



**PROJEKT: PROIZVODNJA ŽELJEZA UZ RIJEKU DRAVU U
ANTICI I SREDNJEM VIJEKU: STVARANJE I TRANSFER
ZNANJA, TEHNOLOGIJA I ROBA**

IZVJEŠĆE O GEOFIZIČKIM ISTRAŽIVANJIMA

na lokacijama:

**SLIVNICE I SUŠINE KOD VIRJA I
DEDANOVICE KOD HLEBINA**

Naručitelj istraživanja:

**Institut za arheologiju
Ulica Ljudevita Gaja 32
10000 Zagreb
R. Hrvatska**

Autori izvješća:

Igor Medarić, univ. dipl. arheol.
Barbara Horn, univ. dipl. inž. geol.

UVOD

Strategija geofizičkih istraživanja je bila napravljena prema ciljevima zadanim u prijavi projekta „Proizvodnja željeza uz rijeku Dravu u antici i srednjem vijeku: stvaranje i transfer znanja, tehnologija i roba“. Osnovni je cilj geofizičkih istraživanja otkrivanje slojeva s većom koncentracijom minerala željeza, koja bi odgovarala tipu rudače *Bog iron ore*. Pojav rude tog tipa nema danas nikakovog ekonomskog značenja, ali su se zbog jednostavne eksploatacije te pojave minerala željeza koristile u željezarstvu od prapovijesti pa do antike i ranog srednjeg vijeka. Radi se o mineralima željeza koji i danas nastaju u močvarama i jezerima, pa su mehanizmi nastajanja tih naslaga dobro poznati. Danas je najviše pojava *Bog iron ore* u sjevernom hladnom pojusu gdje je hladna klima. Najvjerojatnije je veći dio rude željeza tog tipa u Podravini nastao u sličnim okolnostima periglacialnog pojasa nakon zadnje glacialne faze i topljenja glečera. Dobro je poznato, da je najviša akumulacija rude željeza na mjestima gdje se sljevaju močvarne i jezerske vode jer sadrže puno željezovog bikarbonata $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. Dok se ispod močvare stvara sloj takve rude željeza, u jezerima nastaju kuglice veličine do približno 30 mm, a slojevi su u obliku leća veće debljine. Za geofizička istraživanja je značajan podatak, da se ove pojave minerala željeza lateralno brzo izklinjavaju pa se mogu na rezultatima magnetske metode očekivati međusobno odvojena područja relativno višeg magnetskog susceptibilitata.

Kao primarnu geofizičku metodu za otkrivanje pojava akumulacije minerala željeza na način mineralizacije *Bog iron ore* smo koristili magnetsku metodu na gradientan način mjerjenja magnetskog protoka totalnog magnetskog polja Geometrics G-858 (<http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-858-magmapper>). Magnetskom metodom smo ukupno na sve tri lokacije istražili površinu 19.000 m². Za Dedanovice kod Hlebina su prikazani i rezultati magnetskih mjerjenja samo na donjem i gornjem senzoru magnetometra. Na drugim lokacijama zbog štetnog utjecaja drugih izvora jakog magnetskog polja to nije bilo moguće. Na osnovu tih rezultata se može zaključiti, da je jako poželjno magnetska snimanja napraviti na područjima bez sekundarnih izvora magnetskih anomalija, da se mogu analizirati i rezultati mjerjenja na pojedinim senzorima.

Na osnovu rezultata magnetske metode i analiza jezgra bušotina smo odabrali mesta za provjeravanje oblika magnetski anomalnih slojeva metodom 2D geoelektrične tomografije (ERT - *electrical resistivity tomography*) instrumentom ARES (http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&smenu=iress&cont=ares_&ear=ov). Rezultati geofizičkih istraživanja su interpretirani na integralan način koristeći pozitivne rezultate obje metode. Ukupno smo na sve tri lokacije napravili 13 profila 2D geoelektrične tomografije različitim elektrodnih konfiguracijama (dipol-dipol, Wenner-alfa, Wenner-beta i Wenner-Schlumberger) dužina profila i razdaljina između elektroda. To je bilo u prvoj godini projekta neophodno za provjeravanje optimalnog omjera između dubine zahvata i lučljivosti. Na svim smo lokacijama za utvrđivanje korelacije između opisa jezgra bušotina i slojeva različitog specifičnog otpora na osnovu 2d geoelektrične tomografije, jedan profil napravili i na mjestu bošotine.

Geofizička istraživanja smo koordinirali s ekipom geologa koji su izvodili plitke pedološke bušotine, opise jezgri, analize kemijskog sastava uzoraka jezgri bušotina i

mjerenja magnetskog susceptibiliteta uzorka bušotina. Za geofizička istraživanja smo u prvoj godini projekta odabrali tri lokacije (**slika 1**) na osnovu više kriterija:

- a. da položaj odgovara geološkim naslagama močvarnih sedimenta
- b. da su u jezgrama bušotina vidljive naslage minerala željeza
- c. da je magnetski susceptibilitet dijelova jezgra bušotina viši od prosječne vrijednosti za određenu prirodnu sredinu
- d. da se u blizini nalaze arheološki dokazane željezarske radionice

Na Sušinama se mjesto bušotine i površina istražena geofizičkom metodom nalaze u blizini arheološki istraženog područja s željezarskim radionicama. U bušotini su otkrivene pojave minerala željeza s najvišim vrijednostima magnetskog susceptibiliteta među svim jezgrama bušotina. Na lokaciji Novigrad Podravski – Milakov Berek su bili razlog za lociranje bušotine i geofizička istraživanja pojave *Bog iron ore* na površini prilikom izgradnje plinovoda. Na Dedanovicama kod Hlebine smo u 2017. g. magnetskom metodom potvrdili postojanje željezarskih radionica koje su bile prethodno otkrivene terenskim pregledom voditeljice projekta Tajane Sekelj Ivančan. U bušotini u blizinu tog kompleksa su bile otkrivene pojave minerala željeza, a i vrijednosti magnetskog susceptibiliteta su iznad srednjih vrijednosti za tu prirodnu sredinu.



Slika 1. Položaji površina na Sušinama kod Virja (1), Novigrad Podravski – Milakov Berek i Dedanovice kod Hlebine koje su bile istražene s magnetskom metodom (Geometrics G-858, gradientna tehnika) i 2D geoelektričnom tomografijom na DOF-u (Geodetska uprava RH).

Magnetska mjerena na svim lokacijama smo izvodili na georeferenciranim površinama u paralelnim profilima s međusobnim rastojanjem 2 m, a 2D geoelektričnu tomografiju u profilima promjenjive dužine i isto tako razdaljine između elektroda.

PRIMJENJENE GEOFIZIČKE METODE:

1. Magnetska metoda (Geometrics G-858)
2. 2D geoelektrična tomografija (ARES)

1. Primjena magnetske metode i rezultati

Magnetska metoda je pasivna metoda jer se magnetometrima mjere lokalne promjene u „vanjskom“ tj. Zemaljskom magnetskom polju (**slika 2**), koje su posljedica promjena u magnetskom susceptibilitetu materijala ispod površine (inducirana magnetizacija). U ovom je projektu osnovna svrha korištenja magnetske metode prepoznavanje magnetskih anomalija, koje su posljedica višeg magnetskog susceptibiliteta zbog minerala željeza u rudi tipa *Bog iron ore*. Za manje ciljeve na manjim dubinama se koriste mjerena promjena u gustoći magnetskog protoka zemaljskog magnetskog polja na (pseudo)gradijentni način (nT/m) uz mjerena totalnog magnetskog polja (nT) gdje je to moguće zbog utjecaja magnetskih anomalija drugih jakih izvora u blizini (željezni elementi suvremene infrastrukture). Gradijentni način djeluje kao filter niskih frekvencija, što zapravo ojača slabe magnetske anomalije malih objekata na malim dubinama (signal) i eliminira dugovalne anomalije, koje su posljedica drugih magnetskih karakteristika geološke sredine (šum). S magnetnom metodom uspješno se otkrivaju naročito nalazišta rudače željeza jer je za minerale željeza karakterističan aferomagnetni (hematit), ferimagnetni tip magnetizacije (magnetit) i u glavnom paramagnetni tip magnetizacije Fe-hidroksida (npr. goethit). Najveća dubina na kojoj magnetnom metodom možemo otkriti neko rudno tijelo, ovisi od kontrasta u susceptibilitetu između rude i sredine u kojoj se nalazi te veličine, oblika i položaja rude ispod površne.

Rezultati magnetske metode na dijelovima istražene površine su prikazani različitim načinima obrade izmjerениh vrijednosti i različitim rasponima magnetskih anomalija (Virje-Sušine: **slike 3–6**, Novigrad Podrevski-Milakov Berek: **slike 7–10** i Hlebine-Dedanovice: **slike 11–15**).

Relativno jače iako još uvijek slabe anomalije magnetskih gradienata maksimalnih amplituda u rasponu $-/+2 \text{ nT/m}$ su najvjerojatnije zbog većih koncentracija minerala željeza u tlu. Te su magnetske anomalije lako prepoznatljive i odgovaraju pretpostavci o obliku naslaga tipa *Bog iron ore* u lećastim slojevima koji se laterelano isklinjavaju. Pokazalo se, da su pored magnetskog (pseudo)gradienta jako korisne i vrijednosti gustoće magnetskog protoka na pojedinim senzorima. To je bilo moguće koristiti samo na lokaciji Dedanovice kod Hlebine jer tamo, za razliku od druge dvije lokacije, nije bilo nikakvih sekundarnih izvora magnetskog polja. Zbog iznimno slabih anomalija koje su relevantne za mineralizacije željeza u tlu su sve i najslabije magnetske anomalije iz sekundarnih izvora jako štetne i onemogućavaju analize rezultata na pojedinim senzorima. Gradientni način mjerena sve ove vanjske izvore

magnetskog polja u velikoj mjeri negira pa time nema uočljivih utjecaja na rezultate mjerenja.

A



B



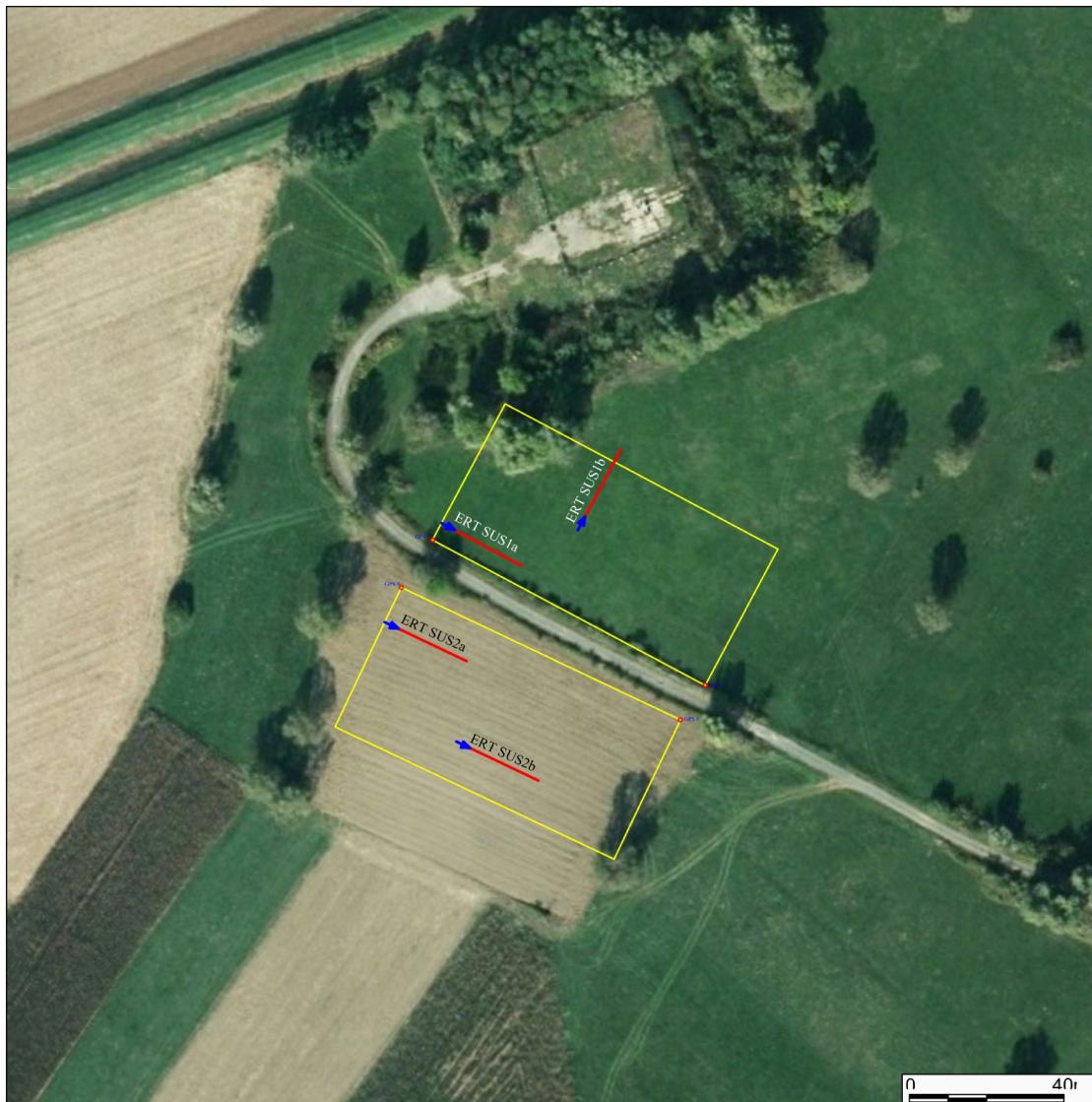
C



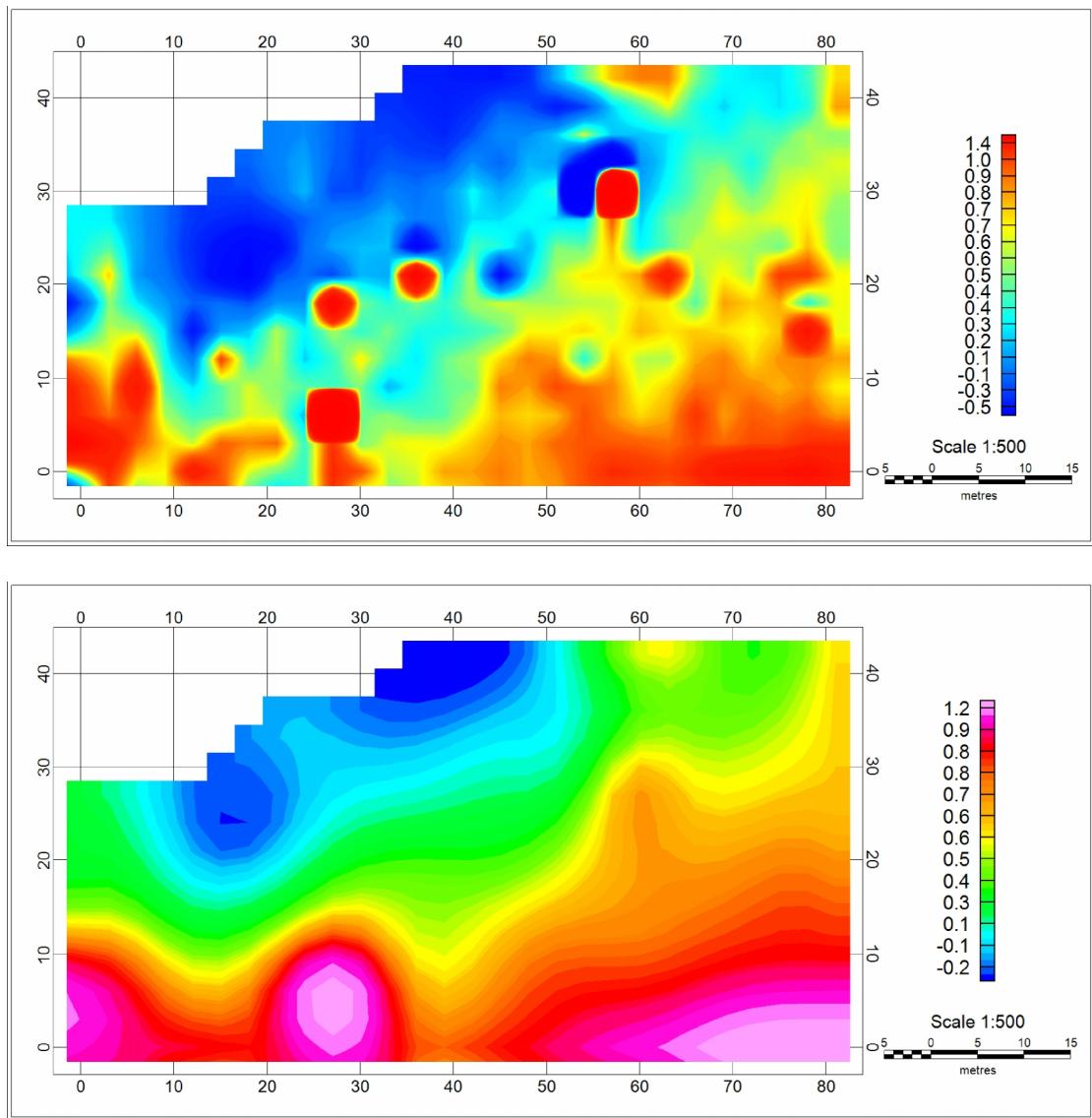
D



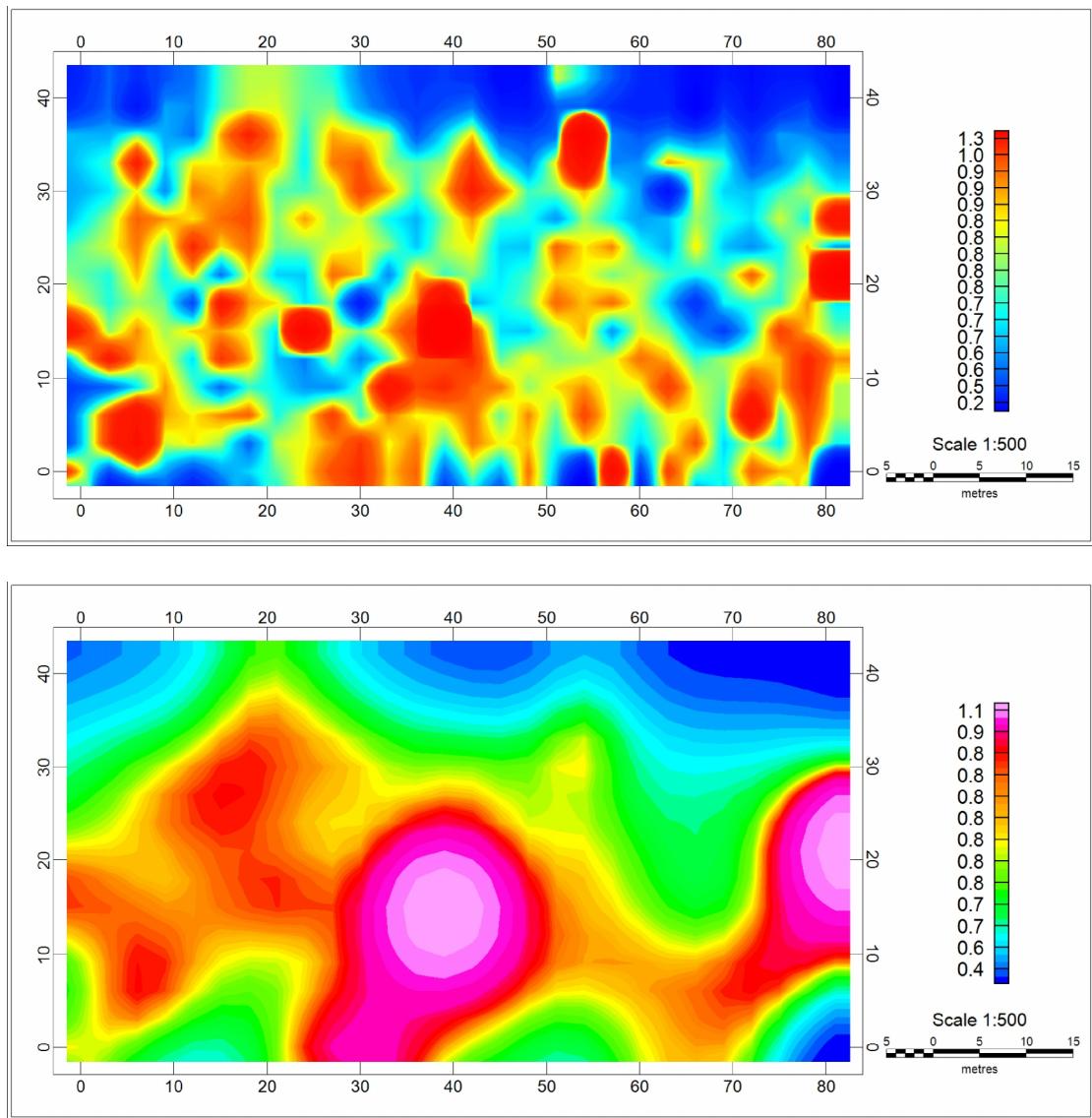
Slika 2. Pogled na stanje površina za vrijeme magnetskih istraživanja: Sušine kod Virja (A i B), Novigrad Podravski – Milakov Berek (C) i Dedanovice kod Hlebina (D).



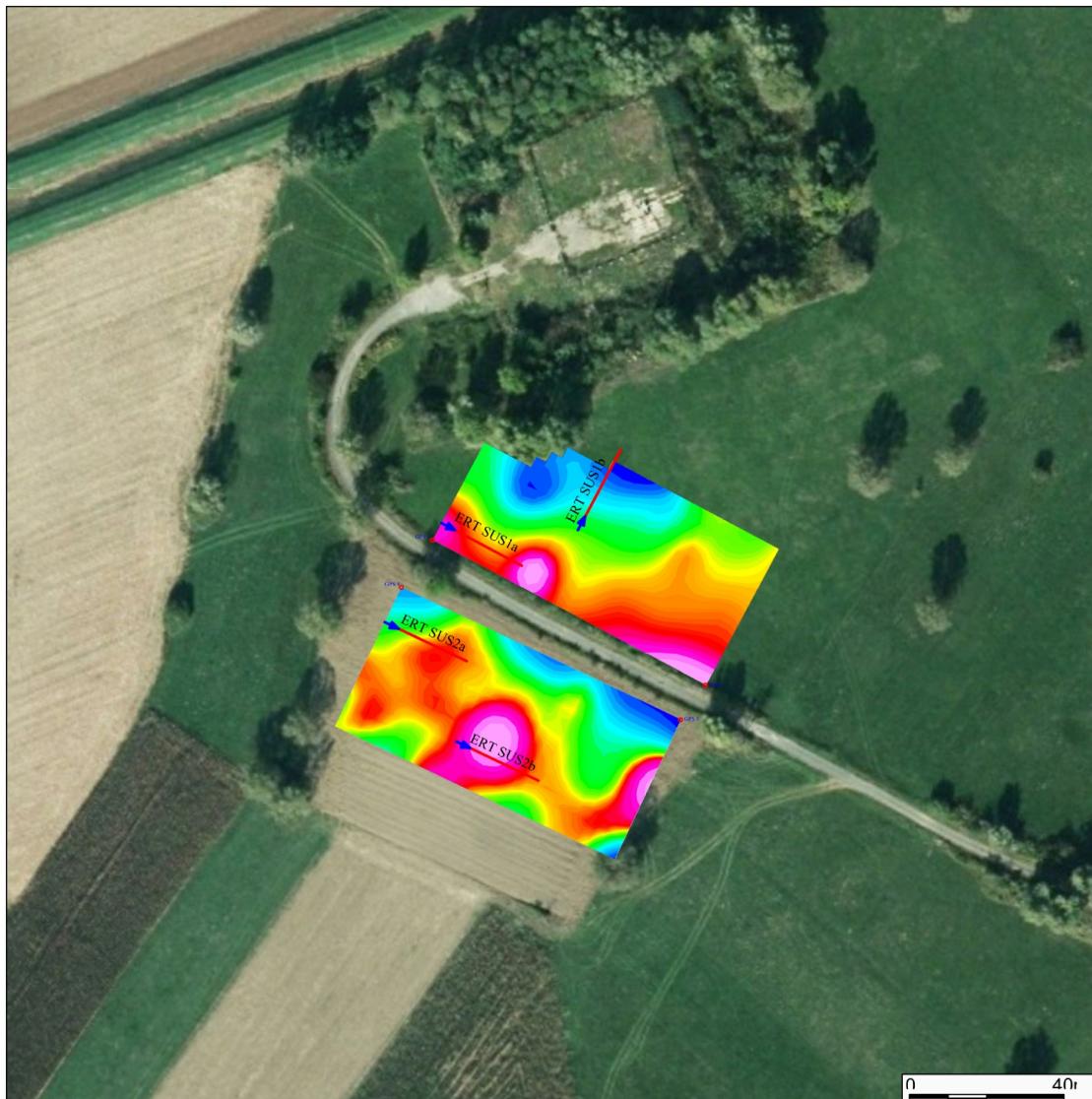
Slika 3. Virje-Sušine. Površine istražene magnetskom metodom (područje 1–sjeverno; područje 2–južno) i profili za 2D geoelektričnu tomografiju.



Slika 4. Virje-Sušine. Područje 1. (slike 3 i 6). Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858). Izmjerene vrijednosti gradijenta (gore) i nakon primjene gaussovog filtera glađenja (dolje). Točke jačih magnetskih anomalija su zbog sitnih komada željeza na površini. Jasno se prepoznaje trend viših gradijenta od sjevera prema jugu. Pretpostavljamo, da su jače magnetske anomalije na mjestima većih koncentracija minerala željeza u tlu (*Bog iron ore?*).



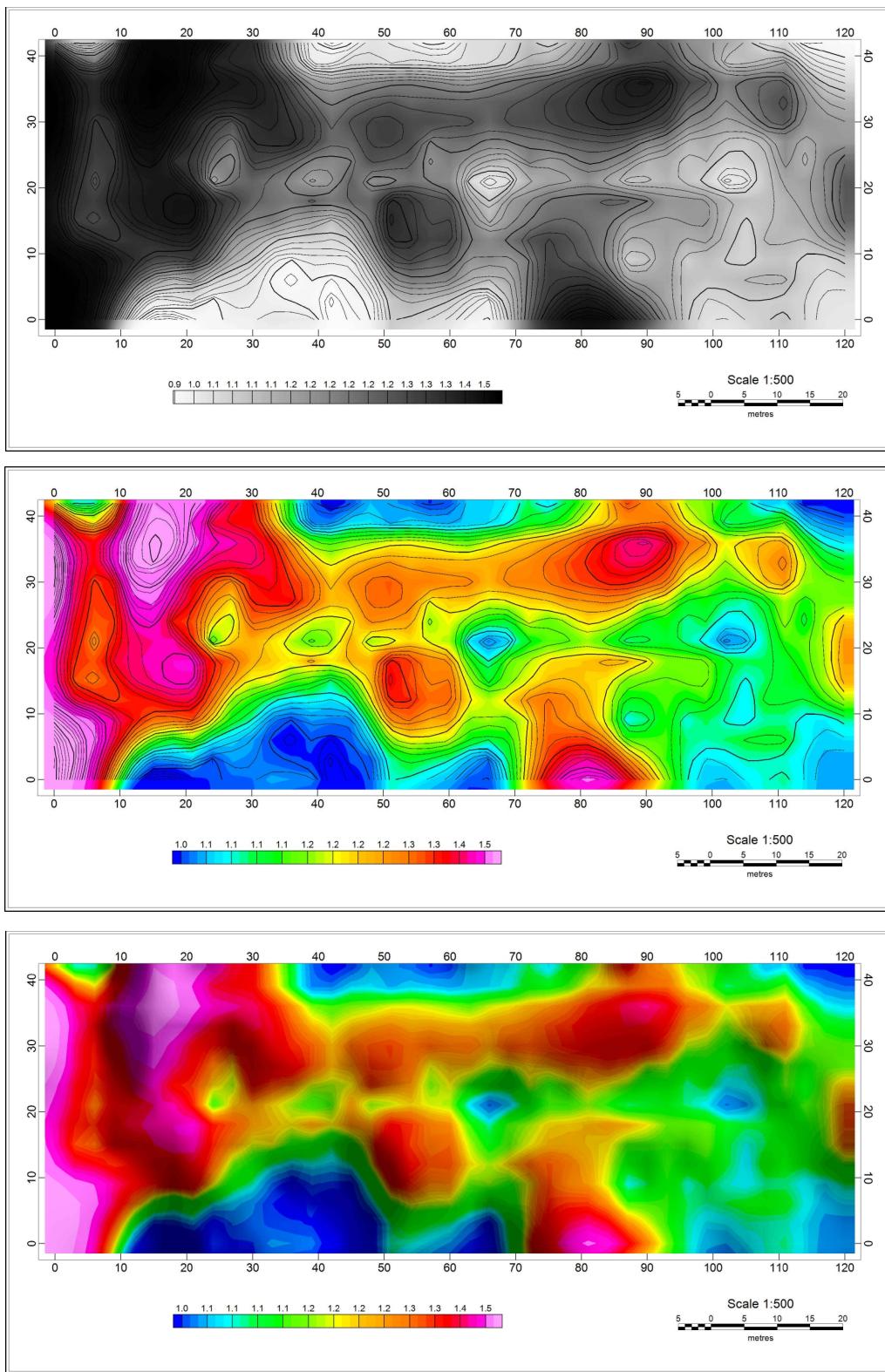
Slika 5. Virje-Sušine. Područje 2. (slike 3 i 6). Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858). Izmjerene vrijednosti gradijenta (gore) i nakon primjene gaussovog filtera glađenja (dolje). Točke jačih magnetskih anomalija su zbog sitnih komada željeza na površini. Jasno se prepoznaju magnetske anomalije viših gradijenta u središnjem dijelu istražene površine. Pretpostavljamo, da su jače magnetske anomalije na mjestima većih koncentracija minerala željeza u tlu (*Bog iron ore?*).



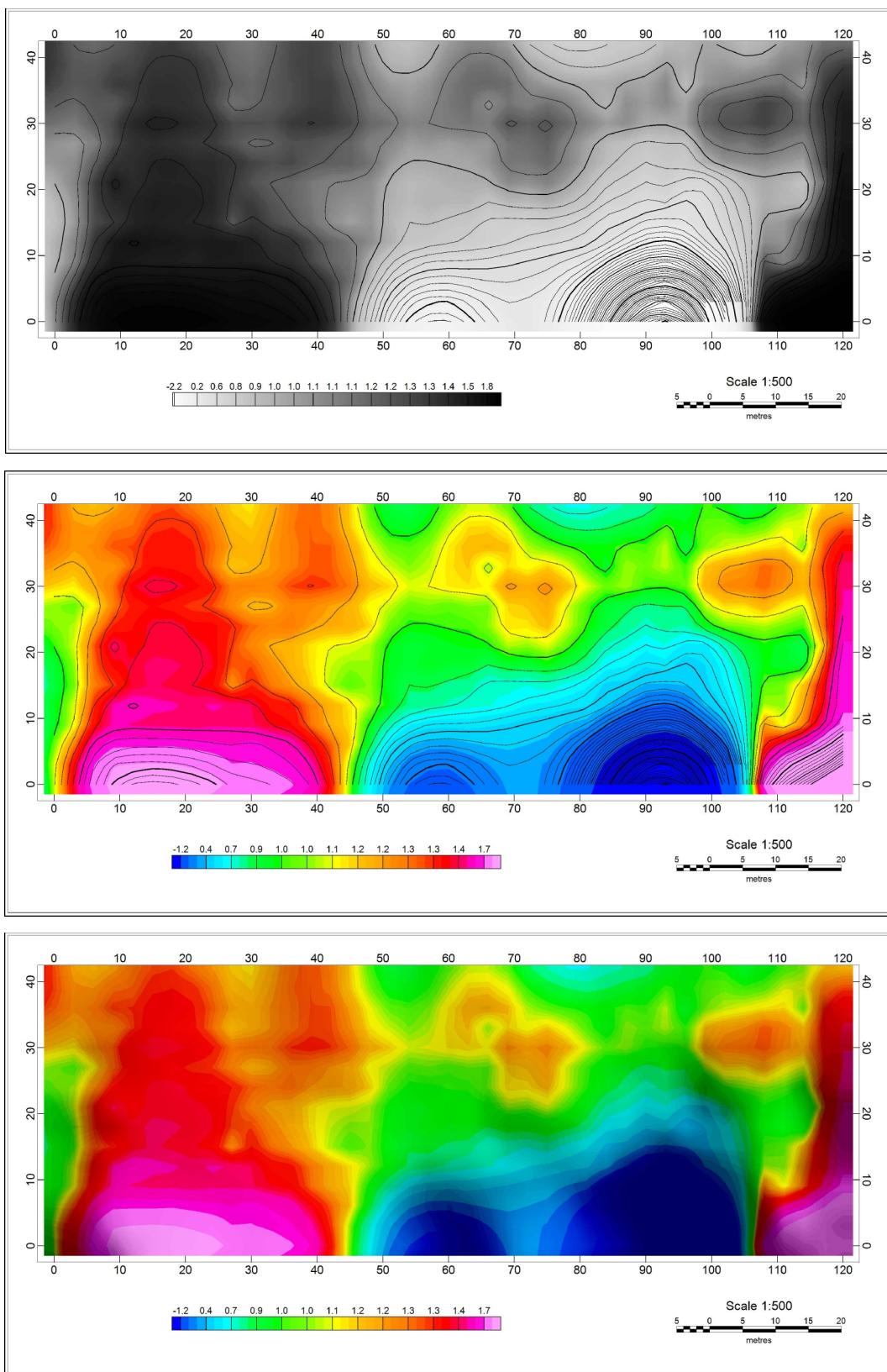
Slika 6. Virje-Sušine. Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) nakon primjene gaussovog filtera glađenja. Narančasta i crvena polja predstavljaju relativno jače magnetske anomalije (-2/+2nT) na područjima s većim nakupinama magnetnijih oblika minerala željeza pa pretpostavljamo da se radi o slojevima s rudom tipa *Bog iron ore*, odnosno samo relativno većim koncentracijama željeza u istom sloju na intervalu dubine približno 0,7 – 1,7 m gdje se po rezultatima 2D geoelektrične tomografije nalazi sloj veće vlažnosti odnosno nižeg otpora a na rezultatima analiza jezgra bušotine sitnozrnati sloj (silt) s koncentracijama minerala željeza.



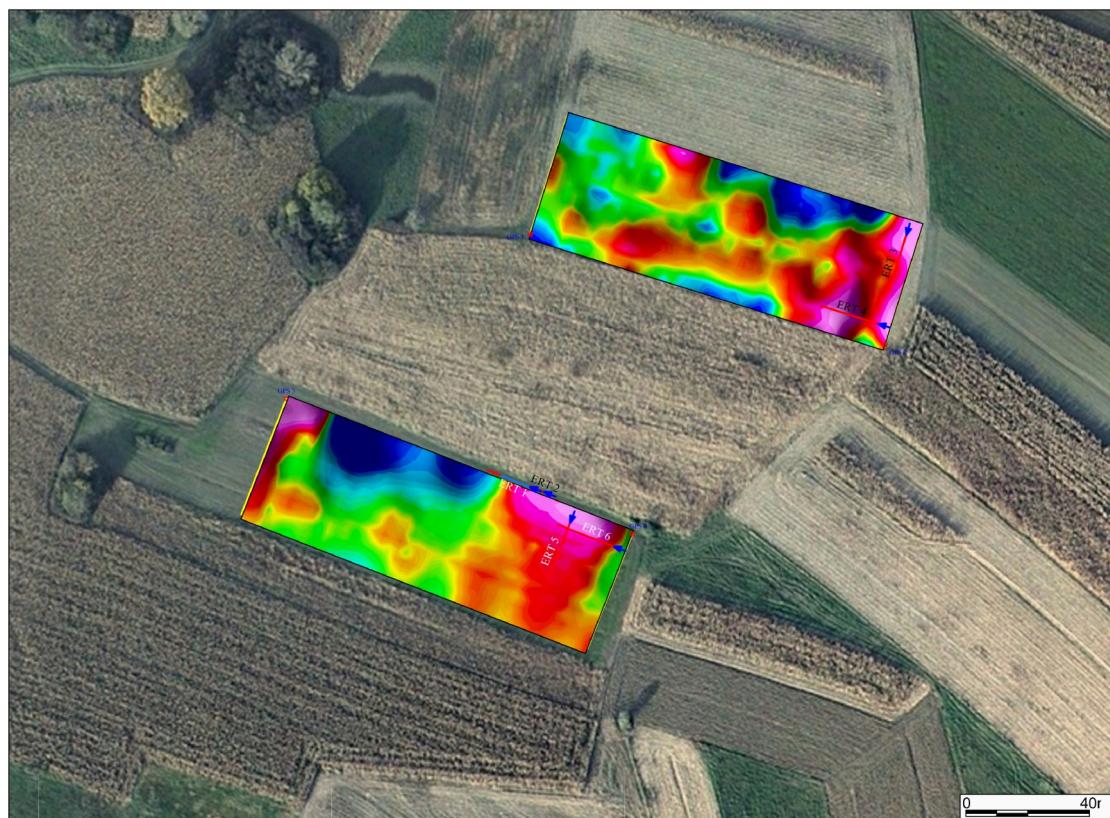
Slika 7. Novigrad Podravski – Milakov Berek. Površine istražene magnetskom metodom i profili za 2D geoelektričnu tomografiju.



Slika 8. Novigrad Podravski–Milakov Berek. Područje 1. (slike 7 i 10). Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) nakon primjene gaussovog filtera glađenja. Jasno se prepoznaju magnetske anomalije viših gradijenta po većem dijelu istražene površine. Pretpostavljamo, da su jače magnetske anomalije na mjestima većih koncentracija minerala željeza u tlu (*Bog iron ore?*).



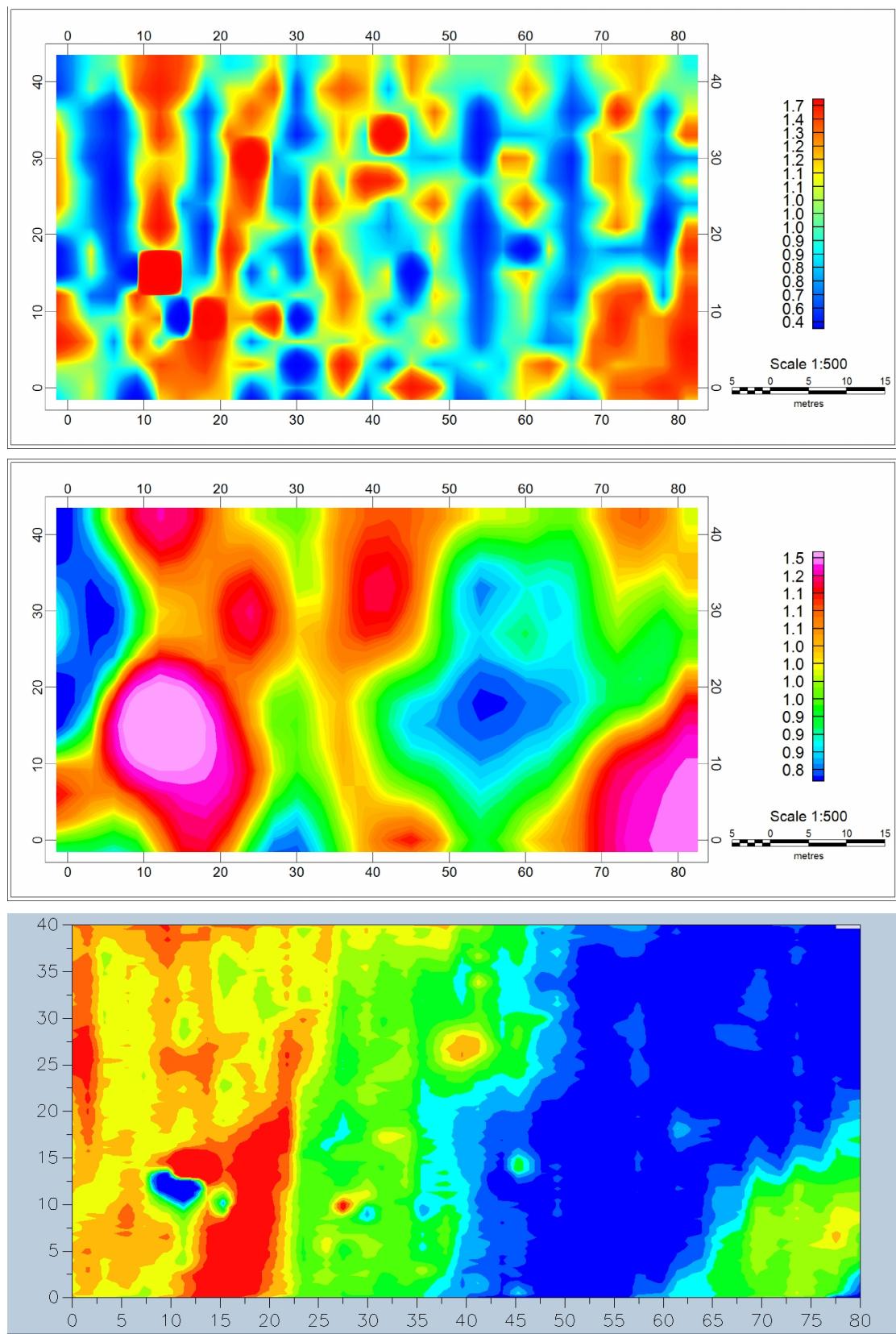
Slika 9. Novigrad Podravski–Milakov Berek. Područje 2. (slike 7 i 10). Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) nakon primjene gaussovog filtera glađenja. Jasno se prepoznaju magnetske anomalije viših gradijenta po većem dijelu istražene površine. Prepostavljamo, da su jače magnetske anomalije na mjestima većih koncentracija minerala željeza u tlu (*Bog iron ore?*).



Slika 10. Novigrad Podravski – Milakov Berek. Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) nakon primjene gaussovog filtera glađenja. Narančasta i crvena polja predstavljaju relativno jače magnetske anomalije ($-2/+2\text{nT}$) na područjima s većim nakupinama magnetnijih oblika minerala željeza pa pretpostavljamo da se radi o slojevima s rudom tipa *Bog iron ore*, odnosno samo relativno većim koncentracijama željeza u istom sloju na intervalu dubine približno $0,5\text{--}1,5\text{ m}$ gdje se po rezultatima 2D geoelektrične tomografije nalazi sloj veće vlažnosti odnosno nižeg otpora a na rezultatima analiza jezgra bušotine sitnozrnati sloj (silt) s koncentracijama minerala željeza.



Slika 11. Hlebine-Dedanovice. Površine istražene magnetskom metodom i profili za 2D geoelektričnu tomografiju.



Slika 12. Hlebine - Dedanovice (slike 11 i 13). Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) (gore) i nakon primjene gaussovog filtera glađenja (sredina). Na analizi mjerena gradijenta i samo gornjeg senzora (dolje) s najjače anomalije na zapadnom dijelu istražene površine. Pretpostavljamo, da su jače magnetske anomalije na mjestima većih koncentracija minerala željeza u tlu (*Bog iron ore?*).



Slika 13. Hlebine-Dedanovice. Rezultati magnetometrije na gradientan način (Geometrics G-858) nakon primjene gaussovog filtera glađenja. Narančasta i crvena polja predstavljaju relativno jače magnetske anomalije ($-2/+2\text{nT}$) na područjima s većim nakupinama magnetnijih oblika minerala željeza pa pretpostavljamo, da se radi o slojevima s rudom tipa *Bog iron ore*, odnosno samo relativno većim koncentracijama željeza u istom sloju na intervalu dubine približno 0,5– 1,5 m gdje se po rezultatima 2D geoelektrične tomografije nalazi sloj veće vlažnosti odnosno nižeg otpora a na rezultatima analiza jezgra bušotine sitnozrnati sloj (silt) s koncentracijama minerala željeza.



Slika 14. Hlebine-Dedanovice. Rezultati magnetometrije na donjem senzoru (Geometrics G-858). Crvena polja predstavljaju relativno jače magnetske anomalije (-2/+2nT) na područjima s većim nakupinama magnetnijih oblika minerala željeza pa pretpostavljamo da se radi o slojevima s rudom tipa *Bog iron ore*, odnosno samo relativno većim koncentracijama željeza u istom sloju na intervalu dubine približno 0,5–1,5 m gdje se po rezultatima 2D geoelektrične tomografije nalazi sloj veće vlažnosti odnosno nižeg otpora a na rezultatima analiza jezgra bušotine sitnozrnati sloj (silt) s koncentracijama minerala željeza.



Slika 15. Hlebine-Dedanovice. Rezultati magnetometrije na gornjem senzoru (Geometrics G-858). Crvena polja predstavljaju relativno jače magnetske anomalije (-2/+2nT) na područjima s većim nakupinama magnetnijih oblika minerala željeza pa pretpostavljamo, da se radi o slojevima s rudom tipa *Bog iron ore*, odnosno samo relativno većim koncentracijama željeza u istom sloju na intervalu dubine približno 0,5–1,5 m gdje se po rezultatima 2D geoelektrične tomografije nalazi sloj veće vlažnosti odnosno nižeg otpora a na rezultatima analiza jezgra bušotine sitnozrnati sloj (silt) s koncentracijama minerala željeza.

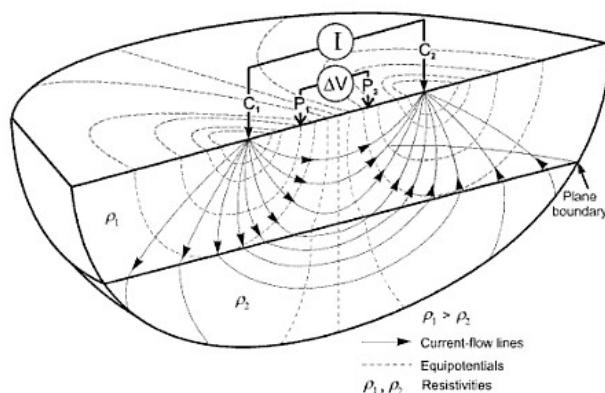
2. Primjena metode 2D geoelektrične tomografije i rezultati

Teorija

Metoda tomografije električnog otpora (eng. ERT – electrical resistivity tomography) djeluje na principu induciranih, umjetnih izvora električne struje koja se uvodi u tlo kroz dvije strujne electrode (**slika 16**). Električna struja, koja prolazi kroz neki volumen zemljišta, uzrokuje razliku potencijala uslijed razlike u otpornosti određenog volumena tla između dvije strujne i dvije potencijalne elektrode gdje sa dvije potencijalne elektrode izmjerimo razlike u potencijalima.

Mjerenje specifičnog otpora temelji se na činjenici, da se električna provodljivost odnosno specifični otpor arheoloških objekata razlikuje od medija u kojem se nalaze. To je u glavnom zbog utjecaja faktora koji nadziru distribuciju vode s elektrolitima i ionskim otopinama u tlu, što zavisi o količini kiše, kao i sposobnošću određene sredine ili podzemne strukture za adsorpciju i zadržavanje vode (porozitet, tekstura, struktura, konsistencija...).

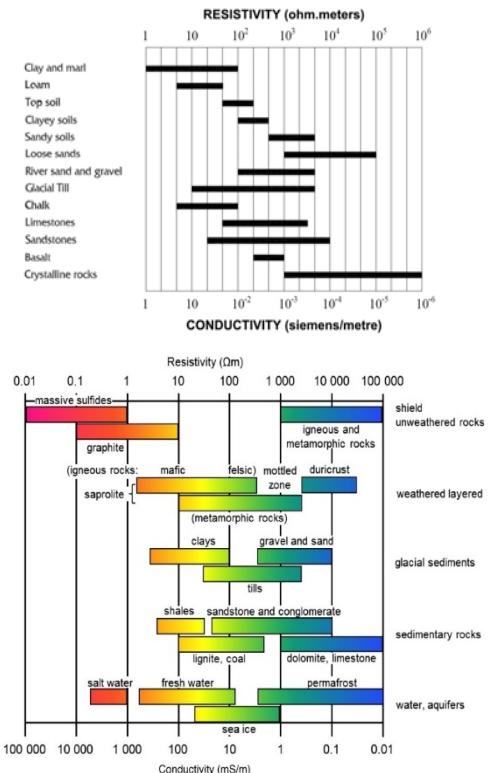
Na osnovu geometrije elektrodne konfiguracije, intenziteta izravne struje inducirane u tlo i izmjerenoj pada napona na nekoj udaljenosti možemo izračunati otpor(nost) određenog volumena tla. Za mjerenja potencijala mogu se koristiti različite konfiguracije elektroda. Izbor najprikladnije ovisi o vrsti podzemnih objekata koje istražujemo, osjetljivosti instrumenta i različitim šumova okoliša. U praksi najčešće se koriste elektrodne konfiguracije Wenner, dipol-dipol (dvojni dipol), Wenner-Schlumberger, pol-pol i pol-dipol, koje imaju različita svojstva u smislu dubinskog zahvata, osjetljivost horizontalnih i vertikalnih promjena otpora u tlu, horizontalnog prikupljanja podataka i jačine signala.



Slika 16. 3D prikaz strujnica induciranih električnog polja i ekvipotencialnih slojeva. C1 in C2 – strujne elektrode, P1 in P2 – potencijalne elektrode, ρ_1 – specifični otpor prvog sloja, ρ_2 – specifični otpor drugog sloja.

Rezultate ERT mjerenja pretstavljaju 2-D (ili 3-D) pseudosekcije prividnog otpora. Pravi otpor se dobiva s kvantitativnom interpretacijom izmjerenih pseudosekcija prividnog otpora pomoću složenih algoritama inverzije gdje pomoću iterativnog postupka približavamo izračunati model s izmjerenim vrijednostima prividnog otpora. Rezultati inverzije također predstavljaju konačni 2-D (ili 3-D) model različitih

objekata raličitih otpora ispod površine. Tako možemo na osnovu toga doći do nekih zaključaka o materijalima i arheološkim strukturama u tlu (**slika 17**). To mogu biti određene vrste objekata, arheoloških kulturnih slojeva i njihova dimenzija međutim, ERT pridonosi i razumijevanju geoloških i geoarheoloških karakteristika arheoloških lokaliteta.



Slika 17. Rasponi vrijednosti specifičnog otpora za neke od sedimenata i stjena.

Za 2D geoelektričnu tomografiju smo koristili sistem ARES (**slika 18**).



Slika 18. Mjerenje profila za 2D geoelektričnu tomografiju.

Elektrodna konfiguracija dipol-dipol (dd) neosjetljiva je za određivanje vertikalnih struktura, a time i najpovoljnija za određivanje arheoloških struktura kao što su ostaci kamenih zidova, isto konfiguracija Wenner beta (wb) koja je nešto kraća različica dipol-dipola. Konfiguracija Wenner alfa (w) predstavlja povoljno rješenje za određivanje horizontalnih struktura odnosno slojeva, a Wenner-Schlumberger (ws)

predstavlja određeni kompromis između dipol-dipol i Wenner-Alfu, te je relativno osjetljiva za vertikalne i horizontalne strukture.

Survey design

Lokacije ERT profila su bile odabrane na osnovu rezultata magnetske metode na način, da smo za usporedbu rezultata ERT metode s rezultatima magnetske metode s ERT profilima obuhvatili područja relativno jačih magnetskih anomalija kao i područja slabijih anomalija odnosno područja gdje magnetskih anomalija nije bilo. Samo se na taj način mogu sa sigurnošću vezati određene anomalije u otporu na pozitivne magnetske anomalije od naslaga minerala željeza.

Ert profili NP-MB_1, NP-MB_2 in DED-3 su bili locirani na mjestima bušotina na način, da se položaj bušotine nalazi točno na polovini ERT profila.

Na lokaciji **Novigrad Podravski - Milakov Berek** je bilo izmjereno 6 ERT profila (**tabela 1**).

Novigrad Podravski - Milekov Berek			
ERT profil	Elektrodna konfiguracija	Dužina profila (m)	Razdalja između elektroda (m)
NP-MB_1	dd	14,1	0,3
	ws	14,1	0,3
	w	14,1	0,3
NP-MB_2	dd	23,5	0,5
	ws	23,5	0,5
	w	23,5	0,5
NP-MB_3	w	23,5	0,5
NP-MB_4	w	23,5	0,5
NP-MB_5	w	23,5	0,5
NP-MB_6	w	23,5	0,5

Tabela 1: ERT profili izmejereni na lokalitetu Milakov Berek; dd – dipol-dipol, ws – Wenner-Schlumberger, w – Wenner alfa, wb – Wenner beta.

Na lokaciji **Dedanovice** su bila izmjerena 3 ERT profila (**tabela 2**).

Dedanovice			
ERT profil	Elektrodna konfiguracija	Dužina profila (m)	Razdalja između elektroda (m)
DED1	wb	23,5	0,5
DED2	wb	23,5	0,5
DED3	wb	23,5	0,5

Tabela 2: ERT profili izmejereni na lokalitetu Dedanovice; dd – dipol-dipol, ws – Wenner-Schlumberger, w – Wenner alfa, wb – Wenner beta.

Na lokaciji **Sušine** su bila izmerjena 4 ERT profila (**tabela 3**).

Sušine			
ERT profil	Elektrodna konfiguracija	Dužina profila (m)	Razdalja između elektroda (m)
SUS1a	wb	23,5	0,5
SUS1b	wb	23,5	0,5
SUS2a	wb	23,5	0,5
SUS2b	wb	23,5	0,5

Tabela 3: ERT profili izmjereni na lokalitetu Sušine; dd – dipol-dipol, ws – Wenner-Schlumberger, w – Wenner alfa, wb – Wenner beta.

Novigrad Podravski – Milakov Berek

ERT profili NP-MB_1 i NP-MB_2 su bili izmerjeni s tri elektrodne konfiguracije. Zbog toga su rezultati za svaku konfiguraciju analizirani i interpretirani posebno (**slike 19 i 20**). ERT profil NP-MB_1 je bio izmjerjen s međuelektrodnom razdaljinom 0,3 m (dužina profila je 14,1 m), a ERT profil NP-MB_2 s međuelektrodnom razdaljinom 0,5 m (dužina profila je 23,5 m). Kod mjerena ostalih ERT profila (NP-MB_3 - NP-BM_6) smo koristili međuelektrodnu razdaljinu 0,5 m što doprinosi veću horizontalnu pokrivenost s većom dubinom zahvata. Koristili smo elektrodnu konfiguraciju Wenner alfa.

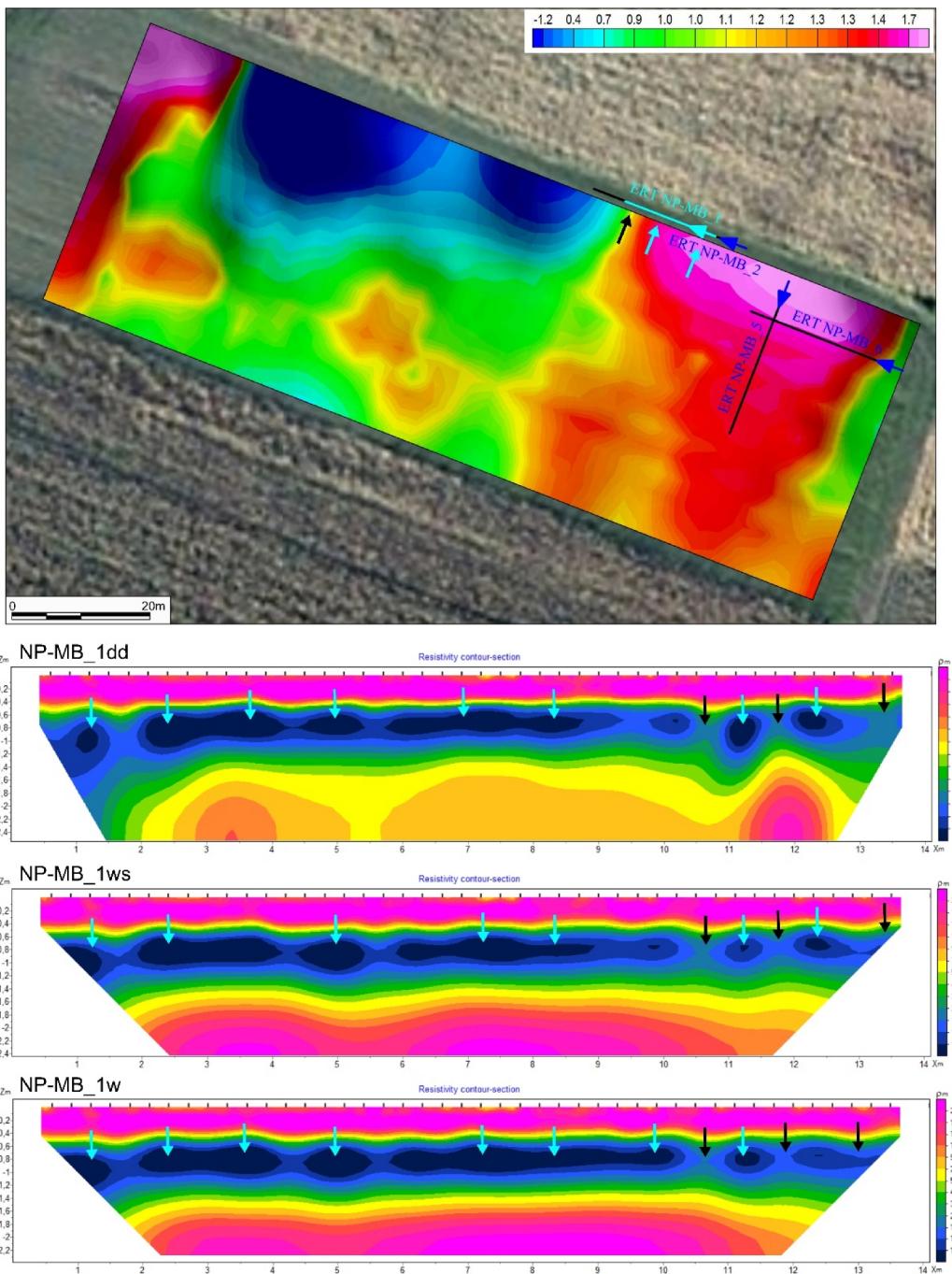
ERT profili NP-MB_1 i NP-MB_2

Ovi se profili djelomično preklapaju pa opis dolje važi za oba profila.

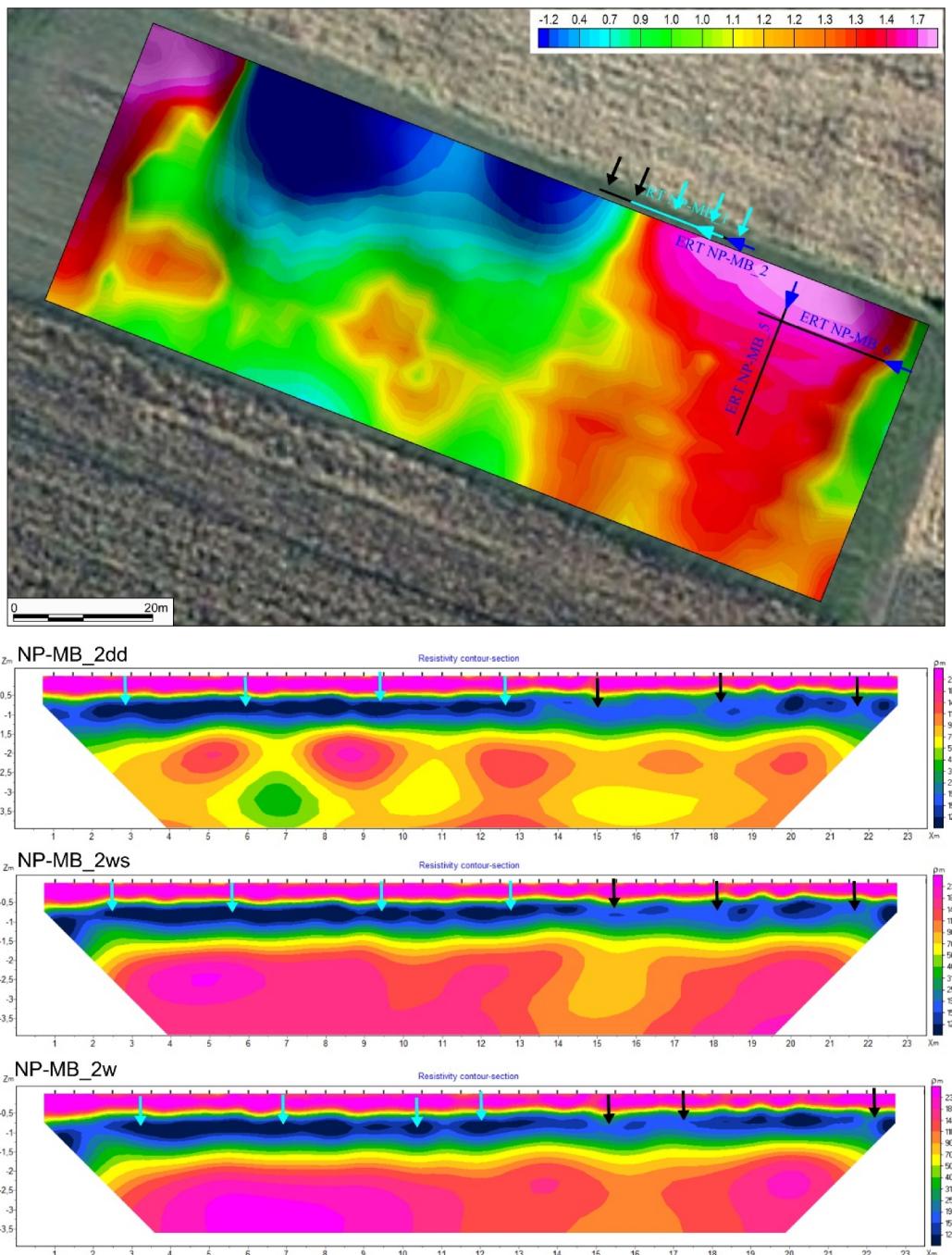
U gornjem dijelu ERT profila **NP-MB_1** do dubine ~0,5 m se nalazi suhi, pješčani sloj sa specifičnim otporom $> 200 \Omega\text{m}$. Ispod tog sloja se nalazi sloj od prahovite gline do dubine ~1,5 m sa specifičnim otporom $< 40 \Omega\text{m}$. Ovaj sloj niže postepeno prelazi u prahovito pješčani sloj na intervalu dubine 1,5–1,8 m s vrijednostima specifičnog otpora 40–70 Ωm . Na većoj dubini prelazi u pijesak s višim vrijednostima specifičnog otpora (do $250 > 70 \Omega\text{m}$).

Na ERT profilu **NP-MB_2** vidimo, da se pješčani sloj nastavlja do dubine 4 m što je i maksimalan dubinski zahvat u ovom ERT profilu.

ERT profili mjereni s elektrodnom konfiguracijom Wenner-Schlumberger (ws) i Wenner alfa (w) su međusobno jako slični, profili izmjerjeni s konfiguracijom dvojni-dipol (dd) su nešto drukčiji. Naime, u pješčanom sloju (dubina $> 1,5$) su lateralne promjene vrijednosti otpora puno bolje vidljive nego kod elektrodnih konfiguracija ws in w. Tu se najvjerojatnije radi o lateralnim prelazima pješčanih slojeva sa šljunkom u pješčane slojeve i prahovito pješčane slojeve.



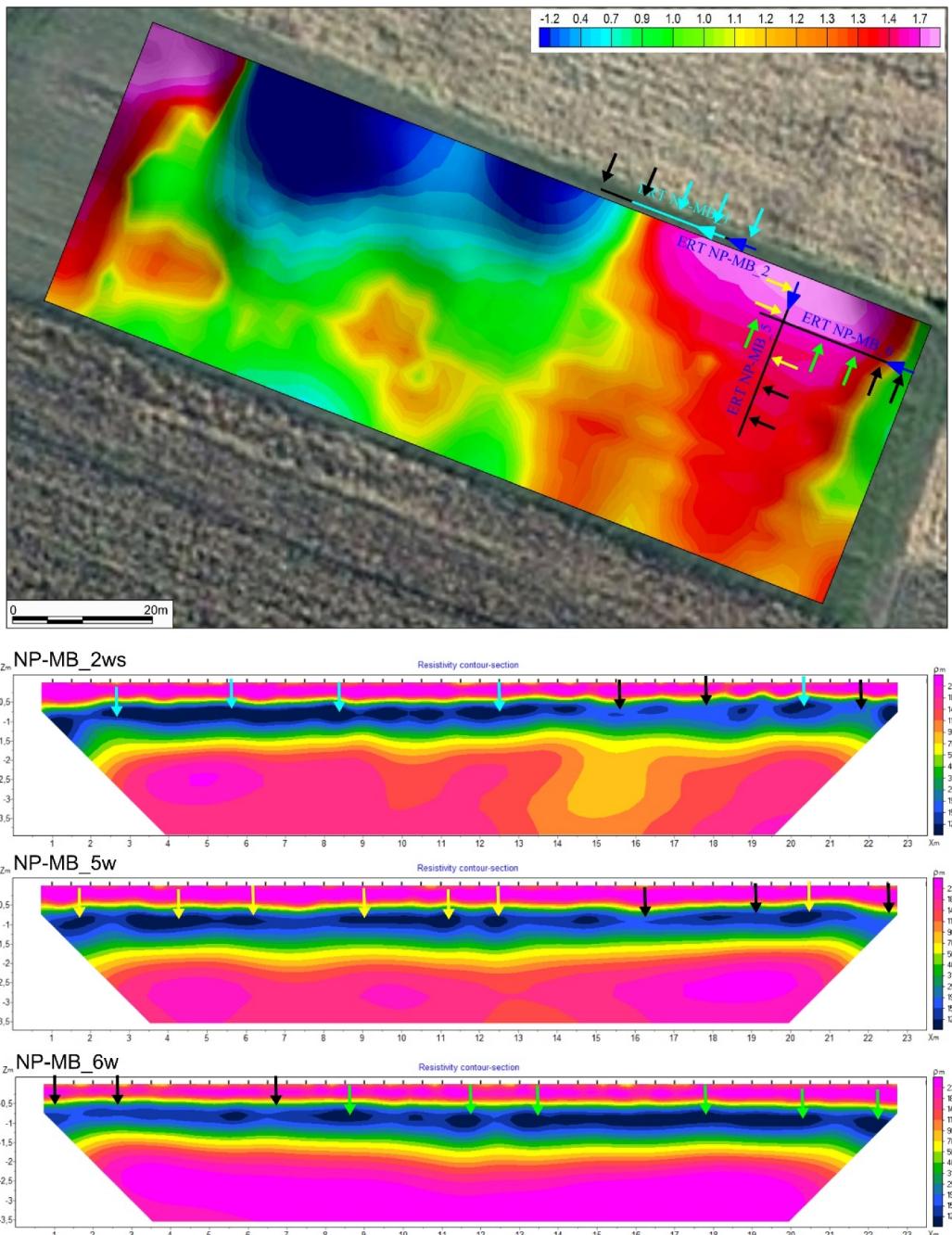
Slika 19. Prikaz gradijenta magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profil **NP-MB_1** (dolje) izmjerен s elektrodnim konfiguracijama dipol-dipol, Wenner-Schlumberger i Wenner alfa. Tirkizne strelice predstavljaju jače magnetske anomalije ($\geq 1,4$ nT/m) i niske vrijednosti otpora ($\leq 12 \Omega\text{m}$) u glinovitom sloju. Crne strelice—slabije magnetske anomalije ($\leq 1,0$ nT/m) i malo više vrijednosti otpora u sloju prahovite gline ($15\text{--}25 \Omega\text{m}$).



Slika 20. Prikaz gradijenta magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profil **NP-MB_2** (dolje) izmjerен s elektrodnim konfiguracijama dipol-dipol, Wenner-Schlumberger i Wenner alfa. Tirkizne strelice predstavljaju jače magnetske anomalije ($\geq 1,4$ nT/m) i niske vrijednosti otpora ($\leq 12 \Omega\text{m}$) u glinovitom sloju. Crne strelice—slabije magnetske anomalije ($\leq 1,0$ nT/m) i malo više vrijednosti otpora u sloju prahovite gline ($15\text{--}25 \Omega\text{m}$).

ERT profili NP-MB_2, NP-MB_5 i NP-MB_6

Na ovim je ERT profilima jasno vidljivo, da se sloj prahovite gline na ovom području nalazi na dubini $\sim 0,5 - 1,5$ m. Dublje, do 2 m postepeno prelazi u sloj pijeska (**slika 21**).

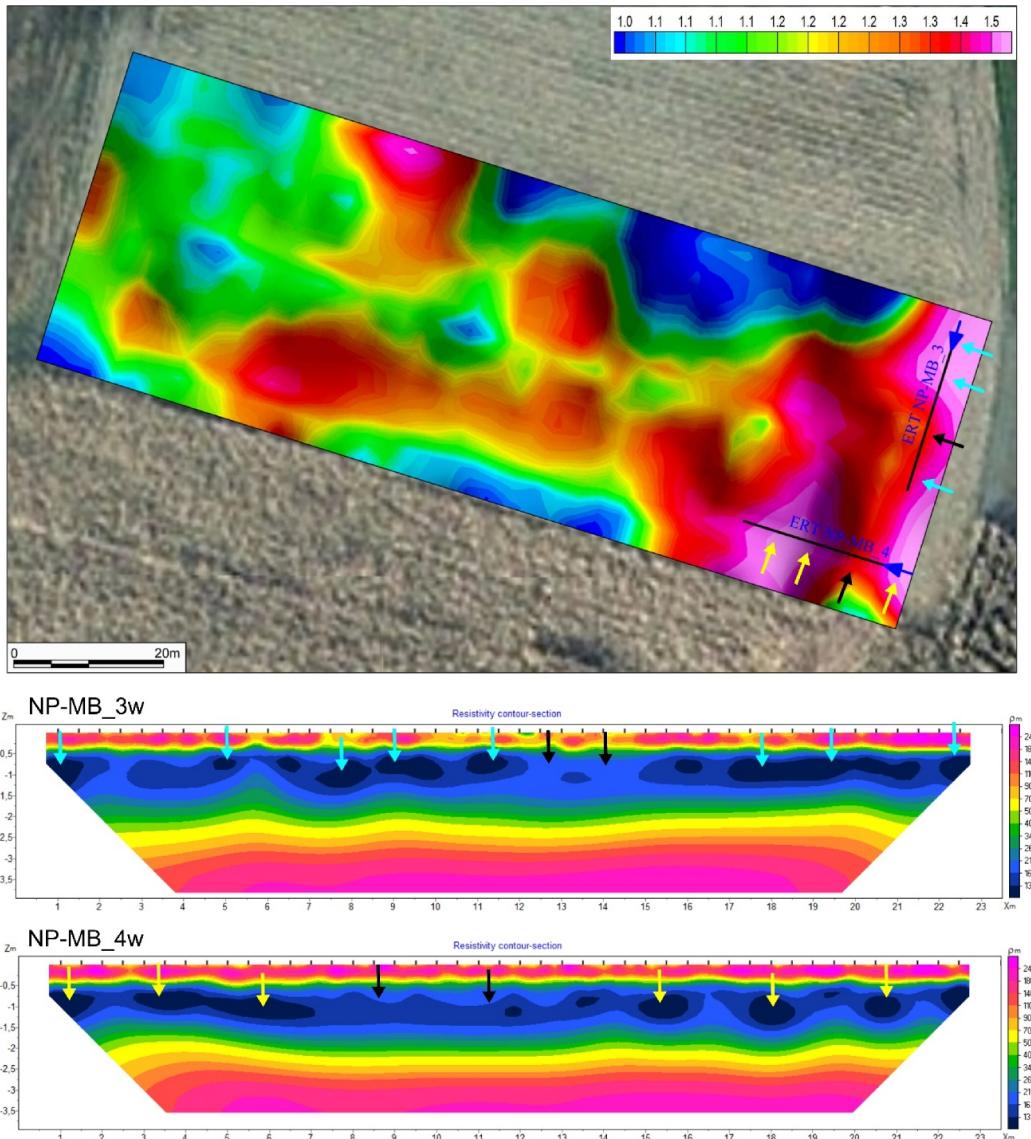


Slika 21. Prikaz gradijenta magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profili NP-MB_2, NP-MB_5 in NP-MB_6 izmjereni s elektrodnim konfiguracijom Wenner alfa. Svjetlije strelice (tirkizna - NP-MB_2; žuta - NP-MB_5 i zelena - NP-MB_6) predstavljaju jače magnetske anomalije ($\geq 1,4$ nT/m) i niske vrijednosti otpora ($\leq 12 \Omega\text{m}$) u glinovitom sloju. Crne strelice – slabije magnetske anomalije ($\leq 1,0$ nT/m) na profilu NP-MB_5 (do 1,3 nT/m) i malo više vrijednosti otpora u sloju gline ($13-19 \Omega\text{m}$).

Pozitivna korelacija između jačih magnetskih anomalija i niskih vrijednosti specifičnog otpora u sloju gline je jako dobra iako su razlike u magnetskom susceptibilitetu i specifičnom otporu minimalne.

Područje s ERT profiloma NP-MB_3 in NP-MB_4

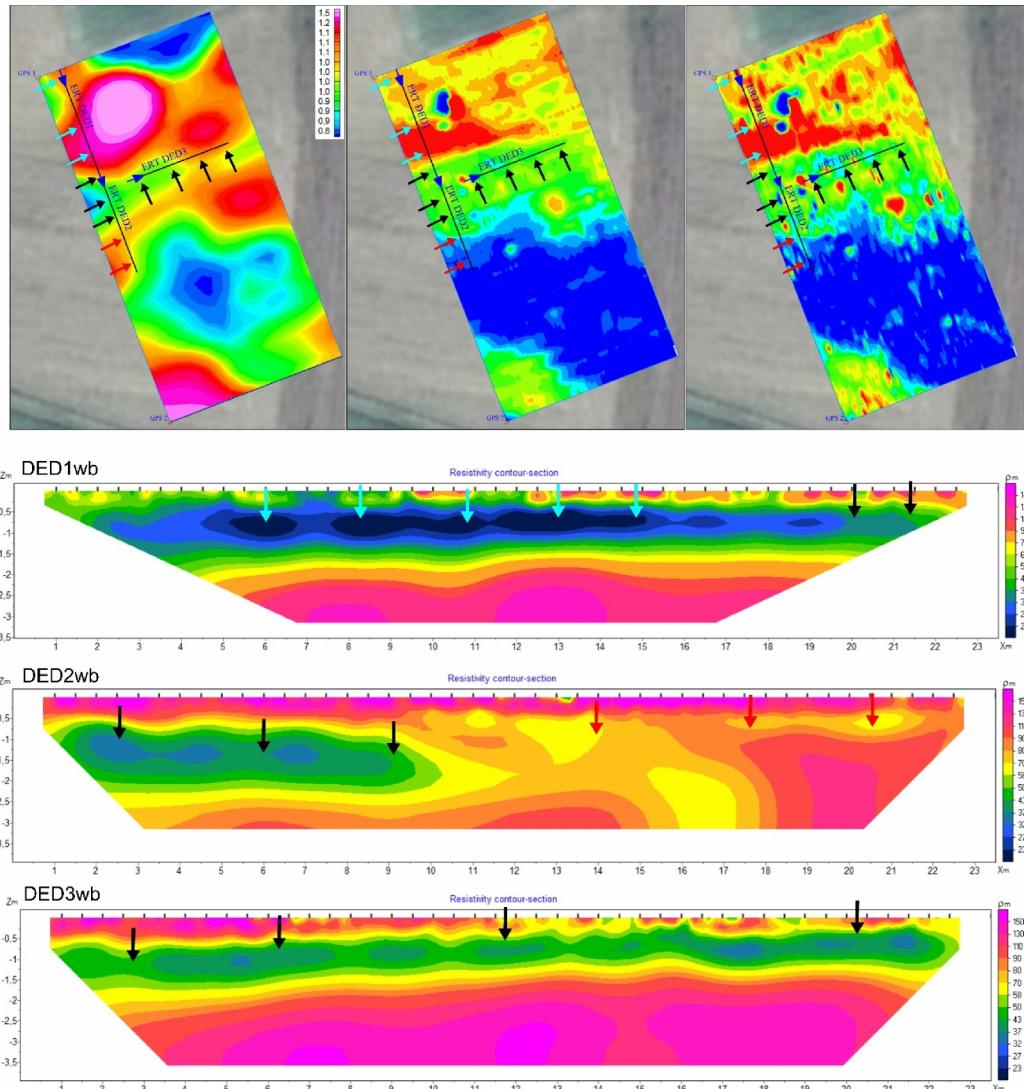
Na ovom području je sloj prahovite gline nešto deblji i na manjoj dubini (0,3 – 2 m) s vrijednostima specifičnog otpora $\leq 34 \Omega\text{m}$. Dublje postepeno prelazi u sloj pijeska ($> 100 \Omega\text{m}$) (slika 22).



Slika 22. Prikaz gradijenta magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profili **NP-MB_3** i **NP-MB_4** izmjereni s elektrodnim konfiguracijom Wenner alfa. Svjetlijе strelice (tirkizna - NP-MB_3; žuta - NP-MB_4) predstavljaju jače magnetske anomalije ($\geq 1,45 \text{ nT/m}$) i niske vrijednosti otpora ($\leq 13 \Omega\text{m}$) u glinovitom sloju. Crne strelice – slabije magnetske anomalije ($\leq 1,3 \text{ nT/m}$) i malo više vrijednosti otpora u sloju gline ($15\text{--}21 \Omega\text{m}$).

Dedanovice

Na ovom se području nalazi sloj prahovite gline na ERT profile DED1 na nešto manjoj dubini (0,25 m), na ERT profilima DED2 i DED3 pojavljuju se na dubini \sim 0,5 m, dok se na ERT profilu DED2 izklinja. Na ERT profilu DED3 je ovaj sloj nagnut, odnosno postepeno se približava površini (od 0,5 m na JZ do 0,2 m na SI). Debljina sloja je tako promjenljiva od 0 (DED2) do \sim 2 m (DED2) a vrijednosti otpora su u rasponu 20 – 60 Ωm (**slika 23**)



Slika 23. Prikaz gradijenta magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profili **DED1**, **DED2** i **DED3** izmjereni s elektrodnim konfiguracijom Wenner beta. Svjetlige strelice (tirkizna – DED1) predstavljaju jače magnetske anomalije ($\geq 1,15 \text{ nT/m}$) i niske vrijednosti otpora ($\leq 20 \Omega\text{m}$) u glinovitom sloju. Crne strelice – slabije magnetske anomalije (0,9-1,0 nT/m) i malo više vrijednosti otpora u sloju prahovite gline (32–60 Ωm). Na ERT rofilu DED2 se sloj prahovite gline izklinjava (prema JI) i lateralno prelazi u prahoviti pjesak /crvene strelice) s vrijednostima otpora 58-90 Ωm i magnetskim gradientima $\sim 1 \text{ nT/m}$.

Najbolja se korelacija magnetskih anomalija s ERT profilima na području pokazala za rezultate mjeranja magnetskog polja na pojedinačnim senzorima. Jake se magnetske anomalije jako dobro preklapaju s nižim vrijednostima otpora u sloju prahovite gline i obrnuto slabije se magnetske anomalije jako dobro koreliraju s višom otpornošću.

U odnosu na nešto više vrijednosti otpora u istraživanom/karakterističnom sloju (20-60 Ωm) na ovom području u odnosu na lokaciju Milakov Berek se može pretpostaviti, da je ovdje prisutan viši udio prahovite komponente na račun gline.

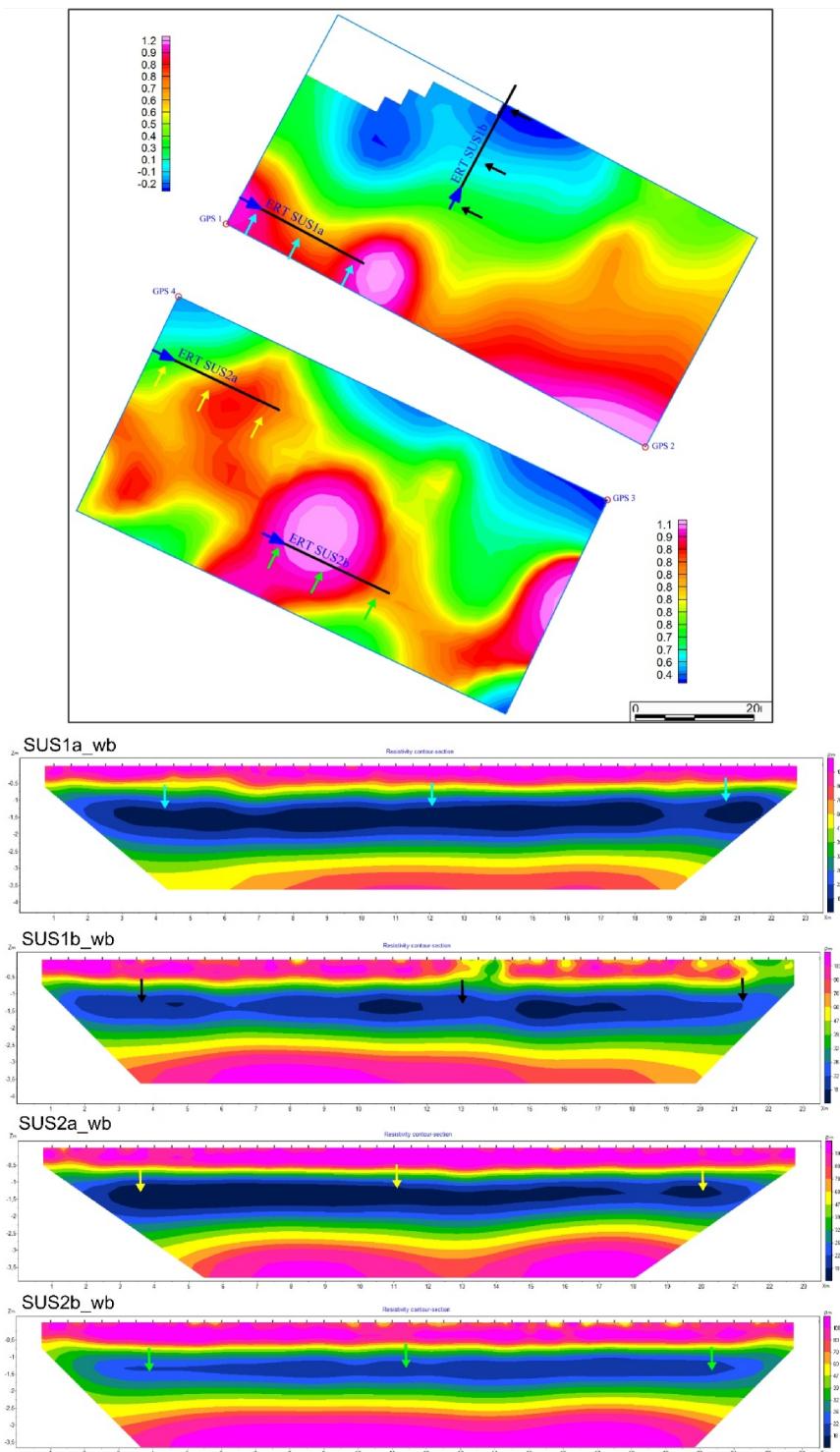
Sušine

Sloj prahovite gline koji se nalazi na intervalu dubine 0,5 m – 2,5 m (moguće i do 3 m) je ovdje nešto deblji. Srednje su vrijednosti otpora u usporedbi s lokacijama Milakov Berek (niže) i Dedanovice (više) nešto drukčije. Specifični otpor sloja pjeska je tu nešto niži ($\sim 100 \Omega\text{m}$), dok je u Milakovem Bereku i Dedanovicama viši ($> 180 \Omega\text{m}$; 100 – 180 Ωm) (**slika 24**).

Korelacija kod ERT profila SUS2a i SUS2b je u ovom smislu negativna. ERT profil SUS2a ima kod nešto nižih vrijednosti magnetskog gradijenta (0,4-0,9 nT/m) i niže vrijednosti otpora (do 18 Ωm). Kod viših magnetskih anomalija ($> 1 \text{ nT/m}$) pa su nešto više i vrijednosti otpora (18 – 26 Ωm).

Mogući su razlozi za tu negativnu korelaciju u odnosu na sve prošle situacije:

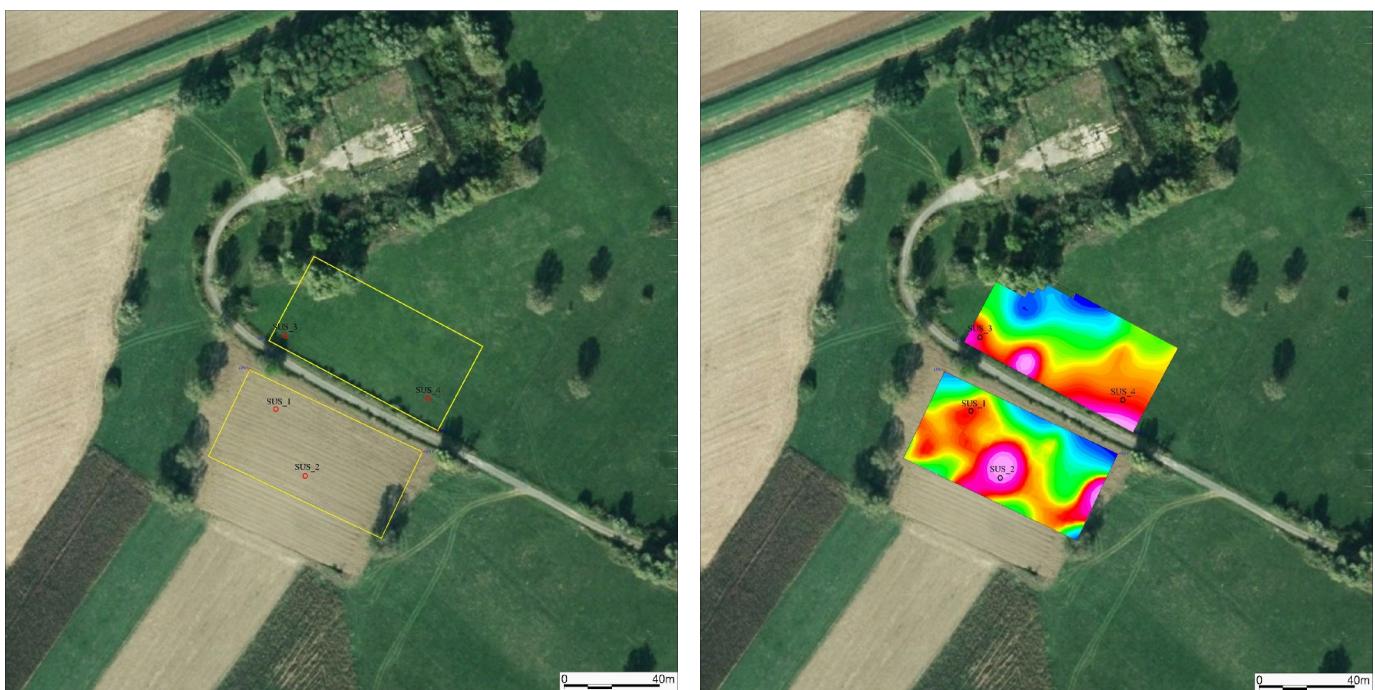
- Izvor magnetskih anomalija je nešto drugo. U blizini je plinska centrala.
- Manji udio vlage u istraživanom sloju – viši udio praha na račun glinovite frakcije te iz nekog razloga jače magnetske anomalije zbog položenja materijala višeg magnetskog susceptibiliteta u sloju prahovite gline (*Bog iron ore?*).



Slika 24. Prikaz magnetskih anomalija (gore, tamno plave strelice ukazuju na početak ERT profila) i ERT profili (**SUS1a**, **SUS1b**, **SUS2a** i **SUS2b**) izmjereni s elektrodnim konfiguracijom Wenner beta. Strelice (tirkizna – SUS1a, crna - SUS1b, žuta - SUS2a i zelena – SUS2b) predstavljaju jače magnetske anomalije i niske vrijednosti otpora u glinovitom sloju. Dobra je pozitivna korelacija između magnetskih gradijenata i prahovitom glinom na ERT profilima SUS1a (0,7-1,2 nT/m i $< 18 \Omega\text{m}$ u ovom sloju) i SUS1b (-0,2 -0,4 nT/m i $18-26 \Omega\text{m}$ u istom sloju).

Prijedlog probnih bušotina na osnovu rezultata geofizičkih istraživanja

Geofizička istraživanja na tri odabrane lokacije su dala dobre rezultat u smislu određenih anomalija koje ukazuju na moguća mjesta taloženja i nakupina minerala željeza u oboiku rude *Bog iron ore*. Izmjerene anomalije gradijenta magnetskog polja su u rasponu -2/+2 nT. To su jako slabi kontrasti ali u očekivanom rasponu. Za daljnja planiranja lokacija geofizičkih istraživanja i koordinaciju s pedološkim bušotinama u voj je fazi nužno probnim bušotinama provjeriti izvor tih magnetskih anomalija. Na svim ERT profilima je na intervalu dubine ca. 0,5 – 1,5 m lako sledljiv sloj relativno nižeg otpora. Radi se o glini i prahovitoj glini u kojoj su bili na više mjesta u jezgrama pedoloških bušotina utvrđene mineralizacije željeza. Prepostavljamo, da je to sloj u kojem su se taložili minerali željeza za rudu tipa *Bog iron ore*. To je jako značajn podatak, jer sada znamo, da se radi o kontinuiranom sloju na jako sličnom intervalu dubine koji se proteže po velikim površinama. Najvjerojatnije se radi o močvarnom sedimentu u kojem se taložilo željezo u dostačnim količinama za intenzivno željezarstvo u kasnoj antici i ranijem srednjem vijeku. Magnetske anomalije se dobro koreliraju rezultatima 2D geoelektrične tomografije (ERT) u smislu, da relativno višim vrijednostima magnetskih anomalija odgovaraju niže vrijednosti specifičnog otpora u tom sloju. To znači, da postoji dobra korelacija između magnetskog susceptibiliteta i specifičnog otpora pa je potrebno probnim bušotinama provjeriti o kakvom se materijalu radi odnosno koji je udio željeza u tom sloju na odabranim mjestima. Ovim čemo rezultatima zaključiti prvu fazu rekognosciranja za otkrivanje nalazišta rude tipa *Bog iron ore* koja se koristila za željezarstvo. Analizom uzoraka jezgra bušotina ćemo znati odnose između magnetskog susceptibiliteta/amplituda magnetskih anomalija, specifičnim otporom i udjelu minerala željeza u jezgrama bušotina na određenim dubinama. Na **slikama 25–27** su naznačena mjesta koja predlažemo za probna bušenja na osnovu rezultata geofizičkih istraživanja.



Slika 25. Virje-Sušine. Prijedlog položaja bušotina na osnovu rezultata geofizičkih istraživanja.



Slika 26. Novigrad Podravski – Milakov Berek. Prijedlog položaja bušotina na osnovu rezultata geofizičkih istraživanja.



Slika 27. Hlebine - Dedanovice. Prijedlog položaja bušotina na osnovu rezultata geofizičkih istraživanja.