

RORY J. BECKER  
IVOR KARAVANIĆ  
NIKOLA VUKOSAVLJEVIĆ

Anthropology/Sociology  
Program, Eastern Oregon  
University  
1 University Boulevard, La  
Grande  
OR 97850-2807, USA  
rbecker@eou.edu

Department of Archaeology,  
Faculty of Humanities and  
Social Sciences, University of  
Zagreb  
Ivana Lučića 3  
HR-10000 Zagreb, Croatia  
ikaravan@ffzg.hr

Department of Archaeology,  
Faculty of Humanities and  
Social Sciences, University of  
Zagreb  
Ivana Lučića 3  
HR-10000 Zagreb, Croatia  
nvukosav@ffzg.hr

UDK: 903.3(497.5Benkovac)“632” :550.83  
550.83:902.3  
Prethodno priopćenje / Preliminary paper  
Primljen / Received: 29.6.2017  
Prihvaćen / Accepted: 10.10.2017.

---

## EARTH RESISTANCE TOMOGRAPHY AT VELIKA PEĆINA IN KLIČEVICA

Earth Resistance Tomography (ERT) is a geophysical prospecting technique that has the capacity to map subsurface sediments. The archaeological work at the Velika Pećina in Kličevica cave site near Zadar, Croatia provides an opportunity to test this technique in association with active archaeological excavations. Testing the viability of ERT as a means to model subsurface sediments at the cave site began in 2013 with the goal of identifying the depth of sediments to bedrock. Though the ERT data from the Velika Pećina in Kličevica site did not produce reliable results, the technique shows promise for continued testing and refinement at cave sites where information about the depth of sediments can help inform the excavation plan.

**Key words:** Geophysical Prospection, Electrical Resistivity Tomography, Paleoanthropology, Cave Site, Adriatic Region

## GEOELEKTRIČNA REZISTENTNA TOMOGRAFIJA U VELIKOJ PEĆINI U KLIČEVICI

Geoelektrična rezistentna tomografija (ERT) tehnika je geofizičkog istraživanja kojom se mogu kartirati dubinski sedimenti. Arheološki radovi u Velikoj pećini u Kličevici kod Zadra prigoda su za ispitivanje te tehnike u kontekstu aktivnih arheoloških istraživanja. Ispitivanje perspektivnosti ERT-a kao sredstva za modeliranje potpovršinskih sedimenata na tom pećinskom nalazištu započelo je 2013. godine, s ciljem utvrđivanja dubine sedimenata sve do žive stijene. Iako podaci iz Velike pećine u Kličevici dobiveni ERT-om nisu dali pouzdane rezultate, ta tehnika pokazuje perspektivnost s obzirom na daljnje ispitivanje i usavršavanje na pećinskim nalazištima, gdje informacije o dubini sedimenata mogu pomoći pri planiranju istraživanja.

**Ključne riječi:** geofizičko istraživanje, geoelektrična tomografija, paleoantropologija, špilja, jadransko područje

## 1. INTRODUCTION

Earth resistance imaging using the tomography method, or earth resistance tomography (ERT), is a multi-probe geophysical technique that creates depth profiles or pseudosections similar to those produced by Ground Penetrating Radar (GPR). While 2D GPR profiles are generally more familiar to the archaeological community, use of ERT as a means of modeling subsurface strata is a valuable resource in its own right. ERT both complements GPR data and is useful in situations where GPR surveys cannot be utilized or are not optimal. Specifically, rocky uneven surfaces where the GPR antenna cannot maintain contact and wet rocky sediments with large clasts where signal noise is high. Those are precisely the type of sediments common in limestone cave sites in the Adriatic region and, for this reason; a reliable alternate technique is needed. The Velika Pećina in Kličevica site located near Zadar, with its uneven surface, wet sediments, and large rocky clasts, serves as a suitable testing ground for ERT as a means for modeling sediment depths to bedrock in cave sites.

## 2. MIDDLE PALEOLITHIC RESEARCH IN DALMATIA AND THE VELIKA PEĆINA IN KLIČEVICA SITE

Middle Paleolithic sites from Dalmatia in southern Croatia are much less known than sites from northwestern Croatia, such as Krapina and Vindija, which contain fossil human remains. Superficial artifact collections from open-air sites situated north of Zadar and from a few of the islands in the region<sup>1 2 3 4 5</sup> have enabled lithic analyses based mainly on typology, while excavations of Middle Paleolithic cave sites are rare in this region during second half of the 20<sup>th</sup> century.<sup>6 7</sup> The first systematically excavated site in Dalmatia (1995 – 2003), with clear and homogenous Mousterian stratigraphic context is Mujina Pećina located north of Kaštela. The site has been chronometrically dated and results of the analyzed material are published in several papers<sup>8</sup>. In recent years, work on Mousterian sites in Dalmatia has intensified. Recent research focuses on several cave and open air sites, one underwater site, and on a systematic survey of the region.<sup>9 10 11 12</sup>

Included in the recent focus on the Mousterian in Dalmatia is a trial excavation of the Velika Pećina in Kličevica site which was carried out in 2006 as a joint effort by the

## 1. UVOD

Geoelektrično snimanje uz pomoć tomografije, odnosno geoelektrična tomografija (ERT), geofizička je tehnika s više sondi kojom se izrađuju dubinski profili (pseudoprofil) slični onima koji se izrađuju uz pomoć georadara (GPR). Iako su dvodimenzionalni GPR profili arheolozima općenito poznatiji, i upotreba ERT-a za modeliranje potpovršinskih slojeva vrijedan je resurs. Osim što nadopunjava podatke dobivene GPR-om, ERT je koristan i u situacijama gdje istraživanje georadarom nije izvodivo ili nije optimalno – konkretno, na neravnim stjenovitim površinama gdje antena georadara ne može zadržati kontakt i kod stjenovitih sedimenata s velikim klastima gdje je šum signala jak. Budući da je upravo ta vrsta sedimenata česta u vapnenačkim špiljama jadranskog područja, potrebna je pouzdana alternativna tehnika. Sa svojom neravnom površinom, vlažnim sedimentima i velikim klastima stijena, Velika pećina u Kličevici blizu Zadra prikladna je za ispitivanje ERT-a kao sredstva za procjenu dubine sedimenata na špiljskim nalazištima sve do žive stijene.

## 2. ISTRAŽIVANJE SREDNJEG PALEOLITIKA U DALMACIJI I U VELIKOJ PEĆINI NA LOKALITETU KLIČEVICA

Nalazišta srednjeg paleolitika u Dalmaciji mnogo su manje poznata od onih u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, poput Krapine i Vindije, koja sadrže fosilne ljudske ostatke. Zbirke površinskih izrađevina s otvorenih nalazišta sjeverno od Zadra i s nekoliko otoka u tom području<sup>1 2 3 4 5</sup> omogućile su litičke analize koje se uglavnom temelje na tipologiji. S druge strane, iskopavanja na srednjopaleolitičkim pećinskim nalazištima u drugoj su polovini 20. stoljeća bila dosta malobrojna.<sup>6 7</sup> Mujina pećina sjeverno od Kaštela prvo je sustavno istraživano nalazište u Dalmaciji (1995. – 2003.) s jasnim i homogenim musterijenskim stratigrafskim kontekstom. Nalazište je kronometrijski datirano, a rezultati analiza materijala objavljeni su u nekoliko radova<sup>8</sup>. Posljednjih je godina intenziviran rad na musterijenskim nalazištima u Dalmaciji. Najnovija istraživanja usredotočena su na nekoliko špilja i nalazišta na otvorenom, jedno podvodno nalazište, kao i na sustavno rekognosciranje cijelog područja.<sup>9 10 11 12</sup>

U sklopu tih najnovijih istraživanja musterijena u Dalmaciji, 2006. godine obavljena su i probna iskopavanja u Velikoj

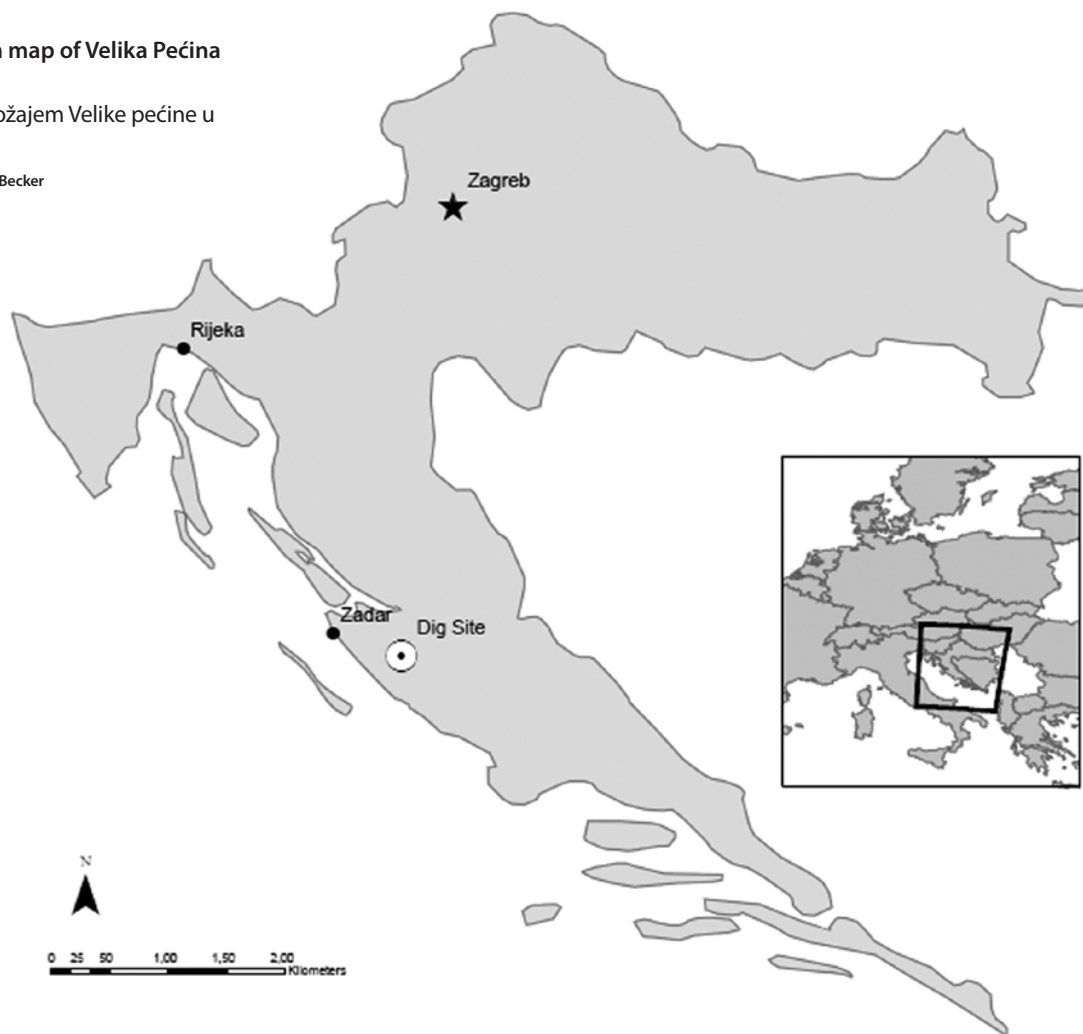
1 Š. Batović, 1965.  
2 Š. Batović, 1988.  
3 M. Malez, 1979.  
4 J. Chapman – R. Shiel – Š. Batović, 1996.  
5 D. Vujević, 2007.  
6 M. Malez, 1979.  
7 N. Petrić, 1979.  
8 I. Karavanić *et al.*, 2008 and references therein.  
9 I. Karavanić *et al.*, 2014.  
10 I. Karavanić *et al.*, 2014a.  
11 I. Karavanić *et al.*, 2016.  
12 D. Vujević – Z. Perhoč – T. Ivančić, 2016.

1 Š. Batović, 1965.  
2 Š. Batović, 1988.  
3 M. Malez, 1979.  
4 J. Chapman – R. Shiel – Š. Batović, 1996.  
5 D. Vujević, 2007.  
6 M. Malez, 1979.  
7 N. Petrić, 1979.  
8 I. Karavanić *et al.*, 2008. i reference iz tog rada.  
9 I. Karavanić *et al.*, 2014.  
10 I. Karavanić *et al.*, 2014a.  
11 I. Karavanić *et al.*, 2016.  
12 D. Vujević – Z. Perhoč – T. Ivančić, 2016.

**Figure 1. Location map of Velika Pećina in Kličevica.**

Slika 1. Karta s položajem Velike pećine u Kličevici.

designed by / izradio: Rory Becker



Department of Archaeology, Faculty of Humanities and Social Sciences in Zagreb and the Archaeological Museum in Zadar. Velika Pećina in Kličevica is situated in the northwestern part of the Kličevica river canyon in Raštević village, not far from Benkovac which is located approximately 30km from Zadar (Fig. 1). The entrance of the cave is small (approximately 2 x 1.5m) and oriented due south-east. The main channel of the cave is around 30m long, 5m wide on the average and about 6m high. At the back of the main chamber, the cavern turns left and then forks into two separate channels after a dozen meters.<sup>13</sup> The 2006 testing include an excavation trench measuring 2 x 1m located in the main hall of the cave (Fig. 2). The stratigraphy from the test trench consists of six layers with the greatest depth at about 1.5m. All the sedimentary layers, except the topsoil, belong to the Mousterian culture. A long bone fragment from an ungulate recovered in layer D was radiocarbon dated by accelerator mass spectrometry (AMS) to 39240±740 BP (Beta-228733)<sup>14</sup>. The dating shows this

pećini u Kličevici, na kojima su surađivali Odsjek za arheologiju Filozofskog fakulteta u Zagrebu i Arheološki muzej Zadar. Velika pećina smještena je u sjeverozapadnoj strani kanjona rječice Kličevice u selu Raštević nedaleko Benkovca, koji se nalazi oko 30 kilometara od Zadra (Sl. 1). Ulaz u pećinu je malen (oko 2 x 1,5 m) i gleda na jugoistok. Glavni pećinski kanal dug je oko 30 metara, širok u prosjeku oko pet metara te visok oko šest metara. Na svom kraju skreće ulijevo te se nakon desetak metara račva u dva kanala.<sup>13</sup> Probno istraživanje 2006. godine uključivalo je sondu dimenzija 2 x 1 metar u glavnoj dvorani pećine (Sl. 2). Sondom je utvrđena stratigrafija od šest slojeva, najveće dubine od oko 1,5 metar. Osim površinskog sloja, svi slojevi pripadaju musterijenskoj kulturi. Fragment duge kosti ungulata pronađen u sloju D datiran je radiokarbonskom metodom AMS (akceleratoraska masena spektrometrija) i dobivena je starost od 39240±740 BP (prije sadašnjosti) (Beta-228733).<sup>14</sup> Utvrđena starost ukazuje na to da uzorak pripada kasnom musterijenu i s jednom se

13 I. Karavanić – N. Čondić, 2006.

14 I. Karavanić – N. Čondić – N. Vukosavljević, 2007.

13 I. Karavanić – N. Čondić, 2006.

14 I. Karavanić – N. Čondić – N. Vukosavljević, 2007.

sample belongs to the late Mousterian and with one standard deviation it overlaps with the results obtained for the upper layers (B, C and D1) of Mujina Pećina.<sup>15</sup>

Given the positive results of the 2006 test excavation, systematic excavation at Velika Pećina in Kličevica was carried out between 2012-2015 in collaboration with the University of Wyoming and Illinois State University when several trenches in the main channel were completed (Fig. 2). Two AMS dates (one with and one without ultrafiltration pretreatment) give an age that is significantly younger in comparison to other late Middle Paleolithic sites in the eastern Adriatic. The radiocarbon dates from an animal bone specimen recovered during the 2013 investigations are  $35110 \pm 310$  BP without ultrafiltration (Beta-372935) and  $32520 \pm 240$  BP (Beta-372934) with ultrafiltration.<sup>16</sup> While the use of ultrafiltration often produces an older date, it was not the case here. The lithic assemblage from Velika Pećina contains various debitage artifacts including tools. The discovered flake tools are small (indicative of the so-called micro-Mousterian) and made of local cherts.<sup>17</sup> Excavations at Velika Pećina in Kličevica concluded in early 2016 so final analyses and reporting on results are forthcoming. However, descriptions of the sedimentary layers for excavated trenches in the area of the ERT testing are included below.

### 3. ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY

Earth resistance surveys are commonly employed at archaeological sites and have been since at least the late 1940s.<sup>18</sup> <sup>19</sup> <sup>20</sup> A mainstay of remote sensing in archaeology, earth resistance has been touted at the most widely applicable geophysical technique for archaeological sites due to its capacity for identifying relevant archaeological information in a wide range of configurations.<sup>21</sup> Earth resistance can be used for both broad area, fixed depth surveys and also for creating 2D and 3D depth profiles even with the same instrumentation through altering the configuration of the survey design.<sup>22</sup> Other prospecting techniques, such as magnetic survey, GPR, and conductivity, have been introduced since the mid-20th century though the use of resistance survey remains a staple remote sensing technique on archaeological sites.<sup>23</sup> <sup>24</sup> <sup>25</sup> As such, earth resistance sits very comfortably alongside magnetics, radar, and conductivity as one of the

standardnom devijacijom preklapa s rezultatima dobivenima za gornje slojeve (B, C i D1) Mujine pećine.<sup>15</sup>

Zahvaljujući pozitivnim rezultatima probnog iskopavanja iz 2006., u Velikoj pećini u Kličevici obavljena su sustavna iskopavanja u razdoblju od 2012. do 2015. godine, u suradnji sa Sveučilištem u Wyomingu i Državnim sveučilištem Illinoisa. Tada je u glavnom kanalu istraženo nekoliko sondi (Sl. 2). Dva datiranja radiokarbonskom AMS metodom (jedno uz primjenu ultrafiltracije i jedno bez nje) pokazala su znatno manju starost u usporedbi s drugim nalazištima kasnog srednjeg paleolitika na istočnoj obali Jadrana. Radiokarbonskim datiranjem primjerka životinjske kosti pronađenog za vrijeme istraživanja 2013. godine utvrđena je starost od  $35110 \pm 310$  BP bez ultrafiltracije (Beta-372935) i  $32520 \pm 240$  BP (Beta-372934) s ultrafiltracijom.<sup>16</sup> Iako se primjenom ultrafiltracije često dobiva stariji rezultat, ovdje to nije bio slučaj. Litički skup nalaza iz Velike pećine sadrži različite lomljevske proizvode, među njima i oruđa. Otkrivena oruđa na odbojcima malih su dimenzija (tipično za tzv. mikro-musterijen) i načinjena su od lokalnih rožnjaka.<sup>17</sup> Iskopavanja u Velikoj pećini završena su početkom 2016. godine, što znači da završne analize i izvještaji s rezultatima tek slijede. No, niže u tekstu opisani su slojevi u istražnim sondama na području gdje je obavljeno ispitivanje ERT-om.

### 3. ELEKTRIČNA REZISTENTNA TOMOGRAFIJA

Barem od kraja četrdesetih godina prošlog stoljeća, istraživanja metodom geoelektričnog otpora tla često se primjenjuju na arheološkim nalazištima.<sup>18</sup> <sup>19</sup> <sup>20</sup> Zahvaljujući tome što je glavni oslonac daljinskog istraživanja u arheologiji i što ima kapacitet za utvrđivanje bitnih arheoloških podataka na nizu konfiguracija, geoelektrični otpor tla smatra se najraširenijom geofizičkom tehnikom za arheološka nalazišta.<sup>21</sup> Geoelektrični otpor tla može se koristiti kako za istraživanja na širem području na fiksnoj dubini, tako i za kreiranje 2D i 3D dubinskih profila – i to čak uz korištenje istih instrumenata, ali uz promjenu konfiguracije istraživanja.<sup>22</sup> Iako su ostale istraživačke tehnike, poput magnetometrijskog istraživanja, istraživanja georadarom i istraživanja provodljivosti, uvedene još sredinom 20. stoljeća, istraživanje metodom električnog otpora i dalje ostaje glavno daljinsko istraživanje koje se koristi na arheološkim nalazištima.<sup>23</sup> <sup>24</sup> <sup>25</sup> Kao takav, geoelektrični otpor je još uvijek

15 J. Rink *et al.*, 2002.

16 I. Karavanić *et al.*, 2014.

17 I. Karavanić – N. Čondić – N. Vukosavljević, 2007.

18 A. Aspinall – C. Gaffney, 2001.

19 A. Clark, 1997.

20 C. Monfort, 2013, 154.

21 B. Bevan, 2000, 1.

22 M. Dabas – A. Tabbagh – J. Tabbagh, 1994.

23 A. Clark, 1997.

24 M. Drahor, 2011.

25 M. Leopold *et al.*, 2010.

15 J. Rink *et al.*, 2002.

16 I. Karavanić *et al.*, 2014.

17 I. Karavanić – N. Čondić – N. Vukosavljević, 2007.

18 A. Aspinall – C. Gaffney, 2001.

19 A. Clark, 1997.

20 C. Monfort, 2013, 154.

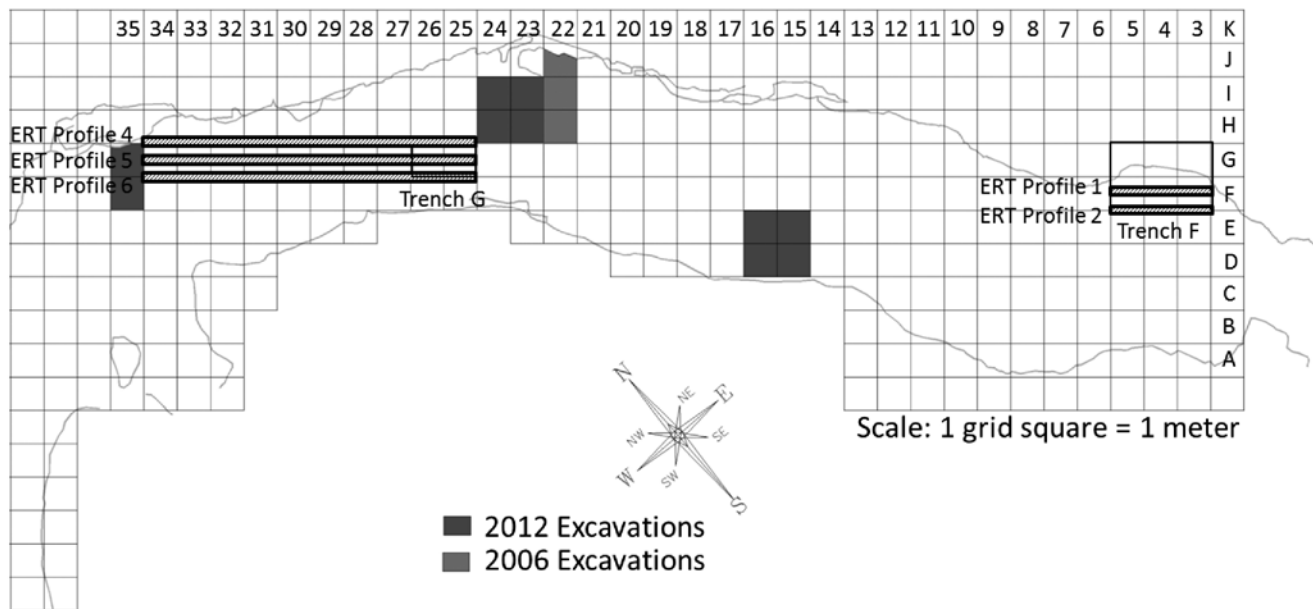
21 B. Bevan, 2000, 1.

22 M. Dabas – A. Tabbagh – J. Tabbagh, 1994.

23 A. Clark, 1997.

24 M. Drahor, 2011.

25 M. Leopold *et al.*, 2010.



**Figure 2. Site map including earlier excavation trenches, Trenches F & G, and the ERT Profile lines.**

Slika 2. Karta nalazišta s ranijim sondama, sondama F i G te ERT linijama profila.

cave drawing / crtež špilje: Ivan Čondić, modified by / modificirao: Rory Becker

four primary means for conducting subsurface geophysical prospection in archaeology.

Several probe array types exist for resistance surveys such as a pole-pole, Wenner, Schlumberger, gradient array, dipole-pole, and dipole-dipole; though the use of several of these in archaeological contexts is often fairly specialized or site specific.<sup>26 27 28 29</sup> The most commonly used probe array for archaeological purposes is the twin probe array. The twin probe array is the recommended configuration for fixed depth broad area surveys from GeoScan Research of England makers of the RM15 and newer RM85 resistance meters. While the multiplexing capabilities of these instruments allows for multiple depth surveys to be conducted in a single pass of the instrument, it still utilizes the twin probe array though it collects multiple depth readings at each station through the use of multiple mobile probes fired in sequence.<sup>30</sup> Earth resistance surveys that utilize a twin probe array for fixed depth broad area coverage are frequently employed to identify building foundations, historic or prehistoric trenches, pits, middens, or any feature that has a moisture content significantly different from its surrounding soil/sediment matrix.<sup>31</sup>

ERT surveys also utilize earth resistance though their design and intent is significantly different. As such, specially designed ERT meters such as the AGI SuperSting and IRIS SYSCAL systems allow for tens or even hundreds of electrodes to be placed across a landscape. Also, they

jedan od četiri glavna načina provođenja potpovršinskih geofizičkih istraživanja u arheologiji (uz magnetometrijska i radarska istraživanja te istraživanja provodljivosti).

Za istraživanje metodom električnog otpora postoji nekoliko različitih rasporeda sonde; pol-pol, Wennerov, Schlumbergerov i gradijentni raspored te dipol-pol i dipol-dipol. U arheološkom kontekstu, neki od tih rasporeda često su prilično specijalizirani ili primjenljivi samo na određenim nalazištima.<sup>26 27 28 29</sup> Raspored sonde koji se najčešće koristi u arheološke svrhe je niz dvostrukih sonde. Ta se konfiguracija preporučuje za mjerenja na širem području na fiksnoj dubini koja se obavljaju mjeračima otpora RM15 i (novijim) RM85, proizvođača GeoScan Research of England. Iako multipleksni način rada ovih instrumenata omogućava mjerenje na više različitih dubina tijekom samo jednog prolaska instrumentom, oni svedeno koriste niz dvostrukih sonde, iako na svakoj stanici prikupljaju očitavanja za više dubina, služeći se za tu svrhu s više pokretnih sonde aktiviranih jedna za drugom.<sup>30</sup> Istraživanja metodom geoelektričnog otpora tla uz pomoć niza dvostrukih sonde na širem području na fiksnoj dubini često se koriste za prepoznavanje temelja zgrada, povijesnih ili prapovijesnih opkopa, jama, bunjišta i bilo

26 M. Dabas – A. Tabbagh – J. Tabbagh, 1994.

27 M. Dogan – S. Papamarinopoulos, 2003.

28 M. Noel – B. Xu, 1991.

29 N. Papadopoulos *et al.*, 2006.

30 A. Walker, 2000.

31 A. Schmidt, 2001.

26 M. Dabas – A. Tabbagh – J. Tabbagh, 1994.

27 M. Dogan – S. Papamarinopoulos, 2003.

28 M. Noel – B. Xu, 1991.

29 N. Papadopoulos *et al.*, 2006.

30 A. Walker, 2000.



allow for the rapid collection of data from these points through the use of switch boxes that fire the probe pairs in sequence along a given tomography line. Additionally, these systems are often used to collect readings from probes spread quite some distance apart and so they often utilize Wenner or Schlumberger arrays, or one of their variants, to collect the data.

The most common application of ERT profiles for archaeological purposes is the investigation of large earthworks such as tells and mound features.<sup>32 33</sup> These surveys employ ERT because of this technique's capacity to provide information on sediment changes from very deep strata. However, this technique is far more widely employed outside of archaeology for minerals exploration, ground water location, and monitoring of deep sediments for fluids from spills or other contaminations.<sup>34</sup>

### 3.1 ERT in Cave Site Environments

The goal of testing ERT surveys at cave sites in the Adriatic as presented in this study is to develop a reliable means for mapping the depth of cave sediments to bedrock as a guide for site excavation efforts. It is important to note that the interest in ERT discussed here does not imply a disinterest in exploring GPR as a valuable technique for acquiring 2D and 3D depth profiles at these cave sites. Certainly not. Gathering both GPR and ERT data from these sites is ideal and using both techniques on any cave site where conditions allow is preferred.

The application of ERT to cave environments varies significantly from open air sites due to natural constraints from working underground. The first and generally most obvious difference is the space available to conduct the survey. Since resistance tomography profiles need to be collected along straight lines where precise probe spacing at each station matters a great deal, it can be difficult to find a suitable area to survey inside a cave. The natural bends and corners of a cave channel may limit the length of any given profile which directly affects the depth that can be measured in those locations. Additionally, the presence of large rocks, exposed bedrock, and calcium carbonate layers can be problematic due to the inability to precisely place an electrode. As such, it is certainly the case that not all cave sites are suitable for ERT surveys. Careful consideration of the applicability of any remote sensing technique to a particular site must be evaluated prior to conducting a survey. This is just as true, and perhaps more so, for cave sites due to additional limiting factors within a cave.

Though the most common probe arrays for conducting resistivity tomography surveys are the inline arrangements

kojih drugih struktura čiji se sadržaj vlage značajno razlikuje od okolnog tla/sedimenta.<sup>31</sup>

Geoelektrični otpor tla koristi se i pri ERT mjerenjima, iako su ta mjerenja po svojoj osnovi i nakani znatno različita. Posebno konstruirani ERT mjerači poput AGI SuperSting i IRIS SYSCAL sustava omogućavaju raspoređivanje desetaka, pa čak i stotina elektroda po okolini. Ujedno omogućavaju i brzo prikupljanje podataka na tim točkama uz pomoć preklopnih kutija koje aktiviraju jedan par sonde za drugim duž tomografske linije. Osim toga, budući da se često koriste za očitavanje sonde raspoređenih na većoj međusobnoj udaljenosti, ti sustavi često za prikupljanje podataka koriste Wennerov ili Schlumbergerov raspored, ili neku njihovu varijantu.

U arheološkom kontekstu, ERT profili najčešće se primjenjuju u istraživanju velikih zemljanih objekata kao što su *tellovi* i grobni humci.<sup>32 33</sup> ERT se u tim istraživanjima koristi zato što je u stanju pružiti informacije o promjenama u sedimentu u vrlo dubokim slojevima. Ta se tehnika, međutim, mnogo više primjenjuje izvan arheologije: pri istraživanju minerala, traženju podzemnih voda i promatranju prodora tekućina u dubinske sedimente u slučaju izlijevanja i drugih vrsta zagađenja.<sup>34</sup>

### 3.1 ERT na špiljskim nalazištima

Ispitivanje ERT mjerenja na jadranskim pećinskim nalazištima predstavljeno u ovom radu ima za cilj razvoj pouzdanih načina kartiranja dubine špiljskih sedimenata sve do žive stijene, čime bi se ravnala kasnija iskopavanja na nalazištu. Važno je napomenuti da interes za ERT iskazan u ovom radu ne znači nedostatak interesa za istraživanje GPR-a kao dragocjene tehnike za dobivanje 2D i 3D dubinskih profila na tim pećinskim nalazištima. Ni u kom slučaju. Idealno je na tim nalazištima prikupiti i GPR i ERT podatke, a preferira se korištenje obje tehnike na bilo kojem pećinskom nalazištu gdje uvjeti to dopuštaju.

Primjena ERT-a na špiljskim nalazištima u znatnoj se mjeri razlikuje od one na otvorenim nalazištima. Razlog tomu su prirodna ograničenja rada u podzemlju. Prva i obično najvidljivija razlika je raspoloživi prostor za obavljanje mjerenja. Budući da se tomografski profili moraju načiniti duž ravnih linija, gdje je od velike važnosti raspoređivanje sonde na pravilne udaljenosti na svakoj stanici, ponekad je u špilji teško pronaći područje prikladno za mjerenje. Prirodne krivine i završeci špiljskih kanala mogu ograničavati bilo koji profil, što izravno utječe na mjerenje dubina na takvim lokacijama. Povrh toga, problem mogu predstavljati i velike stijene, izdanci žive stijene i slojevi kalcijevog karbonata,

32 M. Berge – M. Drahor, 2011.

33 M. Berge – M. Drahor, 2011a.

34 A. Samouëlian *et al.*, 2005.

31 A. Schmidt, 2001.

32 M. Berge – M. Drahor, 2011.

33 M. Berge – M. Drahor, 2011a.

34 A. Samouëlian *et al.*, 2005.

such as Wenner and Schlumberger (and their variants), the pole-pole probe array is selected as the preferred array for use at Velika Pećina in Kličevica. Testing of the ERT technique with a GEOSCAN RM85 meter began in the summer of 2013 at the Bukovac cave site near Lokve, Croatia. This testing regime included surveys with both Wenner and Schlumberger arrays which were used to collect both tomography data and single station depth profiles.<sup>35</sup> There is a subtle but significant drawback to using the Wenner and Schlumberger arrays with the RM85. Since three of the four electrode connections need to be moved for each data point as opposed to moving a single electrode for the pole-pole array, gathering data along a profile with the inline arrays takes significantly more time without a pronounced benefit in terms of data quality. While a pole-pole array does require potentially hundreds of meters of extra wire, once set-up on a site, each profile line can be collected in its entirety with just a single pass for each probe spacing. The testing at Bukovac, which included several array types, demonstrated that completing a full tomography survey with an RM85 by setting up a pole-pole array for data collection was a much better use of both the limited available space, field personnel, and time spent moving wires to different electrodes along the profile than were either the Wenner or Schlumberger arrays. Of course, use of a dedicated ERT system that connects to each electrode simultaneously and collects each data point without need for moving electrodes would alleviate this situation.<sup>36</sup>

Though the testing at the Bukovac site in 2013 did not produce reliable data due to the lack of sufficient wire for setting up a proper pole-pole array with the required twenty times separation between probe sets, it did prove invaluable in the sense that the Bukovac testing refined the field procedures for setting up the tomography profile lines, using the RM85 meter for collecting tomography data, and for identifying the pole-pole array as the preferred choice in collecting 2D tomography data in cave sites with this particular instrument.

#### 4. ERT METHODOLOGY FOR VELIKA PEĆINA

Testing of ERT as a means for subsurface prospecting at Velika Pećina in Kličevica began during the fall 2013 excavations being conducted by the University of Zagreb. A pole-pole array was utilized with the reference probes set outside the cave. Two profiles, each 3m in length, were established near the mouth of the cave where excavation Trench F is located (Fig. 2). Electrodes were set at 0.5m intervals along each 3 m profile and a maximum mobile probe spacing of 3m was used. Heavy rain in the days and weeks leading up to the testing had made for very wet

jer onemogućavaju precizno postavljanje elektrode. Prema tome, nisu sva pećinska nalazišta prikladna za ERT mjerenja. Prije obavljanja mjerenja potrebno je pažljivo proučiti primjenljivost određene tehnike daljinskog istraživanja na konkretnom nalazištu. To posebice vrijedi – možda još i više – za špiljska nalazišta, a zbog dodatnih ograničavajućih čimbenika u špiljama.

Iako su najčešći rasporedi sonde za izvođenje geoelektrične tomografije u liniji poput Wennerovog i Schlumbergerovog (i njihovih varijanti), u Velikoj pećini u Kličevici raspored pol-pol odabran je kao optimalan. Ispitivanje ERT tehnike uz primjenu mjerača GEOSCAN RM85 započelo je u ljeto 2013. godine na pećinskom nalazištu Bukovac blizu Lokava. Taj probni režim uključivao je mjerenja uz pomoć oba rasporeda – i Wennerovog i Schlumbergerovog. Prikupljali su se tomografski podaci i načinjeni su dubinski profili s jednom stanicom.<sup>35</sup> Korištenje Wennerovog i Schlumbergerovog rasporeda s mjeračem RM85 ima manji, ali značajni nedostatak. Budući da za svaku točku podataka treba pomaknuti tri od četiri elektrode (za razliku od rasporeda pol-pol, gdje treba pomaknuti samo jednu elektrodu), za prikupljanje podataka duž profila s rasporedom sonde u liniji potrebno je znatno više vremena, a da pritom nema izraženijeg poboljšanja kvalitete podataka. Iako raspored pol-pol može zahtijevati i stotine metara dodatne žice, jednom kad se instalira, svaka linija profila može se u potpunosti kreirati jednim jedinim prolaskom za svaki razmak između sonde. Ispitivanje na nalazištu Bukovac, u sklopu kojeg je isprobano nekoliko vrsta rasporeda, pokazalo je da je za kompletnu geoelektričnu tomografiju uz pomoć RM85 mnogo praktičniji bio raspored pol-pol nego Wennerov ili Schlumbergerov raspored, jer je ovaj prvi omogućavao mnogo bolju iskorištenost ograničenog prostora i terenskog osoblja te je zahtijevao mnogo manje vremena za premještanje žica na različite elektrode. Naravno, upotreba namjenskog ERT sustava koji se istovremeno spaja sa svim elektrodama i prikuplja svaku točku podataka bez potrebe za pomicanjem elektroda, olakšala bi ovu situaciju.<sup>36</sup>

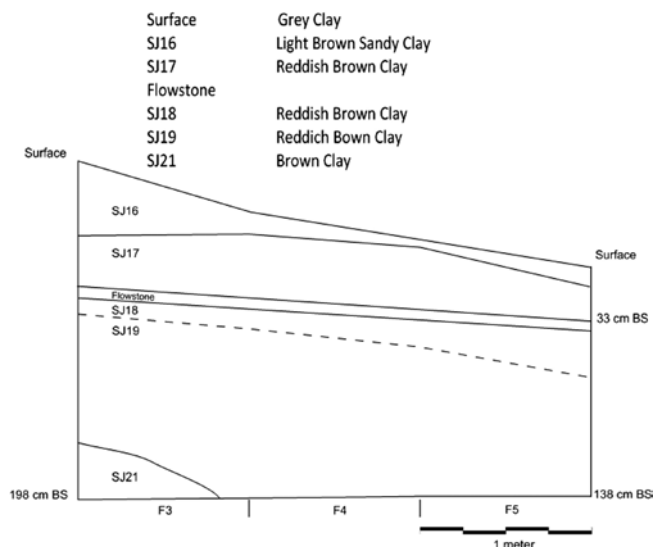
Iako uslijed nedostatka žice za postavljanje odgovarajućeg rasporeda pol-pol s potrebnim razmakom između skupina sonde nije rezultiralo pouzdanim podacima, ispitivanje na nalazištu Bukovac 2013. godine ipak se pokazalo neprocjenjivim, zato što je doprinijelo usavršavanju terenskih postupaka za podešavanje tomografskih linija profila i korištenja mjerača RM85 za prikupljanje tomografskih podataka te zato što je ustanovljeno da je raspored pol-pol najbolji za prikupljanje 2D tomografskih podataka na pećinskim nalazištima kada se radi s tim konkretnim instrumentom.

35 F. Chouker, 2001.  
36 M. Loke, 2017.

35 F. Chouker, 2001.  
36 M. Loke, 2017.

## Trench F South Profile

Stratigraphic Units (SJ)



conditions inside the cave as groundwater seeped into the cavern. With the saturated sediments, the RM85 was operated on the highest level of sensitivity (x10 gain) and did not go over-range at any of the probe spacings. The data was collected along each profile line in the forward direction by placing the current probe at the starting position or 0.0m on the line and connecting the potential probe to the first electrode at the 0.5m position. Once the first reading was collected in the line, the potential probe was moved to the 1.0m spacing while the current probe was left in the same position. This process results in an increase of 0.5m spacing between mobile probes for each reading in a line and was repeated until the maximum spacing of three meters was reached. The second line of data on the RM85 in the same profile line was collected with the current probe at the 0.5m position and the potential probe located at 1.0m. The same process used in the first line was repeated until the potential probe reached the 3.0m position which represents a maximum probe spacing for this line of 2.5m. The above sequence was repeated for each line until the last reading in the profile was recorded with the current probe at the 2.5m position and the potential probe at the 3.0m position. The decrease in maximum probe spacing by one station for each line is why the results of ERT surveys have a trapezoidal shape to their data. This shape would occur regardless of which probe array type is used since greater depth readings with resistance tomography are achieved by increasing the distance between the mobile probes in all instances. As such, a 3m profile with a maximum probe spacing of 3m will have a single data point at its deepest position. Alternatively, a 5m long profile with a maximum probe spacing of 3m would have five readings at the maximum depth because there are five stations along the profile where a probe separation of 3m can be achieved.

Figure 3. Trench F south profile and stratigraphic units.

Slika 3. Sonda F – južni profil i stratigrafske jedinice.

drawing / crtež: Rory Becker

## 4. ERT METODOLOGIJA ZA VELIKU PEĆINU

Ispitivanje ERT-a za potrebe potpovršinskih istraživanja u Velikoj pećini u Kličevici započelo je za vrijeme iskopavanja koja je u jesen 2013. provodilo Sveučilište u Zagrebu. Za referentne sonde smještene izvan špilje korišten je raspored pol-pol. Na ulazu u špilju, gdje je otvorena arheološka sonda F, načinjena su dva profila, svaki od 3 metra (Sl. 2). Elektrode duž oba 3-metarska profila postavljene su u intervalima od po 0,5 metara, a maksimalni razmak između pokretnih sondi iznosio je 3 metra. Uslijed obilnih kiša u danima i tjednima prije ispitivanja, uvjeti u špilji bili su vrlo vlažni zbog cijeđenja površinskih voda. Budući da su sedimenti bili zasićeni, RM85 je bio podešen na najviši stupanj osjetljivosti (pojačanje x 10) i nije izlazio izvan okvira ni kod jednog razmaka između sondi. Podaci su duž svake linije profila prikupljeni prema naprijed, na način da je trenutačno korištena sonda bila postavljena na početni položaj na 0,0 metara na liniji, a da se potencijalna sonda spajala na prvu elektrodu na položaju na 0,5 metara. Nakon što se na liniji obavilo prvo očitavanje, potencijalna je sonda pomaknuta na udaljenost od 1,0 metara, a trenutačno korištena sonda ostavljena je na istom položaju. Taj postupak rezultirao je povećanjem razmaka između pokretnih sondi od 0,5 metara za svako očitavanje na liniji profila. Postupak je ponavljan sve dok se ne bi postigao maksimalni razmak od tri metra. Druga linija podataka na RM85 na istoj liniji profila prikupljena je trenutačno korištenom sondom na položaju na 0,5 metara i potencijalnom sondom smještenom na 1,0 metara. Postupak identičan onome korištenom na prvoj liniji ponavljan je sve dok potencijalna sonda nije dosegla položaj na 3,0 metara, koji predstavlja maksimalni razmak između sondi za ovu liniju od 2,5 metra. Gore opisana sekvenca ponavljana je za svaku liniju, sve dok i posljednje očitavanje na profilu nije obavljeno trenutačno korištenom sondom na položaju na 2,5 metra i potencijalnom sondom na položaju na 3,0 metara. Smanjivanje maksimalnog razmaka između sondi za jednu stanicu na svakoj liniji razlog je što podaci dobiveni ERT mjerenjima imaju trapezoidan oblik. Taj oblik pojavio bi se koji god raspored sondi bio primijenjen, jer se kod geoelektrične tomografije očitavanja na većoj dubini postizu povećavanjem udaljenosti između pokretnih sondi kod bilo kojeg rasporeda. Prema tome, profil od 3 metra s maksimalnim razmakom između sondi od 3 metra imat će samo jednu točku podataka na najdubljem položaju. S druge strane, 5 metara dugi profil s maksimalnim razmakom od 3 metra imat će pet očitavanja na maksimalnoj dubini, zato što duž profila ima pet stanica ondje gdje se može postići razmak sondi od 3 metra.

Budući da je mjerac RM85 namijenjen mjerenju električnog otpora na širem području uz korištenje niza dvostrukih



The RM85 is designed broad area resistance surveys using a twin probe array and so the data collected for ERT surveys with this instrument must be converted to resistivity separately. Conversion of resistance readings requires use of the appropriate formula given the array geometry.<sup>37</sup> For pole-pole arrays, the conversions to resistivity is  $x^*(2a)$  where  $x$  is the resistance reading and  $a$  is the mobile probe spacing in meters when  $x$  was acquired. Once converted and a properly formatted file is written, modeling of the apparent resistivity is handled by the Res2DInv software from Geotomo Software. The measured apparent resistivity data are converted first to calculated apparent resistivity using either the finite-element or finite-difference methods. The data presented here were all processed using the finite-difference method. Finally, the inversion routine utilized in the Res2DInv software is based on the smoothness-constrained least-squares method.

Five additional profiles were established at the Velika Pećina site near the back of the first chamber. These profiles vary in length from 5m to 10m though the electrode spacing for each was 0.5m with a maximum probe spacing of 5m. The sediments in this location were very wet and a puddle of standing water developed during the second day of data collection as moisture from recent storms continued to seep into the cavern. The effects of the standing water on the resistance readings is apparent in these data at about the 3m to 5m mark depending on the particular profile.

## 5. ERT AND EXCAVATION RESULTS

For the topic of this paper we will describe just the two excavation trenches that are relevant for the ERT testing. The first trench, Trench F, at the mouth of the cave (squares F-G 3-5) is approximately 2 x 3m (with exact width depending on the curvature of the cave wall). Figure 3 provides a description of stratigraphy for Trench F based on the south profile of the trench at the border of grid squares E/F 3-5. When compared to the ERT results for Profiles 1 & 2 (Fig. 4), the strong interface apparent in the inversion model, where the apparent resistivity gradients are thin and closely spaced, at approximately 1m below surface does not correspond closely to either the siga layer at approximately 70cm BS on the side near the cave entrance which was discovered during excavations or any other significant change in stratigraphy identified in the excavation. This interface at about 1m BS in the inversion model is more consistent with the modeling design in the Red2DInv program than with the excavation results. The very few data points acquired at 0.5m spacing along a 3m tomography line are insufficient to provide detailed inversion modeling as indicated by Loke.<sup>38</sup> Some variation in the resistivity

sondi, podatke za ERT mjerenja prikupljena njime potrebno je zasebno pretvoriti u otpornost. Za pretvaranje očitavanja otpora potrebna je odgovarajuća formula koja ovisi o geometriji korištenog rasporeda.<sup>37</sup> Za raspored pol-pol, formula za pretvaranje u otpornost je  $x^*(2a)$ , gdje je  $x$  očitavanje otpora, a  $a$  razmak između pokretnih sondi u metrima u trenutku u kojem je očitana  $x$ . Nakon ove konverzije i nakon sastavljanja pravilno formatirane datoteke, uz pomoć softvera Res2DInv tvrtke Geotomo Software modelira se prividna otpornost. Izmjerena prividna otpornost najprije se pretvara u izračunatu otpornost bilo metodom konačnih elemenata, bilo metodom konačnih razlika. Svi ovdje prikazani podaci obrađeni su uz pomoć metode konačnih razlika. I na kraju, potprogram za inverziju kojim se služi softver Res2DInv temelji se na metodi najmanjih kvadrata s glatkom krivuljom.

Na nalazištu Velika pećina, u stražnjem dijelu prve dvorane, načinjeno je pet dodatnih profila. Ti profili imali su dužinu od 5 do 10 metara, iako je razmak između elektroda za svaki bio 0,5 metara, uz maksimalni razmak između sondi od 5 metara. Sedimenti na ovoj lokaciji bili su vrlo vlažni; drugog dana prikupljanja podataka nastala je lokva stajaće vode, jer je vlaga od nedavnih oluja i dalje prodirala u špilju. Djelovanje stajaće vode na očitavanja otpora u tim je podacima očito između oznaka za 3 i 5 metara, ovisno o konkretnom profilu.

## 5. ERT I REZULTATI ISKOPAVANJA

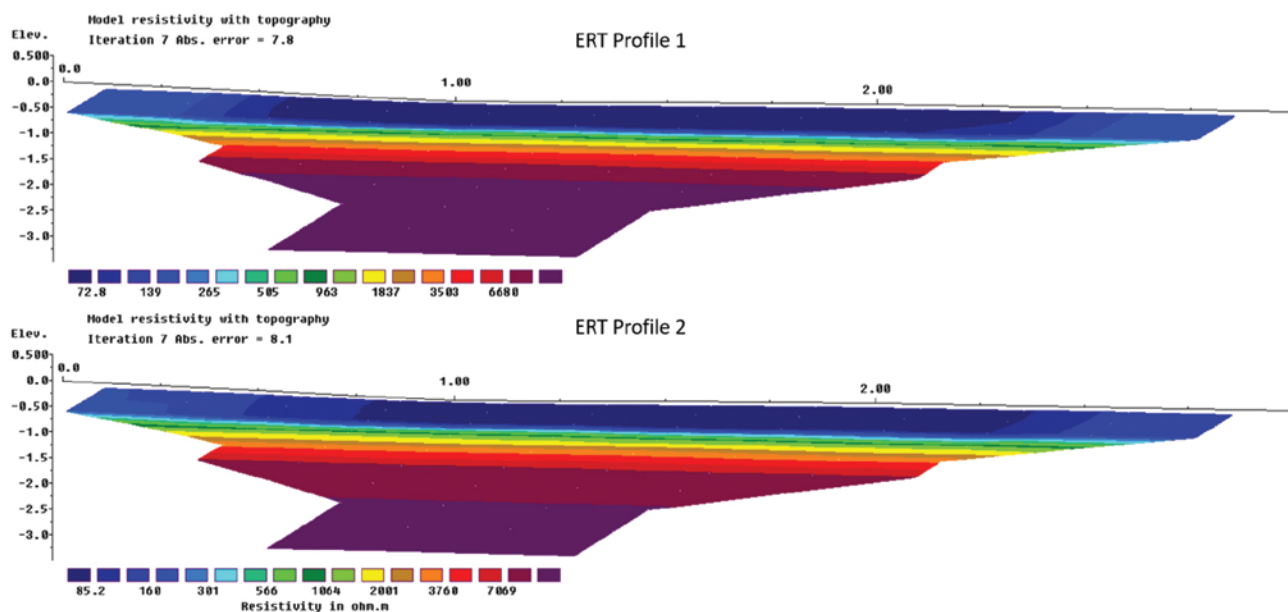
Za potrebe ovog rada opisat ćemo samo one dvije arheološke sonde koje su važne za ispitivanje ERT-a. Prva sonda – sonda F – nalazi se na ulazu u špilju (kvadrati F-G 3-5), a dimenzije su joj oko 2 x 3 metra (točna širina ovisi o zakrivljenosti špiljskog zida). Slika 3 prikazuje stratigrafiju sonde F s pogledom na njezin južni profil na granici kvadranta E/F 3-5. U usporedbi s ERT rezultatima za profile 1 i 2 (Sl. 4), snažno sučelje vidljivo u modelu inverzije, gdje su gradijenti prividne otpornosti tanki i međusobno blizu, na oko 1 metar ispod površine, ne podudara se ni sa slojem sigovine otkrivenim tijekom iskopavanja na oko 70 cm ispod površine blizu ulaza u špilju niti s bilo kojom drugom tada otkrivenom značajnom promjenom u stratigrafiji. To sučelje na oko 1 metar ispod površine u inverznom modelu više je u skladu s programom za modeliranje Red2DInv nego s rezultatima iskopavanja. Loke ukazuje na to da su točke podataka na razmaku od 0,5 metara duž 3-metarske tomografske linije suviše malobrojne za detaljno inverzno modeliranje.<sup>38</sup> U vrijednostima otpornosti za te sedimente od površine do sigovine prisutne su neke varijacije. Te varijacije, međutim, ne koreliraju dobro sa sedimentima opaženim tijekom iskopavanja. I konačno, sedimentni slojevi ispod sigovine slabo su zastupljeni u podacima o otpornosti pa se promjene u

37 M. Loke, 2017.

38 M. Loke, 2017.

37 M. Loke, 2017.

38 M. Loke, 2017.



**Figure 4. ERT profiles 1 & 2 displayed with topography.**

Slika 4. ERT profili 1 i 2 s topografijom.

designed by / izradio: Rory Becker

results for these sediments from the surface to the siga are present though these variations do not correlate well with the sediments as observed during excavations. Finally, the sedimentary layers below the siga are poorly represented in the resistivity data and changes in these deeper sediments discovered through excavation cannot be positively identified in the ERT data. The bedrock was not reached in Trench F at the conclusion of the excavations and the maximum depth near the center of the trench was approximately 150cm BS. Though the ERT data seem to indicate layering below 150cm near the center of the excavation trench (where the deepest data points can be collected), there is little confidence that the information is representative of the actual sediments. Since neither glaring inconsistencies nor obvious errors were identified in the resistance readings collected with the RM85 while using a pole-pole array during field work, we attribute the poor correlation between ERT results and excavation results to the very few data points collected along the tomography line.

The second trench where ERT data was collected, labeled Trench G, is located deeper in the main channel at a distance of 20m from Trench F (Fig. 2). Its size is 1 x 2m (grid squares G 26-27). The stratigraphy was recorded along the north profile of the trench at the border of grid squares G/H 26-27. The sediments in the profile consist of five identified strata with a maximum depth of 35 – 40 cm BS. The location of the trench profile is directly in line with ERT Profile 6 and corresponds to the area at 2 – 3m along the 10 m profile line. ERT Profiles 4 & 5 are also located within the area excavated at Trench G (Fig. 5). The inversion model for this profile poorly represents the shallow sediments to bedrock discovered during excavations of Trench G and is determined to be of little value in this instance as well.

tim dubljim sedimentima, otkrivenima prilikom iskopavanja, ne mogu pouzdano identificirati u ERT podacima. Do kraja iskopavanja nije se stiglo do žive stijene u sondi F, a maksimalna dubina blizu središta sonde bila je oko 150 cm ispod površine. Iako se čini da ERT podaci ukazuju na uslojenost ispod 150 cm blizu središta sonde (gdje se mogu prikupiti podaci iz najveće dubine), malo je vjerojatno da te informacije odražavaju stvarne sedimente. Budući da u vrijednostima otpora izmjenjenima uz pomoć RM85 i uz korištenje rasporeda pol-pol tijekom terenskog rada nisu opažene ni izrazite nedosljednosti ni očite pogreške, lošu korelaciju između rezultata ERT-a i rezultata iskopavanja pripisujemo malobrojnosti točaka podataka na tomografskoj liniji.

Druga sonda u kojoj su prikupljeni ERT podaci, nazvana sondom G, nalazi se dublje u glavnom kanalu, oko 20 metara od sonde F (Sl. 2). Dimenzije su joj 1 x 2 metra (kvadranti G 26-27). Stratigrafija je zabilježena duž sjevernog profila sonde, na granici kvadranta G/H 26-27. Sedimenti u profilu sastoje se od pet identificiranih slojeva maksimalne dubine 35 – 40 cm ispod površine. Lokacija profila sonde poklapa se s ERT profilom 6 i odgovara području smještenom između drugog i trećeg metra desetometarske linije profila. ERT profili 4 i 5 također se nalaze unutar područja istraživanog u sklopu sonde G (Sl. 5). Inverzni model za ovaj profil slabo predstavlja plitke sedimente do žive stijene, otkrivene tijekom iskopavanja sonde G, te je ustanovljeno da je u ovom primjeru od male vrijednosti.

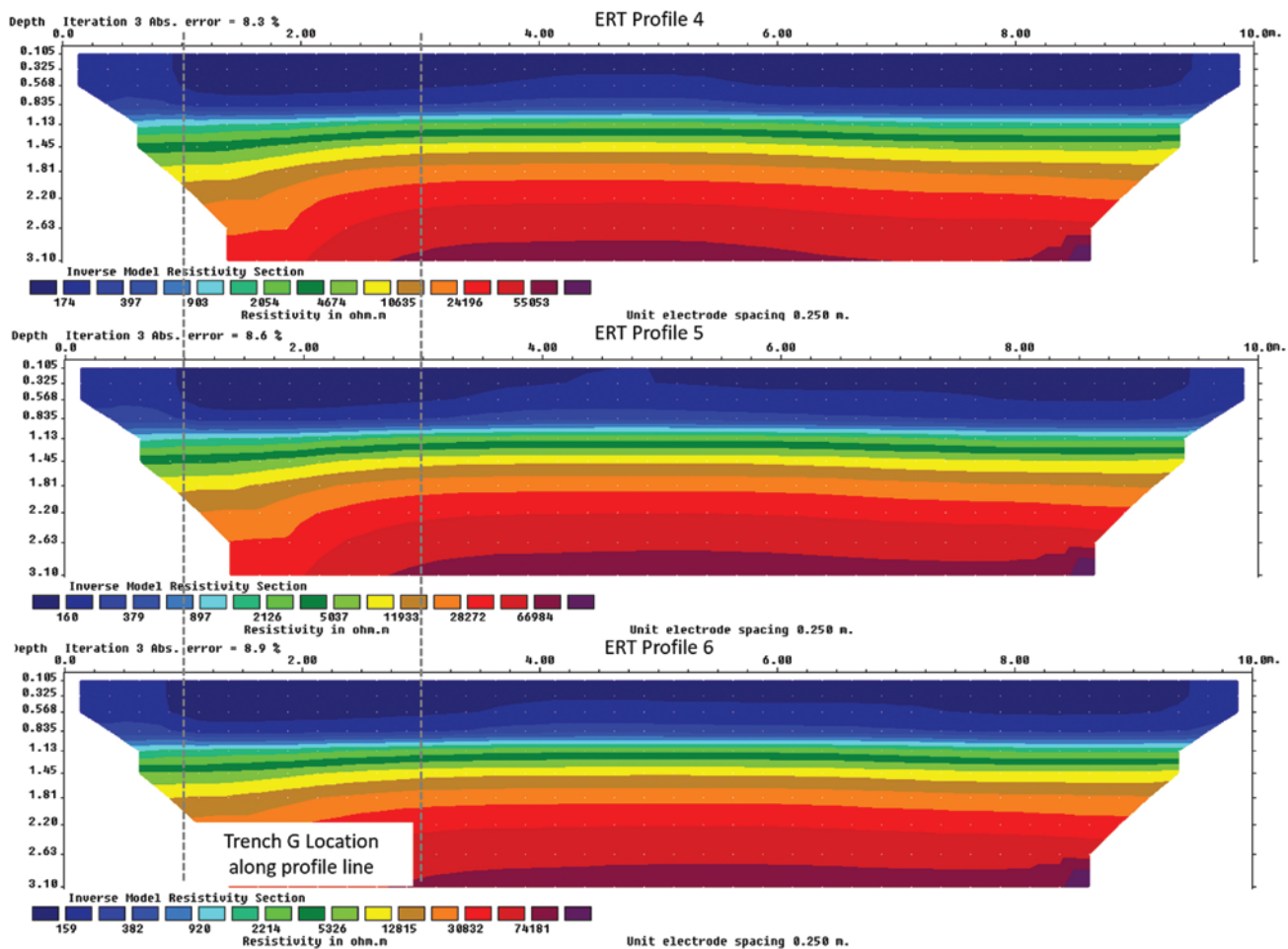


Figure 5. ERT profiles 4, 5, & 6.

Slika 5. ERT profili 4, 5 i 6.

designed by / izradio: Rory Becker

## 6. CONCLUSIONS

ERT Profiles 1 & 2, the two 3m profiles located near the mouth of the cave, do not correlate well with the sediments as observed during excavation. The excavations at the Trench F location reveal there are sediments down to at least 1.5m BS though bedrock has not yet been reached and the depth to bedrock could not be identified in the ERT data. Also of interest, a siga layer was encountered at approximately 30cm BS (variable depending on surface slope) and additional sediments were discovered below the siga layer. A comparison of the ERT results to the excavation results for Trench F shows that neither the apparent resistivity nor inversion modeling prove to be reliable predictors of the siga layer at this location. Five ERT profiles were established in the rear of the first chamber and excavations efforts in this area began in 2014. Three of the 10m tomography lines (ERT profiles 4, 5, & 6) provide data from the location of Trench G which had very shallow sediments

## 6. ZAKLJUČCI

ERT profili 1 i 2 (dva 3-metarska profila u blizini ulaza u špilju), ne koreliraju dobro sa sedimentima opaženima tijekom iskopavanja. Iskopavanja na lokaciji sonde F otkrila su da se sedimenti pružaju najmanje 1,5 metar ispod površine, iako živa stijena još nije dosegnuta niti je njezina dubina mogla biti identificirana u ERT podacima. Značajno je i to da se na oko 30 cm ispod površine (uz određene varijacije uslijed nagiba površine) naišlo na sloj sigovine, a ispod njega su otkriveni dodatni sedimenti. Usporedba rezultata ERT-a i rezultata iskopavanja za sondu F pokazuje da se ni prividna otpornost ni inverzni modeli nisu pokazali pouzdanima za predviđanje slojeva sigovine na ovoj lokaciji. Pet ERT profila načinjeno je u stražnjem dijelu dvorane, a iskopavanja na tom dijelu započela su 2014. godine. Tri od 10 tomografskih linija (ERT profili 4, 5 i 6) pružaju podatke s lokacije sonde G, čiji su sedimenti do žive stijene vrlo plitki u odnosu na druge lokacije u špilji. Maksimalna dubina u sondi G iznosi svega 35-40 cm ispod površine. ERT pseudoprofil na lokaciji sonde G doista ukazuje na prisutnost plitkih sedimenata, iako velika blizina između žive stijene i površine i ovdje čini prilično nepouzdanom dobivenu dubinu do žive stijene. Za sve

to bedrock as compared to other locations in the cave. The maximum depth in Trench G is just 35-40cm BS. The ERT pseudosections in the location of Trench G do indicate the presence of shallow sediments though the close proximity of the bedrock to the surface makes the depth to bedrock results here fairly unreliable as well. For all profiles, reducing the probe spacing to less than 0.5m along the tomography line is the best solution for improving results by both increasing the resolution at shallower depths and increasing the available data points at each depth within the profile.

The primary challenge for utilizing ERT to model sediment depths at cave sites seems to be the restricted space available to establish tomography lines where a sufficient amount of data points may be collected for reliable modeling. However, the combined data from the two sets of profiles and excavation trenches at Velika Pećina in Kličevica provides a starting point for fine tuning the field methodology for this site specifically which can then be generalized for work at other cave sites. Testing the applicability of an RM85 unit across a variety of probe array configurations for collecting tomography data in caves provided valuable information. Continued use of the GEOSCAN instrument in a pole-pole array which both allows for the collection of data from all stations along each profile line in a single pass and requires just one wire to be moved between most readings, seems viable. While this may be the case, comparisons between other resistance meters and equipment types which utilize, or allow for the use of, different probe arrays is needed to test which combination of resistance meter and field methodology provides the most efficient data collection but still produces quality data. Moreover, the 0.5m spacing utilized in this study resulted in an insufficient amount of data for the modeling routines given the short tomography lines available inside the cave environment. Since space in the cave sites cannot be increased, a reduction in probe spacing along each tomography line to at least 0.25m or less, thereby doubling the amount of data collected along each line, may provide sufficient resolution in the data making the modeling of subsurface sediments more reliable and useful. Finally, comparisons of ERT with other remote sensing techniques at the same locations needs to be accomplished.<sup>39</sup> Specifically, comparisons between ERT and GPR pseudosections from the same profile lines at several cave sites will greatly inform this line of inquiry.<sup>40</sup> Should ERT demonstrate a capacity to produce accurate 2D models of sediments to bedrock in cave site environments, then 3D modeling of the subsurface sediments may be explored.<sup>41</sup>

profile, smanjivanje razmaka između sonde na manje od 0,5 metara duž tomografske linije najbolje je rješenje za dobivanje boljih rezultata kako povećavanjem rezolucije na manjim dubinama, tako i povećavanjem raspoloživih točaka za prikupljanje podataka na svakoj dubini unutar profila.

Čini se da je glavni izazov za korištenje ERT-a u modeliranju dubina sedimenata na pećinskim nalazištima ograničeni prostor koji je na raspolaganju za kreiranje tomografskih linija ondje gdje je moguće prikupiti dovoljno točaka podataka za pouzdano modeliranje. No kombinirani podaci iz dvije skupine profila i arheoloških sonde u Velikoj pećini na lokalitetu Kličevica polazna su točka za fino podešavanje terenske metodologije za ovo konkretno nalazište, a koja se kasnije generalizacijom može primijeniti i na druga pećinska nalazišta. Ispitivanjem primjenljivosti jedinice RM85 na različite konfiguracije sonde za prikupljanje tomografskih podataka došlo se do vrijednih informacija. Daljnja upotreba uređaja GEOSCAN u rasporedu pol-pol koji omogućava prikupljanje podataka sa svih stanica duž svake linije profila u jednom jedinom prolasku i zahtijeva pomicanje samo jedne žice između većine očitavanja čini se perspektivnom. To možda jest tako, ali potrebno ga je usporediti s drugim mjeracima otpora i opremom koja koristi, ili omogućava korištenje, različitih rasporeda sonde, kako bi se ispitalo koja kombinacija mjerača otpora i terenske metodologije omogućava najučinkovitije prikupljanje podataka, a da ujedno daje i najkvalitetnije podatke. Osim toga, razmak od 0,5 metara, korišten u ovom radu, rezultirao je količinom podataka nedovoljnom za potprograme za modeliranje, jer su tomografske linije raspoložive u špiljskom okružju bile kratke. Budući da se prostor na pećinskim nalazištima ne može povećati, smanjivanje razmaka između sonde duž svake tomografske linije na barem 0,25 metara ili manje (čime bi se udvostručila količina podataka prikupljenih duž svake linije) mogla bi osigurati dovoljnu rezoluciju podataka te tako učiniti modeliranje potpovršinskih sedimenata pouzdanijim i korisnijim. I na kraju, potrebno je usporediti ERT s drugim tehnikama daljinskog istraživanja na istim lokacijama.<sup>39</sup> Konkretno, usporedbe između ERT i GPR pseudoprofila s istih linija profila na nekoliko pećinskih nalazišta u velikoj će mjeri oblikovati ovo ispitivanje.<sup>40</sup> Ukoliko se ERT pokaže sposobnim proizvesti točne 2D modele dubine sedimenata do žive stijene u okružju pećinskih nalazišta, tada bi se moglo istražiti i 3D modeliranje potpovršinskih sedimenata.<sup>41</sup>

Točno određivanje dubine do žive stijene na cijelom podu špilje te identificiranje pojedinačnih slojeva u špiljskim sedimentima omogućava istraživačima da se

39 N. Papadopoulos *et al.*, 2012.

40 M. Bongiovanni – M. Vega – N. Bonomo, 2011.

41 N. Papadopoulos *et al.*, 2011.

39 N. Papadopoulos *et al.*, 2012.

40 M. Bongiovanni – M. Vega – N. Bonomo, 2011.

41 N. Papadopoulos *et al.*, 2011.



Accurate determination of depth to bedrock across a cave floor and identification of individual stratigraphic layers within the cave sediments allows the researchers to target areas of high probability within the site. The ability to produce subsurface maps of the cave sediments would allow archaeologists to conduct more efficient investigations through standard excavation techniques saving both time and costs. Much of the eastern Adriatic is a karstic region with numerous caves and rock-shelters. Additionally, the Paleolithic record in general is heavily biased towards cave sites. Therefore, developing the ERT technique in cave environments may have a significant impact on continued research. Though the ERT surveys at Velika Pećina in Kličevica did not produce reliable results, they represent the beginnings of a testing regime with the potential to assist and inform future cave site excavation efforts.

### ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank to Eastern Oregon University, the Croatian Science Foundation, the Ministry of Culture of the Republic of Croatia, the Faculty of Humanities and Social Sciences at the University of Zagreb, the University of Wyoming, Zadar County, and the Archaeological Museum in Zadar for financial support of field research during 2013-14 when ERT was done. We would also like to thank to Archaeological Museum Zadar and Benkovac Regional Museum for logistic support during excavation. Finally, thanks to Dale Arnold for GIS support associated with the manuscript.

### Bibliography / Literatura

- Aspinall, A. – Gaffney, C. F., 2001 – The Schlumberger Array – Potential and Pitfalls in Archaeological Prospection, *Archaeological Prospection* 8, 199-209.
- Batović, Š., 1965 – Prvi paleolitski nalazi u sjevernoj Dalmaciji, *Diadora* 3, 205-209.
- Batović, Š., 1988 – Paleolitički i mezolitički ostaci s Dugog otoka, *Poročilo o raziskovanju paleolita, neolita in eneolita v Sloveniji* XVI, 7-54.
- Berge, M. A. – Drahor, M. G., 2011 – Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modeling, *Archaeological Prospection* 18, 159-171.
- Berge, M. A. – Drahor, M. G., 2011a – Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part II – A Case from Old Smyrna Höyük, Turkey, *Archaeological Prospection* 18, 291-302.
- Bevan, B., 2000 – The Pole-Pole Resistivity Array Compared to the Twin Electrode Array. *Geosight Technical Report No. 6*, Manuscript on file at Geosight, Weems, VA.
- Bongiovanni, M. V. – Vega, M. – Bonomo, N., 2011 – Contribution of the Resistivity Method to Characterize Mud Walls in a Very Dry Region and Comparison with GPR, *Journal of Archaeological Science* 38, 2243-2250.
- Chapman, J. – Shiel, R. – Batović, Š., 1996 – *The Changing Face of Dalmatia. Archaeological and ecological studies in a Mediterranean landscape*, Leicester University press, The Society of Antiquaries of London, London.
- Chouker, F., 2001 – Archaeological Site Investigation by Geoelectrical Measurements in Tel-Halawi (Northern Syria), *Archaeological Prospection* 8, 257-263.
- Clark, A., 1997 – *Seeing Beneath the Soil*, Routledge, London.

na nalazištu orijentiraju na područja visoke vjerojatnosti. Mogućnost izrade karata potpovršinskih špiljskih sedimenta omogućila bi arheolozima učinkovitije istraživanje u sklopu standardnih tehnika iskopavanja te uštedu vremena i smanjivanje troškova. Najveći dio istočnog Jadrana sastoji se od krških područja s brojnim špiljama i kamenim skloništima. Osim toga, paleolitički izvori pristrani su u korist pećinskih nalazišta. Stoga bi razvoj ERT tehnike u pećinskom okruženju mogao imati znatan utjecaj na daljnja istraživanja. Iako ERT mjerenja u Velikoj pećini u Kličevici nisu dala pouzdane rezultate, ona predstavljaju početak režima ispitivanja koji bi mogao poduprijeti i oblikovati buduća iskopavanja na pećinskim nalazištima.

### ZAHVALE

Željeli bismo zahvaliti Sveučilištu Eastern Oregon, Hrvatskoj zakladi za znanost, Ministarstvu kulture Republike Hrvatske, Filozofskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Sveučilištu u Wyomingu, Zadarskoj županiji i Arheološkom muzeju Zadar na financijskoj potpori tijekom provođenja ERT-a 2013. i 2014. godine. Također bismo željeli zahvaliti Arheološkom muzeju Zadar i Zavičajnom muzeju Benkovac na logističkoj potpori tijekom iskopavanja. I napokon, hvala Daleu Arnoldu za pomoć oko GIS-a za potrebe ovog rukopisa.



- Dabas, M. – Tabbagh, A. – Tabbagh, J., 1994 – 3-D Inversion in Subsurface Electrical Surveying – I. Theory, *Geophysical Journal International* 119(3), 975-990.
- Dogan, M. – Papamarinopoulos, S., 2003 – Geoelectric Prospection of a City Wall by Multi-electrode Resistivity Image Survey at the Prehistoric Site of Asea (Southern Greece), *Archaeological Prospection* 10, 243-248.
- Drahor, M. G., 2011 – A Review of Integrated Geophysical Investigations from Archaeological and Cultural Sites under Encroaching Urbanisation in Izmir, Turkey, *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1294-1309.
- Karavanić, I. – Čondić, N., 2006 – Probno sondiranje Velike pećine u Kličevici kod Benkovca, *Obavijesti Hrvatskog arheološkog društva XXXVIII/2*, 45-50.
- Karavanić, I. – Čondić, N. – Vukosavljević, N. 2007 – Velika pećina u Kličevici, *Hrvatski arheološki godišnjak* 3/2006, 347-347.
- Karavanić, I. – Miracle, P. T. – Culiberg, M. – Kurtanjek, D. – Zupanić, J. – Golubić, V. – Paunović, M. – Mauch Lenardić, J. – Malez, V. – Šošić, R. – Janković, I. – Smith, F. H., 2008 – The Middle Paleolithic from Mujina pećina, Dalmatia, Croatia, *Journal of Field Archaeology* 33(3), 259-277.
- Karavanić, I. – Vukosavljević, N. – Šošić Klindžić, R. – Ahern, J. C. M. – Čondić, N. – Becker, R. J. – Zubčić, K. – Šuta, I. – Gerometta, K. – Boschian, G., 2014 – The Late Mousterian in the eastern Adriatic – towards understanding of late Neanderthals' identity and their demise Project: a summary of the 1st year of research, *Prilozi Instituta za arheologiju u Zagrebu* 31, 139-157.
- Karavanić, I. – Janković, I. – Ahern, J. C. M. – Smith, F. H., 2014a – Current research on the Middle Paleolithic cave, open-air and underwater sites in Dalmatia, Croatia, In: Sazelova, S., Hupkova, A., Morkovsky, T. (Eds.). *Mikulov Anthropology Meeting. The Dolní Věstonice Studies* 20, Academy of Sciences of the Czech Republic, Institute of Archeology; Masaryk University, Department of Anthropology, Brno, 31-36.
- Karavanić, I. – Vukosavljević, N. – Čondić, N. – Miko, S. – Razum, I. – Iljanić, N. – Zubčić, K. – Šošić Klindžić, R. – Ahern, J.C.M. – Barbir, A., 2016 – Projekt "Kasni musterijen na istočnom Jadranu – temelj za razumijevanje identiteta kasnih neandertalaca i njihovog nestanka": sažetak 2. i 3. godine istraživanja / Project Late Mousterian in the eastern Adriatic – towards understanding of late Neanderthals' identity and their demise: summary of the 2nd and 3rd years of research, *Prilozi Instituta za arheologiju u Zagrebu* 33, 271-285.
- Leopold, M. T. – Plöckl, G. – Forstenaicher –Völkel, J., 2010 – Integrating Pedological and Geophysical Methods to Enhance the Informative Value of an Archaeological Prospection – The Example of a Roman Villa Rustica near Regensburg, Germany, *Journal of Archaeological Science* 39, 1731-1741.
- Loke, M. H., 2017 – *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, Geotomo Software, Penang, Malaysia.
- Malez, M. 1979 – Nalazišta paleolitskog i mezolitskog doba u Hrvatskoj. In: Benac, A. (Ed.), *Praistorija jugoslavenskih zemalja I – paleolit i mezolit*, Svjetlost, Sarajevo, 227-276.
- Monfort, C. C., 2013 – Earth Resistance Survey: A Mature Archaeological Geophysics Method for Archaeology. In: Corsi, C., Slapišak, B., Vermeulen, F. (Eds.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non-invasive Survey of Complex Archaeological Sites*, Springer International Publishing, Switzerland, 153-163.
- Noel, M. – Xu, B., 1991 – Archaeological Investigation by Electrical Resistivity Tomography: A Preliminary Study, *Geophysical Journal International* 107(1), 95-102.
- Papadopoulos, N. G. – Tsourlos, P. – Tsokas, G. N. – Sarris, A., 2006 – Two-dimensional and Three-dimensional Resistivity Imaging in Archaeological Site Investigation, *Archaeological Prospection* 13, 163-181.
- Papadopoulos, N. G. – Tsourlos, P. – Papazachos, C. – Tsokas, G. N. – Sarris, A. – Kim, J. J., 2011 – An Algorithm for Fast 3D Inversion of Surface Electrical Resistivity Tomography Data: Application on Imaging Buried Antiquities, *Geophysical Prospecting* 59, 557-575.
- Papadopoulos, N. G. – Sarris, A. – Salvi, M. C. – Dederix, S. – Soupois, P. – Dikmen, U., 2012 – Rediscovering the Small Theatre and Amphitheatre of Ancient Ierapytna (SE Crete) by Integrated Geophysical Methods, *Journal of Archaeological Science* 39, 1960-1973.
- Petrić, N. 1979 – Mujina pećina, Trogir - paleolitičko nalazište, *Arheološki pregled* 20 (1978), 9.
- Rink, J. W. – Karavanić, I. – Pettitt, P. – van der Plicht, J. – Smith, F. H. – Bartoll, J., 2002 – ESR and AMS-based 14C dating of Mousterian levels at Mujina pećina, Dalmatia, Croatia, *Journal of Archaeological Science* 29/9, 943-952.
- Samouëlian, A. – Cousin, I. – Tabbagh, A. – Bruand, A. – Richard, G., 2005 – Electrical Resistivity Survey in Soil Science: A Review, *Soil and Tillage Research* 83, 173-193.
- Schmidt, A., 2001 – *Geophysical Data in Archaeology: A Guide to Good Practice*, Oxbow Books, Oxford.
- Vujević, D., 2007 – *Srednji paleolitik na području južno od Ražanca*, Neobjavljeni magistarski rad/Unpublished MA Thesis, Sveučilište u Zadru, Zadar.
- Vujević, D. – Perhoč, Z. – Ivančić, T. 2017 – Micro-Mousterian in Northern Dalmatia. *Quaternary International*, 450, 50-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2016.11.019>
- Walker, A.R., 2000 – Multiplexed Resistivity Survey at the Roman Town of Wroxeter, *Archaeological Prospection* 7, 119-132.