



# Pregled uporabe georadarja na krasu

## Application of ground penetrating radar in karst environments: An overview

Teja ČERU<sup>1</sup> & Andrej GOSAR<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: teja.ceru@geo-zs.si

<sup>2</sup>Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova cesta 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>3</sup>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Prejeto / Received 4. 11. 2019; Sprejeto / Accepted 17. 12. 2019; Objavljeno na spletu / Published online 24. 12. 2019

*Ključne besede:* georadar, kras, jama, pogrezanje, epikras, kraški vodonosnik, kamnolom, brezstropa jama, jamski sedimenti

*Key words:* ground penetrating radar (GPR), karst, cave, subsidence, epikarst, karst aquifer, quarry, unroofed cave, cave sediments

### Izvelek

Kras kot kompleksen in heterogen sistem predstavlja za georadar velik izziv. Kljub vsemu pa lahko z dobro načrtovanimi georadarskimi raziskavami pridobimo dodatne informacije o plitvem podpovršju, kjer se odvija večina kraških procesov. Zaradi specifičnosti kraškega površja so v uvodnem delu predstavljene nekatere ovire in prilagoditveni pristopi pri raziskavah na krasu. Analiza pregleda objavljene literature je pokazala, da se georadar v kraških okoljih najpogosteje uporablja za zaznavanje jam in območij pogrezanj ter pri preprečevanju nenadnih porušitev tako v urbanih območjih kot tudi pri gradbenih posegih v prostor. Georadar se uporablja tudi pri raziskavah kraških vodonosnikov, epikrasa in raziskavah v kamnolomih. Poleg uveljavljenih aplikacij so predstavljene nekatere še neuveljavljene aplikacije, kot je uporaba georadarja pri raziskavah brezstropih jam in jamskih sedimentov. Glavni namen članka je prikazati in ovrednotiti možnosti uporabe georadarja v različnih kraških okoljih in spodbuditi njegovo uporabo za nekatere nove aplikacije in opozoriti na nujnost interdisciplinarnega pristopa v takšnih študijah.

### Abstract

Karst as an extremely complex and heterogeneous system, that presents a great challenge for the ground penetrating radar (GPR). However, properly planned GPR surveys can provide additional information about the shallow subsurface, where most karst processes take place. Due to the specific nature of the karst terrain, the introductory part presents some obstacles and adaptive approaches to karst research. An analysis of the published literature revealed that the GPR is most commonly used for detecting caves and subsidence areas and for preventing collapses in urban areas and for construction interventions. This is followed by exploration of karst aquifers, epikarst and quarry research. Some non-established applications are also presented, such as the use of a georadar in exploration of unroofed caves and cave sediments. The main purpose of this article is to demonstrate and evaluate the possibilities of using a georadar in different karst environments, to encourage its use in some new applications, and to emphasize the necessity of an interdisciplinary approach in such studies.

### Uvod

Kraški sistem sodi med najkompleksnejša geološka okolja pri hidrogeoloških, geotehnično-inženirskih in okoljskih raziskavah. Zaradi heterogenosti in nepredvidljivosti predstavlja kraški sistem za georadarske raziskave velik izziv, a z leti se njegova uporaba kljub vsemu veča. Z vidika zaščite podzemne vode na kraških območjih, ter zaradi ostalih nevarnosti, ki so posledica zakrasevanja (npr. nestabilnost tal), je vse večje zavedanje pomembnosti razumevanja kraških

procesov vodilo v hiter porast raziskav v zadnjih dveh desetletjih (Gutiérrez et al., 2014). Ključna prednost georadarja v primerjavi s seizmično refrakcijo/refleksijo in električno upornostno tomografijo (ERT) je visoka ločljivost, ki omogoča natančen vpogled v strukturo podpovršja ter relativno hitre in enostavne meritve (Schrott & Sass, 2008). Medtem ko z geološkimi, hidrogeološkimi in geomorfološkimi metodami raziskujemo le površje krasa oz. pridobimo le točkovne informacije iz globine (vrtine), nudijo geofizikalne metode zvezen niz podatkov.

Kras pokriva 12 % vsega površja Zemlje in je zaradi svoje raznolikosti in posebnosti predmet številnih študij v okviru temeljnih ali aplikativnih raziskav na različnih znanstvenih področjih (Andreo et al., 2010). Dejstvo, da karbonatne in evaporitne kamnine pokrivajo 20 % površja in da je četrtina prebivalstva odvisna od oskrbe pitne vode v kraških vodonosnikih (Gutiérrez et al., 2014), je vodilo v vse večji interes za raziskovanje tega sistema. Zaradi občutljivosti kraškega sistema so v takšnih okoljih potrebne posebne metode raziskav za zaščito pred okoljsko-inženirskimi problemi kot so onesnaževanje kraških vodonosnikov, pogrezanje tal, nastanek udornic in jam. V zadnjem času je bilo objavljene veliko pregledne literature, ki združuje in povezuje temeljno vedeje z aplikativnimi študijami na kraškem površju (Andreo et al., 2010; 2015; Waltham et al., 2005). Še pomembnejše so raziskave krasa na urbanih območjih in pri inženirsko-geotehničnih posegih v prostor (kamnolomi, gradnja cest in predorov) za zmanjševanje geološko pogojenih nevarnosti (geohazard).

V zadnjih 30 letih se je uporaba georadarja uveljavila na številnih področjih, čemur so v zadnjih 10 letih sledile objave preglednih člankov za različne aplikacije. Eden izmed prvih celovitih preglednih člankov na področju uporabe v geologiji obravnava uporabo georadarja v sedimentologiji (Neal, 2004). Pregled uporabe geofizikalnih metod pri geomorfoloških raziskavah sta podala Schrott & Sass (2008) in poudarila pomen integracije različnih metod ter opisala njihove prednosti in omejitve. V zadnjih nekaj letih so bili objavljeni tudi pregledni članki na področju gradbeništva (Wai-Lok Lai et al., 2018). Zajícová & Chuman (2019) sta podala pregled uporabe georadarja v študijah tal, kjer obravnavata določevanje vsebnosti vode, stratigrafije tal, vsebnosti soli in strukture tal, zaznavanje drevesnih korenin in koreninske biomase. Pregled raziskav z različnimi geofizikalnimi metodami na krasu so povzeli Chalikakis et al. (2011), ki so obravnavali prednosti in omejitve za nekatere najpogostejše aplikacije. Podrobnejši pregled, ki bi obravnaval različne aplikacije georadarja na krasu, še ni bil objavljen.

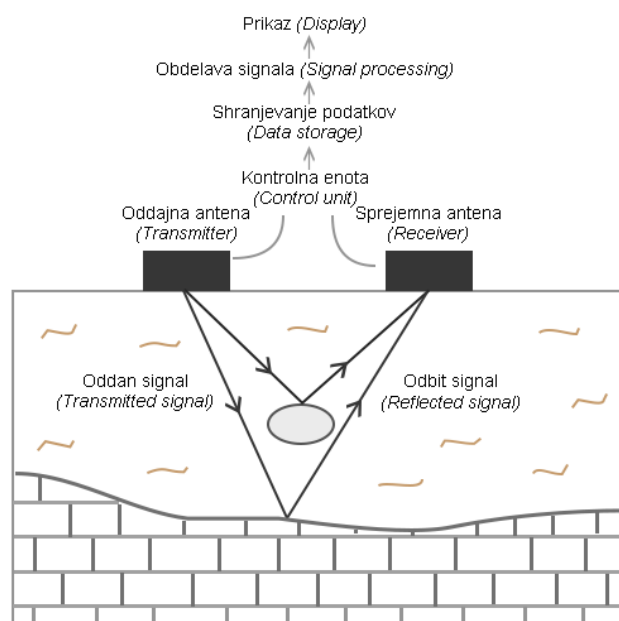
Ta prispevek predstavlja krajši povzetek teorije in raziskav, ki so bile narejene v okviru doktorskega dela (Čeru, 2019). V uvodnem delu so podane osnove, ki so pomembne za razumevanje delovanja georadarja ter njegove uporabe na krasu. Sledi analiza pregleda objavljene literature v bazah Web of Science (WoS) in Scopus. Jedro članka predstavlja pregled raziskav po različnih

aplikacijah s primeri radargramov. Predstavljene so nekatere najbolj uveljavljene uporabe ter tudi nekatere nove možnosti, ki so bile raziskane v okviru doktorata, kot je zaznavanje brezstropih jam in jamskih sedimentov z georadarjem.

## Osnove delovanja georadarja

Georadar oddaja kratke pulze elektromagnetnega (EM) valovanja v podpovršje, kjer se del vpadnega valovanja odbije (refleksija) zaradi kontrasta dielektričnih lastnosti na meji različnih snovi (Blindow et al., 2007). Globinski doseg georadarja je poleg električnih lastnosti materiala v največji meri odvisen od frekvence oddajnih anten, zato se v praksi glede na ciljno problematiko uporabljajo georadarski sistemi različnih frekvenc. Za uporabo na krasu so najprimernejši nizkofrekvenčni georadarski sistemi (25–250 MHz), ki omogočajo večji globinski doseg ob še sprejemljivi ločljivosti. Pri plitvejših raziskavah pa je zaželeno, da se meritve dopolnjujejo tudi z višjefrekvenčnimi antenami (> 250 MHz).

Metoda georadarja je po principu delovanja podobna refleksijski seizmiki in tehnikam sonarjev (Davis & Annan, 1989). Metoda temelji na penetraciji EM valov, ki jih v kratkih impulzih pošiljamo z oddajno anteno v tla (Davis & Annan, 1989). Del vpadnega valovanja se na meji različnega materiala odbije zaradi različnih električnih lastnosti (Blindow et al., 2007), kjer ga na površju zazna sprejemna antena (sl. 1). Pri tem se meri dvojni čas potovanja valov (ang. *two-way travel time*) od oddajne antene do mejnih ploskev (reflektorji) in nazaj do sprejemne antene.



Sl. 1. Shematski prikaz delovanja georadarja.

Fig. 1. Schematic principle of GPR measurement.

Najpomembnejši lastnosti, ki vplivata na odbojnost na meji različnih plasti in na globinski doseg valovanja, sta dielektričnost ( $\epsilon$ ) in električna prevodnost ( $\sigma$ ) snovi (Blindow, 2006). Na električne lastnosti nevezanega sedimenta v največji meri vpliva prostorninski delež vode, na spremembe električnih lastnosti kamnin pa vrsta kamnine in delež razpok zapolnjenih z vodo in/ali zrakom. Razlike v električnih lastnostih materialov vplivajo na hitrost in dušenje ter delež odbitega EM valovanja. Le dovolj velik kontrast dielektričnih lastnosti med različnimi snovmi in s tem sprememba v hitrosti EM valovanja povzroči, da pride do odboja na meji, kar omogoča razlikovanje med različnimi objekti v podpovršju (Reynolds, 2011).

### Ločljivost metode ter izguba energije in dušenje signala

Ker se EM valovanje od oddajne antene širi v obliki konusnega stožca, se amplituda zaradi sferičnega razširjanja valovanja z oddaljevanjem od antene zmanjšuje (Reynolds, 2011). Zato se ločljivost in posledično velikost objekta, ki ga lahko zaznamo, z globino spreminja. Vertikalna ločljivost georadarskega sistema je funkcija predvsem frekvence in teoretično velja, da je vertikalna ločljivost enaka  $\frac{1}{4}$  valovne dolžine ( $\lambda/4$ ). V praksi je manjša od teoretične, saj nanjo vplivajo še številni drugi dejavniki. Horizontalna ločljivost pa je odvisna od frekvence in dielektričnih lastnosti snovi. V tabeli 1 so podane vrednosti za vertikalno in horizontalno ločljivost za dva različna materiala in dve frekvenci, ki se najpogosteje uporabljata pri raziskavah na krasu. Vidimo, da se horizontalna ločljivost z globino hitro manjša.

Na izgubo energije in dušenje EM valovanja vpliva veliko dejavnikov. V prvi vrsti na zmanjšanje amplitude vpliva sama oblika oz. geometrija georadarskega signala. Ko potuje od antene v tla, se ustvari t.i. talni spoj (ang. *ground coupling*), kjer pride do prvih izgub EM valovanja. Izguba je odvisna tudi od značilnosti in kakovosti georadarskega sistema ter frekvence, saj so višje frekvence podvržene večjemu dušenju. Poleg tega pa na dušenje vplivajo predvsem dielektrične, električne in magnetne lastnosti kamnin. Na te pa vplivajo poroznost, zrnavost, mineralna sestava, prisotnost vode, prisotnost soli in ostale značilnosti materiala, zato je težko vnaprej predvideti vse dejavnike, ki imajo vpliv na razširjanje EM valovanja.

V praksi se na kraškem terenu izkaže, da ima na dušenje signala velik vpliv heterogenost sistema. Praznine, neraven in nezvezen kontakt matične podlage s tlemi z vmesnimi globokimi žepi in nehomogenosti znotraj karbonatnih kamnin povzročajo sipanje energije in vplivajo na zmanjšanje energije signala. Veliko omejitev na krasu predstavljajo tudi drobnozrnati sedimenti, ki zapolnjujejo depresije, jame in kraške žepe, saj zaradi svojih lastnosti pomembno vplivajo na izgubo signala. Sedimenti in tla na krasu vsebujejo precejšen delež glinenih mineralov, ki bistveno vplivajo na dušenje signala, še posebej ob večji prisotnosti vode. Kljub temu, da tla na karbonatnih tleh navadno niso debela, se je izkazalo, da je globinski doseg 50 MHz antene bistveno manjši (med 5–20 m, v povprečju pa med 8–15 m) v primerjavi z meritvami v kamnolomih, kjer je teren raven in na površju ni sedimentov (globinski doseg do 30 m). Na razgibanem površju prihaja do izgub energije tudi zaradi slabega stika med anteno in tlemi.

Tabela 1. Teoretična ločljivost 50 in 250 MHz antene pri različnih vrednostih dielektrične konstante na določeni globini.  
Table 1. Theoretical resolution of 50 and 250 MHz antenna with different dielectric constants at certain depth.

	Globina (m) Depth (m)		Vertikalna ločljivost (m) Vertical resolution (m)		Horizontalna ločljivost (m) Horizontal resolution (m)	
	50 MHz	250 MHz	50 MHz	250 MHz	50 MHz	250 MHz
Apnenec Limestone $\epsilon = 7$ ( $v = 0,11$ m/ns)	5	2	1,134	0,227	2,335	0,820
	10	4	1,134	0,227	4,102	1,528
	15	6	1,134	0,227	5,870	2,235
	20	8	1,134	0,227	7,638	2,942
	30	10	1,134	0,227	11,173	3,649
*Povprečna tla Average soil $\epsilon = 16$ ( $v = 0,075$ m/ns)	5	2	0,750	0,15	1,588	0,560
	10	4	0,750	0,15	2,800	1,045
	15	6	0,750	0,15	4,013	1,530
	20	8	0,750	0,15	5,226	2,015
	30	10	0,750	0,15	7,651	2,500

\*povprečna tla (average soil): Povprečna vrednost v razponu za različna tla (average value in the range for different soils).



V tabeli 2 so strjene glavne prednosti in nekatere omejitve georadarja na krasu.

Tabela 2. Prednosti in pomanjkljivosti georadarske metode.  
Table 2. Advantages and limitations of the GPR method.

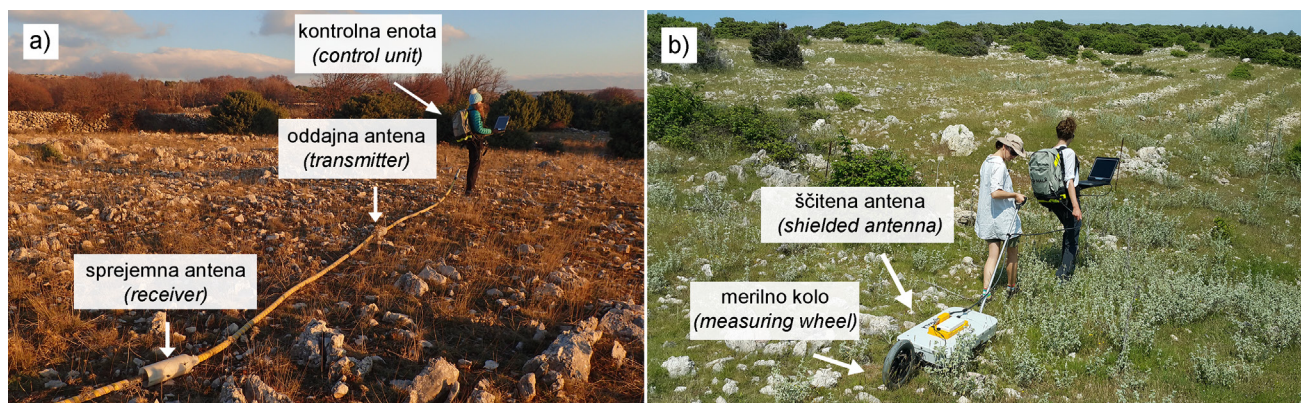
PREDNOSTI ( <i>Advantages</i> )	OMEJITVE ( <i>Limitations</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nedestruktivnost - še posebej pomembna v urbanih okoljih</li> <li><i>Non-destructiveness - particularly important in urban environments</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Globinski doseg je majhen v visoko prevodnih okoljih (sedimenti z večjim deležem gline, prisotnost vode)</li> <li><i>The depth of penetration is limited in highly conductive environments (clayey sediments, presence of water)</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Največja ločljivost med vsemi geofizikalnimi metodami</li> <li><i>The highest resolution out of all geophysical methods</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zaradi stika antene s tlemi mora biti teren raven in enakomeren, kar je na kraškem površju redkost</li> <li><i>Because the antenna must be in contact with the ground, the terrain must be level and even, which is rare in karst</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Z mrežo vzporednih in prečnih profilov z nadaljnjo obdelavo in modeliranjem dobimo 3D modele</li> <li><i>A network of parallel and transverse profiles with further processing and modelling can create 3D models</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interpretacija radargramov je kompleksna, sploh v kraškem sistemu</li> <li><i>The interpretation of radargrams is complex, especially in the karst system</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativno hitre in enostavne meritve v primerjavi z nekaterimi ostalimi geofizikalnimi metodami</li> <li><i>The measurements are relatively quick and easy compared to other geophysical methods</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metoda ni primerna za materiale s podobnimi dielektričnimi lastnosti</li> <li><i>The method has limitations if dielectric properties of materials are similar</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zvezen niz podatkov v primerjavi z raziskovalnim vrtnanjem</li> <li><i>Continuous data information compared to drilling data</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uspešnost metode je odvisna od danih pogojev na terenu, pri čemer ima velik vpliv vsebnost vlage (padavine)</li> <li><i>The success of the method depends on field conditions, where moisture content (precipitation) has a high influence</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Priročna metoda pri preliminarnih raziskavah zaradi relativno enostavnih in hitrih meritev</li> <li><i>A convenient method for preliminary research due to relatively simple and fast measurements</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pri neščitenih antenah lahko odboji od nadpovršinskih objektov onemogočijo interpretacijo radargramov</li> <li><i>For unshielded antennas, reflections from surface objects may prevent the interpretation of the radargrams</i></li> </ul>

### Izvajanje meritev na kraškem terenu

Kraški teren je večinoma neraven in težko prehoden, kar za georadarske meritve predstavlja precejšen omejitveni dejavnik. Pred začetkom meritev zato traso profilov očistimo, kolikor je to mogoče, da omogočimo čim boljši stik antene s tlemi. Če je teren dovolj raven, se uporabljajo toge ščitene antene, s katerimi pa je premikanje po terenu polnem kamenja in škrapelj nemogoče ali pa je stik antene s tlemi preslab. Za večino raziskav v okviru doktorata je bila zato uporabljena georadarska oprema Mala ProEx (Švedska) z 50 MHz RTA (*»Rough Terrain Antenna«*) neščiteno (ang. *unshielded*) anteno. Ta se je za geološke aplikacije izkazala kot zelo uspešna tako

zaradi globinskega dosega kot zaradi samega sistema, ki omogoča meritve tudi na bolj razgibanih in poraščenih območjih. Meritve smo glede na namen in terenske pogoje dopolnjevali tudi s ščiteno (ang. *shielded*) 250 MHz anteno.

Glavna prednost RTA sistema je upogljivost cevi, ki vključuje oddajno in sprejemno anteno. Takšna konfiguracija omogoča meritve na škrapljastem terenu (sl. 2a). Po drugi strani pa takšen sistem onemogoča ščiteno sevanje anten, kar pomeni, da oddajna antena EM valovanje oddaja v vse smeri in dobimo tudi nadpovršinske odboje, ki v neugodnih pogojih lahko zakrivajo reflektorje v podpovršju. Če je mogoče, zato meritve načrtujemo v mesecih, ko na drevesih ni listja in bujne podrasti ter tako zmanjšamo vpliv



Sl. 2. Georadarski sistem Mala ProEx z a) neščiteno 50 MHz RTA (*»Rough Terrain Antenna«*) anteno; b) ščiteno 250 MHz anteno.

Fig. 2. GPR system Mala ProEx with a) an unshielded 50 MHz RTA (*»Rough Terrain Antenna«*); b) a shielded 250 MHz antenna.



nadpovršinskih odbojev. Poleg tega je takrat teren tudi bolj prehodan in posledično stik antene s tlemi boljši. Izogibamo se tudi daljnovodom, ograjam in ostalim objektom na površju, ki lahko predstavljajo izvor nadpovršinskih motenj.

Za plitvejša raziskava smo meritve dopolnjevali tudi s ščiteno 250 MHz anteno (sl. 2b). Oddajna in sprejemna antena sta ščiteni v skupnem ohišju, zato antena oddaja signal samo v smeri tal. S tem je omogočeno selektivno izboljšati železne signale in zmanjšati motnje. Poleg prednosti pa se možnost pojava večkratnega odbijanja signala (ang. *ringing*) zaradi sistema znatno poveča. Ščitenje antene nikoli ni popolno, zato včasih tudi pri ščitjenih antenah dobimo nadpovršinske odboje (Annan, 2009), ki se jih lahko napačno interpretira. Zato je uporaba neščitenih anten včasih boljše izbira, če nam pogoji na terenu to omogočajo.

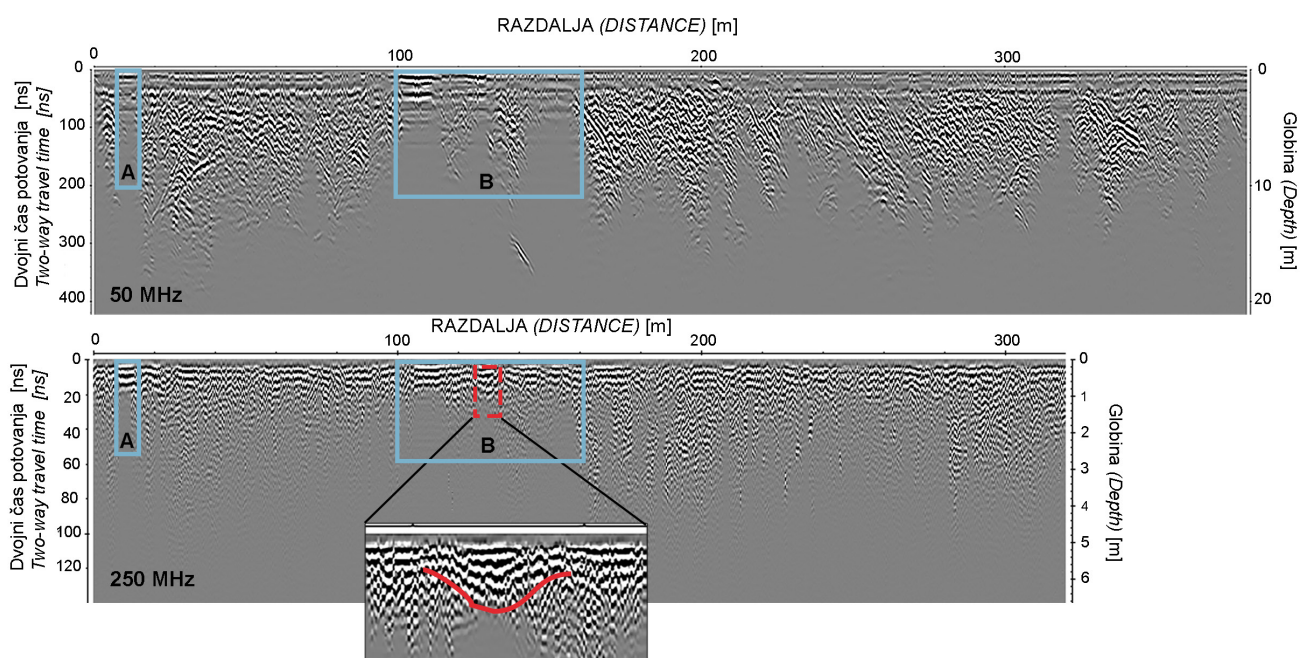
### Izbira antene in primerjava radargramov različnih frekvenc

Ustrezna izbira frekvence antene georadarskega sistema je ključnega pomena pri načrtovanju meritev, saj frekvenca vpliva na globinski doseg in ločljivost metode. Glede na kontrast fizikalnih lastnosti ciljne strukture (jama, vrtača, cevi, prelom, geološka bariera...) v primerjavi z okolno kamnino, ciljno globino in velikostjo proučevane strukture, se odločimo za ustrezno frekvenco. Pred izbiro ustrezne antene je potrebno

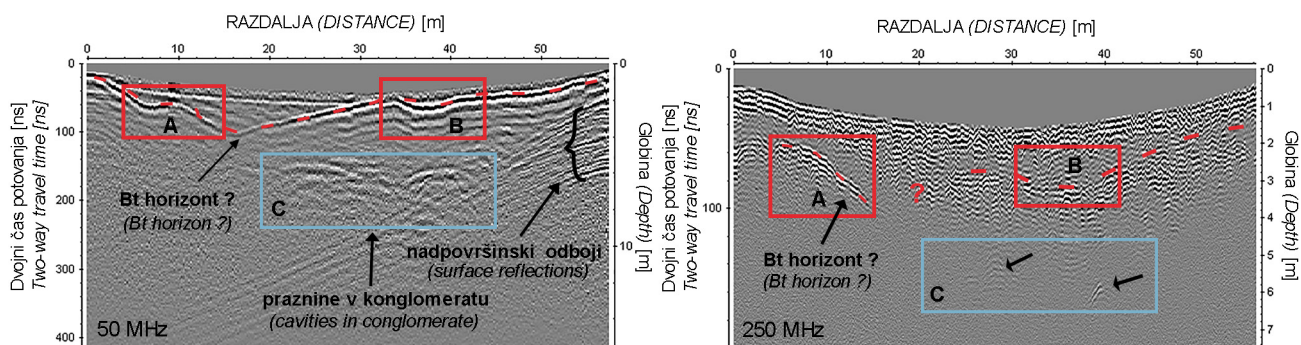
vedeti v kakšnih pogojih se kraške oblike pojavljajo, približno kakšnih dimenzij so, ter na kateri globini pričakujemo pojav, ki ga želimo zaznati. Če pa je le mogoče in smiselno, meritve izvedemo z več različnimi frekvencami.

Za primerjavo radargramov različnih frekvenc sem izbrala dva primera, izmerjena v različnih terenskih pogojih. Prvi profil (sl. 3) prikazuje območja povezav med segmenti brezstropne jame na otoku Krk v karbonatih (Čeru et al., 2018a). Zaradi velikega kontrasta v dielektrični konstanti med sedimenti brezstropnega jamskega sistema in okoliškim kraškim terenom se ta območja jasno odražajo tako na radargramih 50 MHz kot tudi 250 MHz antene. Območja anomalij (A in B) se jasneje vidijo na radargramu 50 MHz antene, kjer je dušenje signala na območjih večje debeline sedimentov izrazitejše v primerjavi z 250 MHz anteno. Na radargramu 250 MHz antene se zaradi boljše ločljivosti antene lepo vidi skledasto obliko povezav (povečan detajl slike 3).

Drugi primer (sl. 4) prikazuje georadarski profil preko vrtače v pleistocenskem konglomeratu na Kranjskem polju (Čeru et al., 2017), kjer so lepo vidne razlike med 50 MHz neščiteno in 250 MHz ščiteno anteno. Pri 250 MHz anteni ne dobimo nadpovršinskih odbojev od dreves. Zaradi velike debeline tal je globinski doseg obeh anten manjši kot v primeru brezstropnih jam v apnencih. Če primerjamo radargrama obeh fre-



Sl. 3. Primerjava radargramov 50 in 250 MHz antene, kjer anomaliji A in B predstavljata večjo debelino sedimentov (povezava segmentov brezstropne jame). Radargram 250 MHz antene zaradi boljše ločljivosti kaže skledasto obliko na sredini anomalije B. Fig. 3. Comparison of the 50 and 250 MHz radargrams, where interpreted anomalies A and B represent greater thickness of sediments (the connections between segments of an unroofed cave). The radargram of the 250 MHz antenna shows a bowl-shaped structure in the centre of anomaly B.



Sl. 4. Primerjava radargramov dveh frekvenc (50 in 250 MHz) na primeru profila čez vrtačo v konglomeratu (Čeru et al., 2017).  
Fig. 4. Comparison of radargrams of two frequencies (50 in 250 MHz) in the case of a profile over a doline in a conglomerate (Čeru et al., 2017).

kvenc, 250 MHz antena poda bistveno manj informacij kot 50 MHz antena. Pedološki horizont Bt je na profilu 50 MHz antene zvezen, medtem ko pri 250 MHz anteni ni v celoti sledljiv. Prav tako niso jasni in izraziti odboji od praznin v dnu vrtače, kot je to vidno pri 50 MHz anteni.

Iz obeh predstavljenih primerov vidimo, da je potrebno vsak teren obravnavati ločeno, prav tako je zaželena uporaba več frekvenc. Testne meritve pri umerjanju metode so pomembne, saj nam pokažejo, katera frekvenca je primernejša za dane terenske pogoje in cilj raziskav.

### Obdelava podatkov

Striktne navodila za obdelavo georadarskih podatkov ne obstajajo, razen za nekatere osnovne postopke kot je odstranitev zamika signala in določitev ničelnega časa, ki so nujni. Izbira drugih postopkov in njihovega zaporedja pa je prilagojena konkretnim podatkom. Pri izbiri postopkov je zelo pomembno dobro poznavanje lastnosti preučevanega območja. Nekateri napredni postopki obdelave lahko podajo boljše informacije, če je

ciljna struktura dobro definirana, in kjer vnaprej poznamo velikost, obliko objekta in lastnosti podpovršja, da so postopki sploh smiselni, kar pa je pri raziskavah na krasu pogosto nemogoče. Zaradi slabšega globinskega doseg pri večini raziskav, sem nekoliko več časa namenila ojačenju amplitude. Vsak radargram sem obdelala z različnimi funkcijami in nastavitvami, da sem pridobila najboljši rezultat.

Vsako območje zahteva specifično obdelavo, a pri večini radargramov sem uporabila zaporedje postopkov, ki so prikazani v tabeli 3.

Postopki so prikazani na primeru radargrama obdelanem v programu ReflexW (sl. 5). Anomalija kaže na povezavo med dvema večjima depresijama (okvir na sl. 5). Območje večje debeline sedimentov dokazuje povezavo teh oblik v brezstropjamski sistem. Nekateri naprednejši postopki kot je migracija in dekonvolucija so bili uporabljeni za posebne namene. Z vzporedno mrežo profilov lahko pridobimo 3D model podpovršja, kjer dobimo predstavo o razširjanju iskanih objektov v prostoru. Programska okolja poleg 3D modelov omogočajo tudi prikaz prereзов po globini in dolžini.

### Uporaba georadarja na krasu

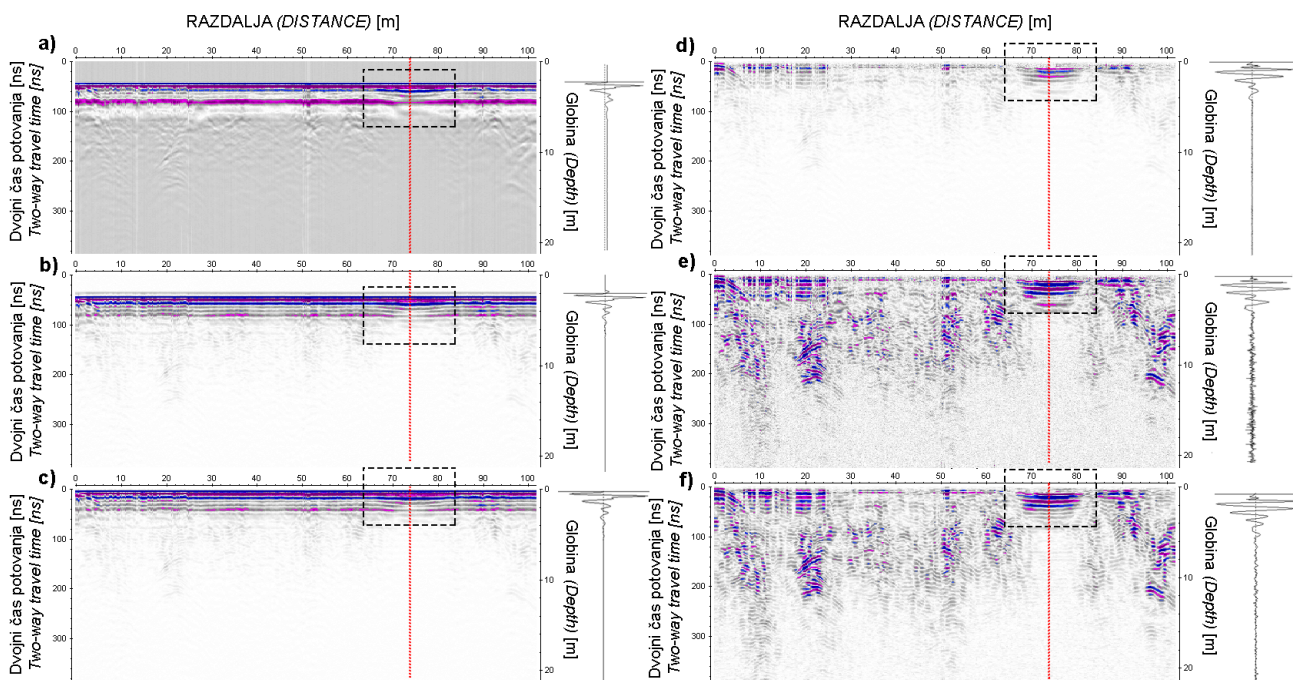
Georadar se je v začetku uporabljal za reševanje različnih geoloških problemov, predvsem pri inženirskih in okoljskih raziskavah ter na področju glaciologije. Šele kasneje se je metoda uveljavila na številnih drugih področjih, med drugim tudi za raziskave na krasu.

Za pregled uporabe georadarja na krasu sem uporabila objavljeno literaturo v podatkovnih bazah Scopus in Web of Science (WoS). Z iskalnim vnosom (*title-abs-key (gpr) or title-abs-key (ground and penetrating and radar) and title-abs-key (karst\*)*) dobimo v bazi Scopus 297 zadetkov in v bazi WoS z iskalnim vnosom, ki je ekvivalenten iskanju v Scopus bazi (*topic (title, abstract, author keywords, keywords Plus): (ground*

Tabela 3. Zaporedje postopkov obdelave radargramov.  
Table 3. Processing sequence of radargrams.

POSTOPKI OBDELAVE ( <i>Processing steps</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>odstranitev zamika signala (<i>»subtract mean-dewow«</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>določitev ničelnega časa pri prvem negativnem vrhu signala s postopkom korekcije maksimalne faze (<i>»correct max. phase«</i>) in prestavitvijo ničelnega časa (<i>»move start time«</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>odstranitev ozadja (<i>»background removal«</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>funkcija ojačenja amplitude (<i>»amplitude correction«</i>): <ul style="list-style-type: none"> <li>upadanje energije (<i>»energy decay«</i>)</li> <li>avtomatsko ojačenje amplitude (<i>»automatic gain control-AGC«</i>)</li> <li>ročno ojačenje amplitude (<i>»manual gain [y]«</i>)</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>pasovno prepustno filtriranje (<i>»bandpass frequency filtering«</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>2D filtriranje (<i>»median xy filter«</i> in <i>»subtracting average«</i>)</li> </ul>





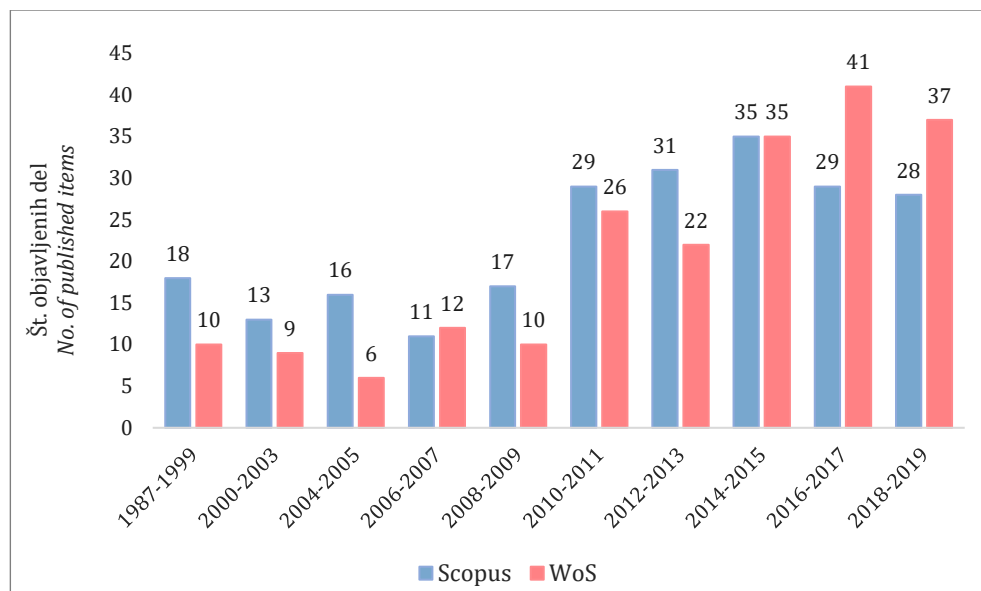
Sl. 5. Zaporedje postopkov obdelave profila 50 MHz antene, ki je bil uporabljen pri večini profilov: a) surov radargram; b) odstranitev zamika signala; c) določitev ničelnega časa; d) odstranitev ozadja; e) ročno ojačenje amplitude; f) pasovno prepustno filtriranje. Vpliv postopka na izbrano sled (označena rdeče) je prikazan desno ob profilu.

Fig. 5. Sequence of processing steps for the 50 MHz antenna that was used for most profiles: a) raw radargram; b) subtract mean-dewow; c) determination of time zero; d) background removal; e) manual amplification of amplitude; f) bandpass filtering. The impact of processing steps on the marked trace (red line) is shown to the right of the profile.

*penetrating radar or gpr*) and topic: (*karst\**)), 244 zadetkov. Glavna razlika med zadetki v obeh bazah je delež prispevkov s konferenc. V bazi Scopus je zavedenih več prispevkov s konferenc, nabor člankov pa je podoben. Po pregledu vsebin člankov in prispevkov je očitno, da je večina prispevkov na konferencah s področja gradbeništva in geotehnike, medtem ko so vsebine člankov bolj raznolike in obravnavajo tudi nekoliko bolj temeljne krasoslovne tematike.

Največji porast objav sledimo po letu 2009, od takrat dalje je letno število prispevkov s konferenc in člankov bolj ali manj konstantno (sl. 6).

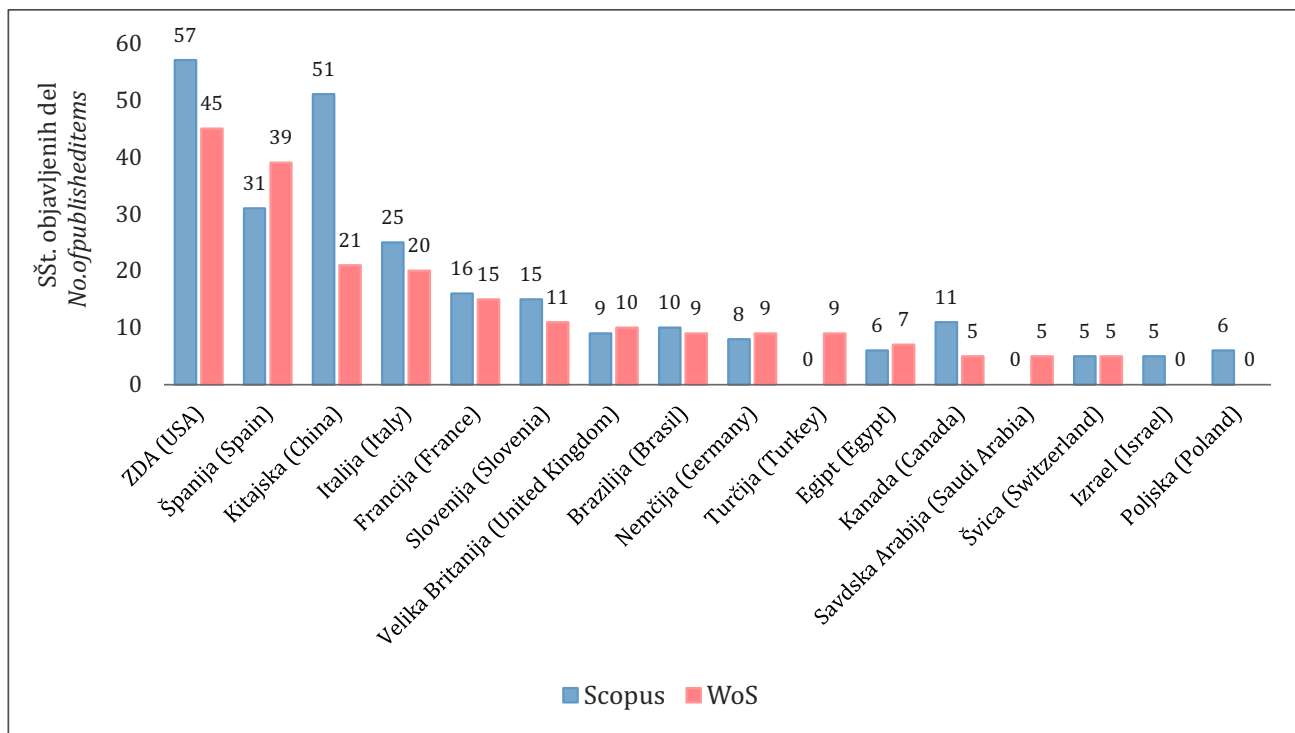
Graf slike 7 prikazuje število objav po državah, za katere pa so značilni različni interesni cilji raziskav. V ZDA prevladujejo raziskave območij pogrezanja (ang. *subsidence*) oz. nenadnih udorov (ang. *hazardous sinkhole*) in raziskave hidrogeoloških značilnosti v kraških vodonosnikih. Na Kitajskem je uporaba georadarja pove-



Sl. 6. Prikaz števila objavljenih del po obdobjih v bazah Scopus in WoS.

Fig. 6. Number of published items by period in Scopus and WoS databases.





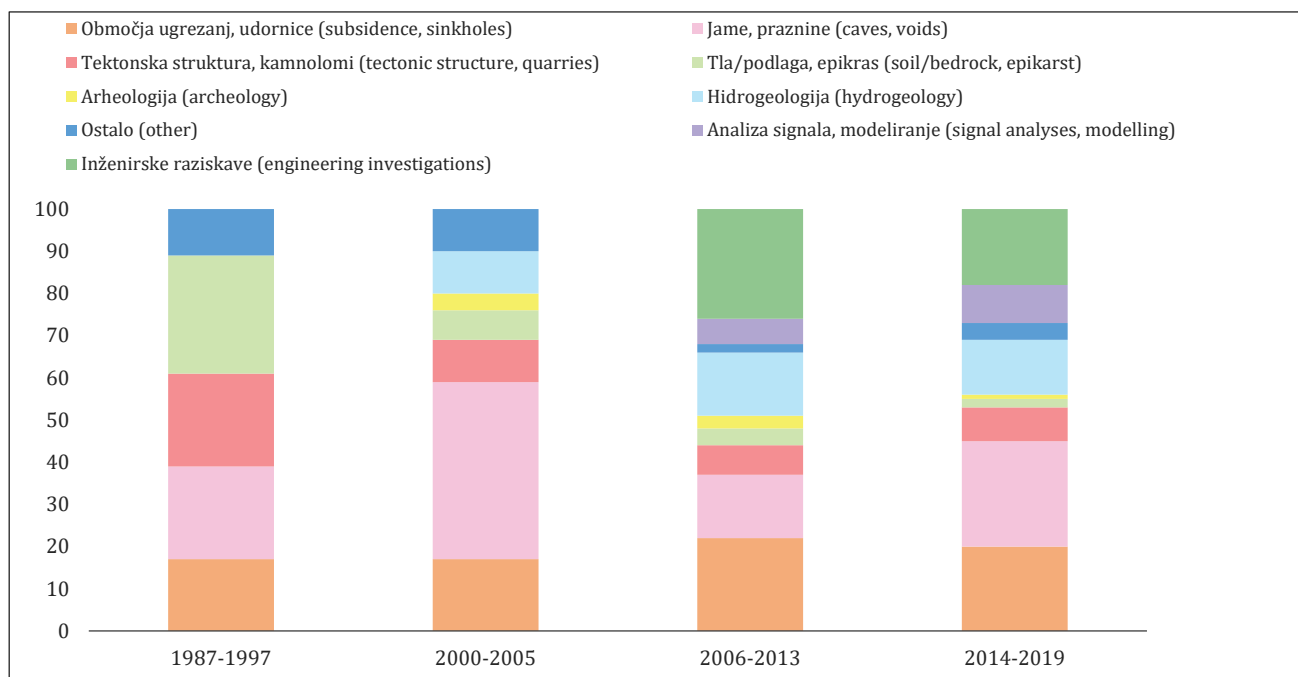
Sl. 7. Število objavljenih del po državah v obdobju med 1987–2019.

Fig. 7. The number of published items by countries in the period 1987–2019.

zana predvsem z gradbeno-inženirskimi posegi v prostor. Večina raziskav v Španiji je osredotočena na preučevanje procesov zakrasevanja v evapornih kamninah, kjer se georadar aplicira za zaznavanje in določevanje obsega območij pogrezanja v sadri in anhidritu. V Italiji prevladujejo arheološke raziskave v zakraselih apnencih in študije zaznavanja plitvih jam in območij nestabilnosti. Tudi v Sloveniji je bilo do sedaj uspešno

izvedenih že nekaj študij z nizkofrekvenčnim georadarjem za detekcijo kraških pojavov v apnencih.

Za analizo uporabe georadarja na krasu sem v bazi Scopus posamično pregledala in izbrala 227 relevantnih člankov in prispevkov z različnih konferenc. V nabor objavljenih del sem vključila vse raziskave, ki obravnavajo vsebine povezane s krasom, in jih uvrstila v kategorije glede na glavni



Sl. 8. Pregled objavljenih del po obdobjih glede na glavni cilj oz. področje raziskave.

Fig. 8. Review of published items by period according to the main objective of the research problem.

Wcilj raziskave (sl. 8). Iz grafa je razvidno, da se je georadar sprva uporabljal predvsem za zaznavanje praznin in jam, strukturno tektonskih značilnosti kamnin in pri raziskavah v kamnolomih ter za raziskave epikraške cone oz. za določanje meje tla/podlaga. Precejšen delež raziskav je bil že v začetku uporabe georadarja na krasu usmerjen na zaznavanje območij ugrezanj. Z leti je število aplikacij naraslo in pričele so se raziskave kraških vodonosnikov in študije v okviru arheoloških raziskav, ki pa so najmanj povezane s kraškimi vsebinami. Po letu 2006 do danes prevladujejo georadarske raziskave pri inženirsko-geotehničnih posegih v prostor, tovrstne študije večinoma obsegajo zaznavanje praznin in strukturno-tektonske značilnosti kamnin. Poleg tega je vse več raziskav, ki se ukvarjajo z analizo signala in z modeliranjem EM valovanja.

### Pregled po različnih aplikacijah

Večina raziskav povezanih s kraškimi pojavi je aplikativnega značaja. Georadar se uporablja za zaznavanje praznin, strukturnih značilnosti kamnin v kamnolomih, kraških vodonosnikih, pri gradbenih posegih v prostor in tudi v arheologiji. Temeljne raziskave, ki bi obravnavale kraška vprašanja, ki niso povezana z oceno tveganj in napovedovanj nevarnosti (ang. *risk assessment, hazard*), so redka. Večina študij posredno obravnava kraški sistem, kjer so glavni cilj raziskav posledice zakrasedanja kamnin, ki lahko povzročijo škodo oz. tveganje za nevarnost (pogrezanje, udiranje) oz. ranljivost kraškega sistema (kraški vodonosniki).

V nadaljevanju so po različnih aplikacijah predstavljene objavljene ali lastne raziskave ter podane prednosti in omejitve georadarske metode.

#### Jame in praznine

Najbolj pogosta uporaba georadarja na kraškem površju je zaznavanje jam in praznin v povezavi z inženirsko-geotehničnimi posegi v prostor in na območjih posedanj in ugrezanj. Prazen jamski prostor se navadno dobro odraža na radargramih zaradi velikega kontrasta v dielektrični konstanti med kamnino in zrakom. Seveda je treba upoštevati, da so lahko praznine deloma ali popolnoma zapolnjene s sedimentom, kar nakazuje hitrost razširjanja EM valovanja, ki jo dobimo s prileganjem hiperbole.

Georadar je primeren za zaznavanje jam do globine 30 m, seveda v odvisnosti od izbrane frekvence in terenskih pogojev. Pomembno je, da poznamo oz. predvidevamo globinski doseg pri določeni frekvenci v danih pogojih na terenu

ter vertikalno in horizontalno ločljivost metode (tabela 1). Pri tem je pomembna predvsem horizontalna ločljivost georadarja, ki se z globino manjša, kar pomeni, da na večjih globinah lahko zaznamo le večje jame. Martínez-Moreno et al. (2013, 2014) so podali pregled raziskav z različnimi geofizikalnimi metodami ter približno globino, kjer so zaznali jame. Globina detekcije podpovršinskih praznin v študijah, ki so vključevale metodo georadarja, je znašala med 4–28 metri. Za raziskave globljih jam (40–80 m) se je izkazalo, da je primernejša uporaba različnih električnih metod v kombinaciji z magnetnimi in/ali gravimetričnimi metodami (Martínez-Moreno et al., 2013). Metoda georadarja za zaznavanje jam in manjših praznin je primerna večinoma največ do globine 30 m. Georadarske raziskave zaznavanja jam in manjših praznin ter določanje geometrije in razširjanje praznih prostorov v podpovršju se največkrat dopolnjujejo z ostalimi elektromagnetnimi in električnimi metodami (Brown et al., 2011; Carrière et al., 2013; El-Qady et al., 2005; Gómez-Ortiz & Martín-Crespo, 2012; Lazzari et al., 2010), redkeje z gravimetričnimi (Beres et al., 2001; Mochales et al., 2008; Leucci & De Giorgi, 2010) in seizmičnimi metodami (Cardarelli et al., 2010). V večini naštetih raziskav je bil cilj zaznati jame in praznine, v nekaterih pa se je georadar uporabil tudi kot komplementarno metodo pri preučevanju nastanka jam in njihovih zapolnitev (Murphy et al., 2008). V arheoloških študijah so georadar uporabili tudi za zaznavanje in lociranje jam v apnencih, znotraj katerih se lahko nahajajo sedimenti primerni za izkopavanje (Chamberlain et al., 2000).

V teoriji se jamski prostor na radargramih odraža kot hiperbolični odboj. Takšen odboj dobimo, če je profil usmerjen prečno na razširjanje jame in je ta v preseku polkrožne oblike. V praksi se velikokrat izkaže, da so ti odboji kompleksnejši, in zaradi nehomogenosti, kot so različne geološke plasti, strukturne značilnosti (razpoke, prelomi), ne vedno tako očitni. Na obliko in značaj anomalije vpliva tudi velikost, oblika in globina jame, zapolnitev ter tudi terenski pogoji na površju. Poleg tega je potrebno upoštevati vse možne dejavnike, ki bi lahko na radargramih predstavljali motnjo oz. šum, npr. odboji od dreves, ograj in električnih napeljav.

Lep primer anomalije nad jamo predstavlja radargram na sliki 9 posnet nad jamo Biserujko na otoku Krku. Vhodni del jame predstavlja velika dvorana polkrožne oblike, kar se na radargramu jasno odraža z odbojem hiperbolične oblike. V praksi je takšnih primerov malo, navadno so

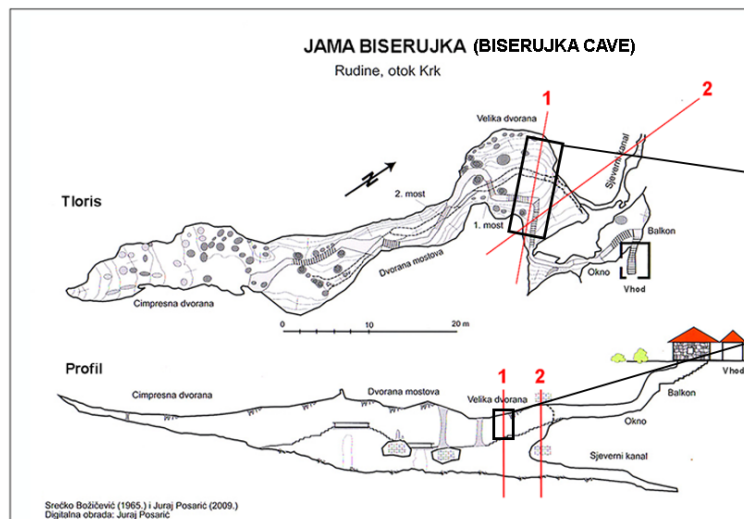
odboji od jam in praznin kompleksnejši. To prikazuje slika 10, kjer sta prikazana dva profila nad vhodno dvorano Najdene jame pri Lazah na Planinskem polju. Na profilu 1, kjer smo meritev izvajali prečno nad vhodno dvorano, se ta odraža z eno večjo hiperbolo na globini 10 m (sl. 10a). Povsem drugačen radargram kaže profil 2, kjer smo merili v vzdolžni smeri nad vhodno dvorano (sl. 10b). Celotna dolžina profila se nahaja nad jamsko dvorano, ki se odraža z manjšimi difrakcijskimi hiperbolami po celotni dolžini. Te se nahajajo na različnih globinah med 5 in 14 metri (rdeče puščice). Vhodna dvorana je zelo razgibane oblike z jamskim stropom na različnih globinah, zato dobimo tako kompleksen radargram.

Kljub temu, da je zaznavanje jam najbolj razširjena in relativno enostavna uporaba georadarja, je dobljen radargram lahko zelo kompleksen. Izdelava sintetičnih modelov in modeliranje je zato bistvenega pomena pri interpretaciji in inverziji georadarskih podatkov (Beres et al., 2001; Leucci & De Giorgi, 2010).

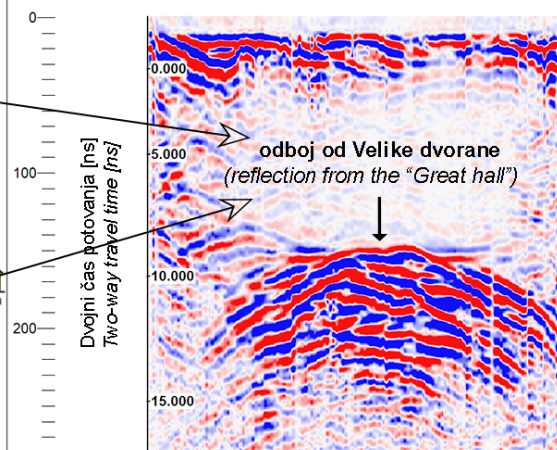
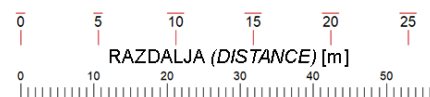
### Območja udorov in pogrezanj

Na krasu zaradi procesov zakrasedanja v pod površju prihaja do nenadnih porušitev, kar je lahko nevarno, še posebej v urbanih okoljih. Proces, ki vodi do nastanka udorov in pogrezanj, so različni. Obstajajo številne genetske klasifikacije, kar pa presega namen tega prispevka.

Načrt jame (Cave plan)

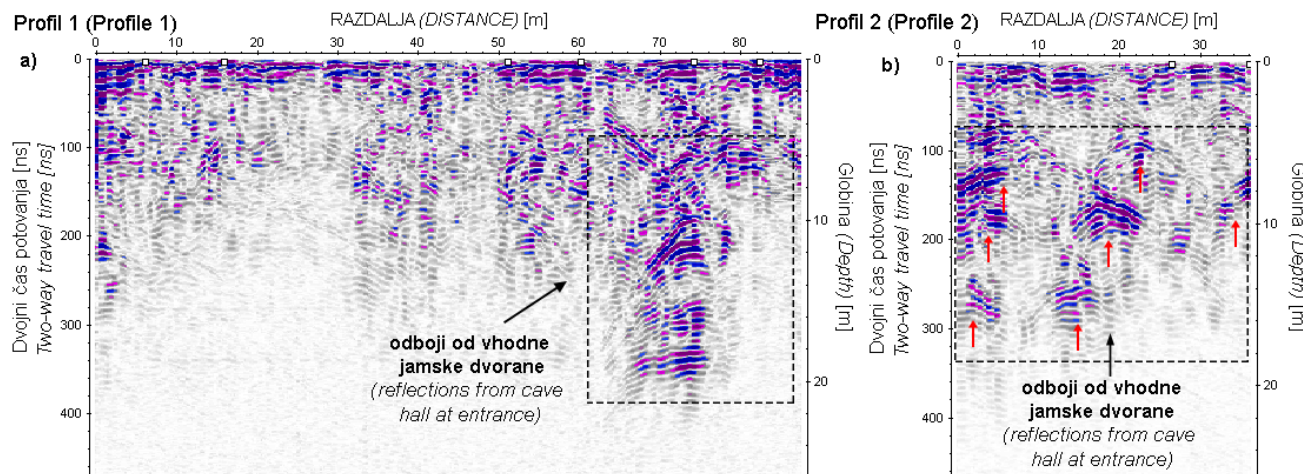


Profil 1 (Profile 1)



Sl. 9. Primer radargrama nad jamo Biserujko na Krku. Dvorana je velika in polkrožne oblike, zato izmerjeni prečni profil nad jamo povzroči jasno hiperbolično anomalijo.

Fig. 9. Example of a radargram above the Biserujka cave on Krk. The hall is large and of a semi-circular shape, so the measured transverse profile above the cave causes a clear hyperbolic anomaly.



Sl. 10. Primer meritev nad Najdeno jamo, kjer je radargramski značaj na dveh profilih različen glede na obliko jame in smer profila. Zaradi kompleksne oblike jame se ta odraža zelo različno, kot nepopolna hiperbola (profil 1, pravokotno na smer razširjanja vhodne dvorane) in več manjših odbojev (profil 2, v smeri daljšega razširjanja vhodne dvorane).

Fig. 10. Example of measurements above Najdeno cave, where the radargrams of two profiles are different depending on the cave shape and the direction of the profile. Due to the complex shape of the cave hall, it reflects very differently, for example as incomplete hyperbole (profile 1) and several smaller reflections (profile 2).



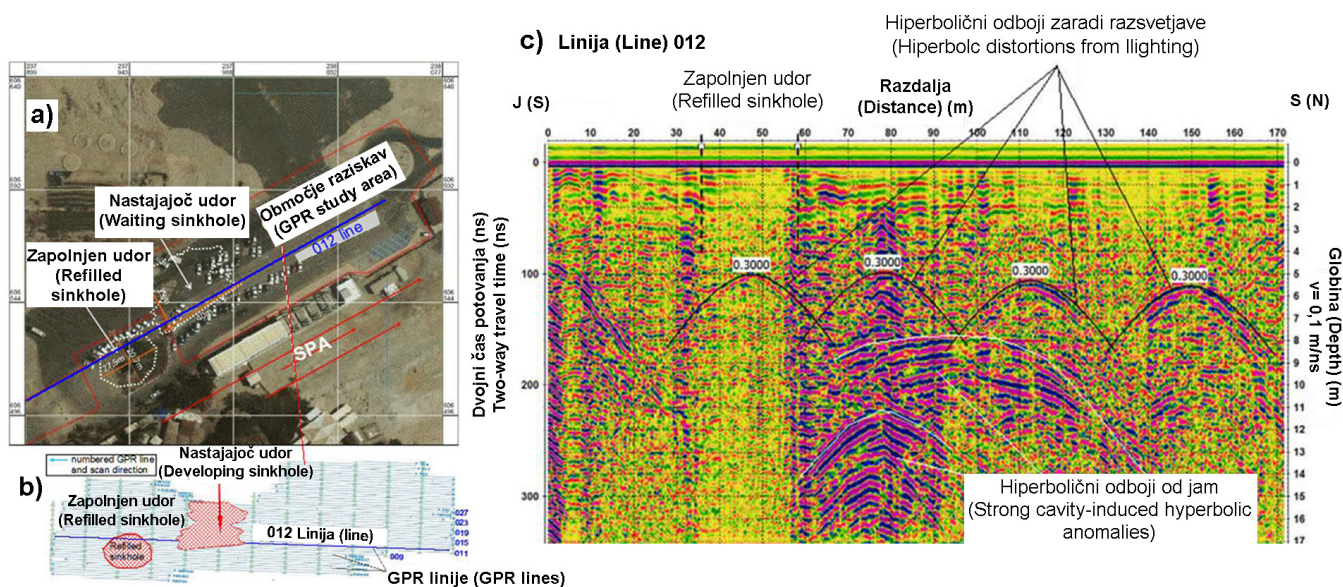
Omenila bi samo, da se izraz »*doline*« za vrtačo uporablja bolj v evropski literaturi, medtem ko se v Severni Ameriki ter v inženirsko-okoljskih raziskavah pogosteje uporablja izraz »*sinkhole*«, ki se nesistematično uporablja tako za vrtače kot tudi udornice, za udornice in območja pogrezanj pa tudi »*collapse sinkhole*« in redkeje »*collapse doline*« (Carbonel et al., 2015; Gutiérrez et al., 2014).

Na območjih, ki so podvržena procesom udiranja (ang. *collapse*) ali pogrezanja (ang. *subsidence*), je pomembno raziskati, kaj se dogaja v podpovršju, saj na površju pogosto ni vidnih znakov zakrasevanja. Ko se poruši ravnotežje, lahko pride do nenadnih udorov, ki lahko povzročijo ogromno škode. Večje območje takšnih pojavov predstavlja Florida in druga območja v ZDA kot so Teksas, Alabama in Pensilvanija. Drugi, počasnejši proces, pogrezanje oz. posedanje, pa prav tako povzroča nestabilnosti, ki vplivajo na infrastrukturo urbanih območij.

Poleg kraških pojavov v karbonatnih kamninah se podobni procesi odvijajo v evaporitnih kamninah kot je sadra, halit in anhidrit. Proces zakrasevanja v evaporitnih kamninah so bistveno hitrejši od tistih v karbonatnih, zato so območja udorov in pogrezanj predmet številnih geofizikalnih raziskav. Proces v evaporitnih kamninah se v marsikaterem pogledu precej razlikujejo od procesov v karbonatnih kamninah. Poleg hitrej-

šega raztapljanja so takšne kamnine tudi mehansko manj odporne in stabilne ter bolj duktilnega značaja. Georadarsko metodo so uporabili v številnih raziskavah vzdolž Mrtvega morja (Frumkin et al., 2011; Ezersky et al., 2017; Ronen et al., 2019). V zadnjih 30 letih je bilo evidentiranih na stotine udorov vzdolž Mrtvega morja tako v Izraelu kot v Jordaniji, pri čemer je prišlo do več nesreč na urbanih območjih (Frumkin et al., 2011). Jame oz. praznine na tem območju se pojavljajo večinoma na globini 20–70 m in pod nivojem slane podzemne vode, kar predstavlja glavni omejitveni dejavnik za georadarsko metodo, zato so bile za detekcijo globljih jam uporabljene tudi druge geofizikalne metode. Integracija geofizikalnih metod z ostalimi geološkimi metodami je bistveno izboljšala zaznavanje praznin in potencialnih območij za nastanek udara. Georadar se je izkazal za najboljšo izbiro pri zaznavanju praznin v plitvem podpovršju do globine 15 m. Na sliki 11 je predstavljen takšen primer georadarskih meritev, kjer so z meritvami določili mesta potencialnih udorov (Ronen et al., 2019). Samo nekaj mesecev po meritvah je prišlo do udara. Odboji od praznin so večinoma zelo kompleksni.

Procese zakrasevanja v neogenskih evaporitih intenzivno preučujejo tudi na območju Zaragoze v Španiji (Rodriguez et al., 2014; Carbonel et al., 2015; Sevil et al., 2017). V Španiji izdanki evaporitnih kamnin (sadra, anhidrit, halit) neogenske,



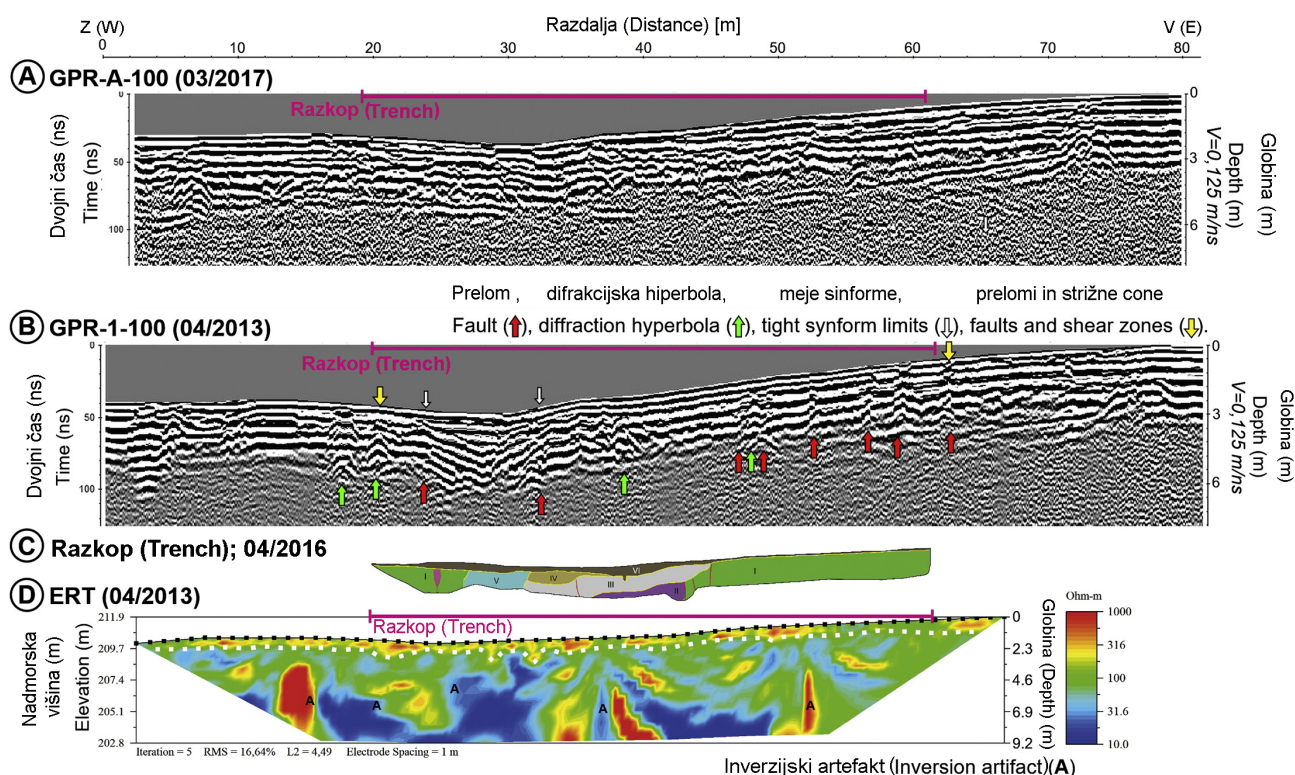
Sl. 11. Primer uporabe georadarja (ščitena 100 MHz antena) na območju udornic ob zahodni obali Mrtvega morja (iz Ronen et al., 2019 z dovoljenjem): a) zračni posnetek območja raziskav; b) shematski prikaz situacije trase profila 012; c) radargram linije 012, kjer območja močnih refleksov (hiperboli) pripadajo jamam na globini med 9–13 m.

Fig. 11. Example of the use of a georadar (shielded 100 MHz antenna) in the area of sinkholes along the western coast of the Dead Sea (from Ronen et al., 2019 with permission): a) an aerial view of the survey area; b) a schematic situation of the route of the profile 012; c) the radargram of line 012, where areas of strong reflections (hyperbola) belong to caves at depths between 9–13 m.

paleogenske in triasne starosti predstavljajo okoli 7 % površja (Gutiérrez et al., 2008). Zaradi hitrega raztapljanja prihaja do hitrih sprememb na površju, ki so odraz večinoma podzemnih procesov zakrasevanja. Zaradi varnosti in visokih stroškov sanacij so ta območja v zadnjih 20 letih vključena v številne raziskave, da bi bolje razumeli procese v evaporitnih kamninah, tok podzemne vode in nenazadnje, da bi preprečili tovrstne nesreče. V okviru geoloških, sedimentoloških in geomorfoloških raziskav sta bila georadar in električna upornostna tomografija velikokrat aplicirana. Rodríguez et al. (2014) so raziskali možnosti uporabe georadarja za karakterizacijo dveh depresij na pokritem krasu, ki sta nastali z različnima procesoma. Rezultati georadarskih meritev so tako omogočili zanesljivo določitev mej depresij, značilnosti njihove notranje geometrije z deformacijskimi značilnostmi. Na podlagi pridobljenih podpovršinskih podatkov so lahko sklepali na mehanizem pogrezanja in ocenili magnitudo le-tega. Metoda je imela tudi nekatere pomanjkljivosti. Zaradi prisotnosti glinenih in meljastih sedimentov znotraj vrtač je bil glo-

binski doseg omejen, ponekod pa so nadpovršinski odboji (električna napeljava, zidovi, drevesa) povzročili motnje na radargramih. V raziskavi so uporabili neščiteni 100 MHz in 50 MHz anteni ter 180 MHz ščiteno anteno. Bistveno boljše rezultate so pridobili z neščiteno anteno. Na podlagi rezultatov neščitene antene so naredili celovito rekonstrukcijo območij pogrezanja in določili naklon plasti. Na radargramih ščitene antene so zaznali le meje depresij. V okviru interdisciplinarnih raziskav rezultate geofizikalnih metod dopolnjujejo tudi z razkopi (Carbonel et al., 2014; 2015; Sevil et al., 2017). Integracija georadarja in električne upornostne tomografije (ERT) z razkopi je prikazana na sliki 12.

V zadnjih 15 letih so tovrstne raziskave poleg zaznavanja jam, ki so lahko povezane tudi z mesti udorov, najbolj razširjena uporaba georadarske metode. Študije, ki obravnavajo to problematiko so številne (Delle Rose & Leucci, 2010; Gómez-Ortiz & Martín-Crespo, 2012; De Giorgi in Leucci, 2014; Bumpus in Kruse, 2014; Pueyo-Anchuela et al., 2015; Kaufmann et al., 2018), saj predvsem v urbanih območjih predstavljajo takšni pojavi eno



Sl. 12. Dopolnjevanje geofizikalnih metod z razkopi in geokronološkimi metodami (iz Sevil et al., 2017 z dovoljenjem): a) in b) depresija jasno vidna na radargramu slike 100 MHz antene. Profil iz leta 2013 je bistveno boljše kvalitete kot isti izmerjen leta 2017, kar je verjetno posledica večje vsebnosti vode v času meritev leta 2017; c) rezultati razkopa; d) rezultati ERT, kjer območje pogrezanja ni vidno, je pa viden stik z matično podlago.

Fig. 12: Integration of geophysical methods with excavations and geochronological methods (from Sevil et al., 2017 with permission): a) and b) the sinkhole is clearly visible on the radargram of the 100 MHz antenna image. The 2013 profile is of significantly better quality than the one measured in 2017, which is probably due to the higher water content at the time of the 2017 measurements; c) results of the excavation; d) ERT results where the subsidence area is not visible but contact with the bedrock is evident.



od najpogostejših oblik nevarnosti na kraškem površju zaradi česar so takšne raziskave velikokrat interdisciplinarne in jih dopolnjujejo nekatere tudi dražje metode. S tega vidika tovrstne raziskave prinašajo informacije, ki so preverjene z različnimi metodami, kar prispeva k boljšemu poznavanju georadarja v različnih terenskih pogojih, in imajo metodološki doprinos.

### Epikras in kontakt tla/matična podlaga

Georadar se pri raziskavah tal največkrat uporablja za določevanje globine, lateralnega razširjanja in variabilnosti pedoloških horizontov, ki so značilni za posamezne skupine tal (Doolittle, 1987; Puckett et al., 1990; Stroh et al., 2001). Georadar lahko zazna mejne horizonte, ki se dovolj razlikujejo v pedološko-mineraloških lastnostih, da meje na radargramih predstavljajo prepoznaven reflektor. Z georadarjem načeloma ne moremo zaznati majhnih sprememb v značilnostih tal, kot so barva, struktura in poroznost ter prehodnih pedoloških horizontov (AB, AC, BC) in zveznih sprememb znotraj posameznih horizontov (Doolittle & Butnor, 2009).

Visoko amplitudne reflekse povzročajo nenadne spremembe na mejah med pedološkimi horizonti, ki jih povzročajo razlike v vsebnosti vlage, fizikalne razlike (spremembe v teksturi tal in gostoti) in/ali kemijske spremembe (prisotnost organskega materiala, kalcijevega karbonata in seskvioksidov). Eden izmed bolj značilnih horizontov je argilični horizont (Bt), ki vsebuje večji delež glinenih mineralov in ima tudi večjo gostoto (Collins & Doolittle, 1987). Prav tako je jasna meja v spodičnih horizontih (Bh, Bfe) zaradi prisotnosti humusa in seskvioksidov, ki se kopičijo iz višje ležečih horizontov.

Bt horizont smo zaznali na območju vrtač v konglomeratih, kjer so tla dobro razvita. Bt horizont je na območju pleistocenskih konglomeratov tudi precej debel. Na podlagi oblike Bt horizonta glede na današnjo morfologijo antropogeno spremenjenih vrtač smo z georadarskimi meritvami pridobili informacije o obliki in globini vrtač preden so bile te obdelane (Čeru et al., 2017).

Z georadarjem načeloma lahko zaznamo tudi mejo med sedimentom in matično podlago, če je meja nenadna in dovolj kontrastna. Navadno je ta meja prepoznavna kot visoko-amplitudni reflektor, ki je zvezen. Kljub vsemu pa velikokrat meja med nevezanim sedimentom in matično podlago ni jasna in je z georadarjem ne moremo zaznati, če prehod ni oster in raven, in če je zanj značilno, da se na meji pojavljajo večji kosi preperele matične podlage (Doolittle & Butnor, 2009). To je

značilno za kraški sistem, kjer je meja med sedimentom in matično podlago neravna s pojavi kraških žepov in zveznim prehodom tal v preperele matično podlago. V takšnih okoliščinah se je izkazalo, da meje med sedimentom in karbonatno podlago z georadarjem večinoma ne moremo zaznati.

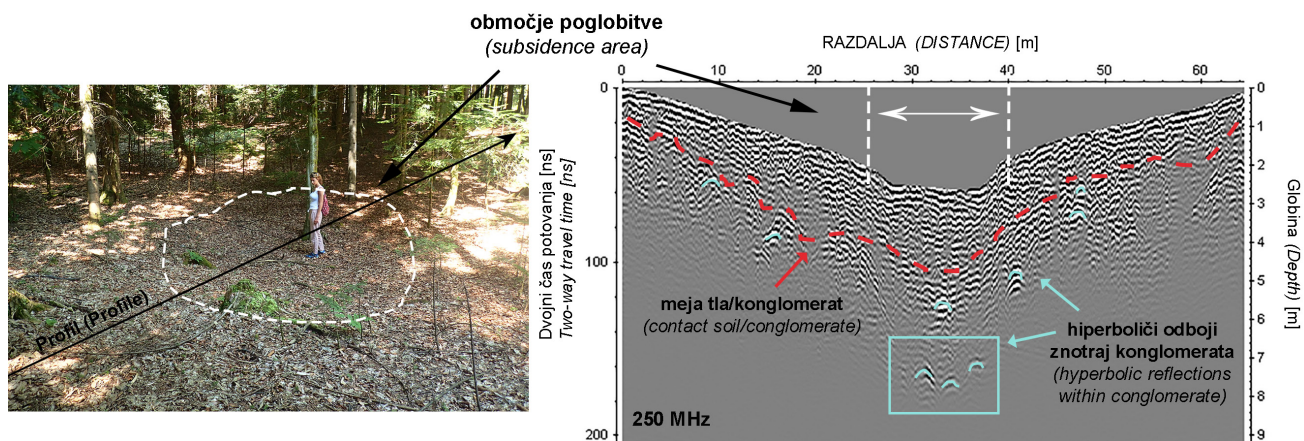
V začetkih uporabe georadarja na krasu je bilo objavljenih nekaj raziskav, kjer so določevali mejo med tlemi in karbonatno podlago, medtem ko se je v zadnjih 20 letih število tovrstnih raziskav bistveno zmanjšalo. Doolittle & Collins (1998) sta uporabila EM indukcijo in georadar na krasu na dveh različnih lokacijah, Floridi in Pensilvaniji. Ugotovila sta, da imata obe metodi svoje pomanjkljivosti glede na lastnosti tal in specifične preučevanega terena. Interpretacija zaradi slabega globinskega dosega in ločljivosti ter premajhnega kontrasta v električnih lastnostih različnih materialov ni bila vedno jasna. Z uporabo 120 MHz antene so bile meritve na tleh v Pensilvaniji neuspešne, saj je bilo dušenje signala zaradi prisotnosti argiličnega horizonta preveliko, da bi lahko zaznali mejo med tlemi in karbonatno podlago. Metoda EM indukcije pa je v primeru bolj prevodnih tal dala boljše rezultate. Georadar je bil uspešnejši pri določevanju mej med peskom in apnencem ter med peskom, glino in zakraselim apnencem (Collins et al., 1990).

V Sloveniji karbonatne kamnine in depresije prekrivajo tla s precejšnjim deležem glinene komponente, zato je meja med tlemi in matično podlago težje določljiva. Prav tako tudi debeline in kontakta med zapolnitvijo in matično podlago v kraških depresijah na različnih območjih raziskav v Sloveniji večinoma nismo zaznali. Debelina sedimentov je bila prevelika oz. so lastnosti sedimentov onemogočale večji globinski doseg.

V primeru raziskav vrtač v konglomeratih smo kontakt določili posredno. Takšen primer raziskav je predstavljajo območje vrtač v najmlajšem konglomeratnem zasipu (Podbrezje), kjer smo kontakt določili na podlagi pojavljanja hiperbol, ki nakazujejo praznine oz. heterogenosti v konglomeratu. V dnu vrtače je na terenu vidna manjša poglobitev, kar se s pojavi večkratnih hiperboličnih odbojev (moder pravokotnik na sliki 13) odraža tudi na radargramu. Nekatere vrtače v konglomeratih so nastale s sufozijskimi procesi, pri katerih se nesprijet material spira skozi razpoke v spodaj ležeč zakrasel konglomerat, zato so na površju ponekod vidni grezi ali manjše poglobitve.

Poleg tipičnih kraških pojavov se je georadar izkazal kot primerna metoda tudi za karakterizacijo pokritega krasa in določitev meje med





Sl. 13. Na podlagi pojavljanja hiperboličnih anomalij (modra barva) smo določili približno mejo med tlemi in konglomeratom (rdeča črtkana linija).

Fig. 13. The contact between soil and conglomerate bedrock (red dashed line) was defined by occurrences of hyperbolic diffractions (blue colour) related to the heterogeneities in conglomerate.

epikraško cono in kompaknejšim apnencem pod njo (Tallini et al., 2006). V raziskavi so uporabili 40 MHz neščiteno in 100 MHz neščiteno anteno. Globinski doseg je v danih pogojih znašal 12 m (40 MHz) oz. 4 m (100 MHz), zato je večina meritev izvedenih s 40 MHz anteno. Tovrstne študije so zelo redke.

### Kraški vodonosniki

Zelo pomembne so tudi raziskave kraških vodonosnikov, ki pogosto predstavljajo zelo ranljiva območja zajetij pitne vode. Georadar predstavlja komplementarno metodo za boljše razumevanje hidrodinamičnega mehanizma strukturno heterogenega kraškega hidrosistema, kjer na podlagi lociranja prelomov, kraških kanalov, votlin in ostalih kraških značilnosti lahko lažje karakteriziramo in konceptualiziramo strukturo vodonosnika. Pri raziskavah kraških vodonosnikov je navadno glavni cilj locirati razpoklinske cone in kanale, prelome in jame ter določiti geometrijo vseh teh elementov v prostoru in podatke iz vrtin dopolniti z georadarskimi rezultati (Al-Fares et al., 2002). Cunningham (2004) je na podlagi rezultatov študije ugotovil, da obstaja empirična povezava med izmerjenimi parametri iz vrtin (poroznost, hidravlična prevodnost) in poroznostjo pridobljeno iz slik kartažnih meritev v vrtinah ter amplitude signala georadarskih podatkov. Ugotovil je, da se amplituda radarskega signala zmanjšuje z večanjem poroznosti in hidravlične prevodnosti določene s podatki iz vrtin, kar omogoča kvalitativno ocenjevanje vertikalne in horizontalne porazdelitve poroznosti in hidravlične prevodnosti. Carrière et al. (2013) so kombinirali georadar in ERT za karakterizacijo kraških kamnin in z namenom boljše razumeti prenos vode znotraj nezasičene

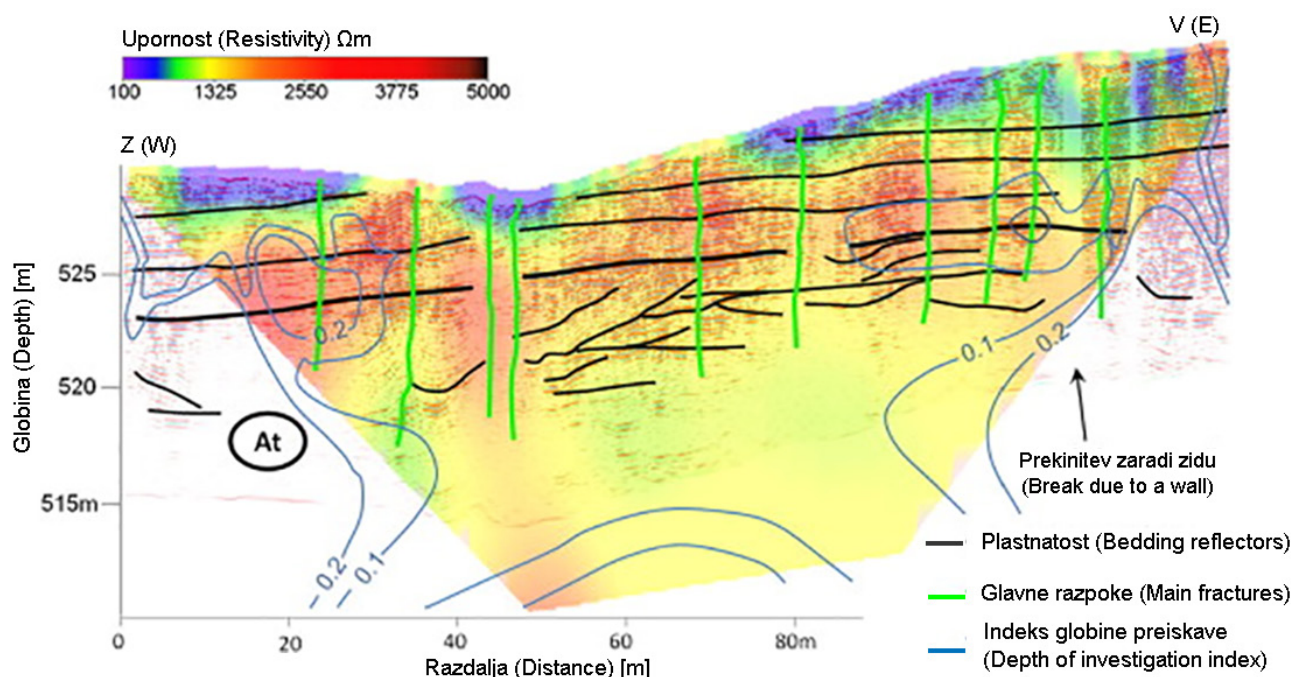
cone vodonosnika in skladiščenja vode. Z integracijo dopolnjujočih metod in poznavanjem geologije tega območja so uspeli podrobneje karakterizirati kamnine preučevanega območja (sl. 14). Kombinacijo ERT metode in georadarske so uporabili tudi v raziskavi vodonosnika v Kanadi (Martel et al., 2018). Izvedena je bila multidisciplinarna študija za boljše poznavanje podzemne dinamike toka in jamskih poti. Geofizikalne metode so dopolnilni s sledilnimi poskusi in vrtnami ter radarsko interferometrijo (InSAR) za detekcijo premikov na stavbah na območjih zapolnjene depresije.

Mount et al. (2014) so georadar uporabili za določitev porazdelitve poroznosti v vodonosniku in določitev lateralnega razširjanja kraških struktur. Na podlagi porazdelitve difrakcijskih hiperbol na radargramih so določili spremembe v hitrosti elektromagnetnega valovanja in iz tega je bila izračunana poroznost z uporabo petrofizikalnega modela CRIM (ang. *complex refractive index model*).

Iz opisanih in prikazanih primerov je za namen hidrogeoloških raziskav nujen multidisciplinaren pristop, ki poleg geofizikalnih metod zajema tudi hidrogeološke in druge metode.

### Kamnolomi

V kamnolomih karbonatnih in evaporitnih kamnin procesi zakrasedanja, ki vodijo do nastanka jam, kraških kanalov in udorov, povzročajo številne težave pri eksploataciji mineralne surovine. Pogoji za georadarske meritve v odprtih površinskih kamnolomih so pogosto dobri, saj je površina ravna, preperinskega sloja, ki bi oviral prodiranje EM valovanja v globino ni. Poleg tega lahko rezultate georadarskih meritev vzporejamo z detajlnim geološko-strukturnim kartiranjem in ve-



Sl. 14. Primer integracije rezultatov georadarja in električne upornostne tomografije (Carrière et al., 2013 z dovoljenjem). Podatki obeh metod so skladni, hkrati pa se dobro dopolnjujejo, pri čemer georadar poda boljše informacije o strukturi plitvejšega področja. Medtem ko je globinski doseg georadarja znašal do 12 m oz. na območjih, kjer je bil prisoten glinen material, celo samo dva metra, so rezultati ERT dopolnili podatke v globino.

Fig. 14. Integration of georadar and ERT results (Carrière et al., 2013 with permission). The data of both methods are consistent, but at the same time they complement each other well, with the georadar providing more detailed information on the structure of the shallower subsurface. While the depth of the georadar measurements was up to 12 m, or even just 2 metres in areas where clayey material was present, the ERT results completed the georadar data in greater depths.

likokrat tudi s podatki iz vrtin. Georadarska metoda se uporablja pri različnih fazah pridobivanja kamna. Lahko se uporablja v začetnih fazah pri splošni oceni kvalitete kamnoloma oz. bodočega nahajališča mineralnih surovin ali pri podrobnejših preiskavah, pri načrtovanju eksploatacijskega materiala, kjer je pomembno natančno določiti smeri prelomnih struktur, razpok in jam.

Za karakterizacijo strukturno-geoloških in hidrogeoloških značilnosti pri načrtovanju eksploatacijskih dejavnosti v kamnolomih se je georadar izkazal za zelo uporabno metodo v številnih študijah. Grandjean & Gourry (1996) sta uporabila georadar za zaznavanje in kartiranje razpok ter drugih kraških struktur v kamnolomu marmorja. Z uporabo 300 in 900 MHz antene so pridobili informacije do globine 15 oz. 8 m in naredili model razpok. Grasmueck et al. (2013) so uporabili 100 in 200 MHz anteni za raziskavo sub-vertikalnih razpok in jam v zapuščenem kamnolomu krednega apnenca. Z gosto mrežo vzporednih meritev in z ustreznimi naprednimi postopki obdelave (3D migracija podatkov) so naredili 3D model poteka vseh razpoklinskih con in določili glavne smeri prevladujočih razpok. V Sloveniji je bil georadar uporabljen v kamnolomu Rodež za zaznavanje kraških pojavov (Zajc et al., 2014).

V kamnolomih se lahko uporablja tako ščiten kot tudi neščiten sistem anten. Pri neščiteni an-

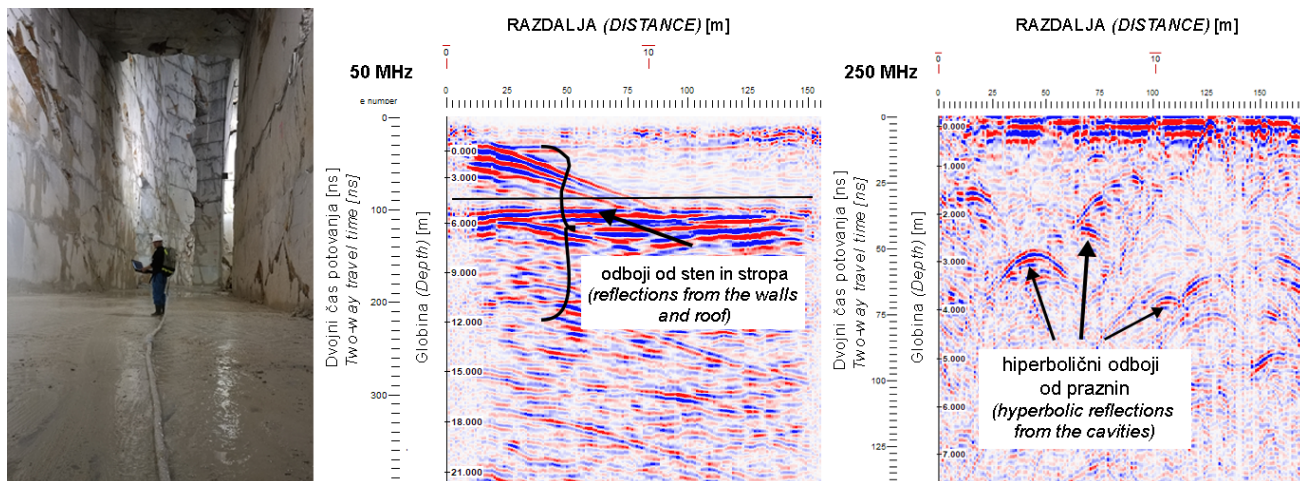
teni lahko prihaja do odboja od stene kamnoloma, zato meritve izvajamo po sredini etaže. Pri podzemnem pridobivanju kamna lahko težave povzročajo odboji od sten in stropa, seveda v odvisnosti od velikosti podzemnega pridobivalnega prostora. Meritve v Lipiškem kamnolomu so pokazale, da so nekateri radargrami zaradi nadpovršinskih odbojev popolnoma neuporabni, pri čemer se izkaže, da so ščitene antene primernejše (sl. 15). Na območjih, kjer so bile stene kamnoloma dovolj oddaljene, dobimo na radargramih le horizontalen odboj od stropa.

### Brezstropne jame in jamski sedimenti

Poleg omenjenih aplikacij, ki so bolj ali manj uveljavljene v georadarski stroki, v tem poglavju podajam novo uporabo georadarja. Ker so brezstropne jame oz. posamezni segmenti brezstropnih jam pomemben del današnje morfologije terena, je pomembno njihovo prepoznavanje na površju. Dokazi za obstoj brezstropnih jam (jamska siga, jamski sedimenti...) velikokrat niso prisotni oz. so nerazpoznavni, zato je pomembno, da lahko z geofizikalnimi metodami dokažemo speleogenetski nastanek kraških oblik.

Območje obsežnejših študij brezstropnih jam je bil otok Krk (Čeru et al., 2018a), jamskih sedimentov pa severni rob Planinskega polja (Čeru et al., 2018b). Območji sta bili izbrani zaradi za-





Sl. 15. Primer meritev v podzemnem pridobivalnem prostoru kamnoloma Lipica II. Pri 50 MHz neščiteni anteni nadpovršinski odboji od sten in stropa kamnoloma popolnoma prekrivajo odboje iz globine. Meritev s ščiteno 250 MHz anteno razkrije manjše praznine in diskontinuitete znotraj apnenca.

Fig. 15. Example of measurements in the underground Lipica II quarry. Surface reflections from the quarry walls and roof completely cover the GPR information with a 50 MHz unshielded antenna. Measurement with a 250 MHz shielded antenna reveals smaller voids and discontinuities within the limestone.

nimivega geološkega in geomorfološkega razvoja ter zaradi raznovrstnosti kraških oblik. Rezultati obeh študij predstavljajo novo uspešno uporabo georadarja v temeljni krasoslovni znanosti. Georadar se je izkazal za zelo uporabno metodo pri karakterizaciji brezstropih jam in pri prostorskih spremembah v značilnostih tal v primeru zaznavanja jamskih sedimentov. Čeprav se brezstropne jame na obeh območjih površinsko odražajo zelo različno, smo z različnim interdisciplinarnim pristopom, kjer je georadar predstavljal ključno metodo, uspeli pridobiti ustrezne podatke za njihovo lažjo rekonstrukcijo.

Na območju planote med Vrbnikom in Staro Baško smo z georadarskimi raziskavami določili mesta povezav med različnimi oblikami. Za ta je značilna večja debelina sedimentov, kar se na radargramih odraža z večjim dušenjem signala. Poleg tega smo našli več podzemnih nadaljevanj oz. podzemnih delov sicer večinoma denudiranega jamskega sistema. Definirali smo prehodno območje med površinskim in podpovršinskim delom brezstropne jame. Za ta območja so značilne manjše praznine, zato smo jih opredelili kot porušne oz. prehodne cone. S pomočjo georadarskih meritev in terenskega ter geomorfološkega pregleda na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja smo opredelili 4 km dolg brezstrop jamski sistem.

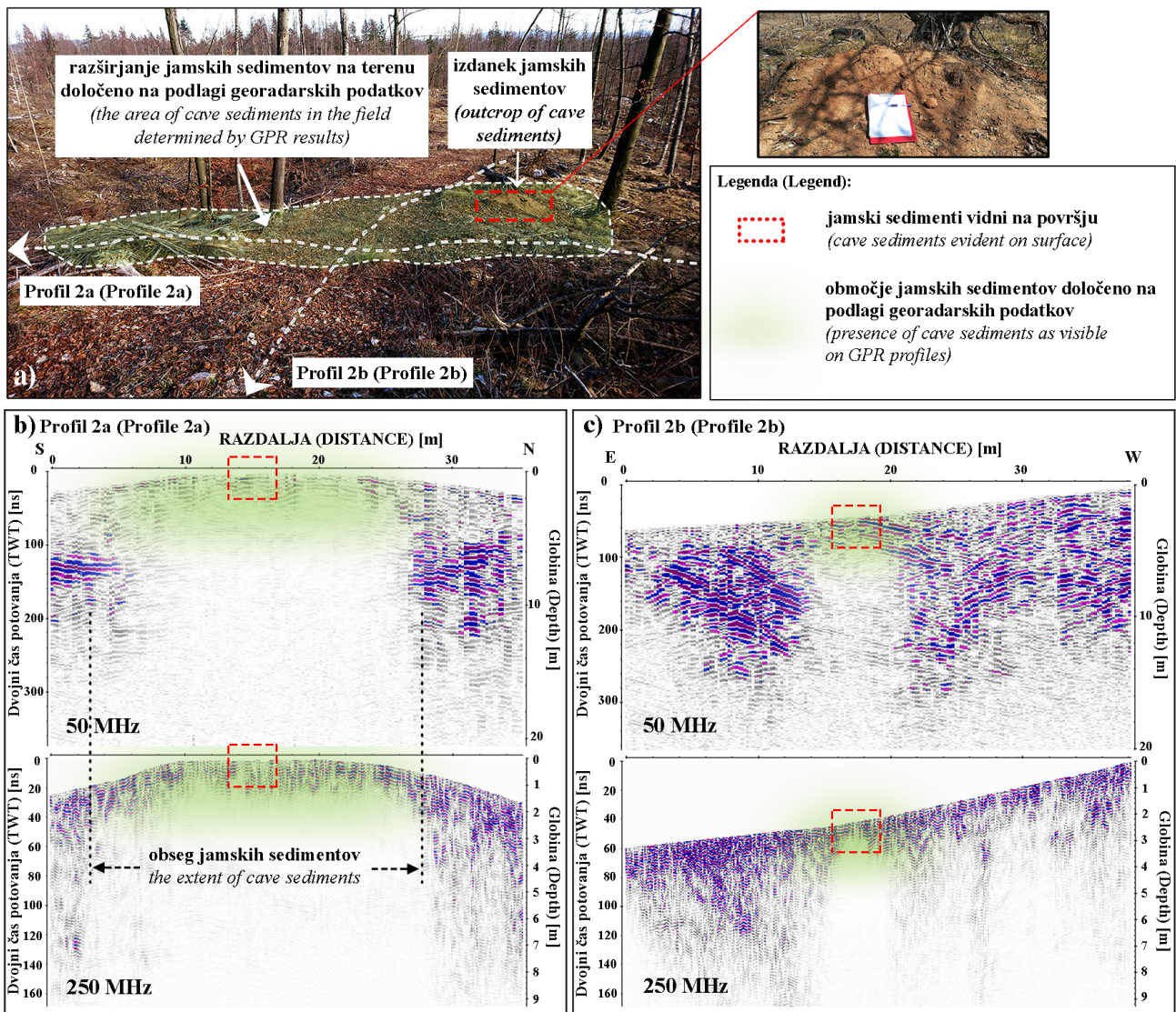
Na območju severnega in vzhodnega obroba Planinskega polja smo izvedli testne meritve za zaznavanje jamskih sedimentov. Želeli smo raziskati, kako zanesljivo lahko z georadarjem zaznamo jamske sedimente. Na območjih, kjer se jamski sedimenti pojavljajo skupaj z jamsko

sigo, so meritve pokazale, da se ti jasno odražajo na radargramih z izrazitim dušenjem signala. Meritve smo nato izvedli tudi na širšem območju, kjer smo določili mesta jamskih sedimentov in njihovo razširjanje v prostoru (sl. 16). Da bi preverili zanesljivost metode in ugotovili, kateri dejavnik najbolj prispeva k dušenju signala, smo preučevali mineraloško-geokemične značilnosti jamskih sedimentov in tal. Raziskave so pokazale, da jamski sedimenti vsebujejo večji delež glinenih mineralov in Fe/Al oksidov in hidroksidov v primerjavi s tlemi na karbonatnih tleh. Na podlagi tega smo sklepali, da je poleg debeline sedimentov ključni dejavnik za povečano dušenje tudi drugačen delež posameznih mineralov. Poleg tega prisotnost Fe/Al oksidov in hidroksidov vpliva k večjemu zadrževanju vode, kar razloži tudi dejstvo, da se na območjih jamskih sedimentov voda zadržuje tudi čez daljša sušna obdobja.

## Diskusija in zaključki

V prispevku smo podali pregled uporabe georadarja na krasu. Bistvena prednost georadarja je dobra ločljivost, ki omogoča natančen vpogled v pod površje, zato predstavlja najbolj ustrezno geofizikalno metodo pri raziskavah, kjer nas zanimajo informacije do globine 30 m. Večina georadarskih raziskav krasa je osredotočenih na najbolj široko uveljavljene aplikacije kot je zaznavanje jam, raziskave kraških vodonosnikov in raziskave strukturnih lastnosti kamnin povezanih s procesi zakrasevanja. V zadnjih 20 letih so raziskave predvsem aplikativnega značaja in metoda se v integraciji z ostalimi uporablja pri





Sl. 16. Meritve jamskih sedimentov na območju severnega roba Planinskega polja z 50 in 250 MHz anteno (Čeru et al., 2018b): a) smer pravokotnih profilov 2a in 2b na območju jamskih sedimentov; b) na podlagi georadarskih rezultatov je bil določen obseg jamskih sedimentov tudi tam, kjer ti niso vidni na površju; c) območje jamskih sedimentov na radargramih sovpada z območjem na površju.

Fig. 16. Measurements of cave sediments in the northern part of Planinsko Polje with 50 and 250 MHz antennas (Čeru et al., 2018b): a) direction of perpendicular Profiles 2a and 2b in the area of the cave sediments outcrop; b) the extent of cave sediments was determined in Profile 2a even where they are not visible on the surface; c) boundaries of cave sediments detected by GPR are limited to the area of the outcrop visible on the surface.

preprečevanju nevarnosti pogojenih z zakrasedevanjem. Zelo redke so temeljne raziskave, ki bi preučevale osnovna krasoslovna vprašanja. V članku smo predstavili pestrost uporabe metode in naredili kratek pregled po različnih aplikacijah, med katerimi smo izpostavili tudi nove aplikacije kot je zaznavanje brezstropih jam in jamskih sedimentov.

Kraško površje je večinoma težko prehodno in razgibano, kar predstavlja močno oviro za marsikatero geofizikalno metodo, a uporabljen sistem s 50 MHz RTA anteno omogoča meritve tudi na takšnih terenih. Omenjena antena se je izkazala za najbolj primerno za večino kraških aplikacij, pri čemer sta glavni prednosti primeren globin-

ski doseg in lažje manevriranje z RTA anteno v primerjavi s ščiteno 250 MHz anteno.

Večina objavljenih raziskav je interdisciplinarnega značaja, kjer se rezultati geofizikalnih metod dopolnjujejo z geološkimi, hidrogeološkimi in geomorfološki metodami. Uporabnost metode je zelo odvisna od lastnosti terena in kraškega sistema. Enoznačna navodila za izvajanje georadarskih meritev na krasu niso smiselna, saj je uspešnost uporabe metode odvisna od številnih dejavnikov. Na območjih, kjer so prisotni sedimenti z večjim deležem glinenih mineralov, je dušenje signala močno, zato je globinski doseg lahko samo nekaj metrov ali manj. Po drugi strani, pa ravno ta lastnost metode omogoča, da

Tabela 4. Prednosti in nekatere omejitve georadarja pri različnih aplikacijah na krasu. (+ primerna, ± lahko pogojno uporabna z nekaterimi omejitvami, – ni primerna).

Table 4. Advantages and some limitations for different applications of GPR in karst. (+ appropriate, ± may be used, but not necessarily the most appropriate method, – not recommended).

Uporaba ( <i>Application</i> )	Možnost uporabe ( <i>Possibility of use</i> )	Praktični nasveti, omejitve ( <i>Practical guides, limitations</i> )
Debelina kraških tal–stik z matično karbonatno podlago <i>Thickness of karst soil - contact with the carbonate bedrock</i>	-/ ±	- neenakomeren prehod med tlemi in matično podlago (neraven kontakt z vmesnimi žepi) - meja med tlemi in podlago večinoma ni nenadna, zato kontakt ne predstavlja dobrega reflektorja - rezultate priporočljivo korelirati z razkopi, cestnimi useki  - <i>uneven transition between soils and bedrock (rough contact with cutters)</i> - <i>the boundary between the soil and the bedrock is rarely sudden, so the contact does not represent a good reflector</i> - <i>it is advisable to correlate the results with excavations, road cuts</i>
Debelina kraških tal–stik s konglomeratno podlago <i>Thickness of karst soil - contact with the conglomerate bedrock</i>	±	- meritve uspešne le v konglomeratnem zasipu najmlajše starosti, saj debelina tal ni prevelika - mejo med tlemi in konglomeratom smo določili na podlagi pojavljanja hiperbol zaradi nehomogenosti znotraj konglomerata  - <i>measurements are only successful in the youngest conglomerate fill, since the soil is not too thick</i> - <i>the boundary between the soil and the conglomerate was determined based on the occurrence of hyperbolas as a result of inhomogeneity within the conglomerate</i>
Zaznavanje jam in praznin <i>Cave and cavity detection</i>	+	- metoda primerna ob uporabi primerne antene glede na globinski doseg in ločljivost metode - značaj anomalije v največji meri odvisen od oblike jame in smeri profila glede na geometrijo jame - odboji od kompleksnejših jam so lahko zelo »netipični«  - <i>method appropriate when using the appropriate antenna with respect to the depth range and resolution of the method</i> - <i>the character of the anomaly depends largely on the shape of the cave and the direction of the profile with respect to the cave geometry</i> - <i>reflections from more complex caves can be very "atypical"</i>
Oblika dna vrtač in debelina sedimentov znotraj vrtač <i>The shape of the bottom of dolines and the thickness of sediments</i>	-/±	- močno dušenje signala zaradi prisotnosti sedimentov, ki vsebujejo precejšen delež glinene komponente  - <i>strong attenuation of the signal due to the presence of sediments containing a significant proportion of a clay component</i>
Raziskave brezstropih jam <i>Unroofed cave research</i>	+	- primerna za zaznavanje povezav med denudiranimi deli brezstropih jam - primerna za zaznavanje podzemnega nadaljevanja brezstropih jam - možno raziskovanje prehodnega območja med denudiranim in podzemnim delom jamskega sistema  - <i>suitable for finding links between segments of unroofed caves</i> - <i>suitable for detecting underground continuation of unroofed caves</i> - <i>it is possible to explore the transition of the transition area between the denuded and the underground parts of the cave system</i>
Jamski sedimenti <i>Cave sediments</i>	+	- metoda primerna, je pa potrebna pazljivost, da območij jamskih sedimentov ne zamenjamo z drugimi večjimi debelinami sedimentov – npr. zapolnjena brezna itd.  - <i>the method is appropriate, but care must be taken not to confuse the cave sediment areas with other larger sediment thicknesses, e.g. filled shafts, etc.</i>
Pedološki horizonti <i>Pedological horizons</i>	+	- metoda primerna pri horizontih, ki se močno razlikujejo v dielektričnih lastnostih npr. Bt horizont - metoda primerna na tleh, kjer so horizonti dobro razviti (primer tal na karbonatnih konglomeratih)  - <i>suitable for horizons that differ greatly in dielectric properties, e.g. Bt horizon</i> - <i>suitable in soils where horizons are well developed (for example soils on carbonate conglomerates)</i>
Jame in vrtače v konglomeratih <i>Caves and dolines in conglomerates</i>	±	- velika debelina razvitih tal na konglomeratnih terasah starejšega in srednjega zasipa lahko predstavlja omejitev - metoda primernejša na najmlajših konglomeratnih zasipih, kjer debelina tal ne presega 3 m  - <i>excessive thickness of developed soil on the conglomerate terraces of the older and middle reaches</i> - <i>the method is more suitable on the youngest conglomerate backfill where the soil thickness does not exceed 3 m</i>

je primerna recimo za zaznavanje jamskih sedimentov, saj se ti na radargramih jasno odražajo kot območja večjega dušenja. Zaradi heterogenosti kraškega sistema so pogoji na terenu lahko zelo različni, zato v tabeli 4 podajam le nekatere usmeritve po aplikacijah. Podane so tudi nekatere aplikacije, ki v svetu še niso široko uveljavljene. Tekom raziskav se je izkazalo, da je georadar za nekatere aplikacije bolj za nekatere manj uporaben, zato podajamo tudi nekatere omejitve, na katere smo naleteli pri različnih raziskavah.

Z geofizikalnega vidika je kras s svojo heterogenostjo zelo kompleksen sistem, ki ima za uporabo georadarja določene omejitve, ki jih moramo upoštevati pri načrtovanju raziskav in interpretaciji podatkov. Zaradi heterogenosti sistema, v katerem se pojavljajo različne kraške oblike, kot so depresije in praznine, ki so lahko zapolnjene z zrakom ali/in sedimentom, lahko včasih le z rezultati različnih geofizikalnih metod pridobimo glavne informacije o strukturi podpovršja. Interdisciplinarnost raziskav je ključnega pomena, zato je za končno interpretacijo georadarske meritve potrebno dopolnjevati z geološkimi, hidrogeološkimi in geomorfološkimi metodami. Uporaba le ene geofizikalne metode lahko vodi do napačnih interpretacij, sploh v bolj kompleksnih sistemih, kjer lahko geofizikalnim podatkom ustreza več različnih modelov. Z razvojem tehnologije, boljšim poznavanjem teoretičnega ozadja metodologij in na podlagi praktičnih izkušenj raziskovalcev v zadnjih 15 letih, ima uporaba georadarja vse večji potencial pri različnih vprašanjih na krasu. Zaenkrat je večina georadarskih raziskav aplikativnega značaja, ki pa so velikokrat zasnovana tako, da je cilj študije tudi razumevanje kraških procesov, ki vodijo do nastanka različnih kraških oblik. Na ta način imamo čedalje več informacij in tudi znanja o kraškem podpovršju. Vse več se geofizikalne metode dopolnjujejo tudi z metodami daljinskega zaznavanja, kar kaže na to, da je prihodnost raziskav v interdisciplinarnem pristopu zelo različnih metod.

### Zahvala

Raziskave v okviru doktorske disertacije, na katerem temelji tudi ta prispevek, so bile izvedene s podporo raziskovalnega programa P1-0011 in sklada za mlade raziskovalce 1000-15-0510, financirana s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

### Literatura

- Al-fares, W., Bakalowicz, M., Guérin, R. & Dukhan, M. 2002: Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 51: 97–106. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00215-X)
- Andreo, B., Carrasco, F., Duran, J.J. & Lamoreaux, J.W. 2010: *Advances in Research in Karst Media*. Springer, Berlin: 429–434.
- Andreo, B., Carrasco, F., Duran, J.J., Jimenez, P. & Lamoreaux, J.W. 2015: *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Springer, Berlin: 638 p.
- Annan, A.P. 2009. *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*. In: Jol, H.M. (ed.): *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands: 3–37.
- Beres, M., Luetscher, M. & Olivier, R. 2001: Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves. *Journal of Applied Geophysics*, 46: 249–262. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00042-8)
- Blindow, N. 2006: *Ground Penetrating Radar*. In: Kirsch, R. (ed.): *Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology*. Springer, Berlin: 227–252.
- Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H. & Richer, T. 2007: *Ground Penetrating Radar*. In: Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J. (eds.): *Environmental Geology. Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, Berlin: 283–335.
- Brown, W.A., Stafford, K.W., Shaw-Faulkner, M. & Grubbs, A. 2011: A comparative integrated geophysical study of Horseshoe Chimney Cave, Colorado Bend State Park, Texas. *International Journal of Speleology*, 40: 9–16. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.40.1.2>
- Bumpus, P.B. & Kruse, S.E. 2014: Self-potential monitoring for hydrologic investigations in urban covered-karst terrain. *Geophysics*, 79/6: B231–B242. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0354.1>
- Carbonel, D., Rodríguez, V., Gutiérrez, F., Mccalpin, J. P., Linares, R., Roqué, C., Zarroca, M., Guerrero, J. & Sasowsky, I. 2014: Evaluation of trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) for sinkhole characterization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 214–227. <https://doi.org/10.1002/esp.3440>



- Carbonel, D., Rodríguez-Tribaldos, V., Gutiérrez, F., Galve, J.P., Guerrero, J., Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R., McCalpin, J.P. & Acosta, E. 2015: Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: Geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching. *Geomorphology*, 229: 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.007>
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A. & DiFilippo, G. 2010: Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical prospecting*, 58: 685–695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Carrière, S.D., Chalikakis, K., Sénéchal, G., Danquigny, C. & Emblanch, C. 2013: Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94: 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R. & Bosch, F.P. 2011: Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview. *Hydrogeology Journal*, 19: 1169–1180. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- Chamberlain, A.T., Sellers, W., Proctor, C. & Coard, R. 2000: Cave detection in limestone using ground penetrating radar. *Journal of Archaeological Science*, 27: 957–964. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0525>
- Collins, M.E. & Doolittle, J.A. 1987: Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. *Soil Science Society of America Journal*, 51/2: 491–493. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90008-6)
- Collins, M.E., Puckett, W.E., Schellentrager, G.W. & Yust, N.A. 1990: Using gpr for micro-analyses of soils and karst features on the chiefland limestone plain in florida. *Geoderma*, 47: 159–170. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(90\)90053-C](https://doi.org/10.1016/0016-7061(90)90053-C)
- Cunningham, K.J. 2004: Application of ground-penetrating radar, digital optical borehole images, and cores for characterization of porosity hydraulic conductivity and paleokarst in the Biscayne aquifer, southeastern Florida, USA. *Journal of Applied Geophysics*, 55: 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.06.005>
- Čeru, T., Šegina, E. & Gosar, A. 2017: Geomorphological dating of Pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and Ground Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 9: 1213. <https://doi.org/10.3390/rs9121213>
- Čeru, T., Šegina, E., Knez, M., Benac, Č. & Gosar, A. 2018a: Detecting and characterizing unroofed caves by ground penetrating radar. *Geomorphology*, 303: 524–539. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.004>
- Čeru, T., Dolenc, M. & Gosar, A. 2018b: Application of Ground Penetrating Radar Supported by Mineralogical-Geochemical Methods for Mapping Unroofed Cave Sediments. *Remote Sensing*, 10: 639. <https://doi.org/10.3390/rs10040639>
- Čeru, T. 2019: Geofizikalne raziskave površinskih in podpovršinskih kraških oblik z metodo nizkofrekvenčnega georadarja s poudarkom na analizi jam in vrtač. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 176 p.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989: Ground-Penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531–551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- De Giorgi, L. & Leucci, G. 2014: Detection of Hazardous Cavities Below a Road Using Combined Geophysical Methods. *Surveys in Geophysics*, 35/4: 1003–1021. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9277-4>
- Delle Rose, M. & Leucci, G. 2010: Towards an integrated approach for characterization of sinkhole hazards in urban environments: The unstable coastal site of Casalabate, Lecce, Italy. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7: 143–154. <https://doi.org/10.1088%2F1742-2132%2F7%2F2%2F004>
- Doolittle, J.A. 1987: Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. In: Reybold, W.U., Peterson, G.W. (eds.): *Soil Survey Techniques*. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, Special Publication, 20: 11–32.
- Doolittle, J.A. & Collins, M.E. 1998: A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst. *Geoderma*, 85: 83–102. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00012-3)
- Doolittle, J.A. & Butnor, J.R. 2009: Soils, Peatlands, and Biomonitoring. In: Jol, H.M. (ed.): *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands: 179–192.
- El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M.A. & Ushijima, K. 2005: Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and

- ground-penetrating radar. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67: 174–181.
- Ezersky, M.G., Legchenko, A., Eppelbaum, L. & Al-Zoubi, A. 2017: Overview of the geophysical studies in the dead sea coastal area related to evaporite karst and recent sinkhole development. *International Journal of Speleology*, 46: 277–302. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.46.2.2087>
- Frumkin, A., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Akkawi, E. & Abueladas, A.R. 2011: The Dead Sea sinkhole hazard: Geophysical assessment of salt dissolution and collapse. *Geomorphology*, 134: 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.023>
- Gómez-Ortiz, D. & Martín-Crespo, T. 2012: Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 149–150: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.022>
- Grandjean, G. & Gourry, J.C. 1996: GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece). *Journal of Applied Geophysics*, 36: 19–30. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(96\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(96)00029-8)
- Grasmueck, M., Quintà, M.C., Pomar, K. & Eberli, G.P. 2013: Diffraction imaging of sub-vertical fractures and karst with full-resolution 3D Ground-Penetrating Radar. *Geophysical Prospecting*, 61: 907–918. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12004>
- Gutiérrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Ortí, F., Durán, J.J. & Garay, P. 2008: Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain. *Environmental Geology*, 53: 951–965. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0721-y>
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J. & Jourde, H. 2014: A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138: 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- Kaufmann, G., Romanov, D., Tippelt, T., Vienken, T., Werban, U., Dietrich, P., Mai, F., Börner, F. 2018: Mapping and modelling of collapse sinkholes in soluble rock: The Münsterdorf site, northern Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 154: 64–80. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.04.021>
- Lazzari, M., Loperte, A. & Perrone, A. 2010: Near surface geophysics techniques and geomorphological approach to reconstruct the hazard cave map in historical and urban areas. *Advances in Geoscience*, 24: 35–44. <https://doi.org/10.5194/adgeo-24-35-2010>
- Leucci, G. & De Giorgi, L. 2010: Microgravimetric and ground penetrating radar geophysical methods to map the shallow karstic cavities network in a coastal area (Marina Di Capilungo, Lecce, Italy). *Exploration Geophysics*, 41: 178–188. <https://doi.org/10.1071/EG09029>
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L. & Garfias, J. 2018: ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology*, 310: 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Martos-Rosillo, S., González-Castillo, L., Sánchez-Úbeda, J.P. & Marín-Lechado C. 2013: Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, 162: 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.008>
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M. & Martín-Rosales, W. 2014: Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107: 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
- Mochales, T., Casas, A.M., Pueyo, E.L., Pueyo, O., Román, M.T., Pocoví, A., Soriano, M.A. & Ansón, D. 2008: Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar surveys: a case study from Zaragoza area, NE Spain. *Environmental Geology*, 53/5: 1067–1077. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0733-7>
- Mount, G.J., Comas, X. & Cunningham, K.J. 2014: Characterization of the porosity distribution in the upper part of the karst Biscayne aquifer using common offset ground penetrating radar, Everglades National Park, Florida. *Journal of Hydrology*, 515: 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.048>
- Murphy, P., Westerman, A.R., Clark, R., Booth, A. & Parr, A. 2008: Enhancing understanding of breakdown and collapse in the Yorkshire Dales using ground penetrating radar on cave sediments. *Engineering Geology*, 99: 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.015>

- Neal, A. 2004: Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66: 261–330.
- Puckett, W.E., Collins, M.E. & Schellentrager, G.W. 1990: Design of soil map units on a karst area in west central Florida. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1068–1073. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400040023x>
- Pueyo Anchuela, O., Casas Sainz, A.M., Poció Juan, A. & Gil Garbí, H. 2015: Assessing karst hazards in urbanized areas. Case study and methodological considerations in the mantle karst from Zaragoza city (NE Spain). *Engineering Geology*, 184: 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.025>
- Reynolds, J.M. 2011: *An introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York: 712 p.
- Rodriguez, V., Gutiérrez, F., Green, A.G., Carbonel, D., Horstmeyer, H. & Schmelzbach, C. 2014: Characterizing sagging and collapse sinkholes in a mantled karst by means of ground penetrating radar (GPR). *Environmental and Engineering Geoscience*, 20: 109–132. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.20.2.109>
- Ronen, A., Ezersky, M., Beck, A., Gatenio, B., & Simhayov, R.B. 2019: Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*, 328: 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.030>
- Schrott, L. & Sass, O. 2008: Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology*, 93: 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.024>
- Sevil, J., Gutiérrez, F., Zarroca, M., Desir, G., Carbonel, D., Guerrero, J., Linares, R., Roqué, C. & Fabregat, I. 2017: Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain. *Engineering Geology*, 231: 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.009>
- Stroh, J.C., Archer, S., Doolittle, J.A. & Wilding, L. 2001: Detection of edaphic discontinuities with ground-penetrating radar and electromagnetic induction. *Landscape Ecology*, 16/5: 377–390. <https://doi.org/10.1023/A:1017556712316>
- Tallini, M., Gasbarri, D., Ranalli, D. & Scozzafava, M. 2006: Investigating epikarst using low-frequency GPR: example from the Gran Sasso range Central Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65/4: 435–443. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0017-y>
- Wai-Lok Lai, W., Dérobert, X. & Annan, P. 2018: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT & E International*, 96: 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.04.002>
- Waltham, T., Bell, F. & Culshaw, M. 2005: *Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer, Berlin: 382 p.
- Zajícová, K. & Chuman, T. 2019: Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*, 343: 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024>
- Zajc, M., Pogačnik, Ž. & Gosar, A. 2014: Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for exploitation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 67: 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.011>