

# *Geofizikalne raziskave v kraškem okolju: rezultati električne upornostne tomografije in nizkofrekvenčne elektromagnetne metode na primeru utrjene naselbine Gradišnica pri Dolenjem Gradišču*

*Geophysical research in the karst environment: electrical resistivity tomography and low-frequency electromagnetic method results, case study of the fortified settlement Gradišnica near Dolenje Gradišče*

© Barbara Horn

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo in Gearh d. o. o., barbarahorn01@gmail.com

© Branko Mušič

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo in Gearh d. o. o., brankomusic1@yahoo.com

© Matija Črešnar

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo in Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, matija.cresnar@gmail.com

© Petra Basar

Sarajevska 8c, 47000 Karlovac, R. Hrvatska, petra.basar@gmail.com

**Izveček:** V članku predstavljamo rezultate geofizikalnih meritev z električno upornostno tomografijo (ERT) in nizkofrekvenčno elektromagnetno metodo (*CMD Mini-Explorer*) na utrjeni naselbini Gradišnica pri Dolenjem Gradišču. Uporabili smo ju kot prednostni metodi za raziskave tega arheološkega najdišča v kraškem okolju. Rezultati navidezne prevodnosti in magnetne susceptibilnosti CMD metode, združeni z osnovnimi arheološkimi podatki, kažejo na pogoste prežgane ostaline in najverjetneje tudi kamnite zidne strukture znotraj globinskega dosega nizkofrekvenčne elektromagnetne metode (do 1,8 m globine), inverzni ERT modeli pa pojasnjujejo zgradbo na površju vidnih pregibov teras, utrdbenih struktur in vrtače z natančnejšo določitvijo globine in dimenzij arheoloških struktur ter različnih kraških oblik v apnenčevi podlagi.

**Gljučne besede:** električna upornostna tomografija (ERT), nizkofrekvenčna elektromagnetna metoda (*CMD Mini-Explorer*), kraško okolje, utrjena naselbina

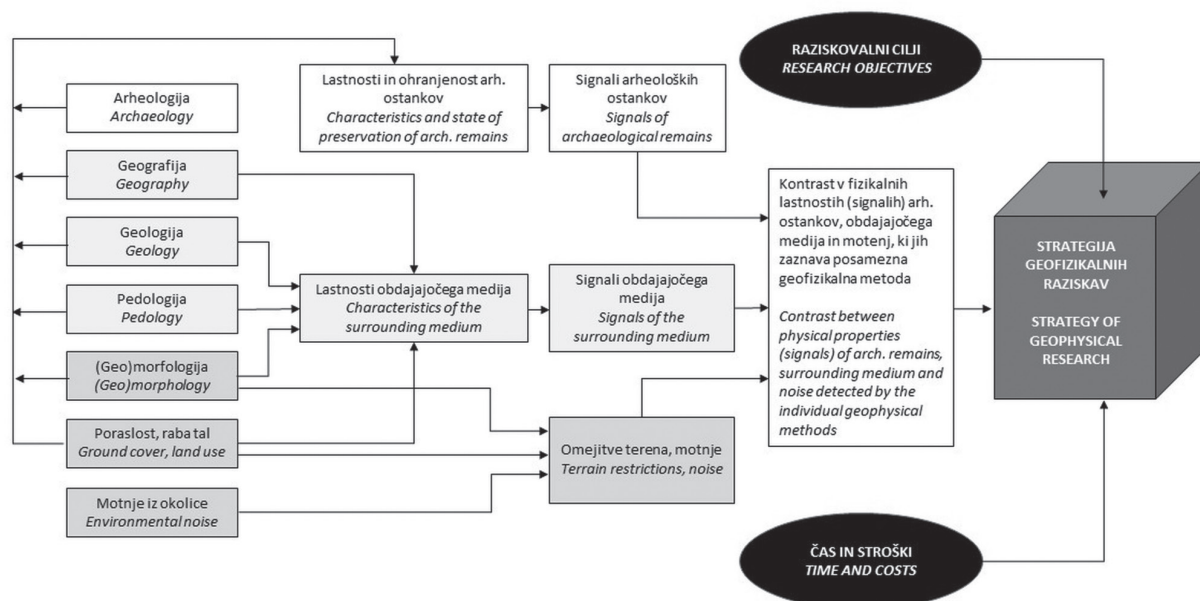
**Abstract:** This article presents the results of geophysical research with electrical resistivity tomography (ERT) and low-frequency electromagnetic (*CMD Mini-Explorer*) methods, which were preferably chosen in research of the fortified settlement Gradišnica near Dolenje Gradišče, located in the karst environment. The results of the apparent conductivity and magnetic susceptibility of the CMD method indicate a relatively high frequency of burnt and, most likely, also stone wall archaeological remains within the depth range of the method (up to 1.8m depth). On the other hand, the inverse ERT models explain the composition of the terrace folds, construction of the fortification, doline visible on the surface and furthermore, more accurately define the depths and dimensions of archaeological structures and karst features in the limestone bedrock.

**Keywords:** electrical resistivity tomography (ERT), low-frequency electromagnetic method (*CMD Mini-Explorer*), karst environment, fortified settlement

## *Uvod*

Tehnološki in metodološki razvoj arheološke znanosti v zadnjih letih in njena usmerjenost v multidisciplinarnost sta v Sloveniji omogočila intenzivnejše raziskave prazgodovinskih naselbin in krajine. To je vodilo ne le v nadgradnjo že obstoječih postopkov raziskav, temveč tudi v testiranje in uveljavitev novih metod in postopkov v sklopu terenskih raziskav. Med temi sta se v okviru neinvazivnih arheo-geofizikalnih raziskav kot komplementarni metodi, poleg že ustaljenega nabora geofizikalnih metod (magnetometrija, georadar in geo-električno kartiranje) (npr. Mušič 1999; Mušič, Horvat

2007; Mušič *et al.* 2015; Medarić *et al.* 2016), uveljavili metoda električne upornostne tomografije (v nadaljevanju ERT – *Electrical Resistivity Tomography*) in nizkofrekvenčna elektromagnetna metoda z instrumentom *CMD Mini-Explorer* (v nadaljevanju *CMD – Conductivity Multy Depth*). Prva omogoča kvantitavno analizo ter stratigrafsko in strukturno interpretacijo podpovršja na podlagi porazdelitev električne upornosti (npr. Horn *et al.* 2017 *v tisku*; Mušič *et al.* 2018; Horn *et al.* 2018a; Horn *et al.* 2018b), druga sočasno pridobivanje večje količine podatkov o električni prevodnosti (konduktivnosti) in magnetni susceptibilnosti podpovršja na treh globinskih intervalih (npr. Basar 2018).



Slika 1. Shematski prikaz ključnih dejavnikov odločanja pri strategiji arheo-geofizikalnih raziskav.

Figure 1. Schematic illustration of key decision-making factors in archaeo-geophysical survey strategy.

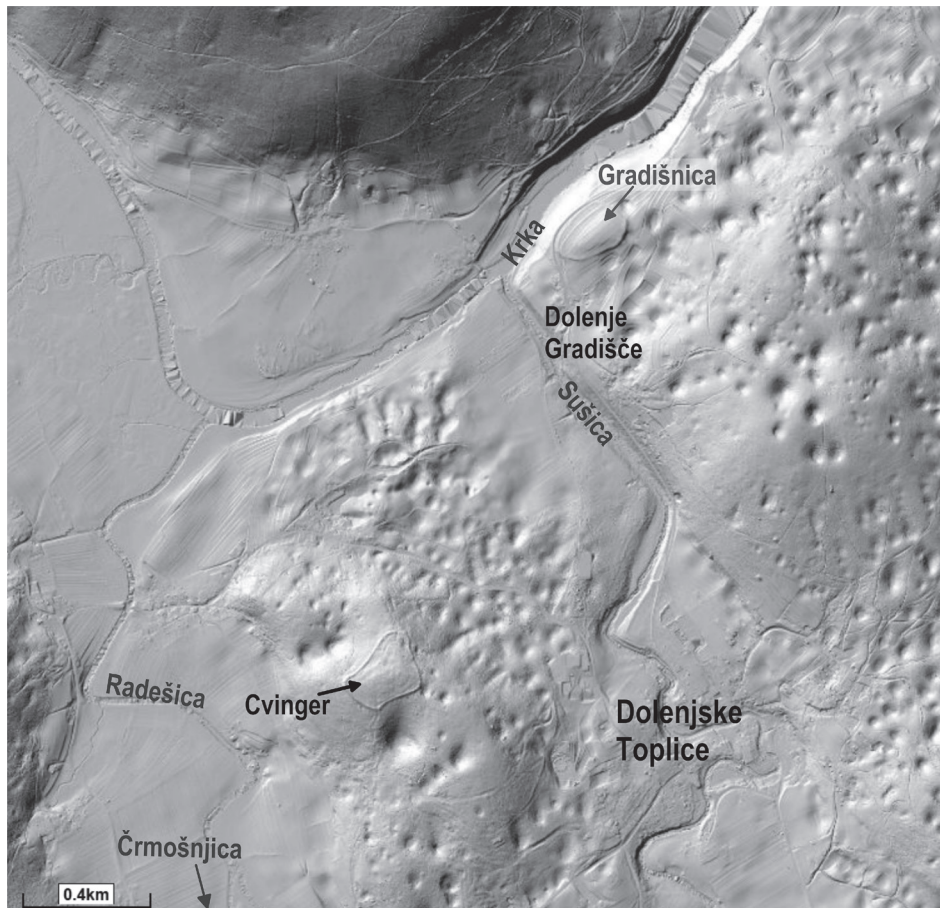
Na strategijo izvedbe geofizikalnih raziskav v specifičnih arheološko-okoljskih danostih vpliva veliko dejavnikov, ki so povezani z medsebojnimi vplivi (slika 1). Za optimalne rezultate raziskav, skladno z njihovimi cilji, je potrebno najprej opredeliti (ali vsaj oceniti, kadar vhodni podatki niso znani) tip, sestavo, geometrijo, globino ter ohranjenost pričakovanih (ali že znanih) arheoloških ostankov, geografsko lokacijo, klimatske in hidrografske razmere na območju najdišča (predvsem vsebnost vlage), sestavo in fizikalne lastnosti geološke podlage ter debelino prsti, geomorfološke značilnosti raziskovalnega območja, poraslost območja in rabo tal ter oceniti stopnjo vpliva njihovih motenj za posamezno geofizikalno metodo.

Danes predstavljajo zelo pomembno podlago vsem arheo-geofizikalnim raziskavam v kombinaciji z aerofotografijo in satelitskimi posnetki, podatki zračnega laserskega snemanja (ZLS), ki zaradi dostopnosti v zadnjem desetletju ponujajo dodaten sistematičen, neinvaziven in razmeroma finančno dostopen način pridobivanja

informacij o arheoloških najdiščih in časovni globini krajine (Mlekuž 2017).

Na podlagi ZLS in satelitskih posnetkov (sliki 2 in 3) lahko razberemo več pomembnih vhodnih podatkov tudi za območje utrjene naselbine Gradišnica pri Dolenjem Gradišču. Med očitnejšimi arheološkimi in geološkimi oblikami so nekoliko privzdignjeno območje osrednjega dela naselbine, obrambni nasip in terase s strmimi pregibi. Na voljo pa so tudi podatki o površini in nadmorski višini naselbine ter položaju številnih vrtač kot posebnosti kraškega okolja, usmerjenosti nekdanjih ornici v smeri SV–JZ in namembnosti površin.

Za kraško okolje je značilno zelo razgibano površje s pogostimi izdanki apnenca, zelo spremenljivo debelino prsti na kratkih razdaljah in prisotnostjo kavern, kotanj in vrtač, zapolnjenih z drobnozrnatimi, relativno vlažnejšimi sedimenti. Ker te okoljske posebnosti že same povzročajo tudi močne kontraste v signalih pri vseh geofizikalnih metodah, ponuja to okolje razmeroma zapletene razmere za arheo-geofizikalne raziskave. Interpretacija



Slika 2. Položaj Gradišnice pri Dolenjem Gradišču in Cvingerja pri Dolenjskih Toplicah na ZLS posnetku (vir: Splet 1).

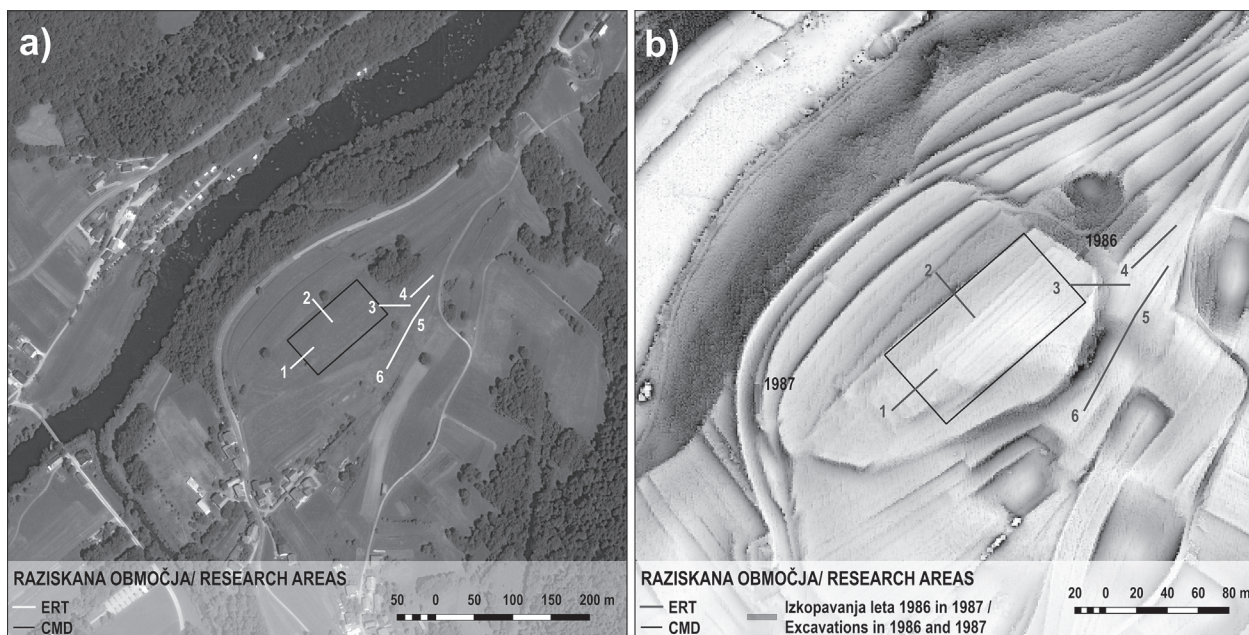
Figure 2. Position of Gradišnica near Dolenje Gradišče and Cvinger near Dolenjske Toplice shown on the Lidar map (source: Web 1).

je lahko dodatno otežena zaradi slabo ohranjenih arheoloških ostankov na nekdanjih poljedelskih površinah, kar velja tudi za Gradišnico pri Dolenjem Gradišču.

Zaradi vseh teh okoliščin in razmeroma skopih arheoloških podatkov so naši raziskovalni cilji, poleg preverjanja sestave površinskih oblik, prepoznanih na ZLS posnetkih, zajemali tudi vpogled v stratigrafijo arheoloških in geoloških plasti. Pri tem smo želeli ugotoviti globino in oblikovanost apnenca v geološki podlagi, posebej pa smo bili pozorni na morebitno prisotnost kotanj, ki lahko predstavljajo območja večje akumulacije arheoloških ostankov. Zato smo izvedli geofizikalne raziskave z metodama ERT in CMD, katerih rezultate predstavljamo

v pričujočem prispevku. Čeprav sta omenjeni metodi različni po načinu delovanja, izvajanju meritev ter tudi obdelavi podatkov (glej npr. Dobrin, Savit 1988; Telford *et al.* 1990; Reynolds 2011; Everet 2013), imata do določene mere skupni imenovalec v pridobivanju globinskih podatkov z možnostjo njihovega navpičnega razčlenjevanja. Poleg arheologije se uporabljata tudi na drugih raziskovalnih področjih, med katerimi naj za potrebe naših raziskav izpostavimo predvsem geologijo in pedologijo (glej npr. Loke *et al.* 2013; Grisso *et al.* 2009; GF Instruments 2016). To pa so tudi razlogi, da smo ti dve metodi uporabili prednostno pri raziskavah Gradišnice pri Dolenjem Gradišču.





Slika 3. Gradišnica pri Dolenjem Gradišču z označenimi raziskanimi območji; a) satelitski posnetek (vir: Splet 2); b) DMR na podlagi ZLS posnetka (vir: Splet 1).

Figure 3. Gradišnica near Dolenje Gradišče with marked research areas; a) satellite image (source: Web 2); b) DMR on a basis of Lidar data (source: Web 1).

### Legat naselbine

Gradišnica, nižinska utrjena naselbina, se nahaja pri vasi Dolenje Gradišče (pri Dolenskih Toplicah), nad sotočjem Krke in Sušice (sliki 2 in 3). Gre za strateško izbrano lego, ki omogoča nadzor nad reko Krko in naravno dolinsko komunikacijo po dolini Sušice v smeri Bele Krajine. Ob tem leži le dober kilometer severozahodno od dobro poznane utrjenega gradišča Cvinger pri Dolenjskih Toplicah (slika 2), ki sodi v pozno bronasto in starejšo železno dobo in se ponaša tudi s talilniškim območjem ter gomilnimi nekropolami (glej npr. Mušič, Orengo 1997; Dular, Križ 2004; Dular, Tecco Hvala 2007; Črešnar *et al.* 2017).

Gradišnica je po dosedanjih objavah datirana predvsem v prazgodovinsko obdobje (Križ 1987; isti 1988; Dular, Tecco Hvala 2007, 343, sl. 266), vendar se omenjajo tudi mlajše najdbe oz. ostaline (Križ 1987, 242). Za potrebe naše raziskave smo sicer pridobili podatke z zaščitnih raziskav, a na tem mestu kronološke pripadnosti posameznih faz najdišča natančneje ne obravnavamo.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zahvale za vpogled v dokumentacijo o dosedanjih terenskih raziskavah Gradišnice in za pregled takrat pridobljenih najdb gredo dr.

Naselbina z nasipom obsega površino pribl. 2,8 ha na nadmorski višini 205–225 m in je trenutno v rabi kot travniška površina. Poleg nasipa so prepoznavne tudi terase, ki so lahko arheološkega in/ali sodobnega izvora, ter smeri ornice kot posledica sodobnega poljedelstva. V geomorfološko-geološkem smislu leži na nekoliko privzdignjenem platoju iz gostega jurskega plastnatega apnenca z ooliti (Pleničar, Premru 1977). Na digitalnem modelu reliefa (DMR), pridobljenem iz ZLS podatkov (slika 3), je naselje na vzhodni in južni strani jasno zamejeno z ostrim, odsekanim robom, v obrambni sistem pa so učinkovito vključeni tudi robovi kraških vrtač.

### Pregled arheoloških raziskav

Kljub temu da je bilo najdišče omenjeno že v 19. stoletju, so za poznavanje najdišča pomembne predvsem zaščitne raziskave iz 80. let 20. stoletja (Križ 1987; isti 1988), kasneje pa je bil narejen tudi topografski izris naselbine

Borutu Križu in Petri Stipančič iz Dolenjskega muzeja Novo mesto ter dr. Philu Masonu z Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije, OE Novo mesto.



(Dular, Tecco Hvala 2007, sl. 266). Zaščitne raziskave so bile izvedene na vzhodnem robu naselbine, kjer je bilo obzidje poškodovano in razgaljeno z obdelovanjem vinograda na pobočju tik pod naseljem, in na njeni severozahodni strani, kjer je bil ob gradnji ceste razkrit in poškodovan del obrambnih struktur.

S sondo (10 × 3 m) na vzhodni strani naselja, ki je prečila ostaline obzidja in nasipa, je bilo ugotovljenih pet plasti: najglobljo plast je predstavljala rumena ilovica brez kulturnih ostankov (geološka osnova), nad njo je bila po vsej dolžini profila 8–20 cm debela plast sive, mastne zemlje s koščki oglja in ostanki organskih snovi (plast II), nad to pa se je nahajala plast rdeče-rjave ilovice (plast III), ki je bila prekrita s plastjo grušča, peska in večjih kamnov (plast IV). Slednjo razumemo

kot ostanke zidu, močno poškodovanega z vinogradniško dejavnostjo (slika 4 zgoraj). Prekrivala jih je le še plast V, sivo-rjava zemlja, oz. orna plast, ki je vsebovala tudi nekaj kamenja zidu.

Na severozahodni strani je zaradi gradnje ceste nastal presek, ki je načel ostaline utrdbenih struktur naselja. Arheološko dokumentiran presek (dol. 12 m, viš. 3,6 m) ponuja naslednje sosledje plasti: geološka osnova je rdečkasto rumena plast z oksidi, nad njo je 60–70 cm temno rjave kompaktne ilovice, sledi nekajcentimetrska črna prežgana plast z ostanki lesa in žganine, nanjo pa je bil postavljen kamniti zid. V višino je bil ohranjen dober meter, nad njim pa je še 25–35 cm črne orne zemlje (slika 4 spodaj). Pri kopanju jarka za infrastrukturo so v notranjosti gradišča ob tem odkrili številne keramične



Slika 4. Gradišnica pri Dolenjem Gradišču. Sonda v severovzhodnem delu naselja med izkopavanjem leta 1986 (zgoraj, pogled proti jugovzhodu) in arheološko dokumentiranje poškodbe utrdbenih struktur na njegovem vzhodnem delu leta 1987 (spodaj, pogled proti jugu) (foto: B. Križ, Arhiv ZVKDS OE Novo mesto).

Figure 4. Gradišnica near Dolenje Gradišče. Trial trench in the northeastern part of the settlement during excavation in 1986 (above, view to the southeast) and documentation of the destruction of the fortification constructions in its eastern part in 1987 (below, view to the south) (Photo: B. Križ, Archive IPCHS RU Novo mesto).

svitke in odlomke lončenine, ki so ležali v popolnoma prežgani rdeče-oranžni zemlji. Na mestu, kjer je jarek presekala obzidje, je bil odkrit do 2 m širok pas kamenja, ki predstavlja ostanke kamnitega obzidja.

Če povzamemo dosedanja dognanja zaščitnih raziskav, je bilo ugotovljeno, da je bilo naselje v starejši fazi utrjeno z zemljenim nasipom, v mlajši fazi pa je bilo na ostanke zemljenega nasipa postavljeno kamnito obzidje.

## Metodologija

### Metoda električne upornostne tomografije (ERT)

Zaradi natančnih 2D in 3D analiz ter naprednih postopkov vizualizacije, ki omogočajo podrobnejši vpogled v arheološke vsebine pod površja, postaja v arheologiji ERT vedno bolj upoštevana in s tem tudi pogosto uporabljena neinvazivna metoda. Uspešno se uporablja pri raziskavah večplastnih naselbin (Diamanti *et al.* 2005; Berge, Drahor 2011a,b; Apostopoulos *et al.* 2014, Horn *et al.* 2018b), zasutih utrdbenih struktur z obzidji in nasipi (Dogan, Papamarinopoulos 2003; Murdie *et al.* 2003a; isti 2003b; Leucci *et al.* 2007; Horn *et al.* 2017, v tisku), gomilnih nekropol s kamnitimi grobnicami (Papadopoulos *et al.* 2010; Tsourlos *et al.* 2014; Mušič *et al.* 2018), kavern in jamskih prehodov (Leucci *et al.* 2007), pri odkrivanju starih mestnih obzidij in drugih večjih arheoloških struktur (Tsourlos, Tsokas 2011; Orfanos, Apostolopoulos 2011), nadalje prispeva k razumevanju geoloških in geoarheoloških posebnosti arheoloških najdišč (Similox Tohon *et al.* 2004; Teixidó *et al.* 2013; Mušič *et al.* 2015) ter pripomore tudi k boljšemu razumevanju zgodovinskih potekov dela in proizvodnih procesov (Leopold *et al.* 2011).

Meritve upornosti temeljijo na dejstvu, da se električna upornost (oziroma njej recipročna prevodnost) arheoloških objektov razlikuje od medija, v katerem se nahajajo, na kar v največji meri vplivajo dejavniki, ki kontrolirajo porazdelitev vlage z elektroliti oz. ionskimi spojinami v tleh. Pri ERT metodi dovajamo v tla električni tok preko dveh tokovnih elektrod, hkrati pa z dvema potencialnima elektrodama merimo električne potenciale določene prostornine pod površja. Z avtomatiziranim preklapljanjem elektrod vzdolž poljubno dolgega profila (omejenega s številom razpoložljivih elektrod) izmerimo upornostno psevdosekcijo z izbrano elektrodno razvrstitvijo z določenim geometrijskim faktorjem ter izračunamo

navidezne upornosti določene prostornine tal (glej npr. Loke 2016).

Rezultati ERT raziskav predstavljajo 2D ali 3D navpični prerez pod površja, ki zagotavlja kvantitativno vrednotenje upornostnih anomalij, na podlagi katerih lahko podamo prostorsko razsežnost in položaj arheoloških struktur v odnosu do materialov naravnega okolja. Na podlagi značilnih razponov vrednosti upornosti določenih materialov (glej npr. Dobrin, Savit 1988; Telford *et al.* 1990) lahko nato analiziramo tip, sestavo in ohranjenost arheoloških struktur in geoloških plasti. Pomembna prednost izvajanja ERT raziskav je tudi v prilagodljivosti načina izvajanja meritev na površinah, ki zaradi geomorfoloških oblik, kot so strma pobočja in jarki (npr. večji nasipi z obrambnimi jarki in gomile), in/ali poraščenosti z vegetacijo niso primerna za druge geofizikalne meritve.

### Izvajanje ERT meritev in obdelava podatkov

Lokacije ERT profilov (slika 3) so bile izbrane na podlagi morfoloških oblik, jasno prepoznavnih na ZLS posnetku. Dolžine, medelektrodne razdalje ter elektrodne razvrstitve vseh profilov so podane v Tabeli 1.

Skladno s cilji raziskav, da bi zadostili vpogledu v arheološke in hkrati geološke vsebine pod površja, smo pri vseh profilih uporabili nekoliko večjo medelektrodno razdaljo za pridobitev večje horizontalne pokritosti ter večje globine preiskav pri omejenem številu elektrod. Občutljivost metode se z globino zmanjšuje; odvisna je od dolžine profila in/ali medelektrodne razdalje ter vrste elektrodne razporeditve (Edwards 1977; Loke 2016). Srednja globina preiskav pri dolžini profila 39 m znaša približno 8 m pri elektrodni razporeditvi dvojni dipol, 7,4 m pri WennerSchlumberger ter 6,7 m pri razporeditvi Wenner alfa. Medelektrodna razdalja 1 m zagotavlja vertikalno in horizontalno ločljivost približno 0,5 m, kar še vedno zadošča prepoznavanju arheoloških značilnosti, prednost večje globine (na račun nekoliko slabše ločljivosti) preiskav pa je vpogled v globljo podzemno geoarheološko strukturo najdišča.

Vse meritve smo izvedli z merilnim instrumentom Ares. Za primerjavo in oceno ustreznosti na Gradišnici smo profile 1, 2 in 3 izmerili s tremi različnimi elektrodnimi razvrstitvami. Zaradi največje vodoravne občutljivosti je razvrstitev dvojnega dipola v večini

ERT profil/ ERT profile	Medelektrodna razdalja/ Electrode spacing (m)	Elektrodna razporeditev/ Electrode array	Dolžina profila/ Profile lenght (m)
1	1	DD, WS, WA	39
2	1	DD, WS, WA	39
3	1	DD, WS, WA	39
4	1	DD	39
5	0,8	DD	37,6
6	1	DD	71

Tabela 1. Tehnične podrobnosti izmerjenih ERT profilov za elektrodne razvrstitve:  
DD – dvojni dipol, WS – Wenner Schlumberger, WA – Wenner alfa.

Table 1. Technical details of measured ERT profiles for electrode arrays:  
DD – dipole-dipole, WS – Wenner Schlumberger, WA – Wenner alpha.

primerov najustreznejša izbira pri preiskovanju navpičnih struktur (obzidja, zidovi, robovi teras, jarki ...), Wenner alfa pa je zaradi boljše zaznave navpičnih sprememb v upornosti dobra izbira za preiskovanje vodoravnih sedimentov in/ali arheoloških plasti oz. struktur. Razvrstitev Wenner Schlumberger je relativno občutljiva tako na vodoravne kot navpične spremembe v upornosti in predstavlja kompromis med prej omenjenima (Loke 2016).

Pri ERT metodi izvajamo obdelavo podatkov oz. t. i. psevdosekcij s pomočjo geofizikalne inverzije (npr. Day, Morrison 1979; Silvester, Ferrari 1990; Dahlin, Loke 1998; Olayinka, Yaramanci 2000; Loke, Dahlin 2002; Loke 2016), kjer model razdelimo na celice in z iterativnim postopkom izračunani model približujemo izmerjenim vrednostim navidezne upornosti. Rešitev problema ni enoznačna, ampak imamo lahko pri istem nizu podatkov več možnih končnih inverzinskih modelov, ki ustrezajo enakim začetnim vrednostim navidezne upornosti, zato z dodatnimi, že znanimi oz. predvidenimi vhodnimi podatki o najdišču, ki jih lahko integriramo v t. i. omejitve vhodnih parametrov, optimiziramo inverzni postopek, da dobimo natančnejši 2D ali 3D inverzni upornostni model pod površja. Prav tako lahko izvedemo preverbo določene situacije s simulacijo, tako da izdelamo sintetični model, ki mu določimo območja z znanimi vrednostmi upornosti ter zanj izračunamo navidezne vrednosti upornosti, kot bi jih dejansko izmerili na terenu. Nato izvedemo inverzijo z enakimi omejitvami vhodnih parametrov in primerjamo oba inverzna modela, realnega ter sintetičnega. V namen takšne preverbe smo izdelali sintetični model s simulacijo distribucije upornosti podobne tisti,

ki smo jo dobili pri profilu ERT 3, izmerjenem čez nasip na vzhodnem robu naselbine.

Pred obdelavo smo v profile integrirali topografske podatke. Pri vseh profilih oz. psevdosekcijah smo izvedli osredotočeno inverzijo (*Focused inversion*) po metodi najmanjših kvadratov (*Least-square method*) z uporabo algoritma glajenja ter dodatnega izostrejanja kontrasta (Portniaguine, Zhdanov 1999; Zond geophysical software 2016), kjer smo s pomočjo dodatnih vhodnih omejitev procesa inverzije določili modelu kontrastne vrednosti sosednjih celic.

#### *Nizkofrekvenčna elektromagnetna metoda (CMD)*

Z nizkofrekvenčnimi elektromagnetnimi metodami sočasno merimo spremembe električne prevodnosti in magnetne susceptibilnosti, kar odpira širok nabor možnosti uporabe tudi v arheološki geofiziki (Maillol *et al.* 2004; Simpson *et al.* 2009; Mušič *et al.* 2014; Basar 2018). Pri arheoloških raziskavah so se začele te meritve v Evropi uveljavljati že v 60. letih preteklega stoletja in v 70. letih v ZDA (Clay 2006; Bonsall *et al.* 2013).

Meritve električne prevodnosti so načeloma najbolj ustrezne za prepoznavanje negativnih arheoloških oblik (jarki, odpadne jame, izkopi za temelje hiš ...), saj so njihova polnila običajno prevodnejša od neposredne okolice, ker zadržujejo večjo količino vlage. Na podlagi kartiranj električne prevodnosti lahko zanesljivo lociramo in ugotovimo tudi sestavo struktur, kot so nasipi, naselbinske terase, večje jame, gomile, zidovi itd. (Fröhlich Guggler, Gex 1996; Sarris *et al.* 2002; Lück *et al.* 2003; Clay



2006; Mušič, Horvat 2007; Simpson *et al.* 2010; Bonsall *et al.* 2013; Basar 2018).

S kartiranjem sprememb magnetne susceptibilnosti na arheoloških najdiščih lahko prepoznamo območja s termoremanentno magnetizacijo (območja intenzivnejše rabe ognja), sledi metalurške dejavnosti (talilne peči in/ali kovaška ognjišča, deponije odpadnih produktov), prisotnost kovinskih (železnih) predmetov, plasti z večjo količino keramike, ostanke iz materialov z magnetnimi lastnostmi (kot so opeka, vulkanske kamnine) itd. (Tabbagh 1986; Clay 2006; Smekalova, Bevan 2009; Simpson *et al.* 2009; De Smedt *et al.* 2013; Wunderlich *et al.* 2015; Basar 2018).

Metoda deluje na podlagi indukcije elektromagnetnega polja z oddajno tuljavo, pri čemer s sprejemno tuljavo merimo spremembe sekundarnega polja. Prednost instrumenta *CMD Mini-Explorer* je v tem, da ima poleg oddajne še tri sprejemne tuljave (*multi-coil*), ki delujejo na enaki frekvenci, zato se meritve obeh količin izvajajo sočasno na treh različnih globinskih dosegeh (*multi-depth*) (Bonsall *et al.* 2013; GF Instruments 2016).

#### *Izvajanje CMD meritev in obdelava podatkov*

Raziskano območje na Gradišnici pri Dolenjem Gradišču zajema površino  $120 \times 60$  m (slika 3). Meritve smo izvajali ročno (*manual mode*) s polaganjem senzorjev na tla v mreži točk z gostoto  $1 \times 1$  m, pri postavitvi instrumenta na večjo globino (*Hi depth*), pri čemer smo v vsaki točki meritev dobili odčitke vrednosti konduktivnosti (mS/m) in magnetne susceptibilnosti (ppt) za kumulativne globinske intervale do 0,5 m, 1,0 m in 1,8 m globine. Rezultate smo interpolirali z metodo minimalne ukrivljenosti (*Minimum curvature*) v pravilno mrežo podatkov  $0,5 \times 0,5$  m. Razpone vrednosti posameznih kvadrantov ( $20 \times 20$  m) smo izenačili z uporabo algoritma za izenačitev razponov (*Edge Correction*) ter uporabili postopek eliminacije ekstremnih vrednosti (*De Spike*) za odstranjevanje šumov v geofizikalnih podatkih.

Rezultati takšne obdelave so predvsem kvalitativne narave, kjer vsaka karta predstavlja lateralne spremembe prevodnosti ali mag. susc. podpovršja v kumulativnem globinskem intervalu, to je 0–0,5 m, 0–1,0 m in 0–1,8 m. Tako lahko na kartah navidezne prevodnosti in/ali magnetne susceptibilnosti posameznega senzorja dobro razmejimo le lateralne spremembe znotraj globinskega

intervala posameznega senzorja. Zato smo v namen pridobitve tudi stratigrafskih informacij celotne raziskane površine s pomočjo geofizikalne inverzije izdelali 3D inverzni upornostni model na podlagi podatkov navideznih prevodnosti (npr. Sasaki 2001; Haber *et al.* 2004; GF Instruments 2016). To smo izvedli podobno kot pri ERT metodi, s čimer smo testirali možnost kvantitizacije rezultatov CMD metode za pridobitev stratigrafskih informacij. Zaradi prisotnosti šuma, ki je v primerjavi s podatki ERT metode v večji meri prisoten pri podatkih CMD metode, smo pri inverznem modeliranju uporabili nekoliko večji faktor dušenja (*Dumping factor*). Z enakim namenom smo uporabili *Occam* inverzno metodo po metodi najmanjših kvadratov z uporabo algoritma glajenja in dodatnega minimiziranja kontrastov (Constable *et al.* 1987; Zond geophysical software 2016), ki rezultira v bolj zglajeni porazdelitvi parametrov končnega modela.

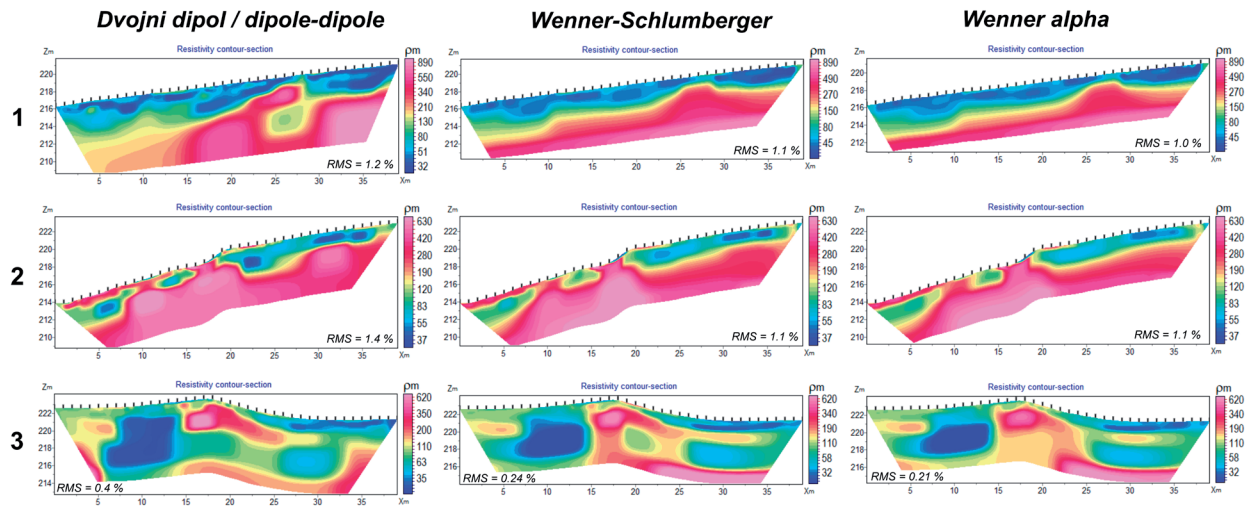
#### *Rezultati z interpretacijo*

##### *ERT – Primerjava različnih elektrodnih razvrstitev*

Primerjava inverznih ERT modelov 1, 2 in 3 (slika 5), izmerjenih z različnimi elektrodnimi razvrstitevami, kaže generalno podobnost, vendar so (sub)vertikalne, tako višjeupornostne kot tudi nižjeupornostne strukture, bolj definirane pri razporeditvi dvojnega dipola, zato smo pri nadaljnji interpretaciji ERT rezultatov uporabili inverzne modele s to razvrstitvijo.

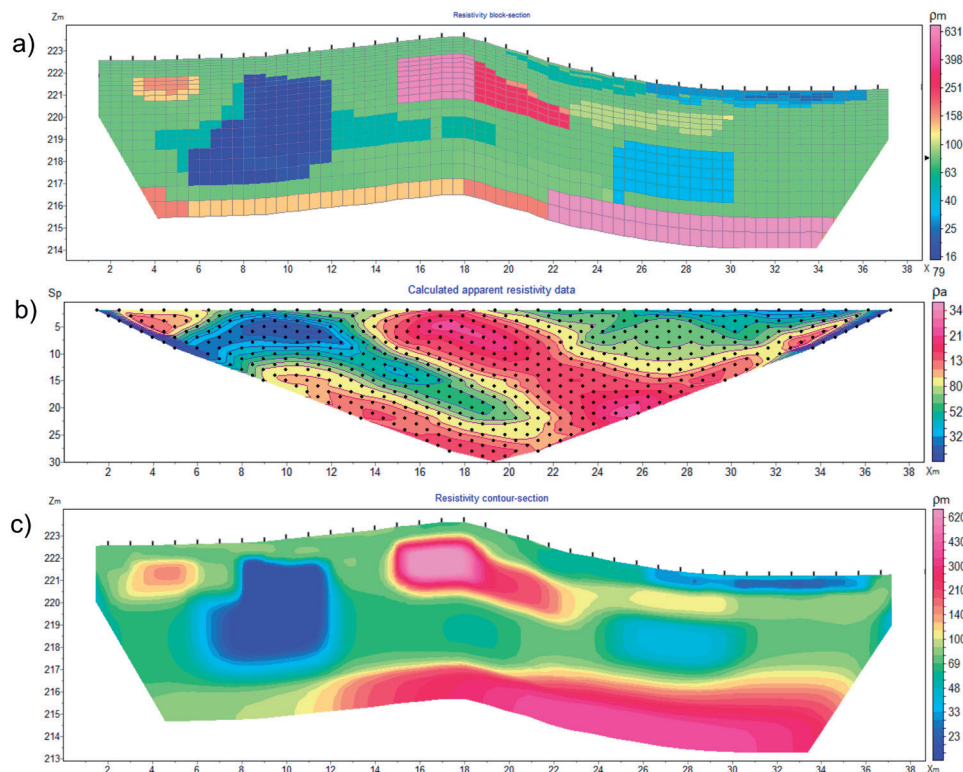
##### *ERT – Sintetični model s simulacijo zgradbe nasipa*

Da bi preverili pravilnost inverznih ERT modelov, smo za profil ERT 3 testirali odzivnosti elektrodne razporeditve dvojni dipol pri znani porazdelitvi upornosti podpovršja (slika 6). Celicam sintetičnega modela smo ročno dodelili znane vrednosti upornosti (slika 6a) in izračunali psevdosekcijo porazdelitve navideznih upornosti (slika 6b), ki bi jih pri taki porazdelitvi prave upornosti izmerili z elektrodno razporeditvijo dvojni dipol. Nadalje smo izvedli inverzijo za izračunano psevdosekcijo s podobnimi vhodnimi omejitvami inverznega modeliranja kot pri vseh dejansko izmerjenih psevdosekcijah, s čimer smo se prepričali, da je končni inverzni model (slika 6c) zelo dober približek sintetičnemu modelu (slika 6a). To pomeni, do so vhodne omejitve inverznega modeliranja optimizirane, inverzni modeli pa predstavljajo zelo dober približek dejanski porazdelitvi upornosti v podpovršju.



Slika 5. Primerjava inverznih ERT modelov 1, 2 in 3, izmerjenih z elektrodnimi razvrstitvami dvojni dipol, Wenner Schlumberger in Wenner alfa.

Figure 5. Comparison of the inverse ERT models 1, 2, and 3, measured by dipole-dipole, WennerSchlumberger and Wenner alpha electrode arrays.



Slika 6. Sintetični model (a), izračunana psevdosekcija navideznih upornosti (b) in inverzni ERT model (c) za ERT profil 3.

Figure 6. Synthetic model (a), calculated apparent resistivity data (b) and inverse ERT model (c) for ERT profile 3.

Nekoliko slabše definirana je le srednjepornostna anomalija v podlagi, ki se nahaja na dnu na levi strani inverznega modela, kar opominja na znano dejstvo, da se občutljivost metode pri meritvah z globino zmanjšuje. Zato je potrebno način meritev skrbno načrtovati in prilagoditi pričakovanim dimenzijam ter globinam ciljnih objektov. Tako moramo za kar najboljše rezultate izbrati najustreznejšo elektrodno razporeditev, dolžino profilov in medelektrodni razmik, ki hkrati zagotavljajo zadostno ločljivost in tudi globino preiskav. Po dosedanjih izkušnjah (Horn *et al.* 2017, v *tisku*; Mušič *et al.* 2018; Horn *et al.* 2018a; Horn *et al.* 2018b; Žebre *et al.* 2018) je zelo priporočljivo, da ERT raziskave načrtujemo tako, da se ciljni objekti nahajajo v zgornjih dveh tretjinah srednje globine preiskav, kjer je seveda to prostorsko izvedljivo.

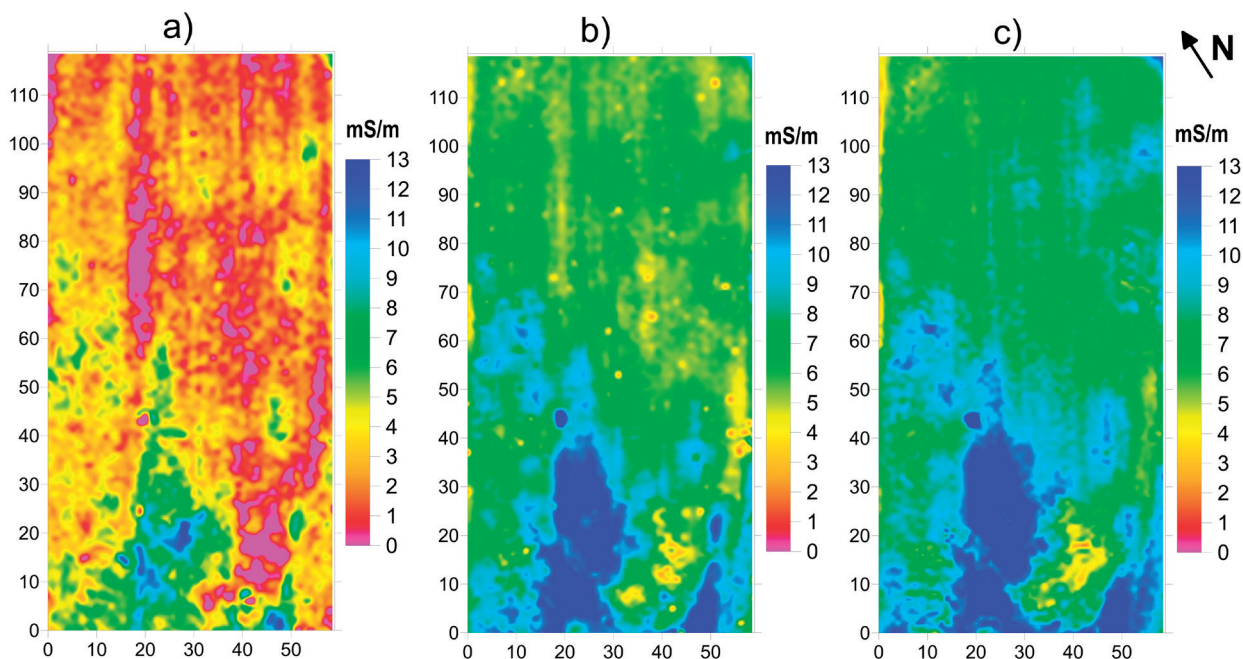
#### *CMD Mini-Explorer – poskus vertikalnega ločevanja plasti*

Ker predstavlja upornost recipročno vrednost konduktivnosti, so za lažjo primerjavo z rezultati ERT raziskav karte navideznih prevodnosti (sliki 7 in 9) prilagojene tako,

da so višje vrednosti prevodnosti (oziroma nižje vrednosti upornosti) ponazorjene z modro barvo, nižje vrednosti prevodnosti (oz. višje vrednosti upornosti) pa z rdečo.

S primerjavo kart navidezne prevodnosti s poenotenimi razponi vrednosti na vseh treh sensorjih oz. globinskih intervalih (slika 7) lahko zaključimo, da je nizka prevodnost prisotna v glavnem v globinskem intervalu 0–0,5 m (slika 7a), karti za globinska intervala 0–1 m in 1–1,8 m (slika 7b, c) pa nakazujeta, da morajo biti globlje plasti relativno prevodnejše (oz. nižjeupornostne). Takšna primerjava in kvantitativno vrednotenje vrednosti med sensorji sta zaradi postopka obdelave podatkov, predvsem izenačevanja vrednosti navideznih prevodnosti (*Edge match*) med posameznimi kvadranti (20 × 20 m), običajno precej nezanesljiva, ker v večini primerov ne prikazujeta dejanskih razlik med posameznimi globinskimi intervali (sensorji).

Pravilnejšo razlago stratigrafskih podatkov omogoča kvantifikacija vhodnih podatkov na podlagi geofizikalne inverzije, rezultat katere je v tem primeru 3D



Slika 7. Karte konduktivnosti z enakimi razponi vrednosti pri vseh treh sensorjih (globinskih intervalih); a) senzor 1 (0–0,5 m), b) senzor 2 (0–1 m), c) senzor 3 (0–1,8 m).

Figure 7. Conductivity maps with the same range of values for all three sensors (depth intervals); a) sensor 1 (0–0.5 m), b) sensor 2 (0–1 m), c) sensor 3 (0–1.8 m).



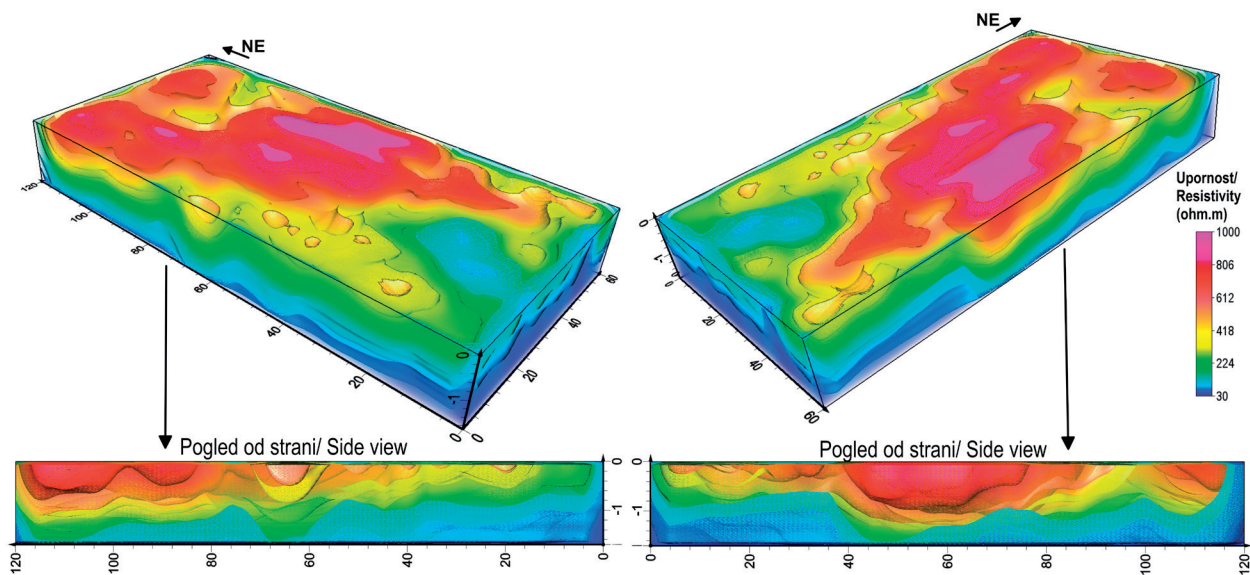
inverzni upornostni model CMD meritev (slika 8 in 9), ki predstavlja realnejšo porazdelitev upornosti po globini. Na tem mestu je potrebno omeniti, da imamo v primeru CMD meritev pri geofizikalni inverziji na voljo podatke le na treh globinskih nivojih (pri ERT meritvah pa na preko 40 globinskih nivojih), zato inverzni upornostni CMD modeli predstavljajo zgolj grobo informacijo o vertikalni porazdelitvi upornosti (stratigrafiji).

Iz 3D inverznega modela (slika 8) lahko razberemo, da so višjeupornostne (600–1000  $\Omega\text{m}$ ) plasti večinoma plitvo pod površino in segajo do globine 0,5 m ali manj, z izjemo na jugovzhodnem robu, kjer segajo do globine 0,8 m, ter se tanjšajo proti jugu, kjer je na površju prisoten nizkoupornostni (do 100  $\Omega\text{m}$ ) drobnozrnati material z večjo vsebnostjo vlage. Upornost z globino pada in ne kaže prisotnosti visokoupornostne podlage kompaktnega apnenca do te globine (1,7 m). Kvečjemu se na dnu 3D modela (slika 9) mestoma pojavijo nekoliko povišane vrednosti upornosti ( $\sim 200 \Omega\text{m}$ ), kar lahko odseva prisotnost močno preperlega apnenca. Lahko gre tudi za preperino z ilovico in kamninskim drobirjem, ali pa prežgane arheološke plasti, ki imajo podobne vrednosti upornosti.

Inverzni upornostni model CMD meritev predstavlja primeren način za ugotavljanje grobe stratigrafije arheoloških in geoloških plasti. Kljub temu je zaradi kompenzacije in dušenja večje količine šuma, ki brez dušenja lahko destabilizira inverzijo, kar rezultira v nerealnih inverznih modelih, prisotnega pri vhodnih CMD podatkih, nekoliko manj primeren za interpretacijo lateralnih sprememb v upornosti. Te so v tem primeru bolj definirane na kartah navidezne prevodnosti.

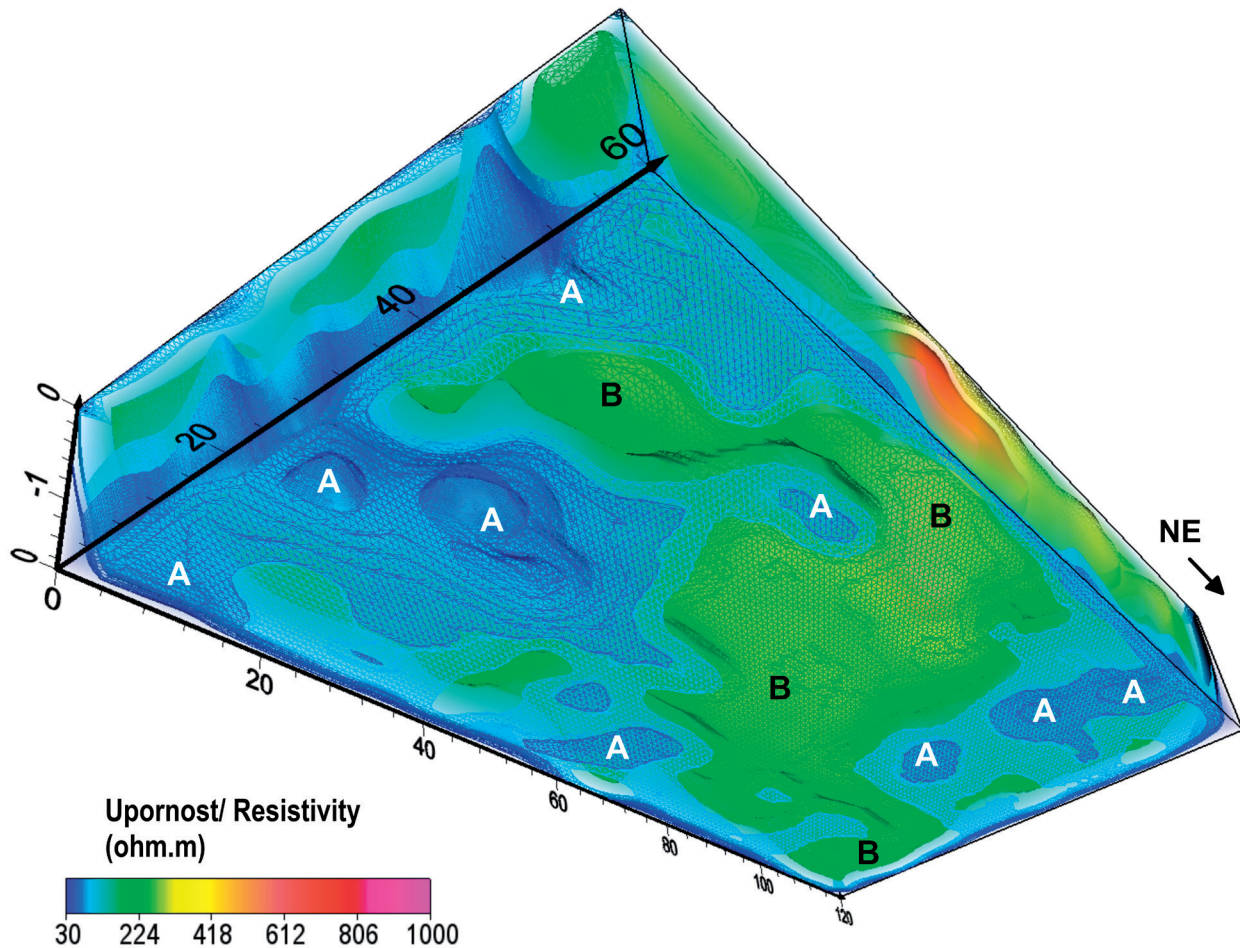
#### *CMD Mini-Explorer – lateralne spremembe navidezne prevodnosti in magnetne susceptibilnosti*

Tako karte porazdelitve navidezne konduktivnosti kot magnetne susceptibilnosti (slika 10) kažejo trend porazdelitve anomalij v smeri SV–JZ. Te sovpadajo predvsem s smerjo ornic (slika 3) in z robovi teras, ki potekajo v enaki smeri. Ta trend je zlasti izrazit na senzorju 1 blizu površine, v globinskem intervalu 0–0,5 m (slika 10a, d), pri večjem globinskem zajemu podatkov 2. in 3. senzorja (slika 10b, c, d, e) pa je sorazmerno manj izrazit. Na večjih globinah so jasno prepoznavne bolj zgoščene in strukturirane anomalije, ki lahko z večjo gotovostjo odsevajo učinek bolj ohranjenih arheoloških struktur *in situ*.



Slika 8. 3D inverzni upornostni CMD model (zgoraj) in delno transparentni stranski pogled 3D modela (spodaj) (razmerje V : H = 10 : 1).

Figure 8. 3D inverse resistivity model of CMD data (top) and semi-transparent side views of the 3D model (bottom) (vertical exaggeration = 10).



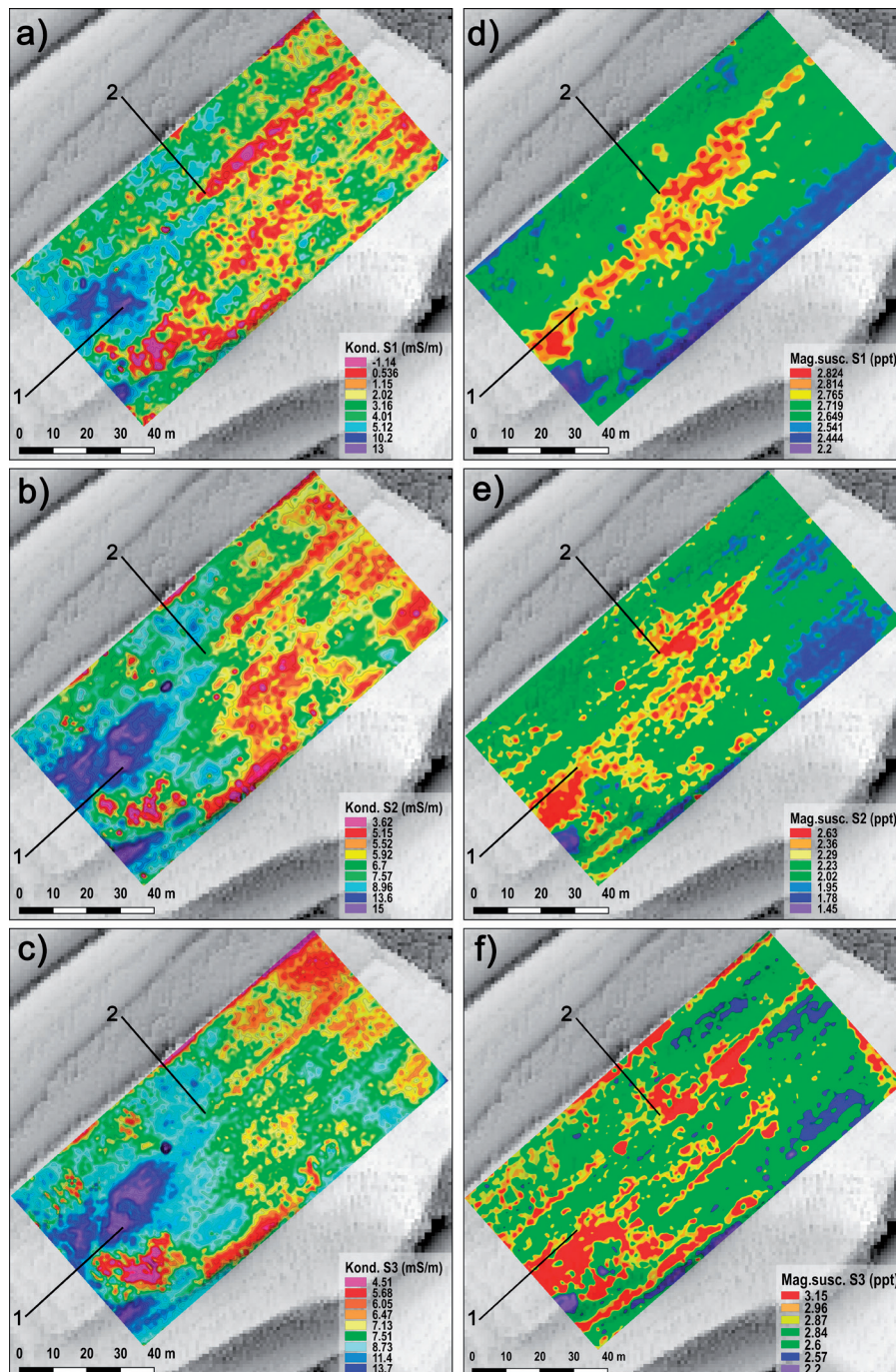
Slika 9. 3D inverzni upornostni CMD model, pogled od spodaj (razmerje V : H = 10 : 1); A – nizkoupornostna območja predstavljajo kotanje, zapolnjene z vlažnim ilovnatim/glinastim sedimentom, v katerih so najverjetneje prisotni tudi arheološki ostanki, območja lahko predstavljajo tudi odpadne jame; B – srednjeupornostne anomalije na dnu 3D modela lahko predstavljajo območja preperine apnenca v podlagi (globina pribl. 1,7 m) ali pa ilovico s kamninskim drobirjem ter prežgane arheološke plasti.

Figure 9. 3D inverse CMD resistivity model, view from the bottom (vertical exaggeration = 10). A – low resistivity areas reflect depressions, filled with moist loamy/clayey sediments which probably also contain archaeological material, some areas could represent dump pits; B – medium resistivity anomalies could be connected to the severely weathered limestone closer to the surface (at depth app. 1.7 m), or to the loamy sediment with stone debris and burnt archaeological horizons.

Na podlagi kontrastnega prikaza porazdelitve prevodnosti (slika 10a, b, c) bi lahko sklepali, da območja z nižjo prevodnostjo (oz. višjo upornostjo) na severovzhodnem delu raziskanega območja predstavljajo kompaktnější apnenec blizu površja. Že s 3D inverznim modelom smo ugotovili, da višjeupornostne anomalije segajo večinoma do globine 0,5 m, pod njimi pa se nahaja nižjeupornostna plast drobneje zrnatega (glinastega ali ilovnatnega) materiala z večjo vsebnostjo vlage, ki na zahodnem delu sega

proti površju v obliki večje kotanje. Srednje vrednosti upornosti, značilne za zelo prepereli apnenec ali za ilovico s kamninskim drobirjem in prežgane arheološke plasti, so prisotne na skrajnem severnem delu, ponekod v osrednjem delu in na jugovzhodnem robu ter v smeri poteka pregiba na južnem delu raziskanega območja. Te ugotovitve govorijo v prid razlagi, da visokoupornostna (oz. nizko prevodna) območja, poleg kamninskega drobirja, najverjetneje predstavljajo tudi arheološke strukture, kot





Slika 10. Rezultati CMD meritev – porazdelitve navidezne prevodnosti in magnetne susceptibilnosti v treh globinski intervalih. Karte električne prevodnosti oz. konduktivnosti (mS/m): a) senzor 1 (0–0,5 m), b) senzor 2 (0–1 m), c) senzor 3 (0–1,8 m); Karte magnetnih susceptibilnosti (ppt): d) senzor 1 (0–0,5 m), e) senzor 2 (0–1 m), f) senzor 3 (0–1,8 m).

Figure 10. CMD measurement results – the distribution of apparent conductivity and magnetic susceptibility in three depth intervals. Conductivity map (mS/m): a) sensor 1 (0–0.5 m), b) sensor 2 (0–1 m), c) sensor 3 (0–1.8 m); Magnetic susceptibility map (ppt): d) sensor 1 (0–0.5 m), e) sensor 2 (0–1 m), f) sensor 3 (0–1.8 m).



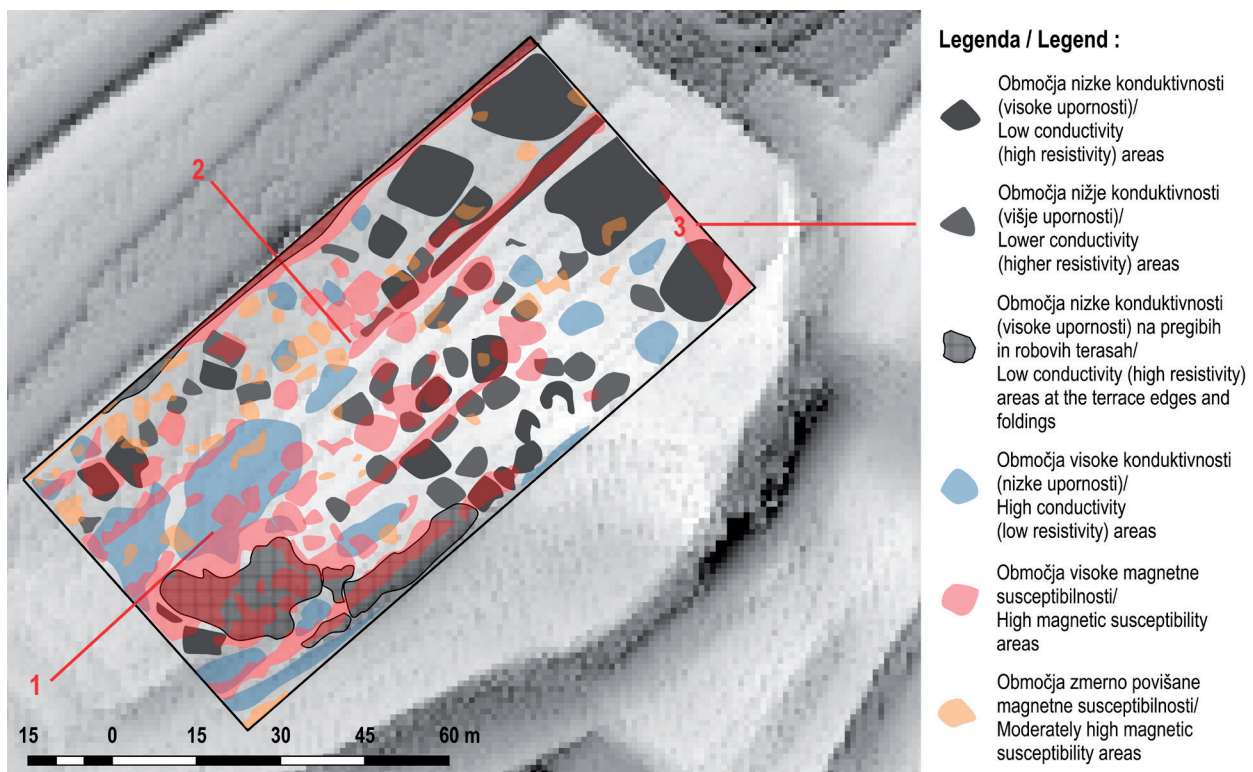
so kamnite zidne konstrukcije, prežgana glina, deponije lončenine, utrjeni robovi teras oz. iz apnenčevih lomljenecv grajene strukture ipd. Te pa so bile s sodobnim poljedelstvom na površini oz. do globine ~ 0,5 m prerezporejene v smeri oranja in terasiranja (SV–JZ).

Višja magnetna susceptibilnost je lahko posledica termoremanentne magnetizacije, prisotne na območjih intenzivnejše rabe ognja, kot so npr. hišna ognjišča, lončarske delavnice, plasti v večjo količino keramike in druge prežgane plasti, ter sledov metalurške dejavnosti, kot so talilne peči, kovaška ognjišča in z njimi povezane deponije odpadnega materiala. Na senzorju 1 (slika 10d) so te zgoščene v osrednjem pasu v smeri SV–JZ in jih lahko z veliko gotovostjo označimo kot arheološki zapis v ornici, kjer se je arheološki material nakopičil vzdolžno s smerjo oranja (Gruškovnjak 2017, 37). Globlje, v globinskem intervalu 0–1 m (senzor 2, slika 10e), so anomalije bolj zgoščene, kar odseva mesta izvora prežganih arheološki ostankov. V intervalu z najglobljim dosegom (0–1,8 m) (senzor 3, slika 10f) pa kažejo anomalije poleg večje

zgoščenosti tudi že določeno strukturiranost, ki je pogosto značilnost arheoloških ostankov.

Za prikaz prekrivanja obeh fizikalnih količin smo izdvojili območja z anomalijami nizkih, nižjih in visokih konduktivnosti ter visokih in zmerno povišanih anomalij magnetne susceptibilnosti, izmerjenih s senzorjem 3, ki zajema celotni globinski interval 0–1,8 m (slika 11).

Večja območja nizke prevodnosti so prisotna na severnem delu, manjša pa so zgoščena v osredjem in zahodnem delu raziskanega območja v relativno pravilnih oblikah. Nakazujejo prisotnost kamnitega materiala (drobir apnenca, preperina apnenca in/ali konstrukcije iz apnenčevih lomljenecv v arheoloških kontekstih), v kombinaciji s povišano magnetno susceptibilnostjo pa predstavljajo tudi prežgane plasti, ki so lahko posledica požarov in/ali s preteklimi dejavnostmi povezane uporabe ognja, kar je bilo opaženo tudi pri zaščitnih izkopavanjih (Križ 1988). Podobno je slabo prevoden in visoko magnetno susceptibilen material nakopičen na



Slika 11. Interpretacija anomalij prevodnosti in magnetne susceptibilnosti senzorja 3 (globinski interval 0–1,8 m).

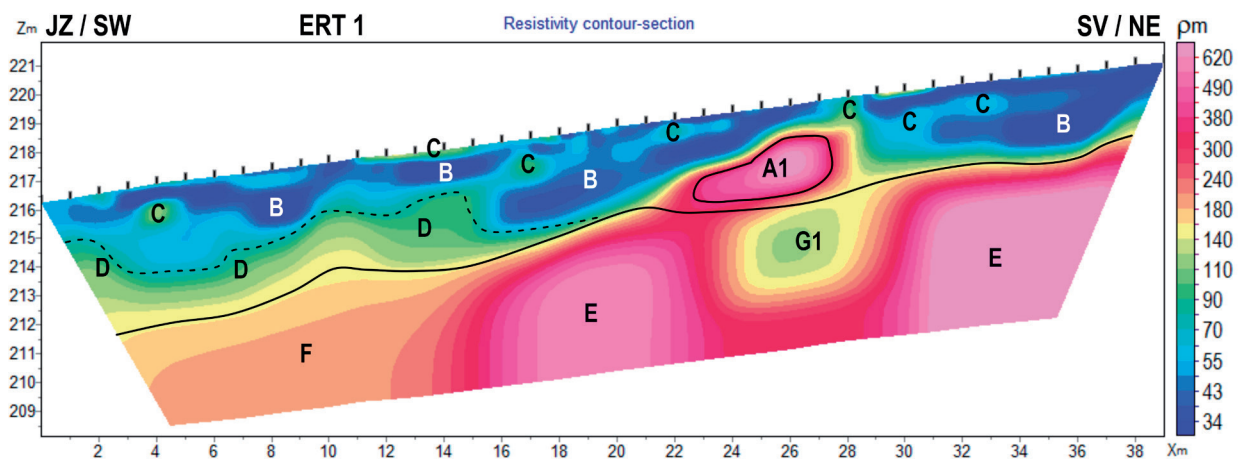
Figure 11. Interpretation of conductivity and magnetic susceptibility anomalies measured with sensor 3 (depth interval 0–1.8 m).

severozahodnem ter na južnem delu, kjer so na podlagi ZLS (slika 3) vidni utrjeni robovi teras in pregibi. Območja dobre prevodnosti lahko povežemo z drobnozrnatimi glinastimi (in/ali) ilovnatimi sedimenti z večjo vsebnostjo vlage. Kjer se te anomalije prekrivajo s povišano magnetno susceptibilnostjo, lahko predstavljajo tudi odpadne jame z nakopičenim žganinskim materialom. Na južnem vogalu raziskanega območja se zvrstijo od severa proti jugu podolgovate anomalije najprej visoke prevodnosti, sledi visoka magnetna susceptibilnost, nato nizka prevodnost ter zopet na jugu območje visoke prevodnosti. Morda gre za utrjen rob na pregibu terase (naravnega ali antropogenega izvora), kjer se je na notranji (in zunanji) strani predpostavljene kamnite konstrukcije nabral dobro prevoden in visoko magnetno-susceptibilen material.

Podolgovate anomalije nizke prevodnosti in visoke magnetne susceptibilnosti v smeri SZ–JV lahko razen na njihovem robu, kjer gre za pregib terase, razumemo kot v smeri oranja nakopičen arheološki material.

#### ERT – ločevanje plasti po globini z upoštevanjem rezultatov CMD meritev

Z rezultati ERT raziskav podrobneje razčlenjujemo porazdelitev upornosti po globini. Izdvojena območja so označena z velikimi črkami in po potrebi z zaporednimi številkami ter so podrobneje razložena v podnapisih. Dolžine vseh inverznih ERT modelov so podane v metrih ( $X_m$ ), višine pa v nadmorskih višinah ( $Z_m$ ). Ker ne poznamo stopnje sedimentacije s prirastkom (ali erozijo) tal in sedimenta v zadnjih tisočletjih, niti nimamo podatkov o morebitnem navažanju zemljine na določene dele najdišča v sodobnem času, ne moremo enoznačno razlagati strukturiranosti območij. Vsekakor pa lahko na podlagi vrednosti upornosti (in magnetne susceptibilnosti) razložimo sestavo, dimenzije in globino struktur oz. plasti ter ob tem podamo možne razlage za porazdelitve upornosti v danem arheološko-geološkem kontekstu z upoštevanjem rezultatov CMD meritev (pri profilih ERT 1 in ERT 2).



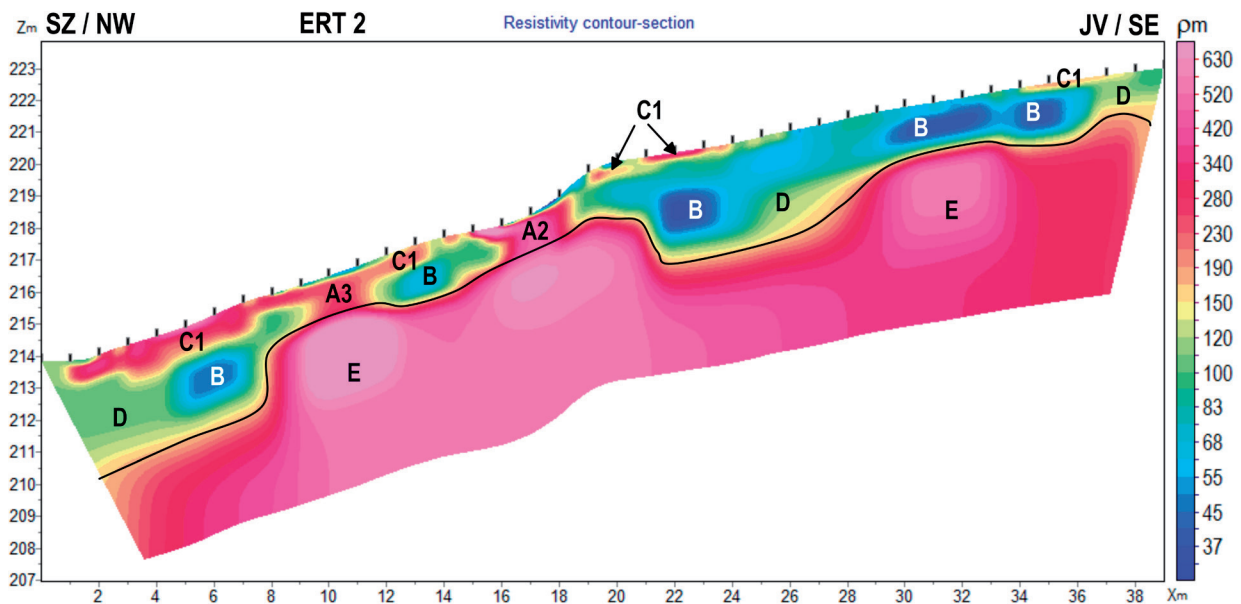
Slika 12. Inverzni model profila ERT 1. A1 – višjeupornostna anomalija (kamnita konstrukcija ali naravna apnenčeva forma); B – nizkoupornostna območja do globine 3 m pod površjem (drobnozrnatu glinasta/ilovnata polnila kotanj, kamor je lahko nanesen arheološki material); C – srednjeupornostne anomalije, ki predstavljajo glede na korelacijo z rezultati CMD (sliki 9 in 10) prežgane arheološke plasti; D – srednjeupornostna anomalija valovite oblike (črna prekinjena linija), ki lahko predstavlja (ilovnato) preperino apnenca in prav tako arheološke plasti; E – visokoupornostna anomalija – kompakten apnenec; F – višjeupornostna anomalija – prepereli apnenec; G1 – srednjeupornostna anomalija na mestu kaverne v apnencu, zapolnjene z (ilovnato) preperino.

Figure 12. Inverse model ERT 1. A1 – high resistivity area (stone wall construction or natural limestone form); B – low resistivity sediment up to 3 m below the surface (clay/loam filling of the depression, which might also gather archaeological material); C – medium resistivity anomalies, which according to correlation with CMD results (Figs. 9 and 10) correspond to the burnt archaeological material; D – medium resistivity area with undulated shape (black interrupted line), which might correspond to the weathered loamy material and also archaeological remains; E – high resistivity solid limestone; F – moderately high resistivity weathered limestone; G1 – cavern in limestone, filled with loamy material.

Profil ERT 1 (slika 12) se nahaja na delu naselbine z blagim naklonom površja proti jugozahodu (slika 3) in sega na območje CMD raziskav na njegovem jugozahodnem delu (sliki 10 in 11). Izmerjen je bil za ugotavljanje debeline tal z arheološkimi horizonti in oblikovanosti apnenčeve geološke podlage. Srednjeupornostna območja (C) se ujemajo z anomalijami višje magnetne susceptibilnosti (slika 10d, e, f in slika 11), nižjeupornostna območja (B) pa z anomalijami višje konduktivnosti (slika 10a, b, c in slika 11), kar pomeni, da gre najverjetneje za prežgane arheološke plasti (C) v globinskem intervalu približno 0,5 do 1,5 m pod površjem, ki so obdane z glinasto-ilovnatim sedimentom (B). Lega višjeupornostne strukture A1 se ujema z lego nizko konduktivnega območja (sliki 10 in 11), vendar glede na globino in obliko te anomalije na

ERT modelu ne moremo zagotovo pojasniti, ali gre za naravno apnenčevo obliko ali za kamnite ruševinske ostanke antropogenega izvora. Ob upoštevanju rezultatov meritev magnetne susceptibilnosti (slika 10b, c, d in slika 11), ki kažejo izrazito povišane vrednosti na tem območju, pa je verjetnejši antropogeni izvor terasiranega območja, kjer gre za kombinacijo zelo močno prežganih plasti, kamnitih zidnih konstrukcij in ruševinskega materiala. Debelina nizkoupornostnih drobnozrnatih sedimentov z arheološkim potencialom na tem profilu znaša 1–3 m.

Profil ERT 2 (slika 13) poteka pravokotno čez razmeroma strmi pregib v smeri SV–JZ (slika 3b) in sega na območje CMD raziskav na njegovem severozahodnem delu (sliki 10 in 11). Ta ERT profil je bil prednostno izmerjen v namen strukturne interpretacije na površini vidnega



Slika 13. Inverzni model profila ERT 2. A2 in A3 – višjeupornostni strukturi pod pregibom terase, vidne na ZLS posnetku (slika 3b), lahko gre za kamniti zidni konstrukciji (v kombinaciji s prežganimi plastmi) ali pa za naravno apnenčevo obliko blizu površja; B – nizkoupornostna območja do globine 3 m pod površjem (drobnozrnato glinasta/ilovnata polnila kotanj, kamor je lahko nanesen arheološki material); C1 – višjeupornostne anomalije do globine 1 m, lahko gre za ruševinski material (lahko tudi v kombinaciji z močno prežganimi plastmi) ali za kamninski drobir izravnave terase; D – srednjeupornostne anomalije nad kompaktnim apnenecem, ki lahko predstavljajo (ilovnato) preperino apnenca ali (prežgane) arheološke plasti; E – visokoupornostno območje (kompakten apnenec v podlagi).

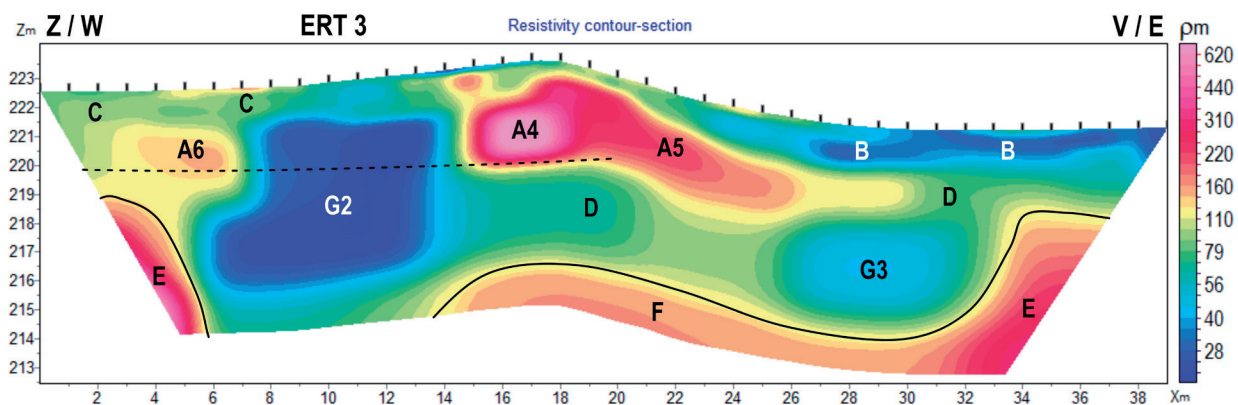
Figure 13. Inverse model ERT 2. A2 and A3 – high resistivity structures near the terraces folding, observable on Lidar image (Fig. 3b) can correspond to the stone wall constructions (also in combination with burnt layers) or to the natural limestone shape close to the surface; B – low resistivity sediment up to 3 m below the surface (clay/loam filling of the depression, which can contain archaeological material); C1 – higher resistivity anomalies with depth up to 1 m can reflect ruination material (possible in combination with burnt material) or stone debris which was used for levelling the terraces; D – medium resistivity areas above limestone bedrock (loamy weathered material or/and archaeological material); E – high resistivity solid limestone.



pregiba. Morfološko gledano lahko celotni profil razdelimo na zgornjo in spodnjo teraso s pregibom na sredini profila, z navpičnim skokom pribl. 2 m na razdalji 3 m. Pod mestom pregiba se na globini 2 m nahaja dvignjeno območje kompaktnega apnenca (E), nad katerim se neposredno pod pregibom nahaja prav tako visokouporostna struktura (A2), ki na jugovzhodni strani v višji legi zadržuje nizkoupornostni material (B in C1; sediment z arheološkimi ostanki), navzdol po pobočju proti severozahodu pa se nadaljuje v obliki nižje ležeče terase z višjeupornostnim materialom blizu površja (C1). Približno 5 m nižje od strukture A2 se nahaja še ena višjeupornostna struktura (A3). Obe strukturi (A2 in A3) lahko predstavljata kamniti gradnji kot del v preteklosti terasiranega območja, ali pa gre za naravni apnenčevi obliki. Ne moremo pa izključiti možnosti, da gre na celotnem območju pod pregibom za izravnavo terase s kamninskim drobirjem

in/ali drugim višjeupornostnim arheološkim materialom. Območja C1 in B na jugovzhodni polovici profila oz. na zgornji terasi se ujemajo s povišanimi magnetnimi susceptibilnostmi (slika 11) in relativno višje konduktivnim območjem rezultatov CMD metode (slika 10a, b, c). Najverjetneje gre torej za prežgane arheološke ostaline v relativno vlažnejšem drobnozrnatem geološkem mediju do globine pribl. 1,5 m (največ do 3 m) pod površjem.

Profil ERT 3 (slika 14) smo izmerili pravokotno čez nasip na vzhodnem robu naselbine s ciljem ugotavljanja dimenzij ostankov kamnitega obzidja z ruševinskim materialom pod plastjo ornice. Obzidje je jasno definirano v obliki pravokotnika (A4) z ruševino na zunanji strani (A5). Proti pričakovanjem smo ugotovili, da se na tem robu naselbine kompaktnější apnenec nahaja relativno globoko (slika 14, E in F) pod površjem in je tako obzidje



Slika 14. Inverzni model profila ERT 3. A4 – višjeupornostna kamnita zidna konstrukcija (dimenzije  $1,5 \times 2$  m); od A4 se proti vzhodu širijo kamnite ruševine obzidja (A5), najbrž povzročene z obdelovanjem vinograda na zunanjem pobočju; A6 – višjeupornostna anomalija relativno pravilne oblike v notranjosti naselbine na enakem nivoju kot obzidje (črna prekinjena linija), najbrž gre za arheološke ostanke; B – nizkoupornostna območja do globine 1,5 m pod površjem (ornica in drobnozrnat glinasto/ilovnat sediment, lahko s primesmi arheološkega materiala); C – srednjeupornostna plast do globine približno 1 m (ornica in ilovnat sediment z arheološkim materialom); D – ilovnat preperinski material z možnimi arheološkimi ostanki; E – kompaktni apnenec v podlagi s pričetkom na globini 3,5 m na območju naselbine in na globini 3 m zunaj naselbine; F – delno prepereli apnenec v podlagi (na globini cca 7 m pod površjem); G2 – večja kotanja oz. kaverna na notranji strani obzidja, zapolnjena z drobnozrnatim glinastim/ilovnatim sedimentom z večjo vsebnostjo vlage, najverjetneje vsebuje tudi arheološki material; G3 – drobnozrnat glinasti/ilovnat sediment.

Figure 14. Inverse model ERT 3. A4 – high resistivity stone wall construction (dimension  $1.5 \times 2.5$  m); A5 – ruins of defence wall, probably caused by the vineyard cultivation; A6 – higher resistivity anomaly inside the settlement, levelled with the defence wall (black interrupted line), probably reflects archaeological remains; B – low resistivity sediment up to 1.5 m below the surface (fine-grained clay/loam sediment/soil, which might contain archaeological material); D – loamy weathered material or/and archaeological material; E – solid limestone (3.5 m below the surface inside and 3 m below the surface on the outer side of the settlement); F – partially weathered limestone (7 m below the surface); G2 – larger depression/cavern filled with clay/loamy material with higher moisture content, most probably also with archaeological material; G3 – fine-grained clayey/loamy sediment.

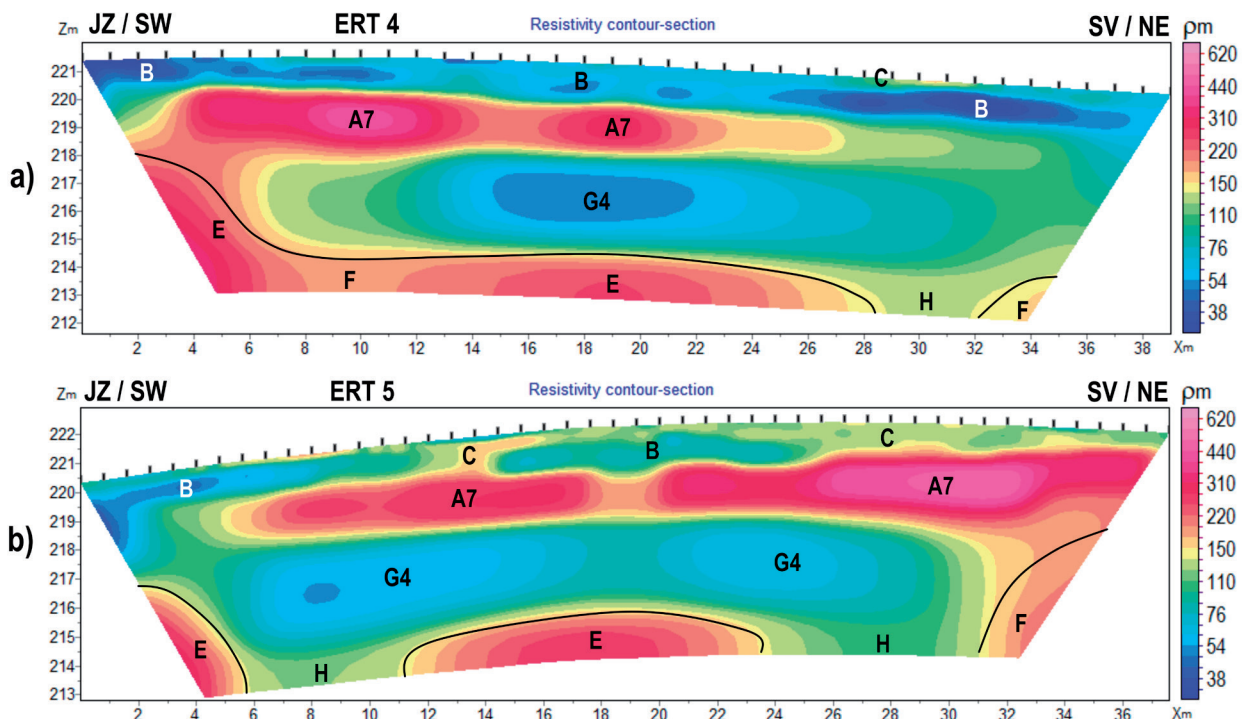
postavljeno na debelejšo plast ilovnatega materiala (D), ki bi lahko deloma predstavljal tudi zemljeni nasip prve faze utrditve prepoznane pri izkopavanjih (Križ 1987; isti 1988). Čeprav viden le na zahodnem robu profila, se apnec v notranosti naselbine nahaja na tem mestu na globini pribl. 3,5 m pod površjem, kar je skladno z rezultati 3D CMD inverznega modela, kjer smo ugotovili, da na raziskanem območju do globine 1,7 m ni prisotne visokoupornostne kompaktne apnenčeve podlage.

#### ERT – Ugotavljanje geološke zgradbe v neposredni bližini naselbine

Profila ERT 4 in ERT 5 (slika 15) smo izmerili približno 20 m vzhodno od naselbine na nekoliko nižjem območju

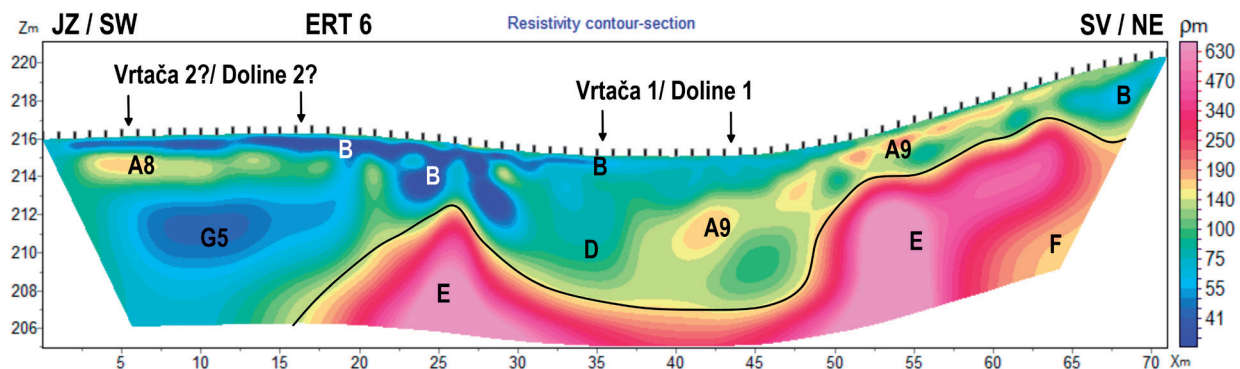
med dvema vrtačama (slika 3) s ciljem ugotavljanja prisotnosti morebitnih arheoloških horizontov in vpogleda v geološko zgradbo. Oba kažeta podobno zgradbo območja, kjer se pod nenavadno ravno plastjo A7, ki jo lahko razlagamo kot kompaktnjšo plast apnenca, nahaja večja kaverna (G4), zapolnjena z drobnozrnato (glinasto/ilovnato) preperino v debelini približno 3 m, pod katero se nahaja apnec (E). Glede na obliko in položaj plasti A7, ki leži v globini približno 1–2,5 m, bi lahko predstavljala tudi arheološke ruševinske ostanke.

Profil ERT 7 smo izmerili z namenom ugotavljanja sestave vrtače tik pod vzhodnim robom naselbine (slika 3). Rezultati kažejo, da gre v bistvu za dve sosednji vrtači (slika 16), kjer je morfologija vrtače 1 (s premerom 22 m



Slika 15. Inverzna modela a) profila ERT 4 in b) profila ERT 5. A7 – višjeupornostna plast debeline nekaj več kot 1 m, s pričetkom 1–1,5 m pod površjem, najbrž gre za plast kompaktne apnenca (manj verjetno za arheološke ruševine). B in C – nizko do srednjeupornostna plast blizu površja (ornica in drobnozrnat glinasto/ilovnat sediment, lahko s primesmi arheološkega materiala); E – kompaktni apnec v podlagi; F – delno prepereli apnec v podlagi; G4 in H – nizko do srednjeupornostno območje, kaverne s preperino in drobnozrnatim glinasto/ilovnatim sedimentom z višjo vsebnostjo vlage.

Figure 15. Inverse models a) ERT 4 and b) ERT 5. A7 – high resistivity layer app. 1 m thick starts at depth 1–1.5 m below the surface, probably it reflects limestone layer (less likely archaeological ruins); B and C – low to medium resistivity near surface layer (plough zone and fine-grained sediment which might contain archaeological material); E – solid limestone; F – weathered limestone; G4 and H – low to medium resistivity area, caverns filled with weathered clayey/loamy material with higher moisture content.



Slika 16. Inverzni model profila ERT 6. A8 – srednjeupornostna plast debeline okrog 1 m s pričetkom pribl. 0,5 m pod površjem, lahko predstavlja arheološko plast na vrhu zapolnitve vrtače 2; A9 – srednjeupornostni pobočni material/grušč, ki deloma zapolnjuje vrtačo 1; B – nizkoupornostna plast blizu površja (ornica in drobnozrnato glinasto/ilovnat sediment, lahko s primesmi arheološkega materiala); D – preperinsko (in ilovnato) srednjeupornostno polnilo vrtače 1; E – viskoupornostni kompaktni apnenec ter F – srednjeupornostna kaverna v apnencu; G5 – nizkoupornostno drobnozrnato polnilo vrtače 2 z višjo vsebnostjo vlage.

Figure 16. Inverse model ERT 6. A8 – medium resistivity layer (app. 1 m thick) that starts app. 0.5 m below the surface, it can reflect the archaeological layer of the near-surface filling of doline 2; A9 – medium resistivity slope material/debris, which partially infills doline 1; B – low resistivity fine-grained sediment close to the surface, which can contain archaeological material; D – medium resistivity weathered/loamy infill of doline 1; E – solid limestone; and F – cavern; G5 – low resistivity fine-grained moist sediment.

in globino 8 m) opredeljena z znatnim znižanjem površja od smeri SV, medtem ko globlja vrtača 2 na površini ni vidna. Gre za izravnano površino, ki jo izdaja nizkouporno območje (G5) na mestu, kjer bi sicer glede na morfologijo terena (slika 3) pričakovali visokoupornostni apnenec. Na podlagi ugotovljenega lahko predpostavljamo, da je bila vrtača 2 umetno zapolnjena in izravnana. Samo na podlagi ERT raziskav seveda ne moremo opredeliti, ali so izravnave nastale sočasno s poselitvijo v arheoloških obdobjih ali kadar koli kasneje.

### Razprava in sklepi

S pomočjo skupne interpretacije rezultatov neinvazivnih geofizikalnih metod ERT in CMD na utrjeni naselbini Gradišnica pri Dolenjem Gradišču smo prispevali raznovrstne podatke o sestavi arheoloških kulturnih plasti, predpostavljenih tipih arheoloških ostankov in njihovi ohranjenosti ter o geoloških posebnostih kraškega okolja ob vplivu sodobnega poljedelstva. Rezultati se dopolnjujejo, saj smo z obema metodama merili enaki količini, tj. navidezno prevodnost (CMD) in navidezno upornost (ERT) podpovršja, s CMD pa tudi magnetno susceptibilnost.

Testiranje različnih elektrodnih razvrstitev pri ERT meritvah (slika 5) je pokazalo, da predstavlja elektrodna

razvrstitev dvojnega dipola optimalno izbiro pri ugotavljanju sestave tako potencialnih arheoloških kot kraških oblik, saj najbolje definira navpične arheološke strukture, kraške kotanje, kaverne in morfologijo razgibane apnenčeve podlage. Nekoliko večji medelektrodni razmik, 0,8–1 m (pri končnem številu elektrod 40–48), zagotavlja globino preiskav do približno 8 m ob relativno večji horizontalni pokritosti in s tem predstavlja optimalno izbiro za sočasen vpogled v arheološke vsebine in geološke značilnosti konkretnega kraškega okolja. Verodostojnost sicer ne povsem enoznačnih rešitev inverznega modeliranja upornostnih psevdosekcij smo potrdili s sintetičnim modelom (slika 6), pri katerem smo uporabili podobne parametre kot pri dejansko izmerjenih ERT profilih.

Rezultati ERT raziskav potrjujejo prisotnost privzdignjenega, morfološko zmerno razgibanega apnenčevega platoja na območju dvignjenega dela naselbine (slike 12, 13 in 14), vendar pa kompaktni apnenec na naselbini ne izdaja, temveč je prekrit z ilovnato preperino, arheološkimi horizonti in ornico v skupni debelini približno 1,5 do 3 m. Profil ERT 3 (slika 14) v globinskem intervalu 1–3 m jasno orisuje ostaline obrambnega kamnitega obzidje višine okrog 1,5 m in širine nekaj čez 2 m, kar se ujema z ugotovitvami zaščitnih raziskav (Križ 1987; isti 1988). Ob tem so bile prepoznane tudi ruševine zidu, ki se širijo navzdol po vzhodnem pobočju. Neposredno



pod obzidjem se nahaja nekaj več kot 3 m debela plast ilovice in/ali preperine, ki leži nad preperelo apnenčevo podlago na globini 7 m pod površjem. Ta plast zelo verjetno predstavlja v določeni meri tudi ostanke starejšega, zemljenega nasipa, odkritega pri izkopavanjih (Križ 1987; isti 1988). Kompaktni apnenec na zahodnem delu profila ERT 3, ki se nahaja v notranjosti naselbine, leži 3,5 m pod površjem. Kotanje v apnencu, zapolnjene z drobnozrnatim vlažnim sedimentom in arheološkimi ostanki, so znotraj naselbine globoke do 3 m (sliki 12 in 13), tik pred obzidjem na vzhodnem delu naselbine (slika 14) pa je bila odkrita večja kotanja širine 6–8 m in globine 7 m.

Korelacija inverznih modelov profilov ERT 1 in ERT 2 z rezultati CMD raziskav kaže, da so prežgane arheološke plasti (z višjo magnetno susceptibilnostjo) prisotne v polnilu kotanj, globokih do 3 m, na ERT profilih pa so večinoma zastopane s srednjimi vrednostmi upornosti, ponekod tudi z nekoliko višjimi, kar je odvisno od stopnje prežganosti gline oz. ilovice ter od količine kamninskega materiala v polnilu kotanj. Na območjih pregibov teras, jasno vidnih tudi na ZLS (slika 3b), so prisotne visokoupornostne anomalije (sliki 12 in 13) hkrati z višjo magnetno susceptibilnostjo (sliki 10 in 11), ki najbrž predstavljajo kamnite zidne konstrukcije za utrjevanje robov teras in močno prežgane arheološke plasti, kar je bilo prav tako že prepoznano (Križ 1988). Robovi teras so lahko deloma tudi naravnega izvora, kjer na pregibih preperela apnenčeva geološka podlaga sega skoraj do površja, delno pa so lahko tudi rezultat sodobnih posegov pri terasiranju terena v poljedelske namene.

Na območju izven naselbine so poleg vrtač, vidnih na ZLS posnetku (slika 3b), prisotne tudi kaverne v apnencu, zapolnjene z vlažnim drobnozrnatim glinastim in/ali ilovnatim sedimentom (sliki 15 in 16). Vrtače so bile delno ali v celoti izravnane (slika 16), a dejanj oz. dejanja časovno še ne moremo opredeliti. Glede na debelino polnila vrtač (do 8 m in več) je celotno območje zaznamovano z izobiljem plodne prsti, primerne za poljedelstvo in pašništvo, ter ilovnatega materiala za obrtne dejavnosti.

Na podlagi 3D inverznega upornostnega modela CMD meritev (sliki 8 in 9) smo interpretirali grobo stratigrafijo raziskanega dela naselbine. Visoko uporni (nizko prevodni) horizonti se nahajajo večinoma blizu površja (do globine 0,8 m), upornost pa nato postopoma pada do globine 1,7 m (~ globinski doseg CMD meritev). Groba

razjasnitev stratigrafije na podlagi 3D inverznega modela je pomembna predvsem zato, ker potrjuje predpostavko, da lahko višjeuporne anomalije predstavljajo arheološke naselbinske ostanke (kamnite zidne konstrukcije in/ali močnejše prežgane plasti) ter mestoma plasti preperlega apnenca v podlagi, ne pa tudi kompaktnega apnenca v globinskem dosegu raziskav CMD metode.

Rezultati navidezne prevodnosti in magnetne susceptibilnosti (slika 10) kažejo izrazite anomalije v zgornji plasti (pri senzorju 1 in tudi senzorju 2) v smeri oranja (SV–JZ). Te površinske anomalije prerazporejenega arheološkega materiala v smeri oranja so manj izrazite pri meritvah z večjim globinskim dosegom (senzor 3), kjer se na karti magnetnih susceptibilnosti poleg verjetnejših *in situ* lokacij izvora anomalij kaže tudi strukturiranost anomalij v relativno pravilnejših tlorisnih oblikah. Visoka frekvenca anomalij nizkih prevodnosti in visokih magnetnih susceptibilnosti na senzorju 3 (sliki 10 in 11) predstavlja v veliki meri učinek kamnitih zidnih konstrukcij (temelji hiš, terasiranje ...) in prežganih arheoloških plasti (mesta ognjišč, posledice požarov, deponije keramike ...). Manjša območja visoke prevodnosti (nizke upornosti) lahko predstavljajo odpadne jame, večja pa večje kotanje, zapolnjene z drobnozrnatim ilovnatim in/ali glinastim sedimentom, ki pa običajno vsebuje tudi preneseni arheološki material.

### Zahvala

Članek predstavlja del raziskav doktorske naloge (Horn, B. v pripravi) z naslovom *Uporaba električne upornostne tomografije na prazgodovinskih arheoloških najdiščih*. Raziskava je bila izvedena v okviru transnacionalnega projekta Iron-Age-Danube, ki ga vodi dr. Marko Mele, in Univerzalnega muzeja Joanneum iz Gradca. Zahvale gredo vsem, ki so omogočili pripravo tega članka, predvsem dr. Igorju Medariću, ki je sodeloval pri izvedbi vseh ERT meritev, ter dr. Borutu Križu, vodji terenskih raziskav na Gradišnici v 80. letih 20. stoletja, Petri Stipančić iz Dolenjskega muzeja Novo mesto ter dr. Philu Masonu z Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije, OE Novo mesto, ki so omogočili vpogled v dokumentacijo o takratnih raziskavah in pregled najdb z najdišča, ob tem pa so z nami delili še marsikatero nezapisano informacijo.

*Literatura / References*

- APOSTOPOULOS, G., K. PAVLOPOULOS, J.-P. GOIRAN, E. FOUACHE 2014, Was the Piraeus peninsula (Greece) a rocky island? Detection of pre-Holocene rocky relief with borehole data and resistivity tomography analysis. – *Journal of Archaeological Science* 42, 412–421.
- BASAR, P. 2018, *Geofizikalne raziskave prazgodovinskih najdišč z nizkofrekvenčno elektromagnetno metodo CMD Mini-Explorer*. Magistrsko delo. Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana (neobjavljeno).
- BONSALL, J., R. FRY, C. GAFFNEY, I. ARMIT, A. BECK, V. GAFFNEY 2013, Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. – *Archaeological Prospection* 20, 219–231.
- BERGE, M. A., M. G. DRAHOR 2011a, Electrical resistivity tomography investigations of multilayered archaeological settlements: part I – Modelling. – *Archaeological Prospection* 18, 159–171.
- BERGE, M. A., M. G. DRAHOR 2011b, Electrical resistivity tomography investigations of multilayered archaeological settlements: part II – a case from old Smyrna Hoyuk, Turkey. – *Archaeological Prospection* 18, 291–302.
- CLAY, R. B. 2006, Conductivity (EM) Survey: A Survival Manual. – V / In: J. K. Johnson (ur. / ed.), *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, Tuscaloosa, 79–107.
- CONSTABLE, S. C., R. L. PARKER, C. G. CONSTABLE 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. – *Geophysics* 52, 289–300.
- ČREŠNAR, M., M. VINAZZA, J. BURJA 2017, Nove arheološke raziskave na Cvingerju pri Dolenjskih Toplicah in njihov doprinos k poznavanju železarstva v jugovzhodni Sloveniji v starejši železni dobi (Recent archaeological investigations at Cvinger near Dolenjske Toplice and their importance for the research of the Early Iron Age ironworking in south-eastern Slovenia). – *Arheo* 34, 79–93.
- DAHLIN, T., M. H. LOKE 1998, Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. – *Journal of Applied Geophysics* 38, 237–249.
- DE SMEDT, P., M. VAN MEIRVENNE, D. HERREMANS, J. DE REU, T. SAEY, E. MEERSCHMAN, P. COMBÉ, W. DE CLERCQ 2013, The 3-D reconstruction of medieval wetland reclamation through electromagnetic induction survey. – *Scientific Reports* 3/1517; (<http://www.nature.com/articles/srep01517>, dostop / accessed: 10. 11. 2015).
- DEY, A., H. F. MORRISON 1979, Resistivity modelling for arbitrary shaped two dimensional structures. – *Geophysical Prospecting* 27, 106–136.
- DIAMANTI, N. G., G. N. TSOKAS, P. I. TSOURLOS, A. VAFIDIS 2005, Integrated Interpretation of Geophysical Data in the Archaeological Site of Europos (Northern Greece). – *Archaeological Prospection* 12, 79–91.
- DOBRIN, M. B., C. H. SAVIT 1988, *Introduction to Geophysical Prospecting*. New York.
- DOGAN, M., S. PAPAMARINOPOULOS 2003, Geoelectric Prospection of a City Wall by Multi-electrode Resistivity Image Survey at the Prehistoric Site of Asea (Southern Greece). – *Archaeological Prospection* 10, 241–248.
- DULAR, J., B. KRIŽ 2004, Železnodobno naselje na Cvingerju pri Dolenjskih Toplicah. – *Arheološki vestnik* 55, 207–250.
- DULAR, J., S. TECCO HVALA 2007, South-Eastern Slovenia in the Early Iron Age / Jugovzhodna Slovenija v starejši železni dobi. – *Opera Instituti Archaeologici Sloveniae* 12, Ljubljana.
- EDWARDS L. S. 1977, A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. – *Geophysics* 42, 1020–1036.
- EVERETT, M. E. 2013, *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge.
- FRÖHLICH GUGLER, A. I. M., P. GEX 1996, Electromagnetic survey of a Celtic tumulus. – *Journal of Applied Geophysics* 35, 15–25.

- GF INSTRUMENTS 2016, Short guide for electromagnetic conductivity mapping and tomography; ([http://www.gfinstruments.cz/version\\_cz/downloads/CMD\\_Short\\_guide\\_Electromagnetic\\_conductivity\\_mapping-10-10-2016.pdf](http://www.gfinstruments.cz/version_cz/downloads/CMD_Short_guide_Electromagnetic_conductivity_mapping-10-10-2016.pdf), dostop / accessed: 25. 12. 2018).
- GRISSE, R. B., M. ALLEY, D. HOLSHOUSER, W. THOMASON 2009, Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. – *Virginia Cooperation Extension Publications* 442–508; (<https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/51377/442-508.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).
- GRUŠKOVNJAK, L. 2017, Arheološki površinski pregledi – osnovni koncepti in problemi (Archaeological surface survey – basic concepts and problems). – *Arheo* 34, 23–77.
- HABER, E., U. M. ASCHER, D. W. OLDENBURG 2004, Inversion of 3D electromagnetic data in frequency and tie domain using an inexact all-at-once approach. – *Geophysics* 69, 1216–1228.
- HORN, B., B. MUŠIČ, M. ČREŠNAR (2017 v tisku/in print), Innovative Approaches for Understanding Iron Age Fortifications. Emphasize on 2D Subsurface Models in the Light of Electrical Resistivity Tomography. – V / In: T. Tkalčec (ur. / ed.), *Zbornik instituta za arheologiju / Serta Instituti Archaeologici – Fortifications, defence systems, structures and features in the past*, Zagreb.
- HORN, B., B. MUŠIČ, I. MEDARIĆ 2018a, Geofizikalne raziskave kot orodje za prepoznavanje prazgodovinskih naselbinskih struktur v kraškem okolju: primer gradišča Debela Griža. – V / In: Ferk, P. Gostinčar, J. Tičar (ur. / ed.), *Ekskurzije in povzetki*, Ljubljana, 21–22.
- HORN, B., B. MUŠIČ, I. MEDARIĆ, D. MLEKUŽ 2018b, Geophysical and archaeological research of Eneolithic pile dwelling settlement Gornje Mostišče – emphasis on electrical resistivity tomography method. – V / In: I. Miloglav (ur. / ed.), *6th Scientific Conference Methodology & Archaeometry, Zagreb, 6th – 7th December 2018*, Zagreb, 54–55.
- KRIŽ, B. 1987, Dolenje Gradišče. – *Varstvo spomenikov* 29, 241–242.
- KRIŽ, B. 1988, Gorenje Gradišče. – *Varstvo spomenikov* 30, 213–214.
- LEOPOLD, M., E. GANNAWAY, J. VOELKEL, F. HAAS, M. BECHT, T. HECKMANN, M. WESTPHAL, G. ZIMMER 2011, Geophysical prospection of a bronze foundry on the southern slope of the Acropolis at Athens, Greece. – *Archaeological Prospection* 18 (1), 27–41.
- LEUCCI, G., F. GRECO, L. DE GIORGI, R. MAUCERI 2007, Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola (Sicily, Italy). – *Journal of Archaeological Science* 34 (2), 233–242.
- LOKE, M. H. 2016, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia. (<https://www.geotomosoft.com/downloads.php>, dostop / access: 12. 2. 2017)
- LOKE, M. H., T. DAHLIN, T. 2002, A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. – *Journal of Applied Geophysics* 49, 149–162.
- LOKE, M. H., J. E. CHAMBERS, D. F. RUCKER, O. KURAS, P. B. WILKINSON 2013, Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. – *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156.
- LÜCK, E., J. CALLMER, T. SKÅNBERG 2003, The House of the Bailiff of Sövestad, Sweeden – A Multi-method Geophysical Case Study. – *Archaeological Prospection* 10, 143–151.
- MAILLOL, J. M., D. L. CIOBOTARU, I. MORAVETZ 2004, Electrical and Magnetic Response of Archaeological Features at the Early Neolithic Site of Movila lui Deciov, Western Romania. – *Archaeological Prospection* 11, 213–226.
- MEDARIĆ, I., B. MUŠIČ, M. ČREŠNAR 2016, Tracing the flat cremation graves using integrated advanced processing of magnetometry data (case study of Poštela near Maribor, NE Slovenia). – V / In: I. Armit, H. Potrebica, M. Črešnar, P. Mason, L. Büster (ur. / eds.), *Cultural encounters in Iron Age Europe*. Archaeolingua, Series Minor 38, Budapest, 67–93.
- MLEKUŽ, D. 2017, Hiperspektralna snemanja in arheologija (Hyperspectral surveys and archaeology). – *Arheo* 34, 7–21.



- MURDIE, R. E., R. H. WHITE, G. BARRATT, V. GAFFNEY, N. R. GOULTY 2003a, Geophysical Surveys of Bury Walls Hill Fort, Shropshire. – *Archaeological Prospection* 10, 249–263.
- MURDIE, R. E., N. R. GOULTY, R. H. WHITE, G. BARRATT, N. J. CASSIDY, V. GAFFNEY 2003b, Comparison of Geophysical Techniques for Investigating an Infilled Ditch at Bury Walls Hill Fort, Shropshire. – *Archaeological Prospection* 10, 265–276.
- MUŠIČ, B. 1999, Geophysical prospecting in Slovenia: an overview with some observation related to the natural environment. – *Arheološki vestnik* 50, 349–405.
- MUŠIČ, B., J. HORVAT 2007, Nauportus – an Early Roman trading post at Dolge njive in Vrhinka. The results of geophysical prospecting using a variety of independent methods. – *Arheološki vestnik* 58, 219–283.
- MUŠIČ, B., L. ORENKO 1998, Magnetometrične raziskave železnodobnega talilnega kompleksa na Cvingerju pri Meniški vasi. – *Arheološki vestnik* 49, 157–186.
- MUŠIČ, B., M. ČREŠNAR, I. MEDARIĆ 2014, Možnosti geofizikalnih raziskav na najdiščih iz starejše železne dobe. Primer arheološkega kompleksa Poštela pri Mariboru. – *Arheo* 31, 19–48.
- MUŠIČ, B., M. VINAZZA, M. ČREŠNAR, I. MEDARIĆ 2015, Integrirane neinvazivne raziskave in terensko preverjanje. Izkušnje s prazgodovinskih najdišč severovzhodne Slovenije. – *Arheo* 32, 37–64.
- MUŠIČ, B., M. ČREŠNAR, I. MEDARIĆ, B. HORN 2018, Neinvazivne raziskave gomil, pomnikov starejše železne dobe pod Poštelo pri Mariboru / Non-invasive research of barrows, monuments of the Early Iron age below Poštela near Maribor – V / In: M. Črešnar, M. Vinazza (ur. / ed.), *Srečanja in vplivi v raziskovanju bronaste in železne dobe na slovenskem. Zbornik prispevkov v čast Bibi Teržan*, Ljubljana, 317–334.
- OLAYINKA, A. I., U. YARAMANCI 2000, Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. – *Journal of Applied Geophysics* 45, 63–81.
- ORFANOS, C., G. APOSTOLOPOULOS 2011, 2D–3D resistivity and microgravity measurements for the detection of an ancient tunnel in the Lavrion area, Greece. – *Near Surface Geophysics* 9 (5), 449–457.
- PAPADOPOULOS, N. G., A. SARRIS, W. A. PARKINSON, A. GYUCHA, R. W. YERKES, P. R. DUFFY, P. TSOURLOS 2014, Electrical Resistivity Tomography for the Modelling of Cultural Deposits and Geomorphological Landscapes at Neolithic Sites: a Case Study from Southeastern Hungary. – *Archaeological Prospection* 21, 169–183.
- PLENIČAR, M., U. PREMUR 1977, *Osnovna geološka karta SFRJ*. Tolmač za list Novo Mesto L 33–79. Beograd.
- PORTNIAGUINE, O. N., M. S. ZHDANOV 1999, Focusing geophysical inversion images. – *Geophysics* 64, 874–887.
- REYNOLDS, J. M. 2011, Introduction to applied and environmental geophysics, (2. Izd. / 2nd edition). John Wiley and Sons, London.
- SARRIS, A., E. ATHANASSOPOULOU, A. DOULGERI-INTZESEILOGLOU, E. SKAFIDA, J. WEMYOUTH 2002, Geophysical Prospection Survey of an Ancient Amphorae Workshop at Tsoukalia, Alonnisos (Greece). – *Archaeological Prospection* 9, 183–195.
- SASAKI, Z. 2001, Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. – *Journal of Applied Geophysics* 46, 45–54.
- SILVESTER, P. P., R. L. FERRARI 1990, Finite Elements for Electrical Engineers. Cambridge.
- SIMILOX TOHON, D., K. VANNESTE, M. SINTUBIN, P. MUCHEZ, M. WAELKENS 2004, Two-dimensional Resistivity Imaging: a Tool in Archaeoseismology. An Example from Ancient Sagalassos (Southwest Turkey). – *Archaeological Prospection* 11, 1–18.
- SIMPSON, D., M. VAN MEIRVENNE, T. SAEY, H. VERMEERSCH, J. BOURGEOIS, A. LEHOUCK, L. COCKX, U. W. A. VITHARANA 2009, Evaluating the Multiple Coil Configurations of the EM38DD and DUAL-EM-21S Sensors to Detect Archaeological Anomalies. – *Archaeological Prospection* 16, 91–102.
- SIMPSON, D., M. VAN MEIRVENNE, E. LÜCK, J. BOURGEOIS, J. RÜHLMANN 2010, Prospection of two circular Bronze Age ditches with multi-receiver

electrical conductivity sensors (North Belgium). – *Journal of Archaeological Science* 37, 2198–2206.

SMEKALOVA, T., B. BEVAN 2009, A Geophysical Evaluation of Avaldsnes, Technical Report; ([https://www.researchgate.net/publication/305723441\\_A\\_Geophysical\\_Evaluation\\_of\\_Avaldsnes](https://www.researchgate.net/publication/305723441_A_Geophysical_Evaluation_of_Avaldsnes), dostop / access: 12. 2. 2017).

TABBAGH, A. 1986, Applications and advantages of the Slingram EM method for archaeological prospecting. – *Geophysics* 51, 576–584.

TEIXIDÓ, T., E. G. ARTIGOT, J. A. PEÑA, F. MOLINA, T. NÁJERA, F. CARRIÓN 2013, Geoarchaeological Context of the Motilla de la Vega Site (Spain) Based on Electrical Resistivity Tomography. – *Archaeological Prospection* 20, 11–22.

TELFORD, W. S., L. P. GELDART, R. E. SHERIFF 1990, *Applied Geophysics*. Cambridge.

TSOURLOS, P. I., G. N. TSOKAS 2011, Non-destructive electrical resistivity tomography survey at the south walls of the Acropolis of Athens. – *Archaeological Prospection* 18 (3), 173–186.

TSOURLOS, P., N. PAPADOPOULOS, M.-J. YI, J.-H. KIM, G. TSOKAS 2014, Comparison of measuring strategies for the 3-D electrical resistivity imaging of tumuli. – *Journal of Applied Geophysics* 101, 77–85.

WUNDERLICH, T., D. WILKEN, J. ANDERSEN, W. RABEL, D. ZORI, S. KALMRING, J. BYOCK 2015, On the Ability of Geophysical Methods to Image Medieval Turf Buildings in Iceland. – *Archaeological Prospection* 22, 171–186.

ZOND GEOPHYSICAL SOFTWARE 2016, *ZONDRES2D – Program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods. Zond geophysical software*. – Saint-Petersburg 2001–2016.

ŽEBRE, M., J. JEŽ, S. MECHERNICH, B. MUŠIČ, B. HORN, P. JAMŠEK RUPNIK 2018, Fluvial response to glacial dynamics in the Dinaric mountain karst during the Late glacial period. Geophysical research abstracts. – *Geophysical research abstracts* vol. 20, no. EGU2018-11942; (<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-11942.pdf>, 1. 12. 2018).

### Spletna vira / Web sources:

Splet 1 / Web 1: [http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso) (dostop / access: 25. 12. 2018).

Splet 2 / Web 2: <https://www.google.com/maps/@45.7693583,15.0508371,1661m/data=!3m1!1e3> (dostop / access: 25. 12. 2018).

## *Geophysical research in the karst environment: electrical resistivity tomography and low-frequency electromagnetic method results, case study of the fortified settlement Gradišnica near Dolenje Gradišče*

### *(Summary)*

In this article we present the results of geophysical research with electrical resistivity tomography (ERT) and low-frequency electromagnetic methods (*CMD Mini-Explorer*), which we have preferably chosen in research of the fortified archaeological settlement Gradišnica near Dolenje Gradišče, located in the karst environment, surrounded with dolines (Figures 2–3).

The settlement with a rampart, positioned on jurassic stratified limestone near the river Krka, covers an area of approx. 2.8 ha at the altitude 205–225 m, and is currently overgrown with grass. Modern agricultural activities are visible on the surface in the form of plough lines in a NE–SW direction. Preliminary rescue excavations revealed a prehistoric rampart, a stone wall defence structure as well as severely burnt layers also comprising several ceramic fragments from multiple periods.

In order to obtain depths on archaeological structures and horizons, as well as to reveal the geological composition of the area, we measured six ERT profiles over the topographically recognised features (Figure 3b) with dipole-dipole electrode array, which better defines vertical structures (Figure 5). We verified applied inverse modelling constraints of focused inversion (Portniaguine and Zhdanov 1999; Zond geophysical software 2016) with a synthetic model (Figure 6). Inverse ERT models 1 and 2 (Figures 12 and 13) revealed high resistivity structures (A1, A2, and A3) at the places of terrace folds, which might correspond to the settlement inner stone constructions, or to the weathered limestone, which could be partially artificially restructured. Low resistivity depressions are up to 3 m deep, while solid limestone has undulated shape and (with exception of the mentioned structures) lies at depth 1.5–3 m. ERT 3 (Figure 14) delineates the defence wall structure (A4) with ruins (A5) down the E slope. ERT 4 and 5 (Figure 15) show rather weathered geological composition between two dolines and ERT 6 (Figure 16) the composition of Doline 1 and Doline 2, which seems to be artificially filled in the archaeological or more recent past.

Research with the CMD method covers an area of 120 × 60 m in the highest part of the settlement. An attempt to quantify the conductivity data set (in vertical directions) with the 3D inversion model (Figures 8 and 9) shows high resistivity horizons near the surface (up to depth 0.8 m), while at the bottom low resistivity material fills depressions. Furthermore, medium resistivity

material is also present, which might correspond to severely weathered limestone or/and (burnt) archaeological remains. CMD-apparent conductivity and magnetic susceptibility maps (Figure 10) on sensor 1 show strong tendency of anomaly distribution in the ploughing direction (NW–SE), while at sensors 2 and 3 the anomalies show the original position of archaeological remains with greater certainty. Low conductivity areas (Figures 10 and 11) can be connected to the stone wall remains (constructions), terraces (natural or anthropogenic), burnt layers, pottery dumps, and stone debris, while high magnetic susceptibility is connected to burnt horizons (like places of hearths, fires, pottery workshops, ceramic dumps, metallurgic activities, etc.). High conductivity areas are connected to the fine-grained clayey/loamy moist sediment, which can indicate caverns or also the presence of dump pits at some places. At the southern terrace edge a larger low conductivity area overlaps with high magnetic susceptibility which likely reflects burnt layers combined with stone wall constructions, with the corresponding high resistivity anomaly on ERT 1 (Figure 12, A1). At the NW edge we also observe low conductivity and high magnetic susceptibility overlapping in the direction of the terrace edges (NE–SW), with the corresponding high resistivity anomaly just below the terrace edge on ERT 2 (Figure 13, A2). The features could reflect the natural, partially weathered limestone, although rather unusual in the case of the completely straight line in the NE–SW direction, which might well be the result of a more recent terracing of the area for agricultural purposes. However, an archaeological origin of the feature in the form of a stone wall cannot be completely excluded either.