = 23rd Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, marec 2017. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2017. Str. 185-189. Geološki zbornik, 24. ISSN 0352-3802. [COBISS.SI-ID [1333086](#)]

#### 1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci

12. ZAJC, Marjana, URBANC, Janko. Improving groundwater vulnerability and risk assessments within karst aquifers using GPR = Izboljšanje ocene tveganja in ranljivosti podzemne vode v kraškem vodonosniku z uporabo georadarja. V: BLATNIK, Matej (ur.), et al. *Karst hydrogeology - research trends and applications : abstracts & guide book = Kraška hidrogeologija - raziskovalni trendi in uporaba izsledkov : povzetki & vodnik*. 1st ed. Ljubljana: Založba ZRC, 2019. Str. 135-136. ISBN 978-961-05-0196-1. [COBISS.SI-ID [44894765](#)]

- 13.** JAMŠEK RUPNIK, Petra, ŽEBRE, Manja, JEŽ, Jernej, PREUSSER, Frank, ZAJC, Marjana, MONEGATO, Giovanni. Deformed Pleistocene deposits in Most na Soči, W Slovenia. V: ROŽIČ, Boštjan (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports*. 24. posvetovanje slovenskih geologov = 24th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, november 2019. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2019. [št.] 25, str. 41-44, ilustr. Geološki zbornik, 25. ISSN 0352-3802. [COBISS.SI-ID [2984533](#)]
- 14.** ZAJC, Marjana, URBANC, Janko, PEČAN, Urša, GLAVAN, Matjaž, PINTAR, Marina. Using GPR for determining soil horizons on different types of agricultural fields. V: ROŽIČ, Boštjan (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports*. 24. posvetovanje slovenskih geologov = 24th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, november 2019. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2019. [št.] 25, str. 155. Geološki zbornik, 25. ISSN 0352-3802. [COBISS.SI-ID [2987861](#)]
- 15.** ZAJC, Marjana, RMAN, Nina. Using UAV-based thermal imaging and GPR for investigating the Stavešinci mofettes - preliminary results. V: ROŽIČ, Boštjan (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports*. 24. posvetovanje slovenskih geologov = 24th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, november 2019. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2019. [št.] 25, str. 156. Geološki zbornik, 25. ISSN 0352-3802. [COBISS.SI-ID [2988117](#)]
- 16.** ZAJC, Marjana, RMAN, Nina. Using GPR for studying natural CO<sub>2</sub> vents = Uporaba georadarja za raziskovanje naravnih virov CO<sub>2</sub>. V: NOVAK, Matevž, RMAN, Nina. *Zbornik povzetkov = Book of abstracts*. 5. slovenski geološki kongres, Velenje, 3.-5. 10. 2018. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2018. Str. 91. ISBN 978-961-6498-60-9. [COBISS.SI-ID [2848597](#)]
- 17.** POGAČNIK, Željko, ZAJC, Marjana, HAFNER, Polona, VIŽINTIN, Goran. Določitev dinamike geomehanske nestabilnosti heterogenih hribin : primer regionalne ceste Morsko-Kanalski vrh = Determination of the dynamics of geomechanical instabilities of heterogeneous slopes : the case of the Morsko - Kanalski vrh regional road. V: NOVAK, Matevž, RMAN, Nina. *Zbornik povzetkov = Book of abstracts*. 5. slovenski geološki kongres, Velenje, 3.-5. 10. 2018. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2018. Str. 125. ISBN 978-961-6498-60-9. [COBISS.SI-ID [5229734](#)]
- 18.** ZAJC, Marjana, URBANC, Janko. Using GPR for defining groundwater vulnerability due to the impact of agricultural activity = Uporaba georadarja za ugotavljanje ranljivosti podzemne vode zaradi vplivov kmetijske dejavnosti. V: NOVAK, Matevž, RMAN, Nina. *Zbornik povzetkov = Book of abstracts*. 5. slovenski geološki kongres, Velenje, 3.-5. 10. 2018. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2018. Str. 136-137. ISBN 978-961-6498-60-9. [COBISS.SI-ID [2859349](#)]
- 19.** ZAJC, Marjana, POGAČNIK, Željko, GOSAR, Andrej. The use of GPR for determining sheath fold blocks in the heterogeneous horizons of subaquatic gravity flows in W Slovenia : the case of Anhovo. V: JEMEC AUFLIČ, Mateja (ur.). *Symposium programme : book of abstracts*. 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic - Balkan Region, Ljubljana - ReSyLAB 2017, 11-13 October 2017, Ljubljana, Slovenia. Ljubljana: Geological Survey of Slovenia, 2017. Str. 27. ISBN 978-961-6498-53-1. [COBISS.SI-ID [1366878](#)]

#### **1.17 Samostojni strokovni sestavek ali poglavje v monografski publikaciji**

- 20.** RMAN, Nina, ZAJC, Marjana. Naravni izvir CO<sub>2</sub> - Stavešinska mofeta Strmec. V: RMAN, Nina. *Strokovna ekskurzija Slovenskega geološkega društva (SGD) in Društva Slovenski komite mednarodnega združenja hidrogeologov - IAH (SKIAH), 13-14. oktober 2017*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2017. Str. 10. [COBISS.SI-ID [2666325](#)]
- 21.** ZAJC, Marjana. Predstavitev projekta Uporaba georadarja za ugotavljanje ranljivosti podzemne vode zaradi vplivov kmetijske dejavnosti. V: RMAN, Nina. *Strokovna ekskurzija Slovenskega geološkega društva (SGD) in Društva Slovenski komite mednarodnega združenja hidrogeologov - IAH (SKIAH), 13-14. oktober 2017*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2017. Str. 29. [COBISS.SI-ID [2669653](#)]

## 2.25 Druge monografije in druga zaključena dela

22. RMAN, Nina, LAPANJE, Andrej, MARKOVIĆ, Tamara, MARKIČ, Miloš, RAJVER, Dušan, ŠRAM, Dejan, BRENČIČ, Mihael, KOREN, Katja, ZAJC, Marjana, TORHAČ, Evgen, JUNEŽ, Peter, ŠOLAJA, Dragana, LARVA, Ozren, BRKIČ, Željka, SUTON, Branimir, CRLJEN, Martina, AVANIĆ, Radovan, ŠIMUNIĆ, Antun, PEH, Zoran, RMAN, Nina (urednik), BRENČIČ, Mihael (urednik), MARKOVIĆ, Tamara (urednik). *Geology, hydrogeology and geothermy of NE Slovenia and N Croatia = Geologija, hidrogeologija in geotermija SV Slovenije in S Hrvaške : Post Congress Field Trip*. Ljubljana: Geological Survey of Slovenia, 2018. 42 str., ilustr. ISBN 978-961-6498-62-3. [COBISS.SI-ID [296549376](#)]

---

## IZVEDENA DELA (DOGODKI)

### 3.16 Vabljeno predavanje na konferenci brez natisa

23. ZAJC, Marjana. *Geofizikalne preiskave - GPR pri detekciji globine podzemne vode na prodonosnih območjih : predavanje na seminarju Društva tehničnih vodij površinsko odkopavanje DTV PO 6. novembra 2019 v Narodnem domu v Logatcu*. [COBISS.SI-ID [2974805](#)]

## ZAKLJUČKI

Predmet raziskovalnega projekta je bil z neinvazivno metodo georadarja določiti različne lastnosti tal in matične podlage, ki bojo pripomogli k natančnejšemu določevanju ranljivosti podzemne vode na območju kmetijskih zemljin. Z georadarjem smo uspeli ločiti različne horizonte tal, določiti debelino vrhnje zaščitne plasti, globino do podzemne vode ter območja različnih zadrževalnih sposobnosti tal. Poleg teh parametrov smo določili tudi prisotnost več pojavov, ki vplivajo na dinamiko pretoka vode v podpovršje, t.j. razpoke in plastnatost ter kraške jame. Iz georadarskih profilov smo izdelali 3D modele podpovršja in s tem pridobili tudi podatke o prostorskem razširjanju posameznih elementov.

## LITERATURA

Allred, B. J., Daniels, J. J., and Ehsani, M. R. (ur.) 2008. Handbook of agricultural geophysics. Boca Raton, Florida. CRC Press LLC.

Astis. 2004. Podzemne vode čezmejnih vodonosnikov. Soča/Isonzo. Univerza v Novi Gorici. [Dostopano 6.12.2016] Pridobljeno od: [http://astis.ung.si/sites/default/files/astis/astis\\_slo.pdf](http://astis.ung.si/sites/default/files/astis/astis_slo.pdf)

Glavan, M. 2011. Vpliv spremenjene rabe zemljišč na količino in kakovost vode v reki Reki v Goriških Brdih in reki Dragonji : doktorska disertacija [na spletu]. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.

Goldscheider, N. in Drew, D. (ur.) 2007. Methods in Karst Hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology 26, International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, 264 pp.

Jurkovšek, B. 2013. Geološka karta Krasa 1:100.000 = Geological Map of Kras (Slovenia) 1:100.000. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.

Kirsch, R. (ur.). 2009. Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology. 2nd edition. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publication.

MOP - Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. 2009. Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja 2009-2015.

MOP - Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. 2015. Načrt upravljanja voda 2016-2021.

Ravbar, N. 2007. Vulnerability and risk mapping for the protection of karst waters in Slovenia. Application of the catchment of the Podstenjšek springs. Doktorska disertacija, Univerza v Novi Gorici. Nova Gorica.

Zajc, M. 2015. Optimizacija nizkofrekvenčnih georadarskih raziskav za karakterizacijo plitvih geoloških struktur. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.

Zajc, M., Celarc, B. in Gosar, A. 2015. Structural–geological and karst feature investigations of the limestone–flysch thrust-fault contact using low-frequency ground penetrating radar (Adria–Dinarides thrust zone, SW Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, vol. 73(12). pp. 8237-8249.

Zajc, M. in Urbanc, J. 2018. Using GPR for defining groundwater vulnerability due to the impact of agricultural activity = Uporaba georadarja za ugotavljanje ranljivosti podzemne vode zaradi vplivov kmetijske dejavnosti. V: Novak, M., Rman, N. Zbornik povzetkov = Book of abstracts. 5. slovenski geološki kongres, Velenje, 3.-5. 10. 2018. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2018. Str. 136-137.

Zajc, M., Gosar, A. in Celarc, B. 2018. GPR Study of a Thrust-fault in an Active Limestone Quarry (SW Slovenia). *Journal of environmental & engineering geophysics*, vol. 23, no. 4, str. 457-468. ISSN 1083-1363. DOI: 10.2113/JEEG23.4.457

Zajc, M. in Urbanc, J. 2019. Using GPR on a problematic agricultural field for groundwater protection in a karst environment. V: 10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 8 - 12 September 2019, The Hague, Netherlands. Houten: European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 5 str.

Zajc, M., Urbanc, J., Pečan, U., Glavan, M., Pintar, M. 2019. Using GPR for determining soil horizons on different types of agricultural fields. V: Rožič, B. (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports. 24. posvetovanje slovenskih geologov = 24th Meeting of Slovenian Geologists*, Ljubljana, november 2019. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2019. [št.] 25, str. 155. Geološki zbornik, 25.

Zajc, M. 2020. Uporaba georadarja za določanje geoloških struktur plitvo pod površjem. *Mineral & gradnja*. junij 2020, št. 3, str. 22-24.

Žabar, R., Gregorič, A., Čenčur Curk, B., Petrič, M., Prebil, T. in Bisaglia, M. 2014. Smernice za zaščito vodonosnikov [na spletu]. Autorità di bacino Alto Adriatico. [Dostopano 6.12.2016]. Pridobljeno od: [http://astis.ung.si/sites/default/files/astis/Smernice\\_slo.pdf](http://astis.ung.si/sites/default/files/astis/Smernice_slo.pdf)