

arhe,

NAROČNIK:
KOLODVOR d.o.o
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

POROČILO O GEORADARSKI RAZISKAVI NA LOKACIJI KRANJ – NEKROPOLA OB SAVI

(EŠD 5541)
(april, maj 2019)



IZDELALA:
dr. Tomaž Verbič, univ. dipl. inž. geol.
mag. Matjaž Novšak, univ. dipl. arheol.

Ljubljana, 2019

UVOD

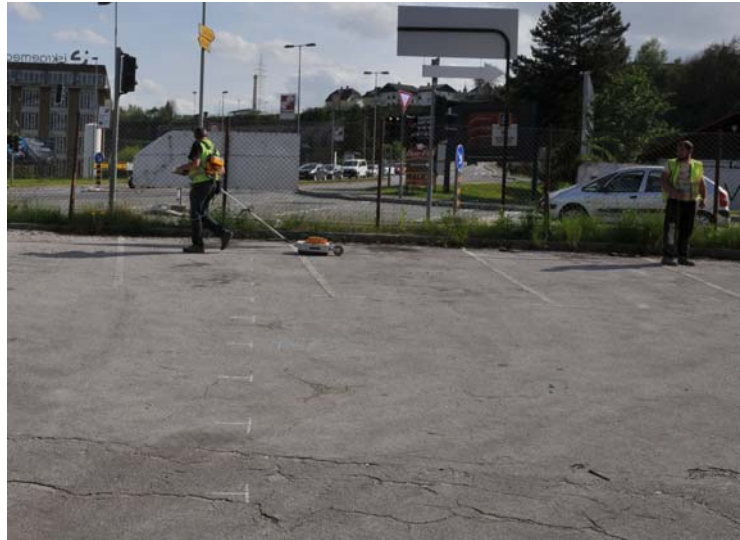
Georadarske meritve na arheološkem najdišču Kranj – Nekropola ob Savi (EŠD 5541) smo izvajali na podlagi naročila podjetja Kolodvor d.o.o., Kolodvorska cesta 4, Kranj in v skladu z dopolnilnimi smernicami za OPPN a del območja urejanja KR SA4 (Kolodvor) z dne 11.12.2018, ki jih je odredilo Ministrstvo za kulturo RS.

ZAJEM PODATKOV NA TERENU

Meritve na terenu smo izvajali dva dneva, 25. in 27. aprila 2019. Vreme v času zajema podatkov je bilo suho, dovolj toplo in ni vplivalo na kvaliteto zajema podatkov (slika 1, 2). Pri terenskih meritvah so sodelovali: Rui Rios de Macedo Pinto, Nashir Isoski, Borut Plohl, Jašar Skorupan, Matjaž Novšak in Tomaž Verbič.

Meritve smo izvajali v vzporednih profilih na medsebojni razdalji 0,5 m. Uporabili smo 500 MHz okvirjeno anteno s kompaktno vgrajeno Tx in Rx enoto, Ramac GPR kontrolno enoto in shranjevalno postajo Ramac XV11. Proizvajalec opreme je švedska firma Mala GeoScience (sedaj GuidelineGeo ABEM Mala).

Meritve smo zaradi lažjega obvladovanja zajetih podatkov izvajali v petih sektorjih (slika 3). Skupaj je bilo preiskanih nekaj več kot 4000 m² površin.



Slika 1, 2: Zajem georadarskih podatkov.

Na preiskanem terenu je večje število komunalnih vodov, predvsem v sektorjih 1, 4 in 5, podatke o njih smo prevzeli iz spletnega portala podjetja Kalipoa d.o.o.

(<https://gis.iobcina.si/gisapp/Default.aspx?a=Kranj>, slika 4). Opazili smo, da vsi komunalni in infrastrukturni vodi niso vneseni v bazo, prav tako nekatere vrisane komunalne linije odstopajo od dejanskega stanja na terenu.



Slika 3: Raziskan teren z vrisanimi sektorji na podlagi digitalnega ortofoto posnetka GURS-a. Opazen je zamik podlage (posnetka) glede na dejansko geodetsko umestitev. Geodetsko umestitev meritev je izvajal Boštjan Trobiš iz podjetja GEONEP d.o.o. Geodetsko umeščanje struktur ugotovljenih pri arheoloških izkopavanjih leta 1977 je izdelal Robert Erjavec.



Slika 4: Posnetek zaslona z aplikacije podjetja Kalipoa d.o.o. (<https://gis.iobcina.si/gisapp/Default.aspx?a=Kranj>) z vrisanimi komunalnimi vodi na preiskanem terenu.



Slika 5: Položaj evidentiranih komunalnih vodov (<https://gis.iobcina.si/gisapp/Default.aspx?a=Kranj>) glede na preiskane sektorje.

Smer snemanja profilov je bila sledeča: v sektorjih 1,2 in 4 je bila smer (azimut) 95° oziroma 275° , v sektorju 3 109° (289°) in v sektorju 177° (357°). (Meritve smo namreč izvajali v dveh nasprotnih smereh, v fazi obdelave smo jih zrcalili.)

Del sektorja 3 je tlakovan z armiranim betonom, georadarske meritve tam pravzaprav niso dale uporabnih rezultatov. Na cestišču se je radarski signal z globino zelo hitro dušil, posledica zbitega podložnega tampona. Infrastrukturni in komunalni podzemni vodi na so praktično na vseh sektorjih nekoliko omejevali razlago meritev.

OBDELAVA DIGITALNIH PODATKOV

Digitalne podatke smo obdelali s programom REFLEXW (Sandmeier Software). Uporabili smo naslednje faze obdelave:

```
file: G:\000 v delu\georadar
kranj\kranj_2019_1dan_2\PROCDATA\DAT_0048.20T
XFlipProfile / 0 / 0 / 0 / 0 / / 0 / 0 / 0 / 0
background removal / 0 / 76.9193 / -2 / 41 / / 0 / 0 / 0 / 0
subtract-DC-shift / 0 / 0 / 0 / 0 / / 0 / 0 / 1 / 1089
subtract-mean(dewow) / 2 / 0 / 0 / 0 / / 0 / 0 / 1 / 1089
```


arhe,

```
move starttime / -3.3 / 0 / 0 / 0 / / 1 / 0 / 1 / 1089
energy decay / 0.4194303 / 0 / 0 / 0 / / 1 / 0 / 1 / 1089
time cut / 53.75823 / 0 / 0 / 0 / / 1 / 0 / 1 / 1089
bandpassbutterworth / 300 / 700 / 0 / 0 / / 1 / 0 / 1 / 1089
deconvolution/shap. / 0 / 50 / 15 / 0 / / 1 / 0 / 0 / 1
Traceinterpol-3DFile / 0.03 / 43 / 0 / 0 / / 0 / 0 / 10 / 0
```

REZULATI

SPLOŠNO

Rezultati meritev so prikazani v obliki horizontalnih (globinskih rezov). Na podlagi sicer skromnega poznavanja sestave tal na mestu meritev smo kot primeren približek hitrosti EM valov pri raziskavi prevzeli oceno 0,09 m/ns. To oceno smo določili na podlagi opisov tal v sklopu arheoloških izkopavanj iz leta 1977 v neposredni bližini naših meritev. Sestava tal na tem terenu prav gotovo ni homogena, zato so možna odstopanja od dejanskih globin.

Na večini preiskanega terena je veliko kaotičnih točkovnih radarskih odbojev. Domnevamo, da s ti odboji posledica prisotnosti večjih prodnikov (večji kot približno 20 cm) v tleh. Največ oddane radarske energije se do sprejemne antene odbije na stikih dveh materialov, ki imata zelo različni dielektričnosti (relativni dielektrični permitivnosti, RDP) in se stikata na dovolj veliki površini. Taka površina je recimo stik prodnika s peščeno/meljasto/glinasto zemljino. Značilnost takih odbojev so velike amplitude.

Rezultati georadarskih meritev na cestišču so slabši. Verjetno zaradi zbitega tampona pod zgornjim ustrojem penetracija EM valov ni globoka.

20 IN 25 CM (SLIKA 6A,B,C IN 7A,B,C)

Že na tej globini se v južnem delu sektorja 2 pojavijo zvezni odboji, ki nakazujejo na homogeno tlakovanje, vendar ne gre za železno armirano površino (slika 8). Podatkov, da bi na tem mestu stala kakšna moderna stavba, nismo zasledili. Orientacija te površine in spodaj ležečih temeljev ne sledi orientaciji leta 1977 izkopanih struktur/temeljev. Vsekakor gre pri tej strukturi le za delno ohranjenost, vzhodni rob je kot kaže odstranjen, del pa sega izven merjenega območja.

30 CM (SLIKA 10A,B,C)

Na tej globini je delno še vidno višje tlakovanje, opazne so linearne linije sprememb v odzivnosti EM valov, ki verjetno nakazujejo na nekdanje objekte in ruševine.

40 CM (SLIKA 11A,B,C,D)

Strukture iz zgornjega globinskega reza se večinoma nadaljujejo navzdol, nekaj je novih linijskih odbojev. Pojavljajo se odboji za katere domnevamo, da so posledica komunalne infrastrukture, ki pa ni kartirana (slika 4, 5). Večji del površine severnega dela sektorja 1, skoraj celoten sektor 4 in del sektorja 5 so prepleteni s kartiranimi komunalnimi vodi.

50 IN 60 CM (SLIKA 12A,B,C; 13A,B,C)

Področja intenzivnih radarskih odbojev se na tej globini bolj jasno izražajo od okolice. Razlogi so v sestavi zemljine (raba tal?) delno seveda ostanki arhitekture. Jasen obris (verjetno) modernega objekta v južnem delu sektorja 2. Prvič nakazana struktura, ki ima približno enako orientacijo kot jo imajo leta 1977 izkopane strukture.

80 CM IN 100 CM (SLIKA 14A,B,C; 15A,B,C)

V severnem delu sektorja 2, na robu sektorja 1, se izpod ruševinske? plasti kaže jasna linearna struktura – verjetno zid oziroma temelj. Ima skoraj enako orientacijo kot sosednja obstoječa zgradba.

120 CM IN 140 CM (SLIKA 16A,B,C; 17A,B,C)

Nekatere strukture iz zgornjega reza se nadaljujejo tudi do te globine. V južnem delu sektorja 2 se jasneje nakazuje struktura skladna z orientacijo leta 1977 izkopanih temeljev.

160 CM IN 180 CM (SLIKA 18A,B,C; 19A,B,C)

To so globine skrajnega dosega 500 MHz antene v danih pogojih. Še vedno lahko sledimo posameznim strukturam, v južnem delu sektorja 2 je pravokotno polje z izrazitimi odboji, ki mogoče nakazuje na kletni prostor.

PRILOGA 1

Slike 6-19

PRILOGA 2

Georadarska metoda

Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

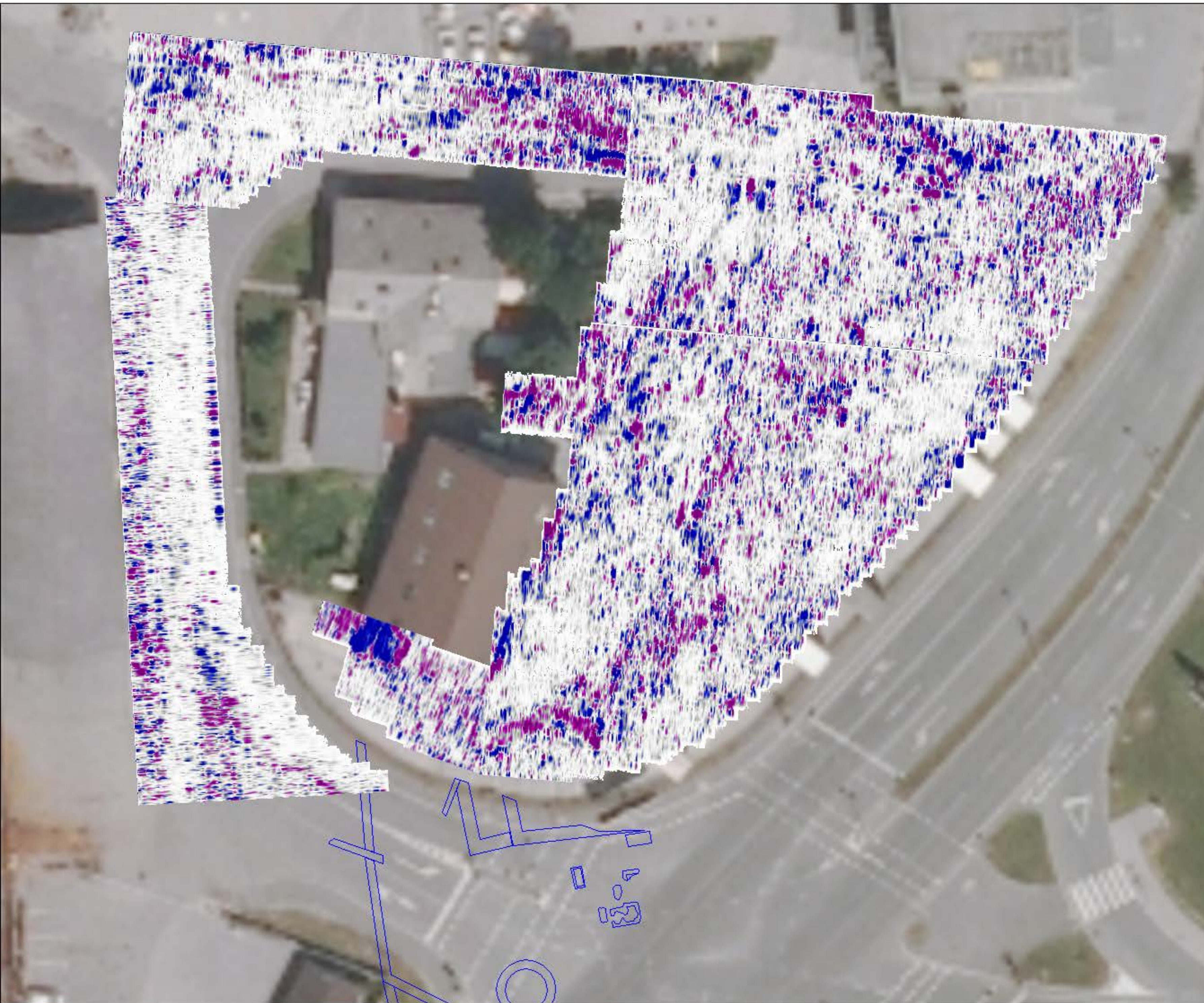
Slika 6a: horizontalni rez
na globini približno 20
cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,




Georadarska raziskava


Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

 zidovi, temelji

 infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)

 linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije

 neopredeljeni linearni
radarski odzivi

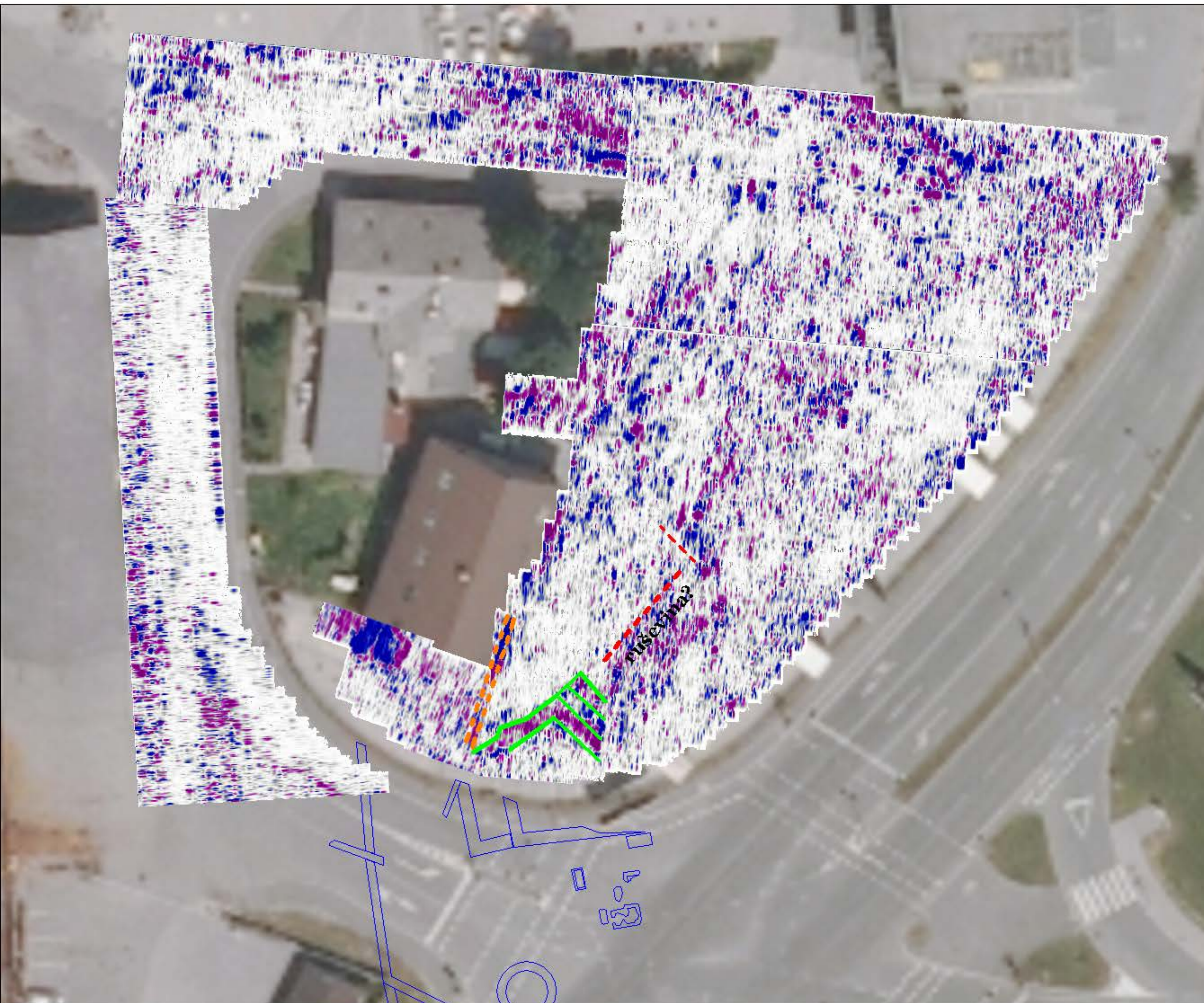
Slika 6b: horizontalni rez
na globini približno 20
cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m


maj 2019

arhe,



Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

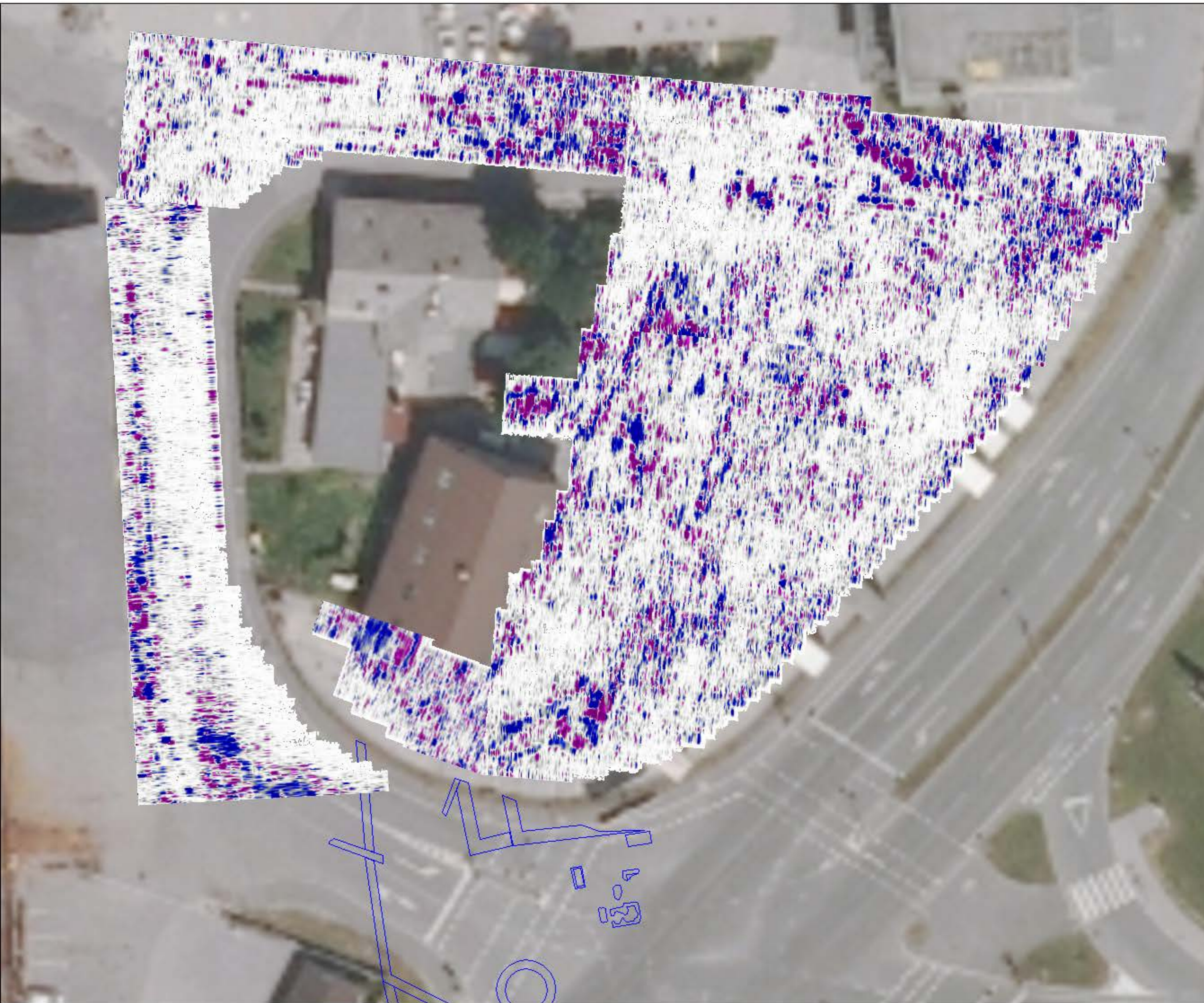
Slika 7a: horizontalni rez
na globini približno 25
cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

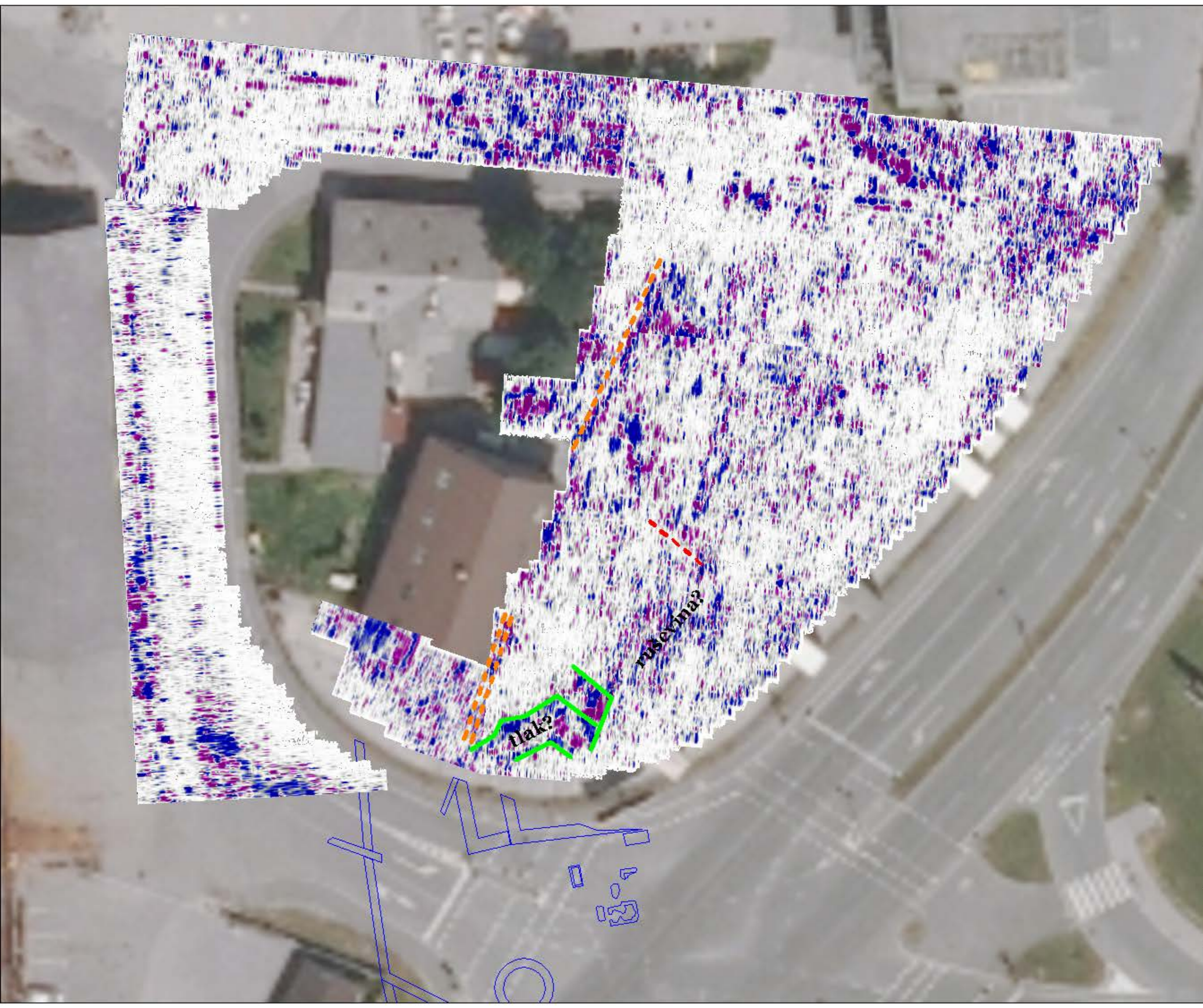
Slika 7b: horizontalni rez
na globini približno 25
cm

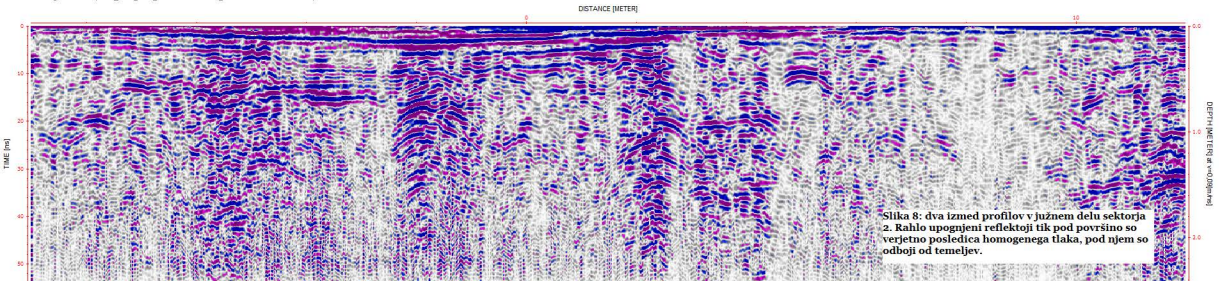
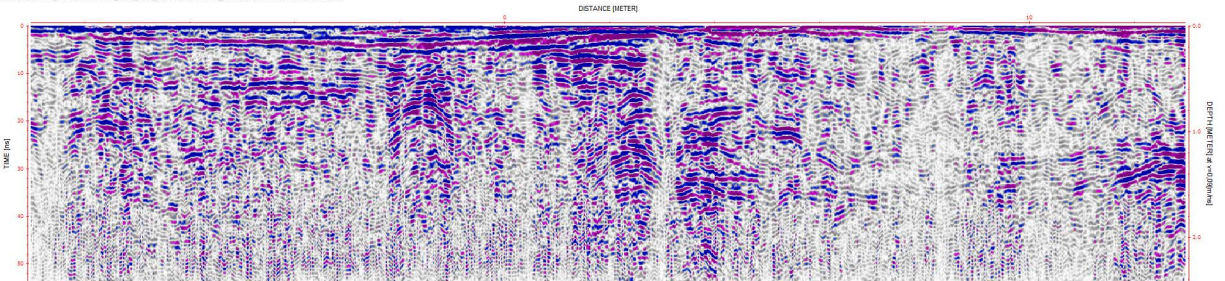
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

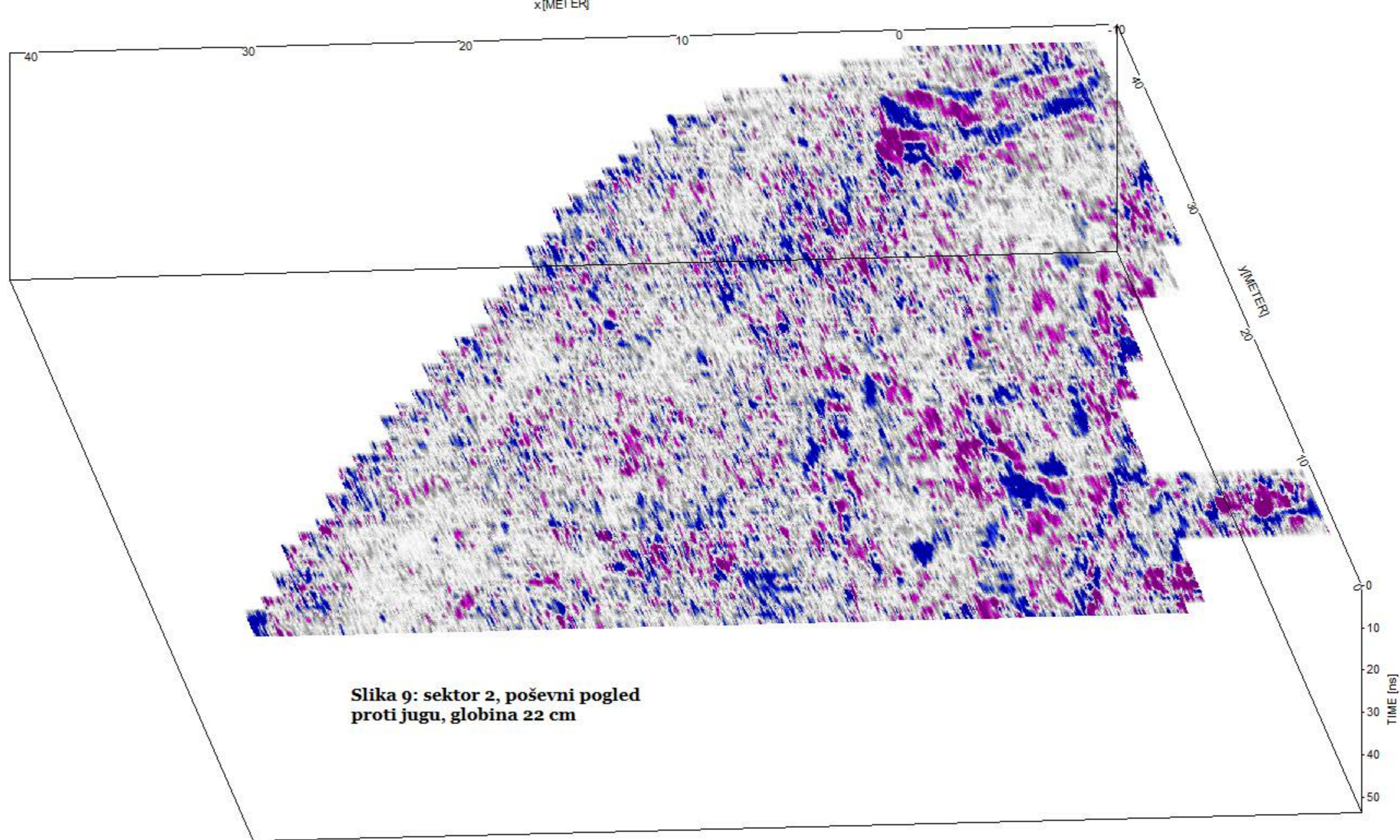
maj 2019

arhej





Slika 8: dva izmed profilov v južnem delu sektorja 2. Rahlo upognjeni reflektori tik pod površino so verjetno posledica homogenega tlaka, pod njem so odboji od temeljev.



Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

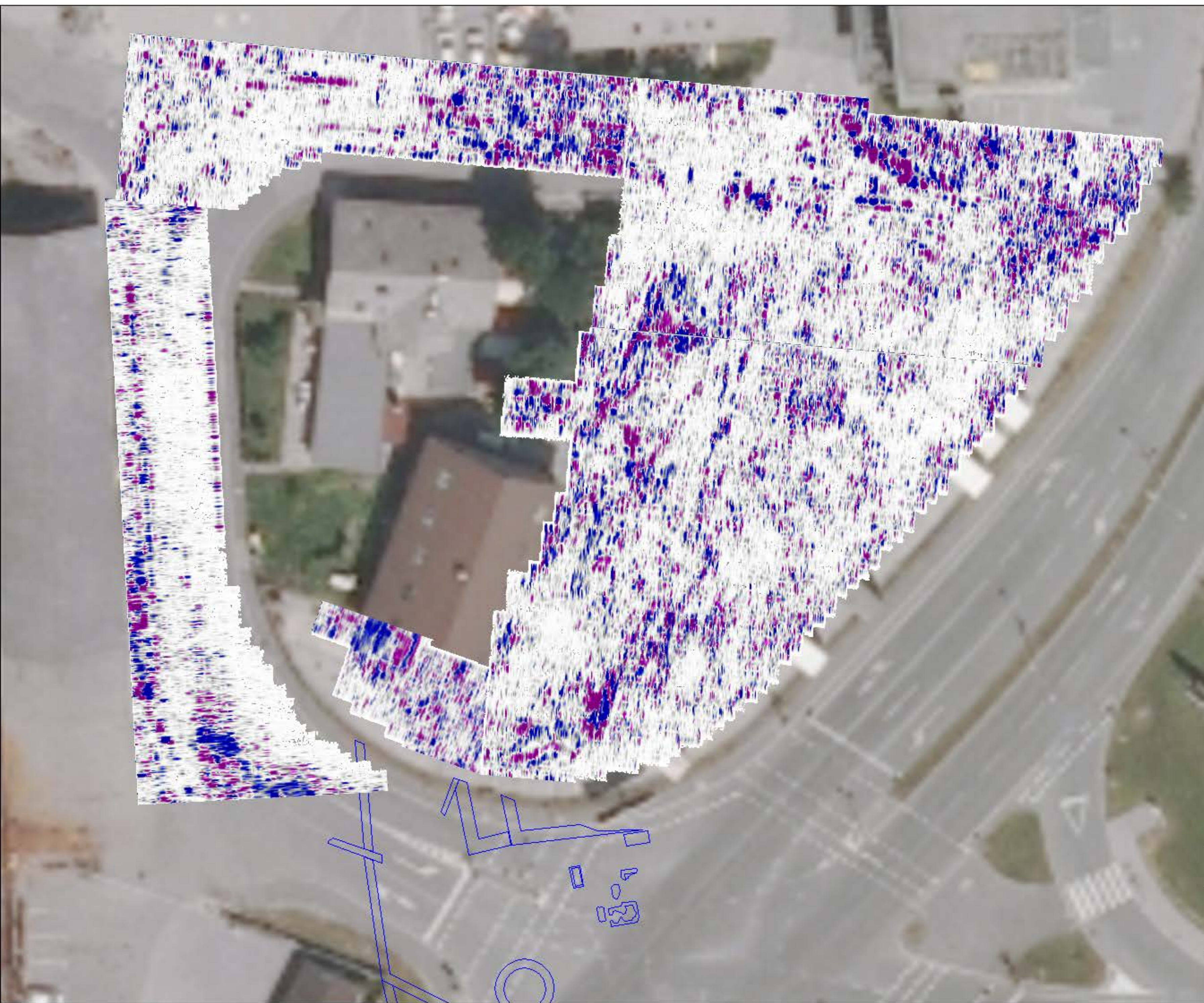
Slika 10b: horizontalni
rez na globini približno
30 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

Slika 10b: horizontalni
rez na globini približno
30 cm

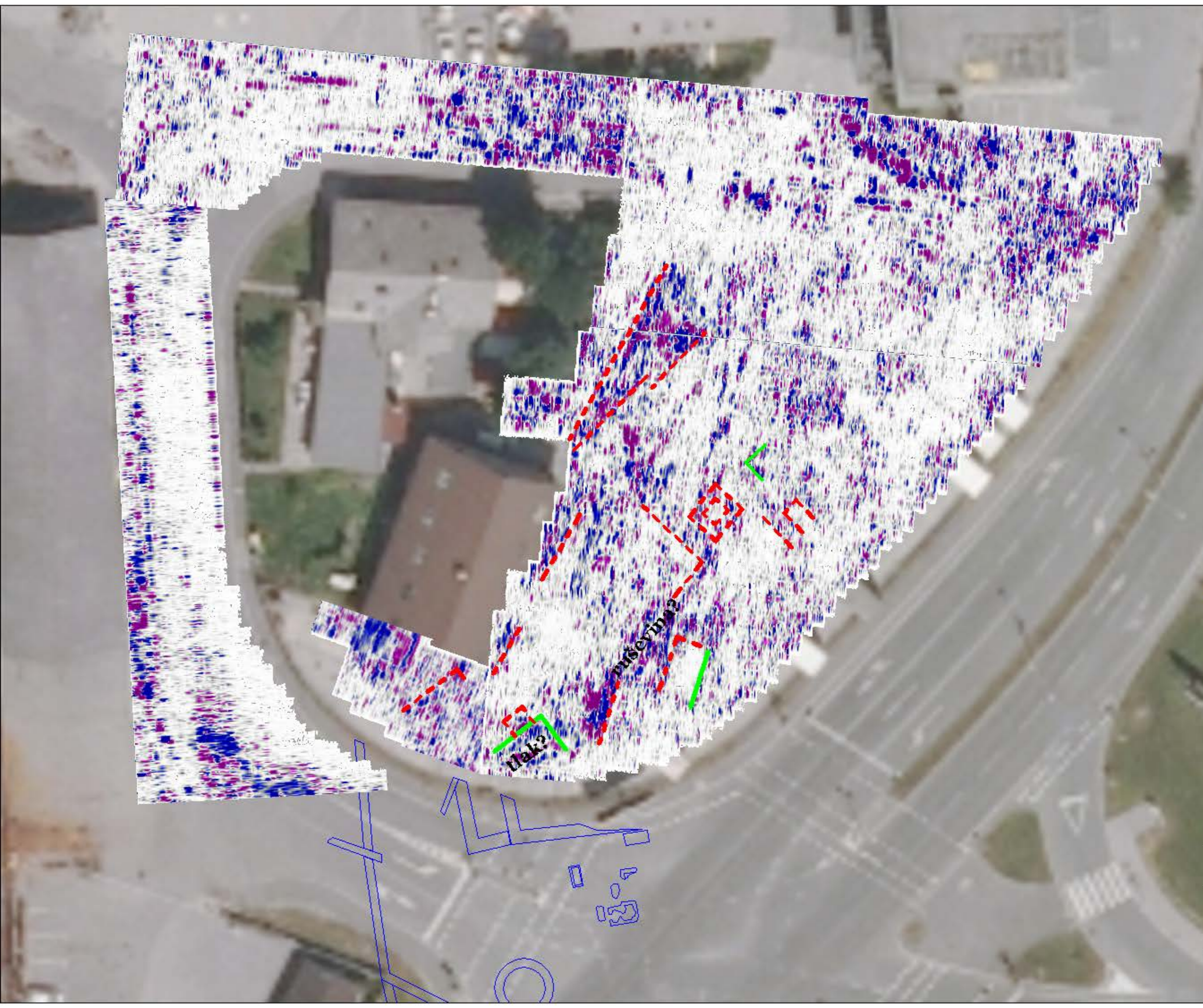
Podlaga: DOF ©GURS

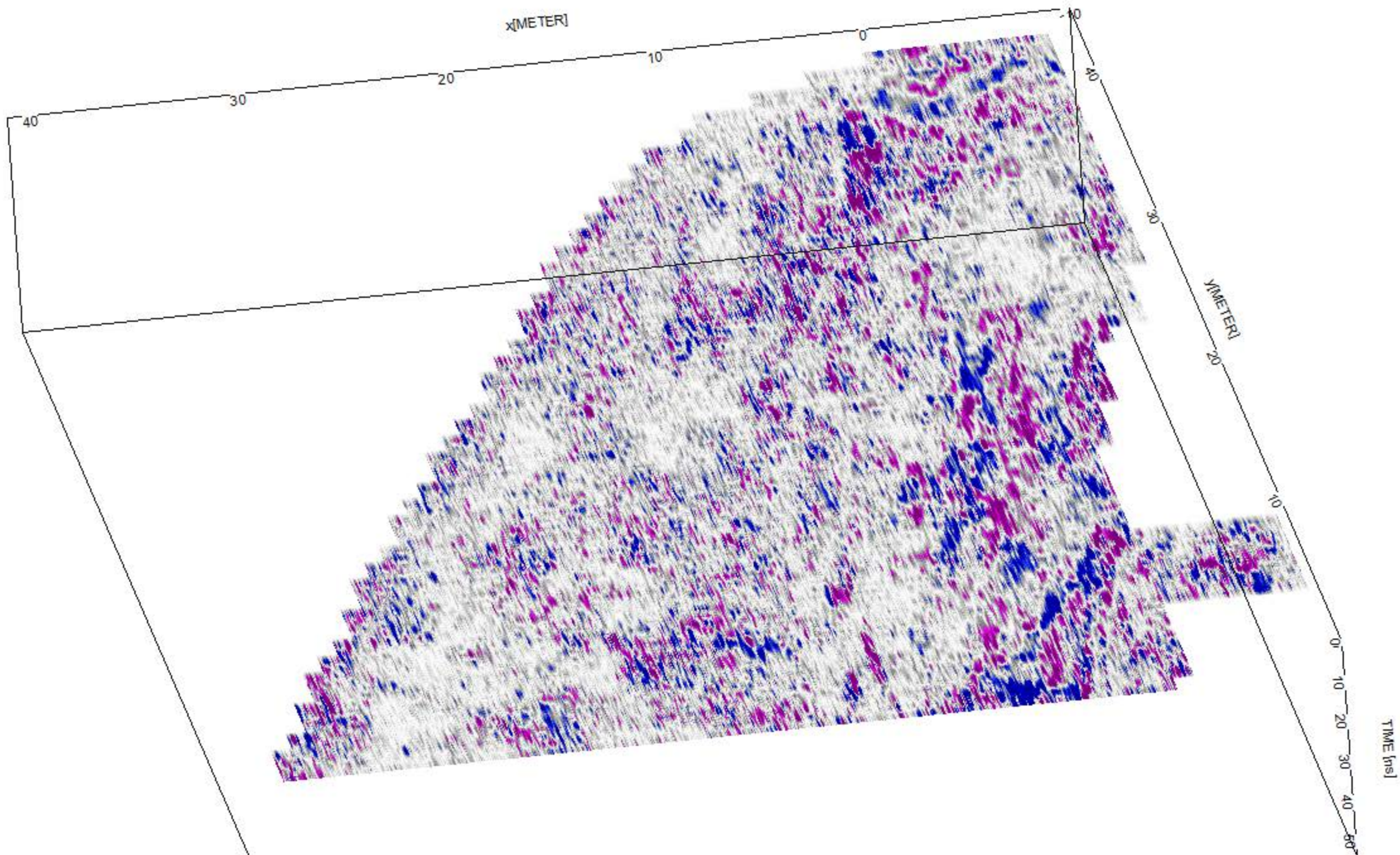
0 5 20m



maj 2019

arhej





**Slika 10c: Sektor 2, poševni
pogled proti jugu, globina 30 cm**

Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

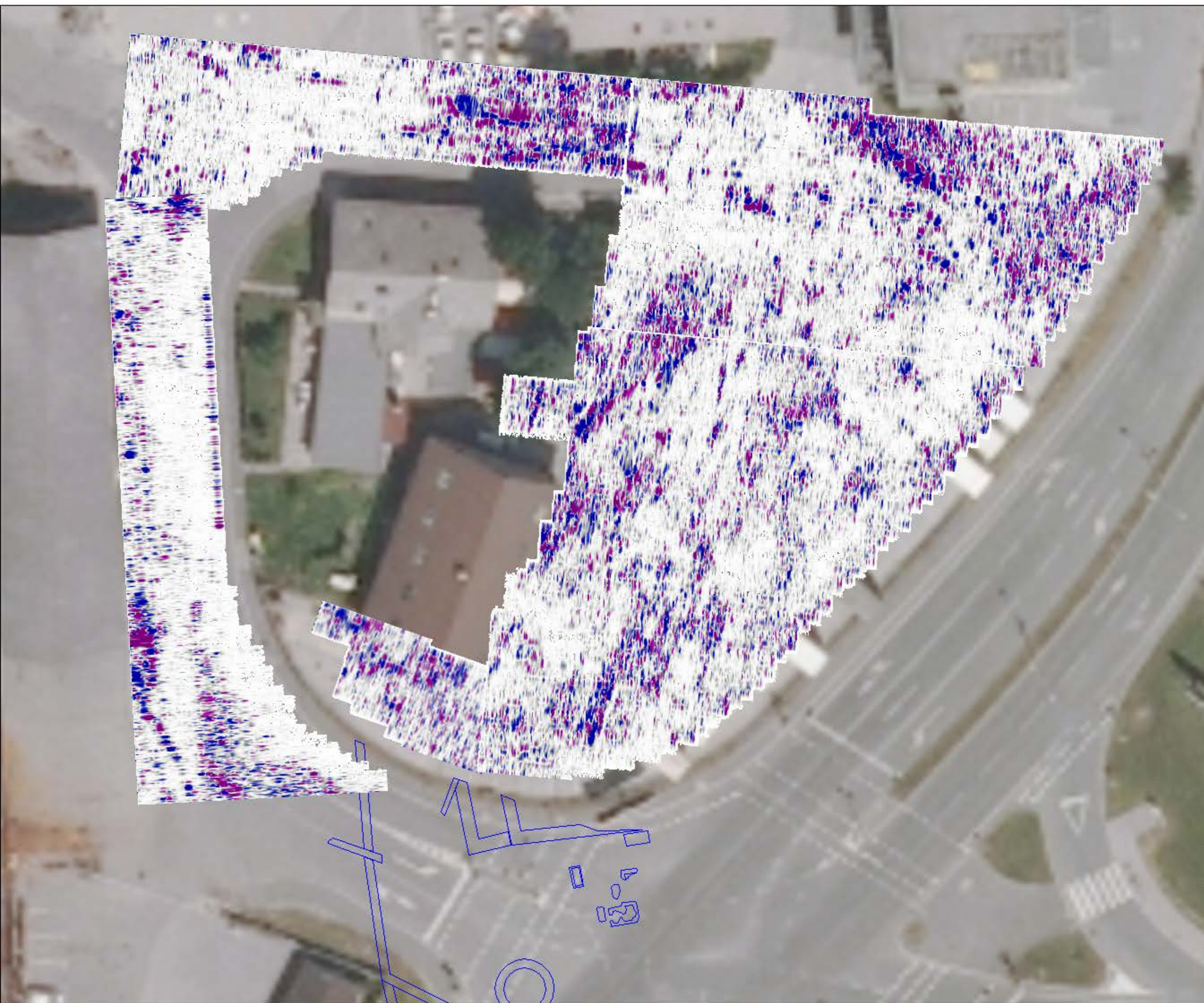
Slika 11a: horizontalni rez
na globini približno 40
cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

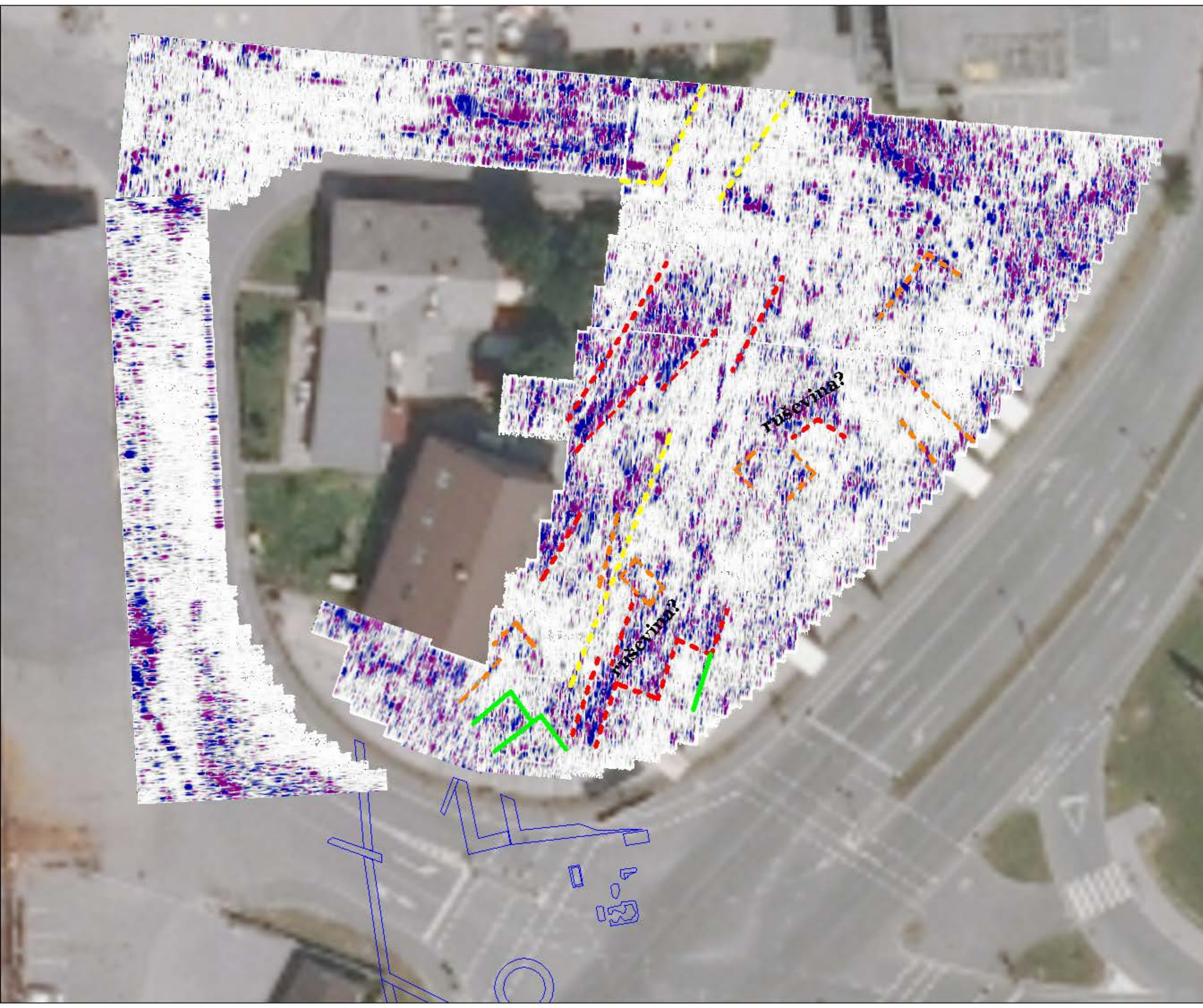
Slika 11b: horizontalni
rez na globini približno
40 cm

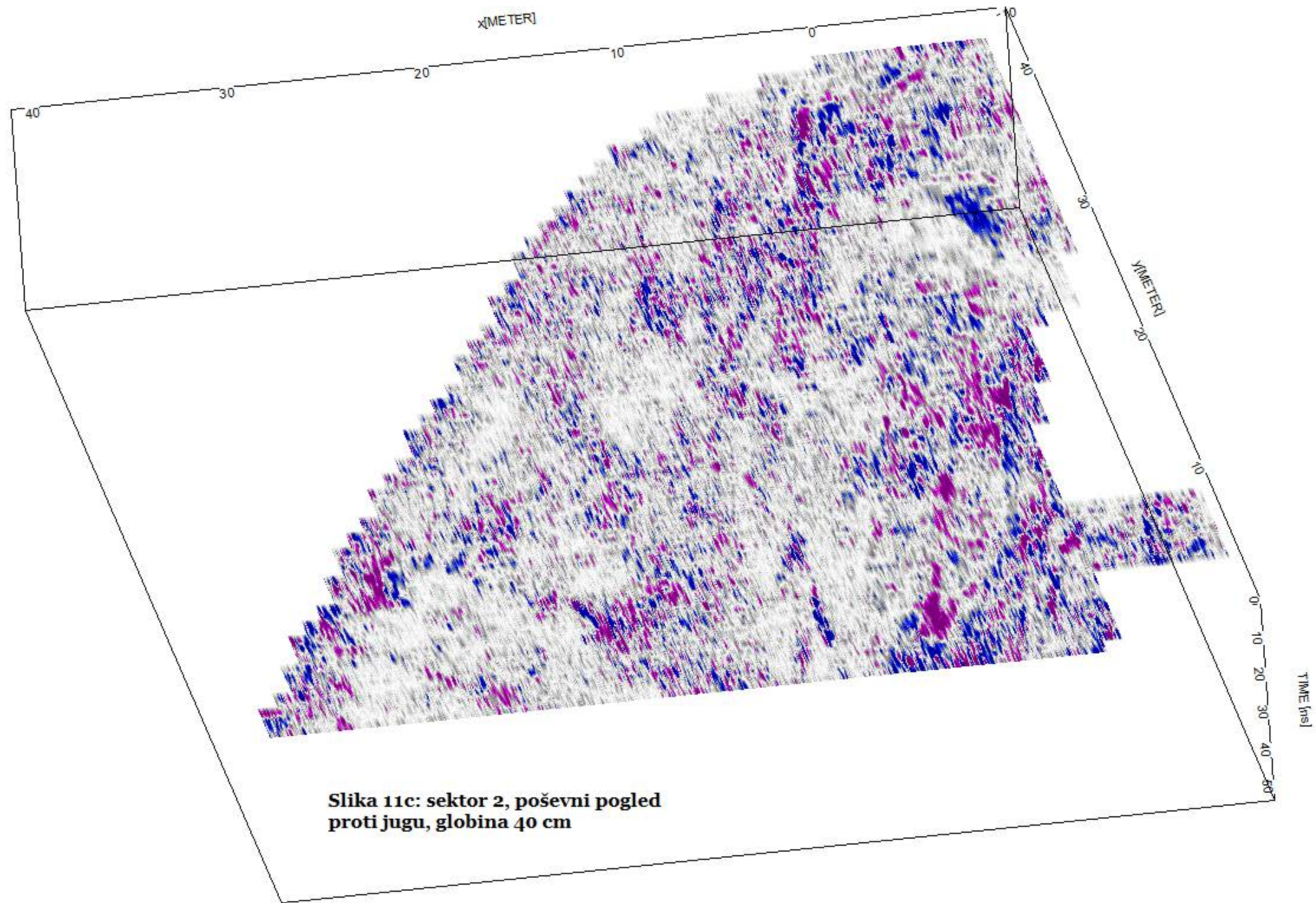
Podlaga: DOF ©GURS

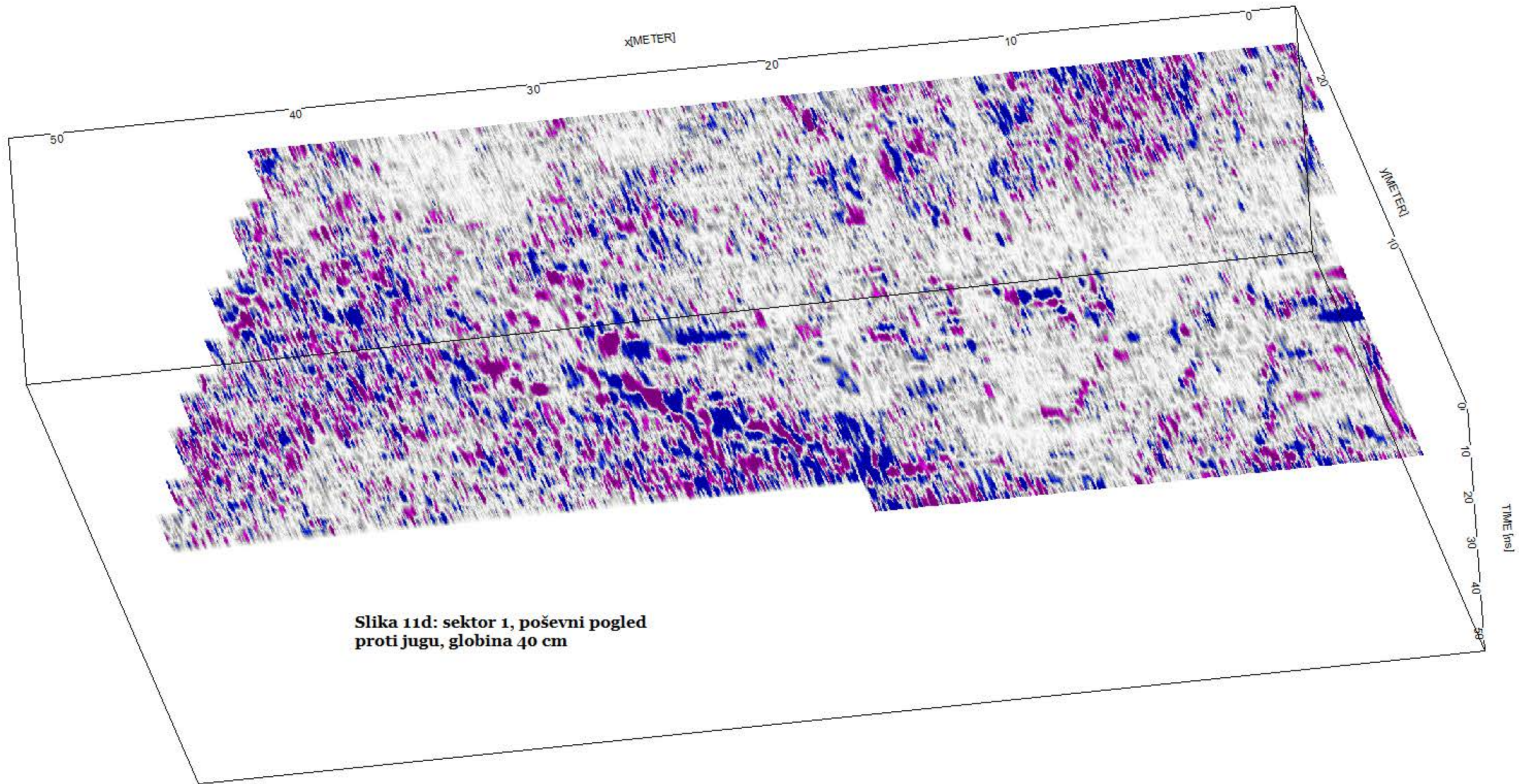
0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

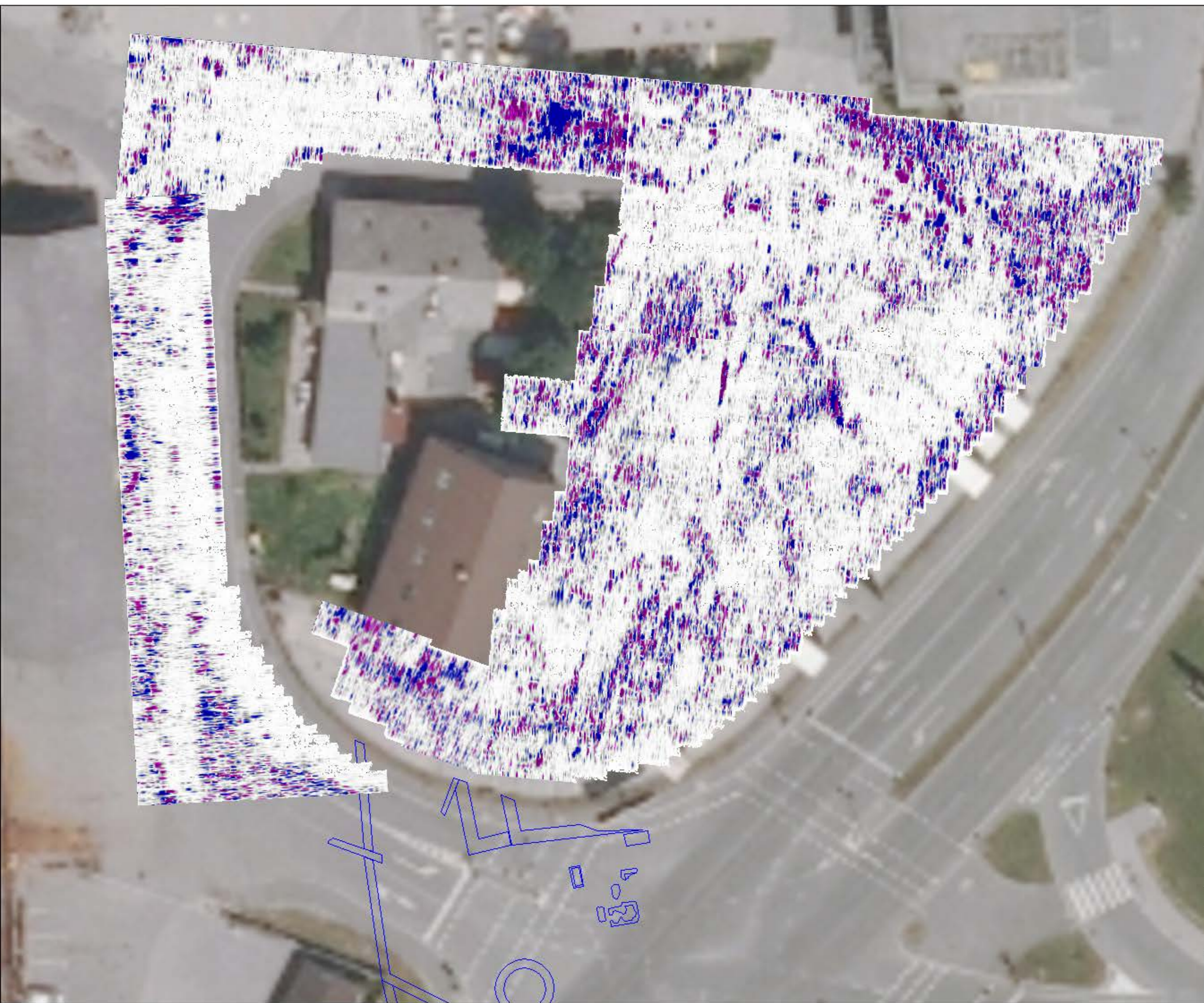
Slika 12b: horizontalni
rez na globini približno
50 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

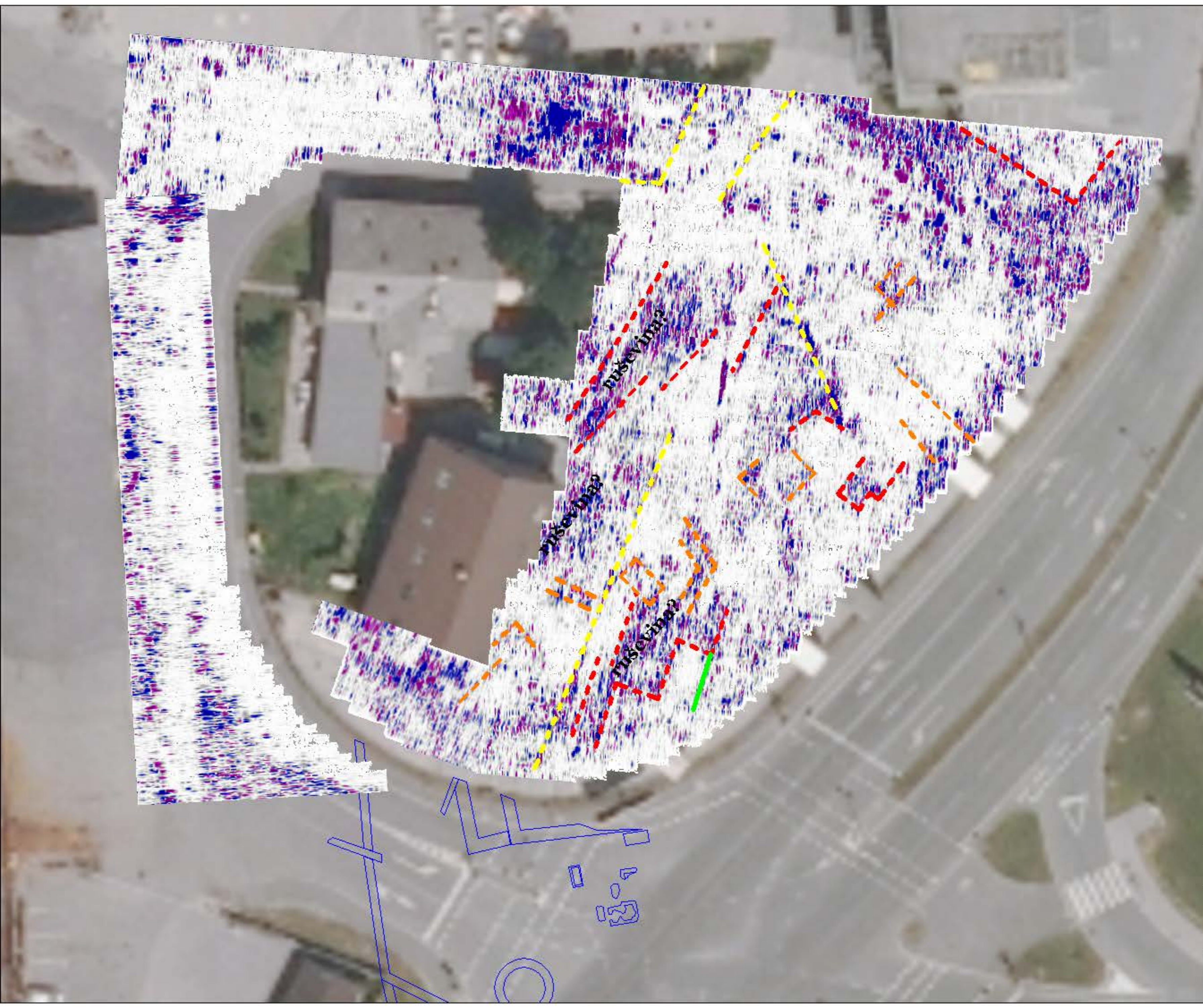
Slika 12b: horizontalni
rez na globini približno
50 cm

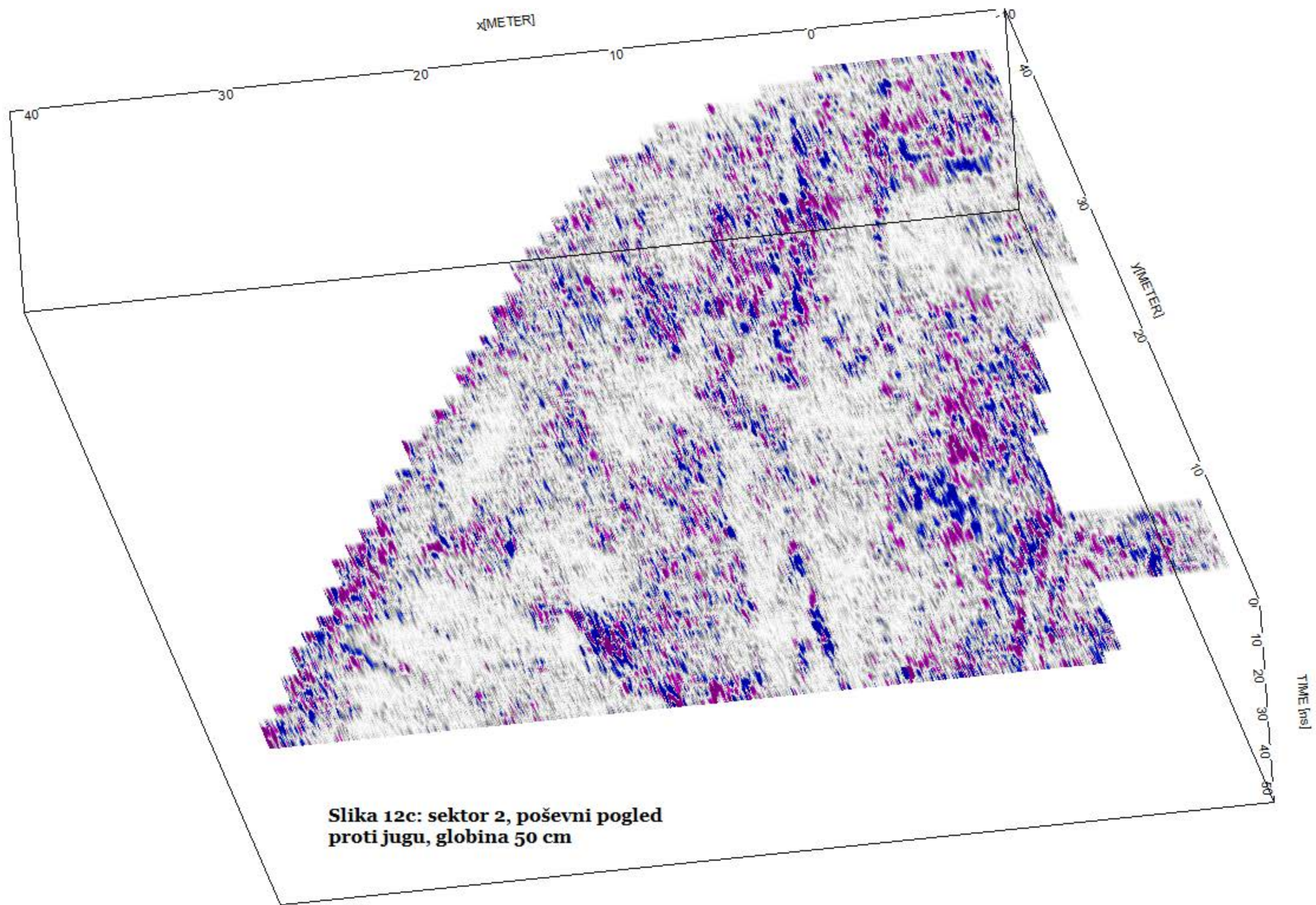
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m



maj 2019 **arhe,**





Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

Slika 13a: horizontalni
rez na globini približno
60 cm

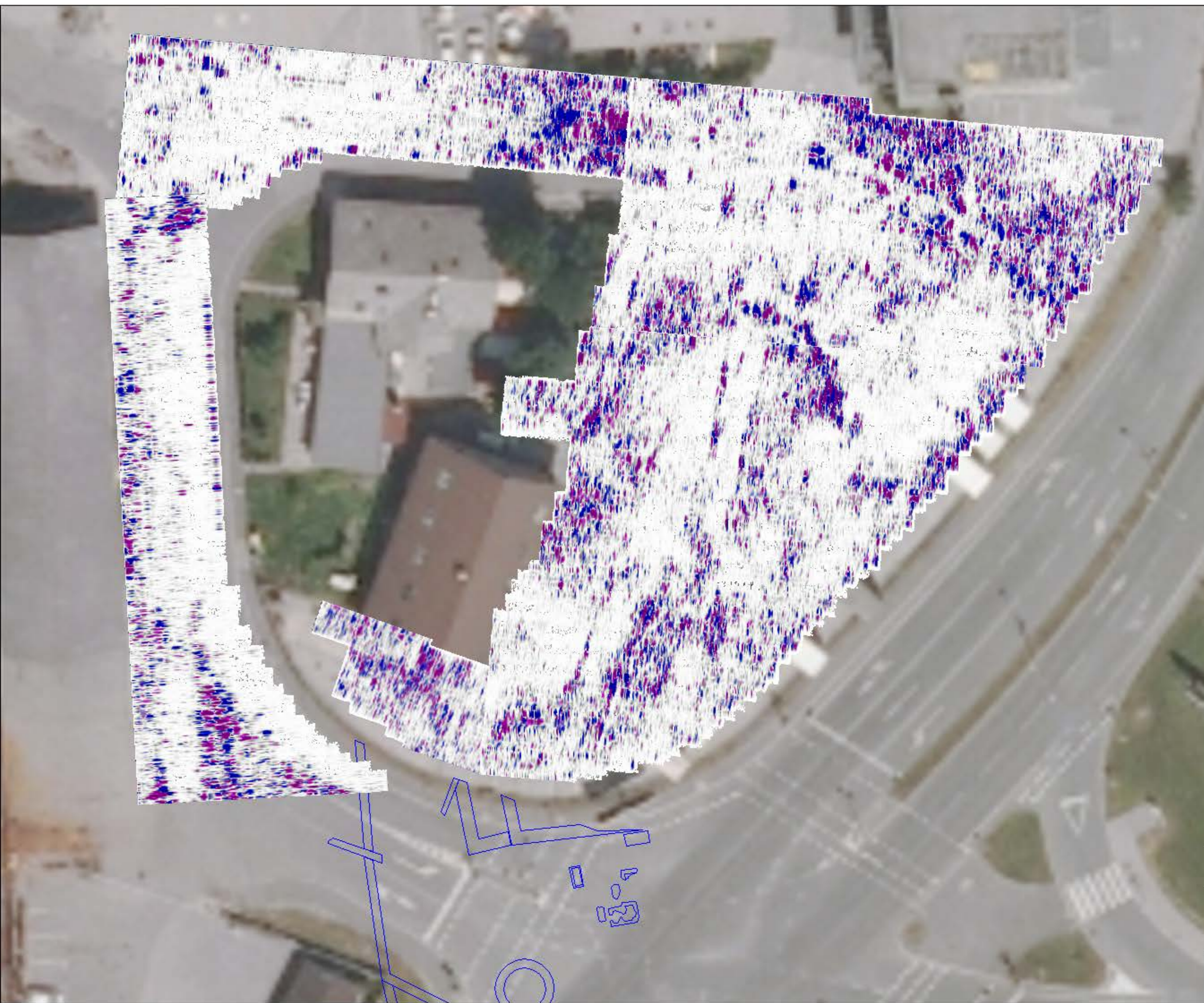
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m



maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

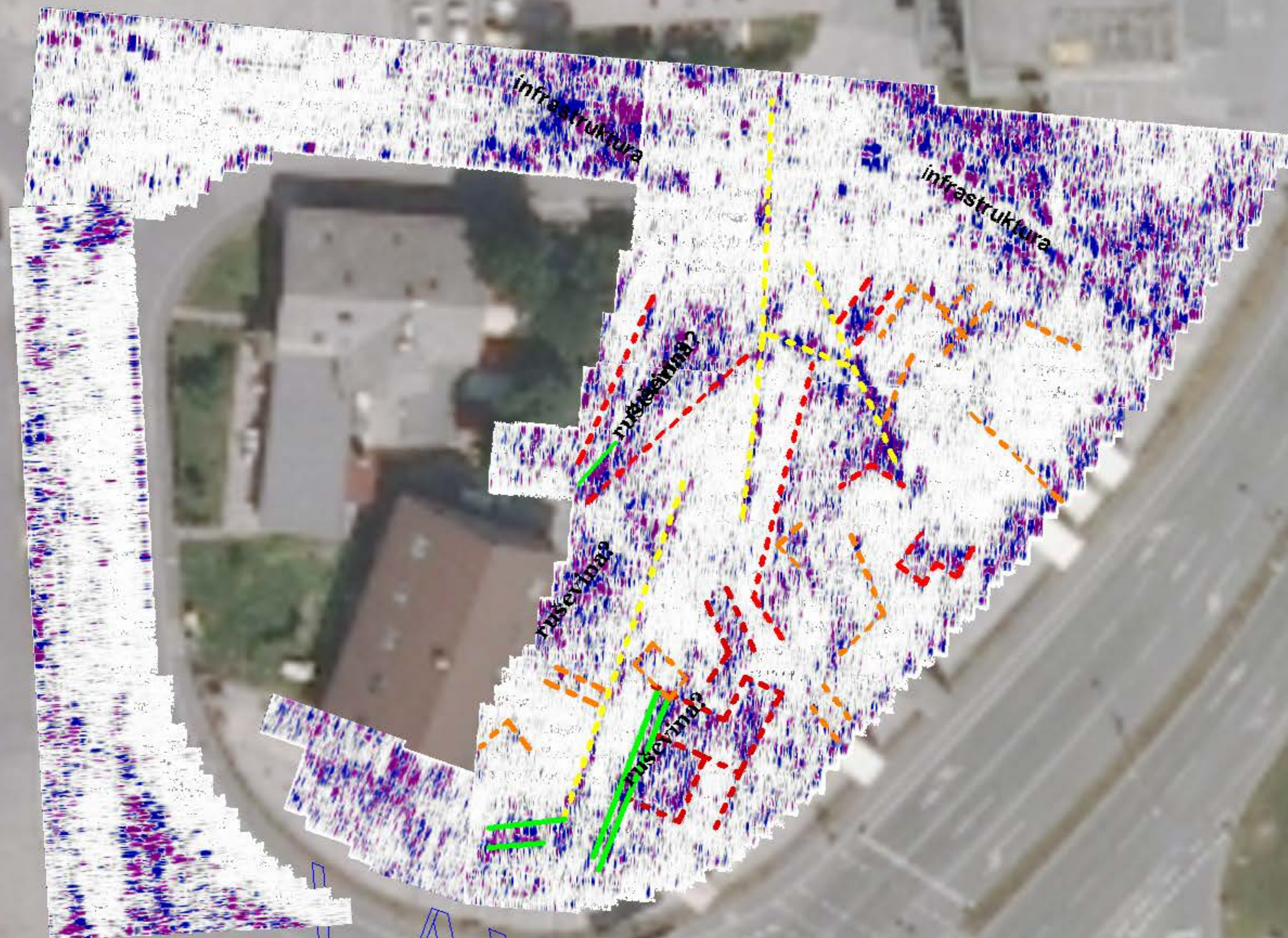
Slika 13b: horizontalni
rez na globini približno
60 cm

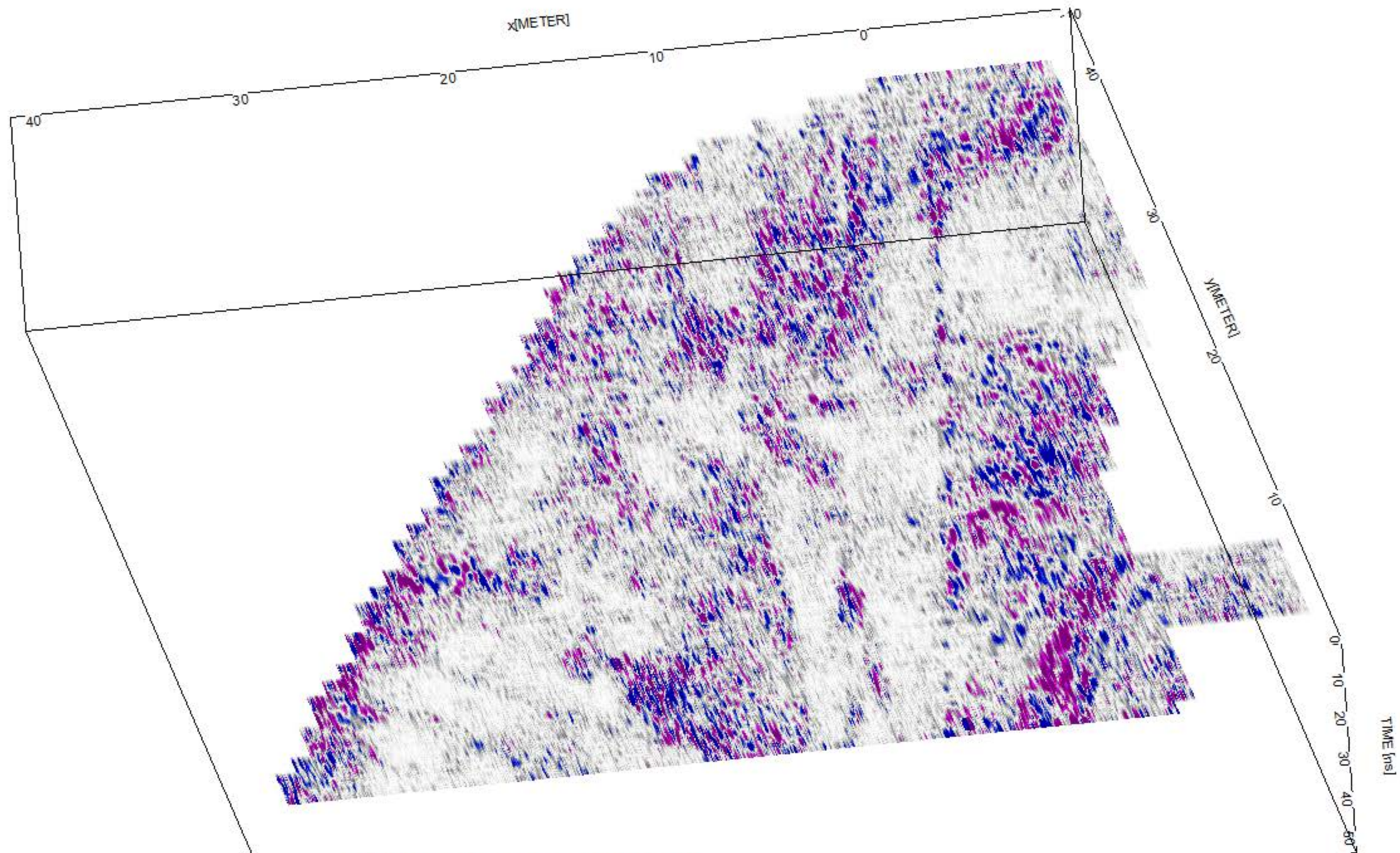
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

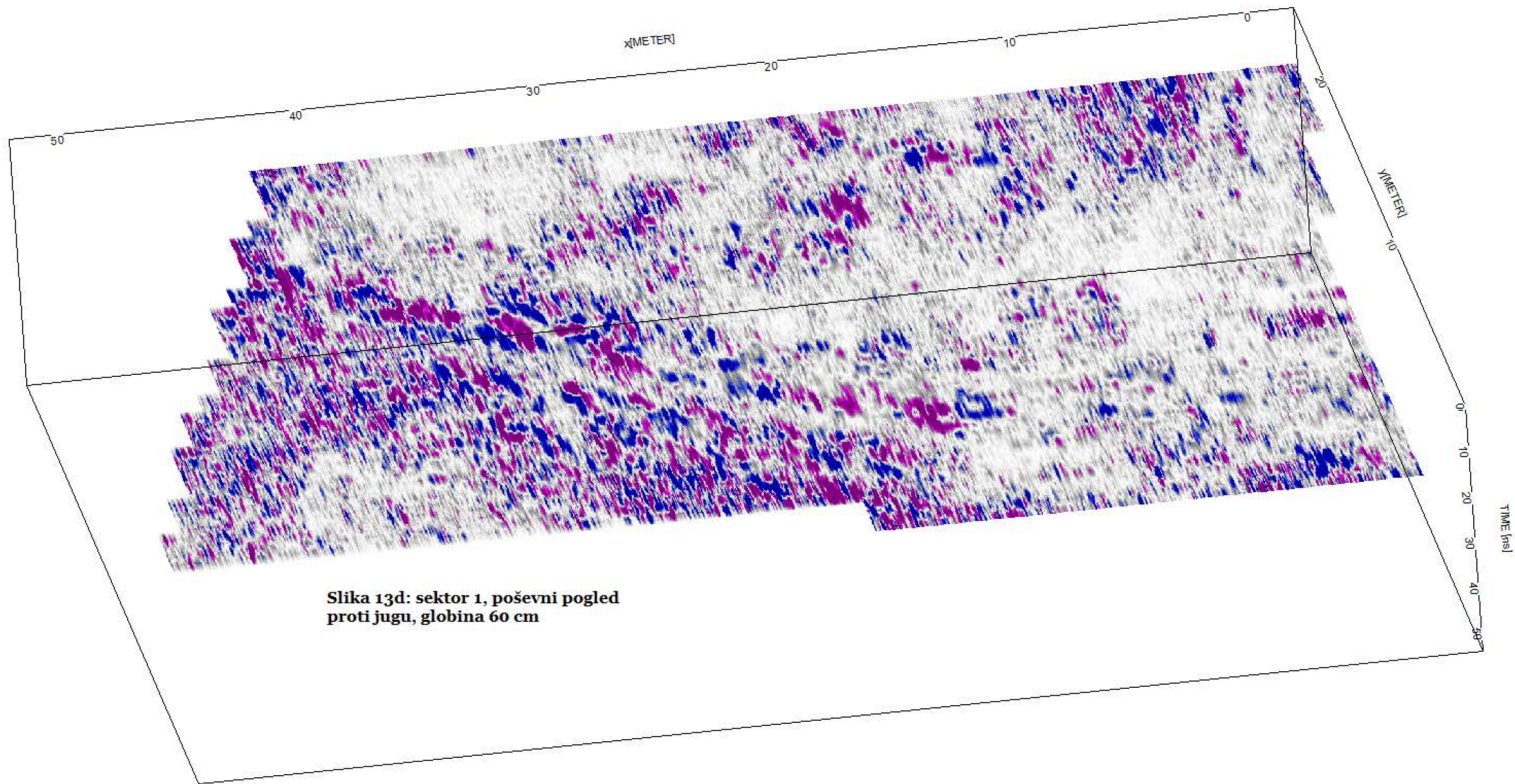
maj 2019

arhe,





**Slika 13c: sektor 2, poševni pogled
proti jugu, globina 60 cm**



**Slika 13d: sektor 1, poševni pogled
proti jugu, globina 60 cm**

Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

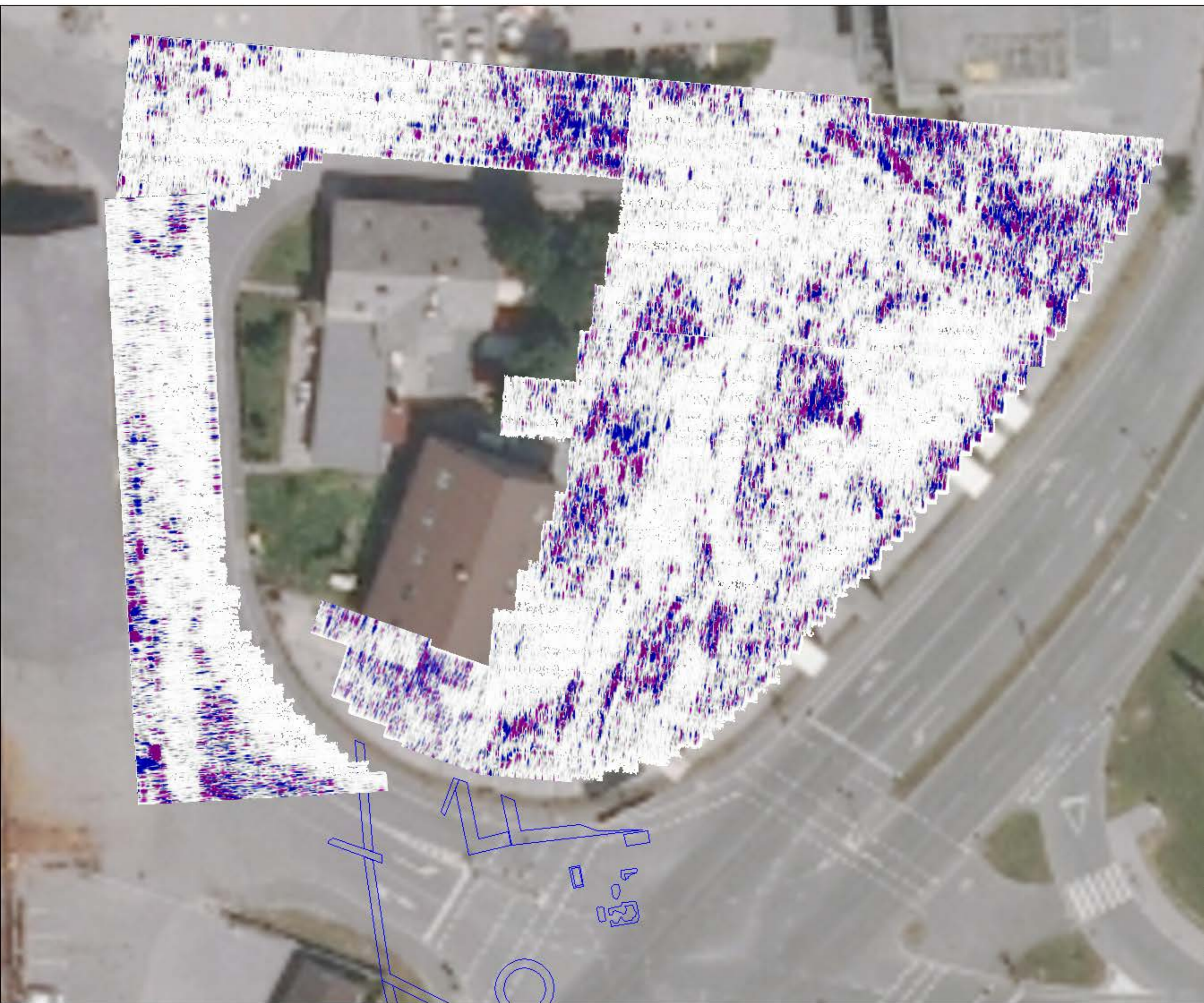
Slika 14a: horizontalni
rez na globini približno
80 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

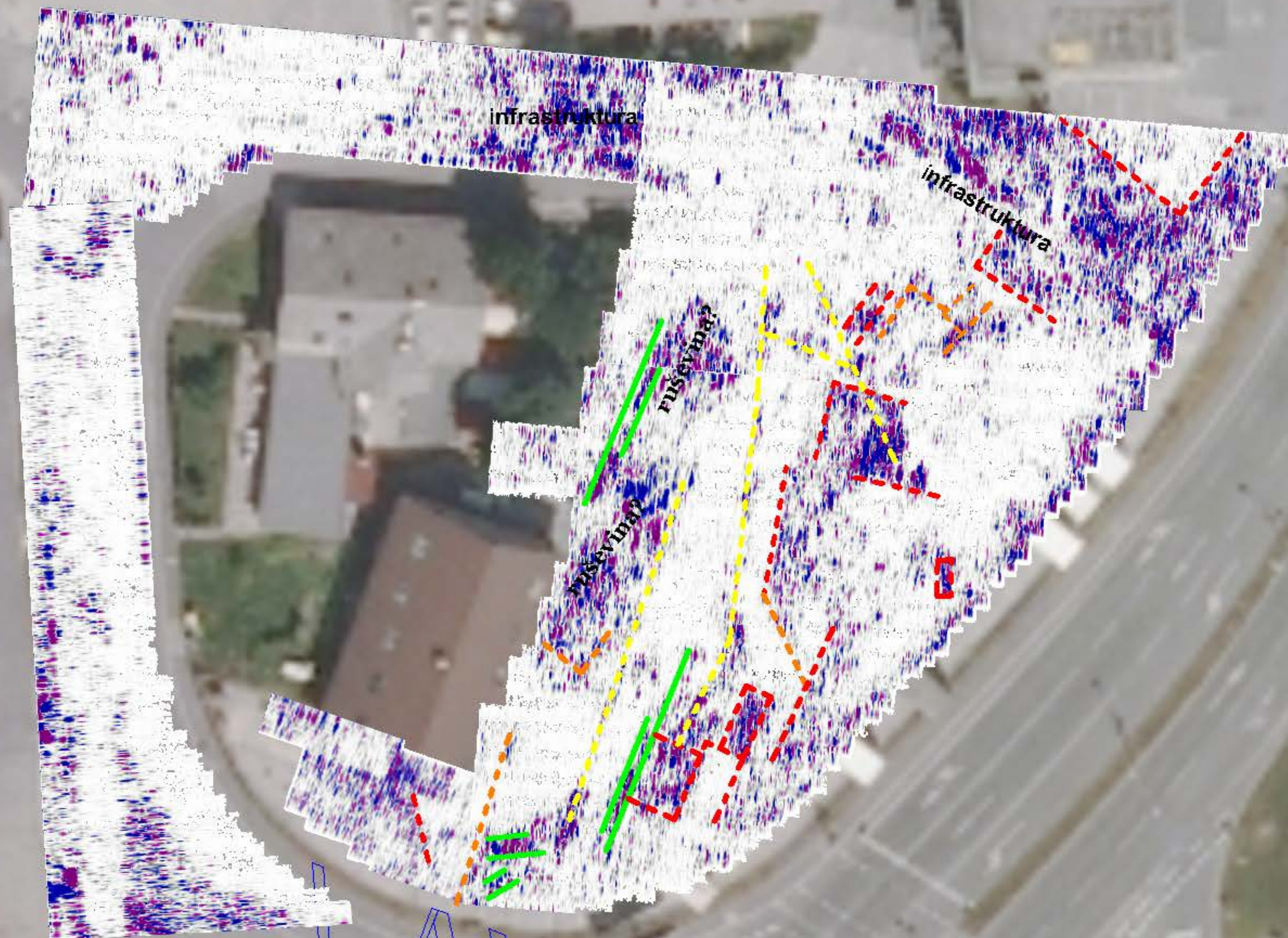
Slika 14b: horizontalni
rez na globini približno
80 cm

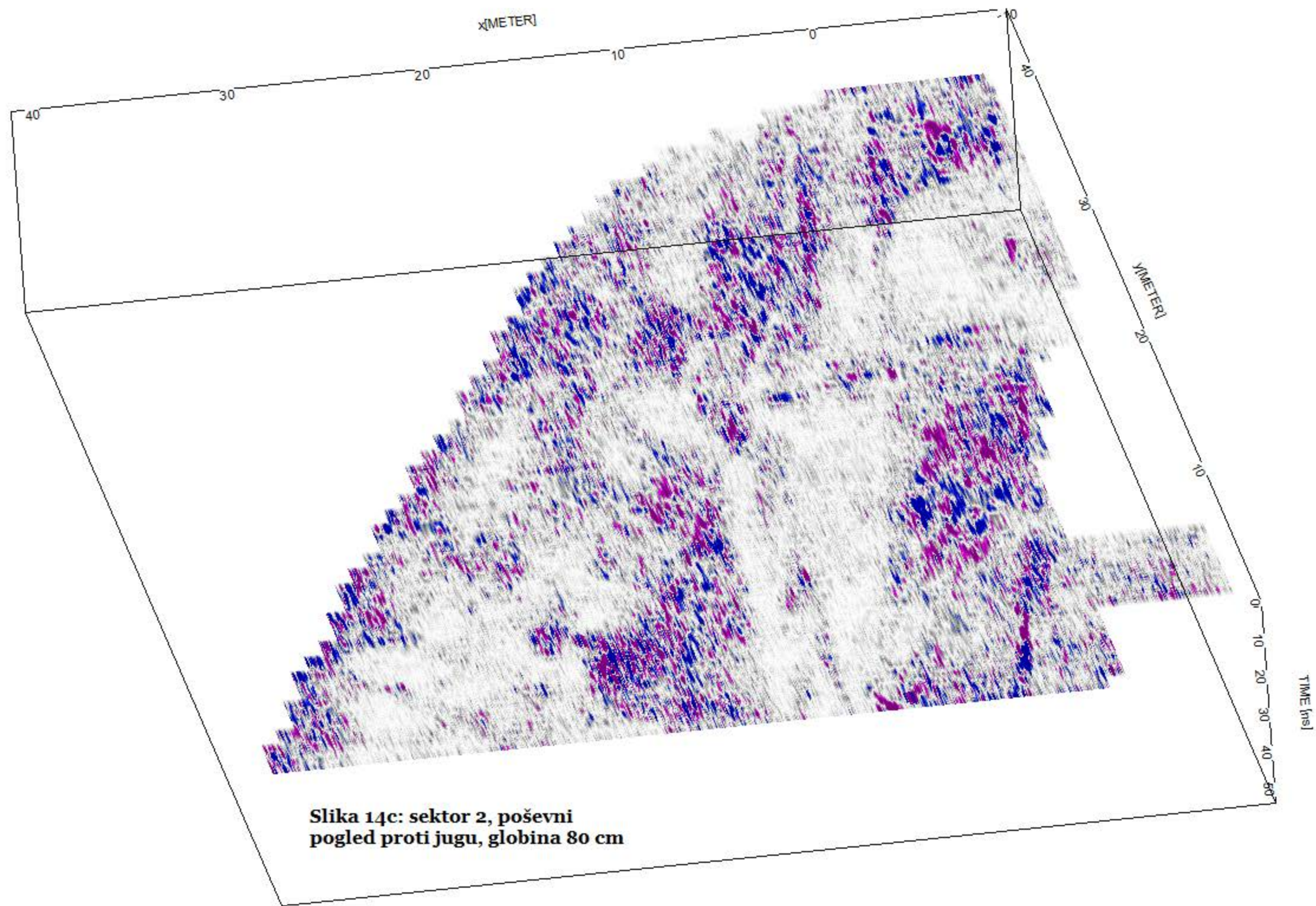
Podlaga: DOF ©GURS

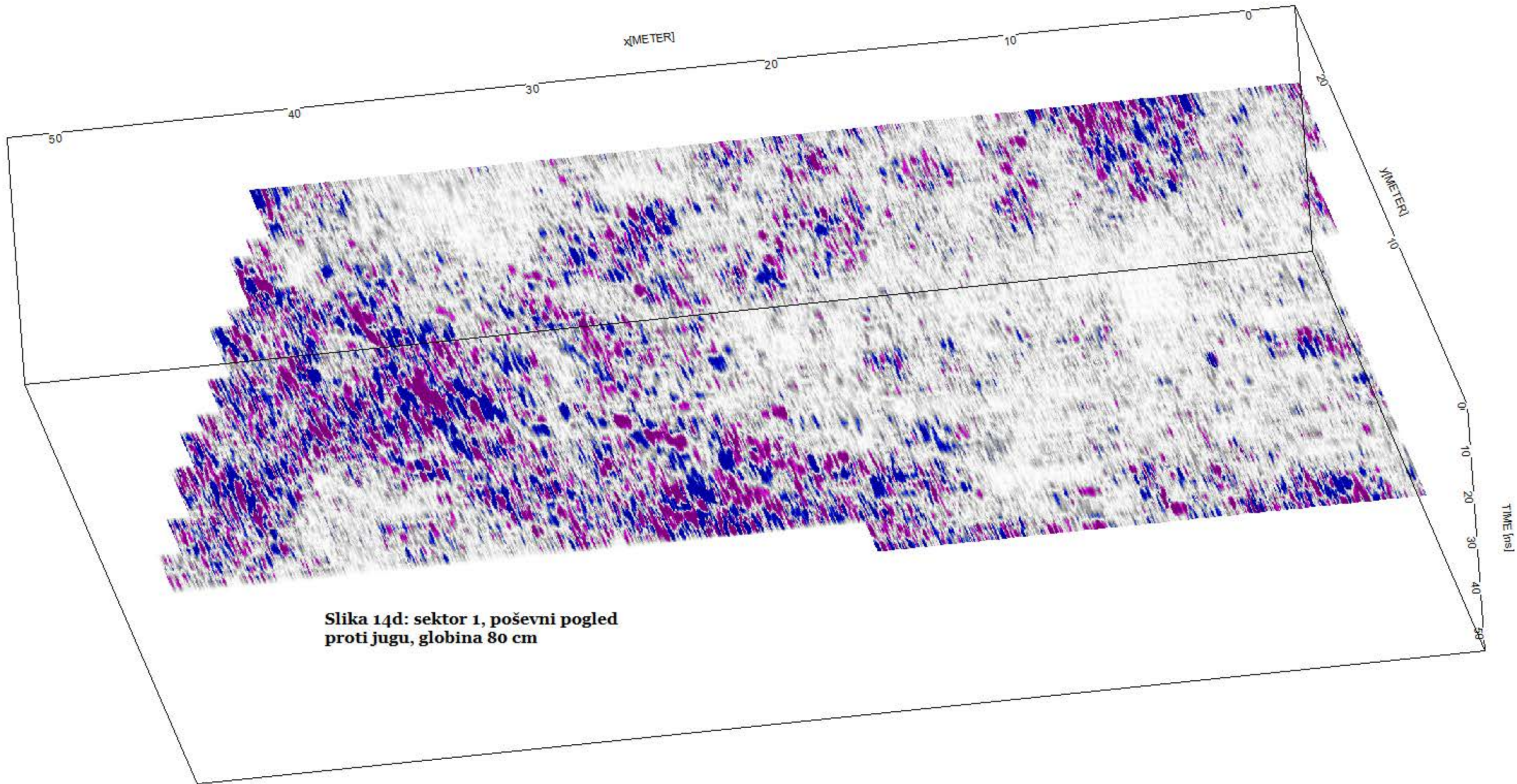
0 5 20m

maj 2019

arhej







**Slika 14d: sektor 1, poševni pogled
proti jugu, globina 80 cm**

Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

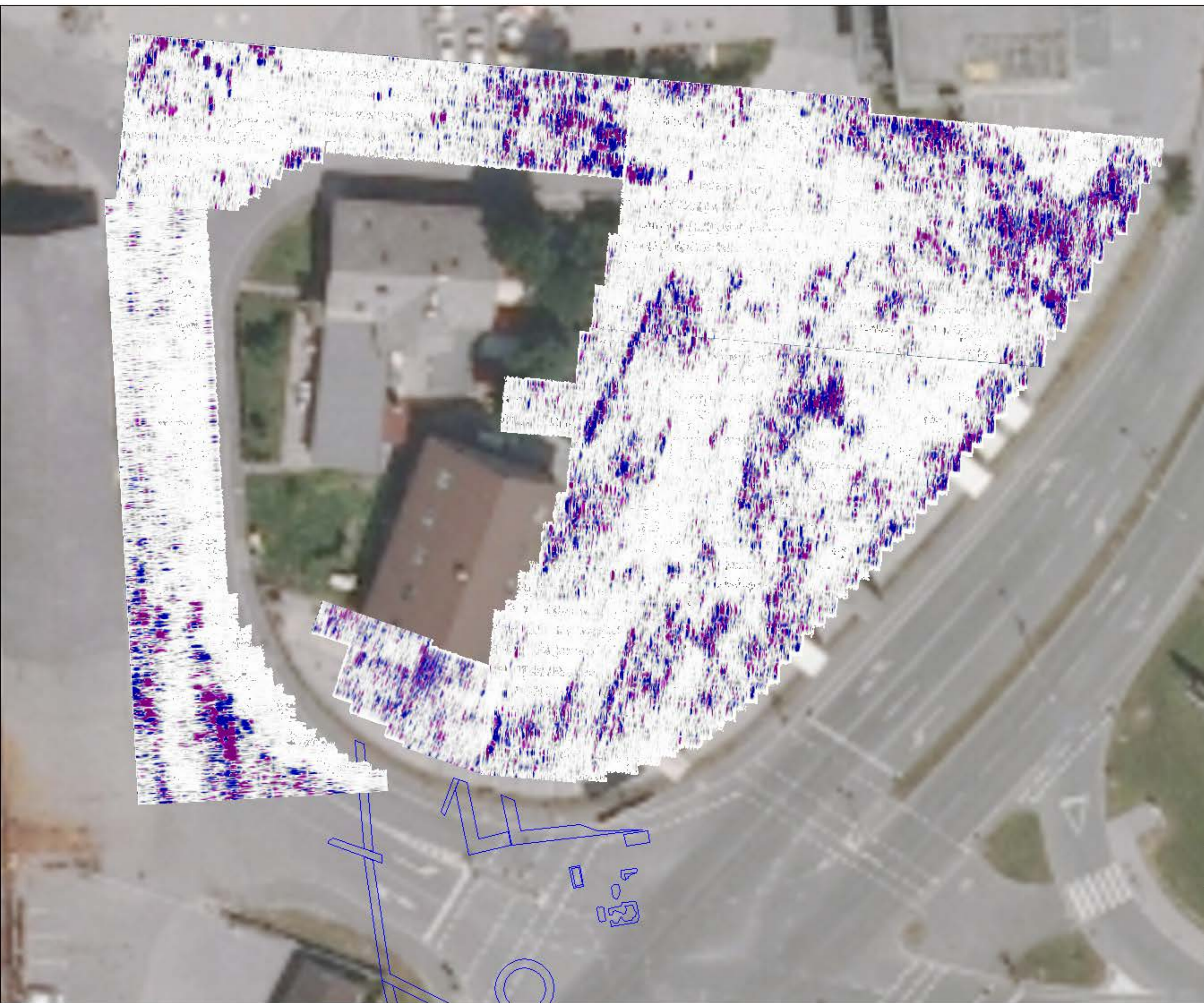
Slika 15a: horizontalni
rez na globini približno
100 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhej







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

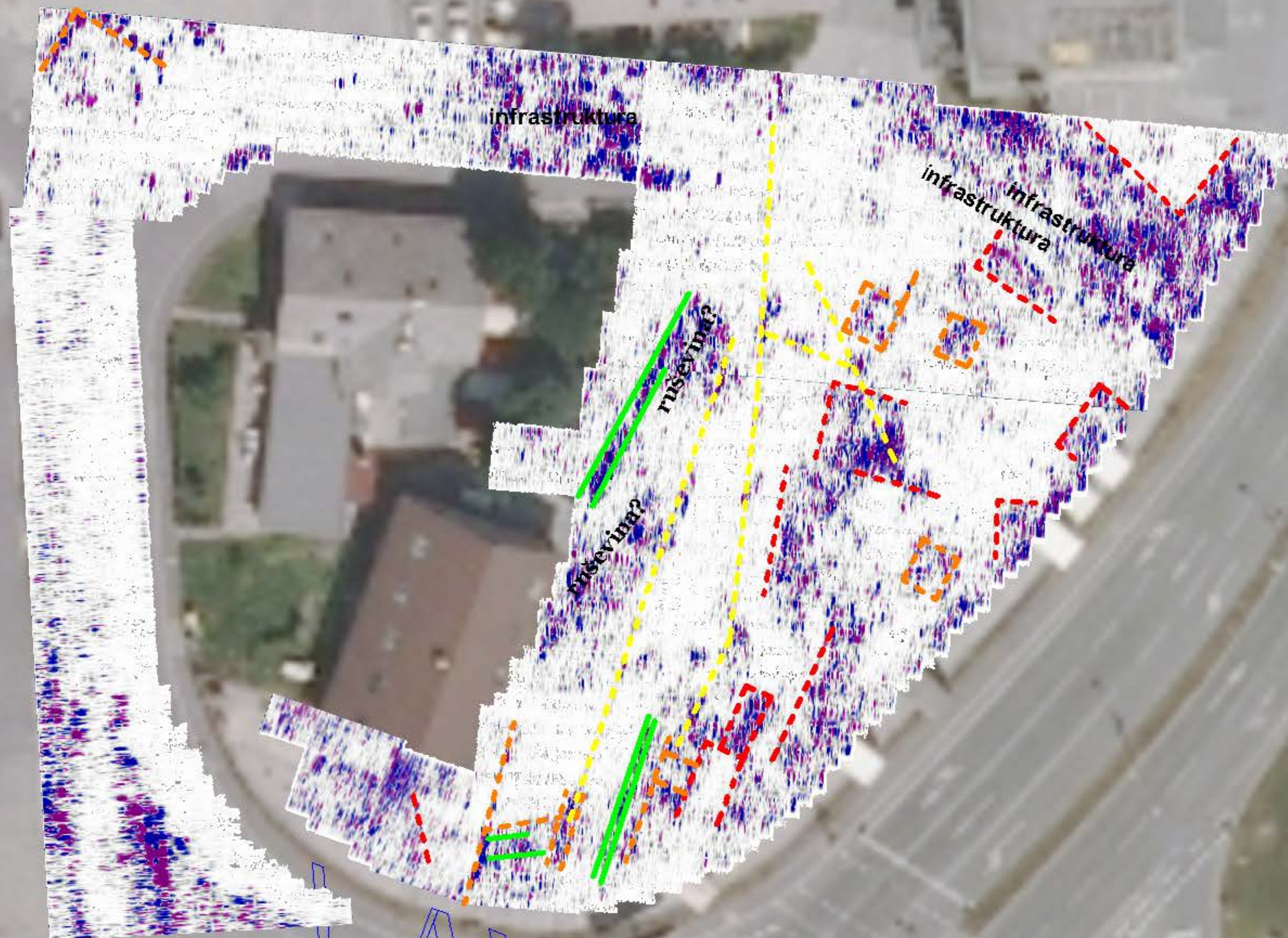
Slika 15b: horizontalni
rez na globini približno
100 cm

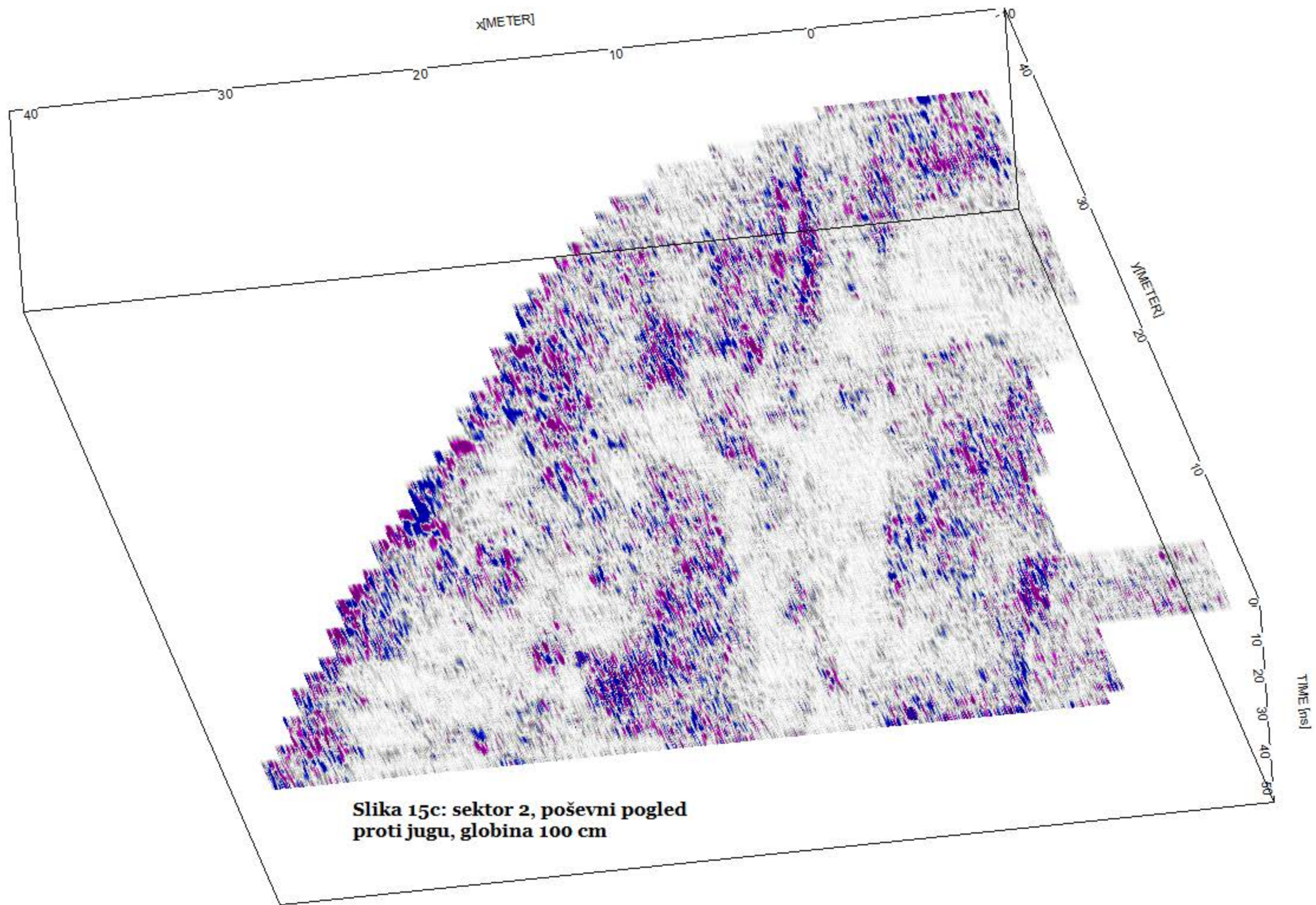
Podlaga: DOF ©GURS

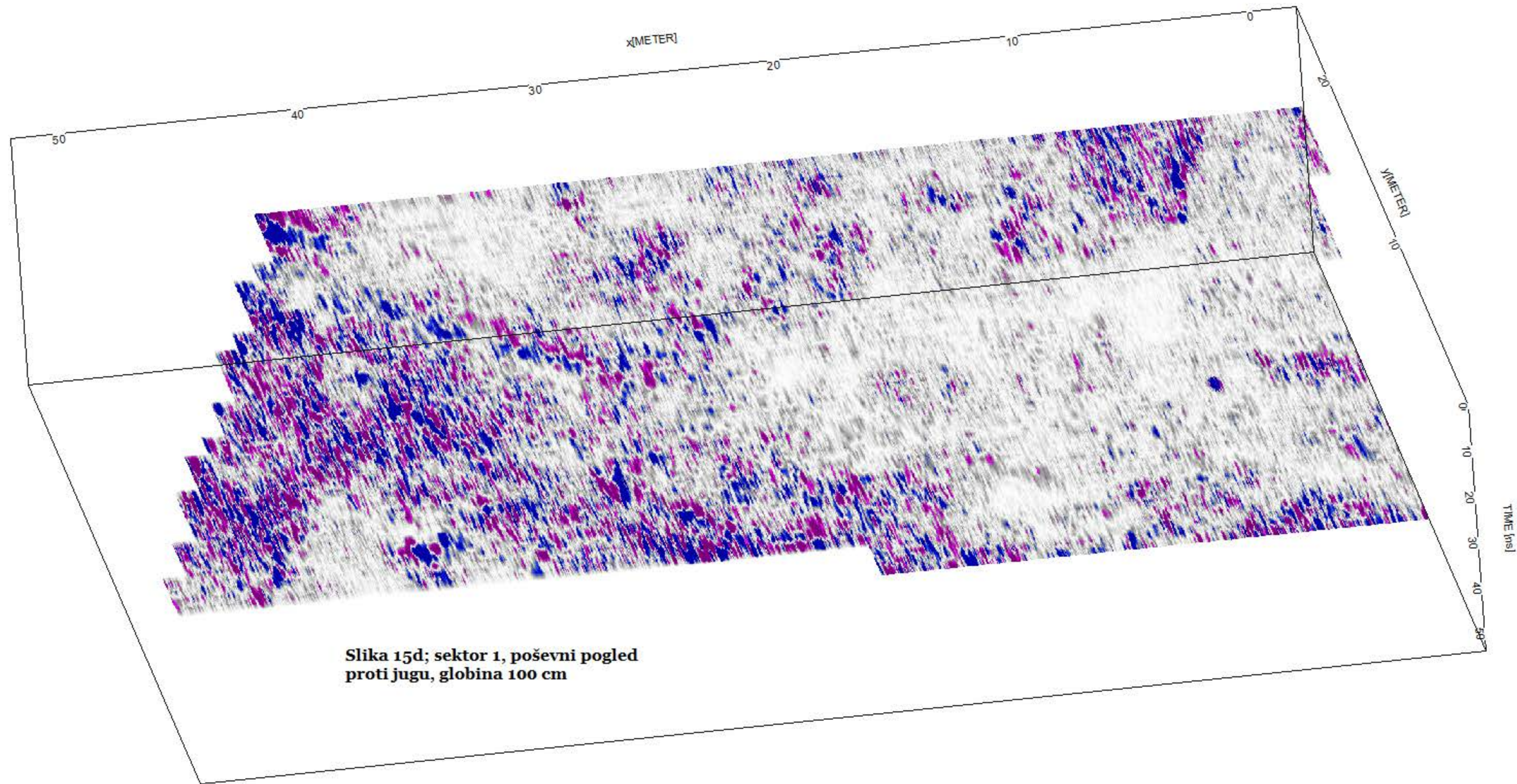
0 5 20m

maj 2019

arhej







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

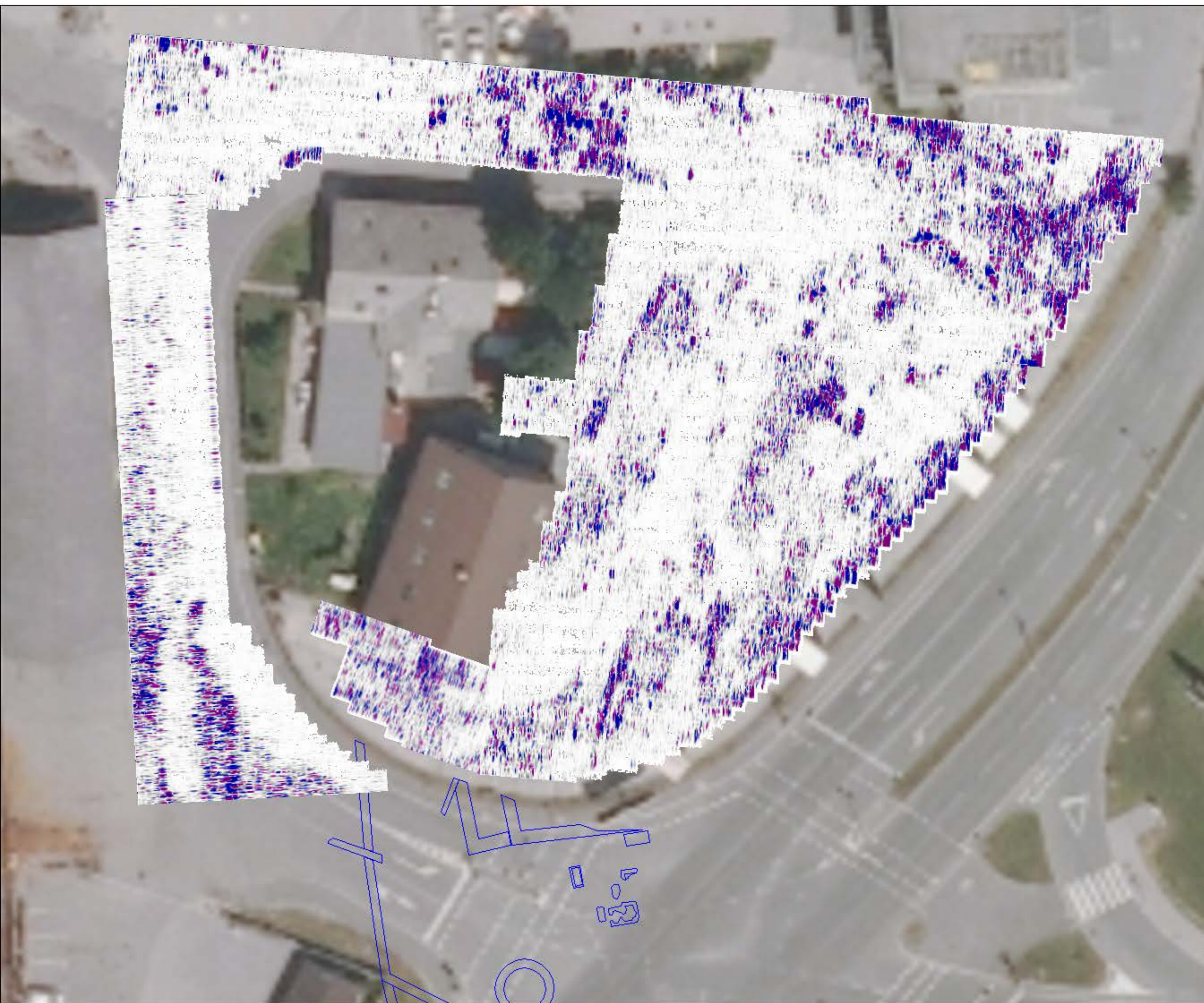
Slika 16a: horizontalni
rez na globini približno
120 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

Slika 16b: horizontalni
rez na globini približno
120 cm

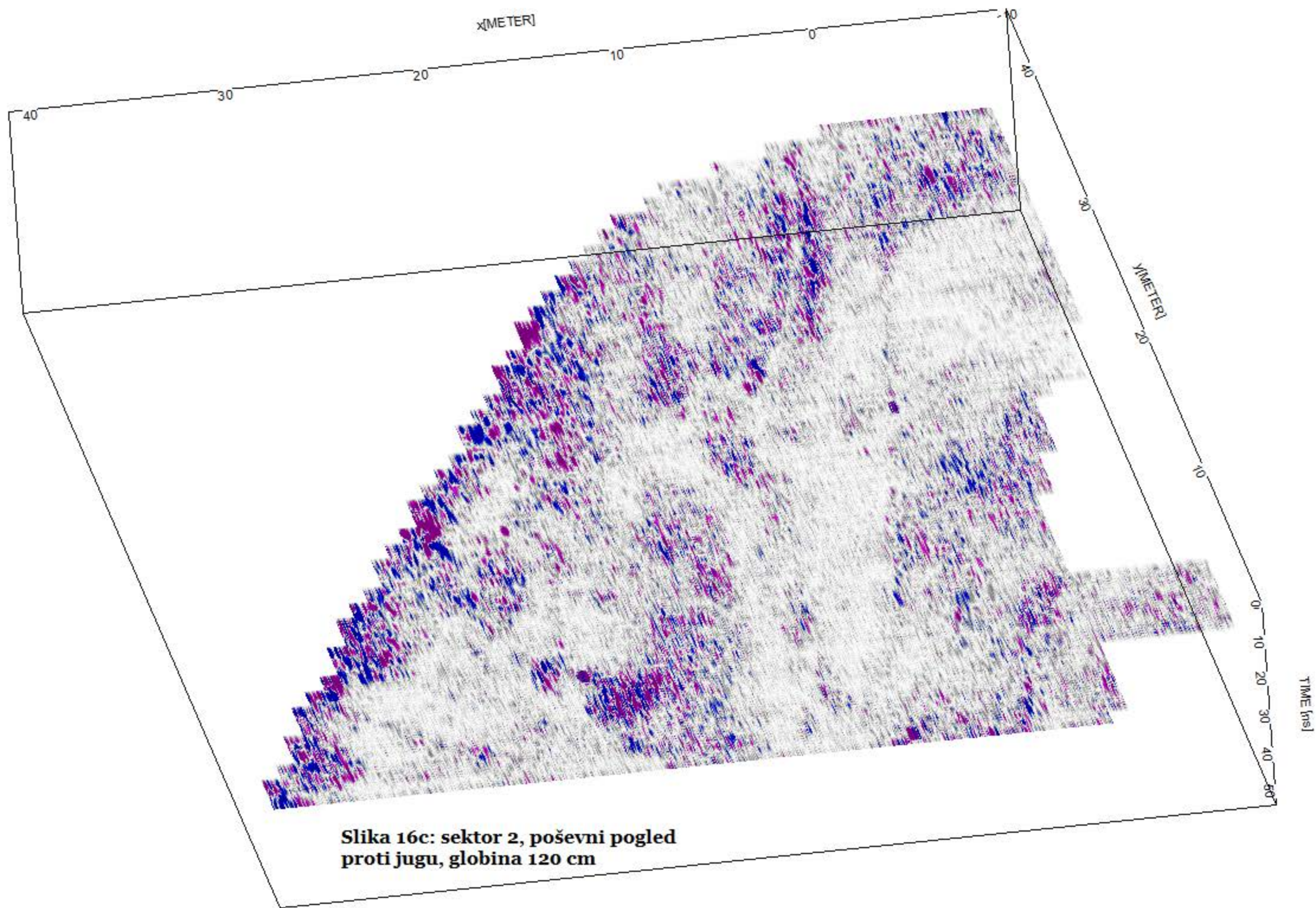
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

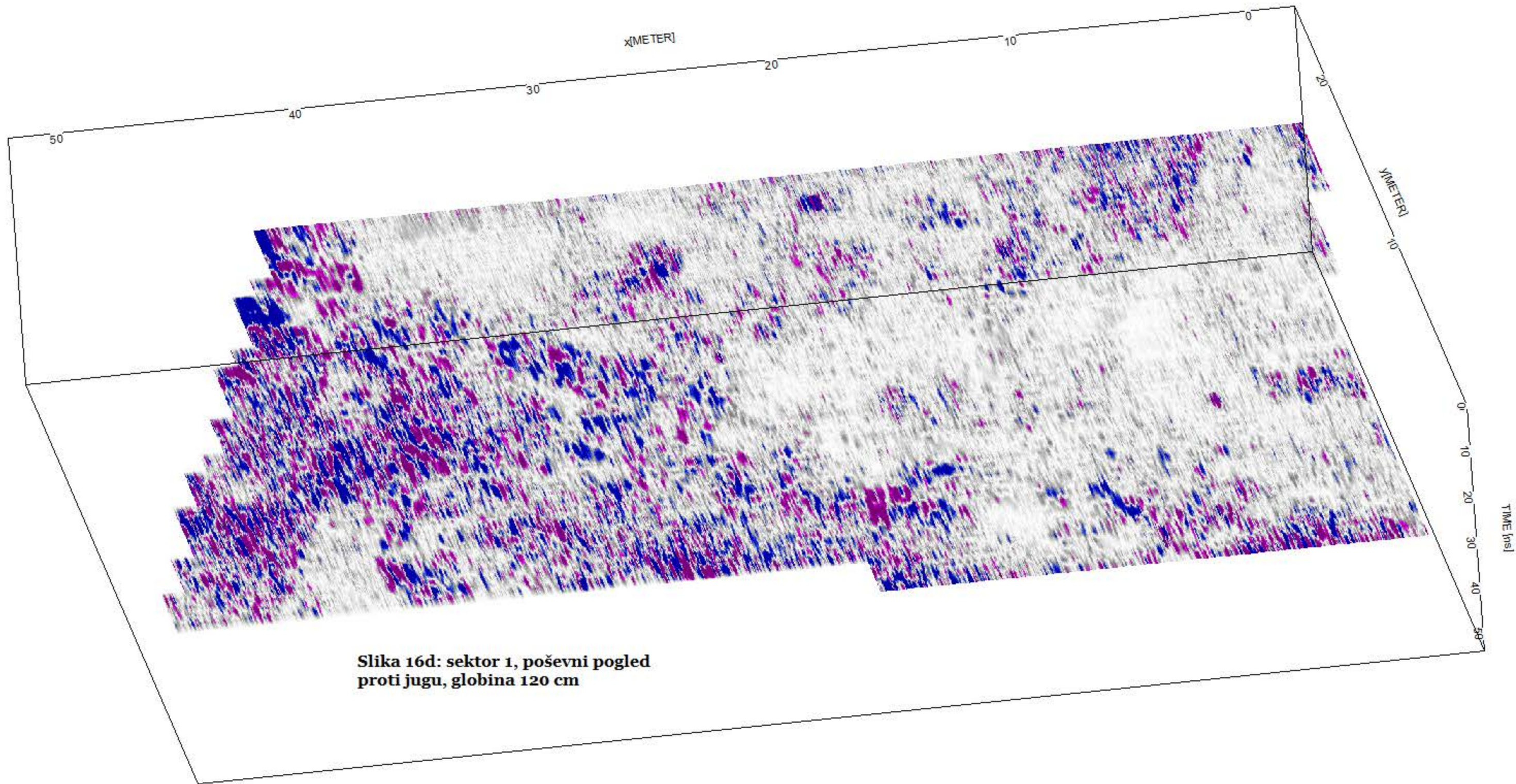
maj 2019

arhe,





**Slika 16c: sektor 2, poševni pogled
proti jugu, globina 120 cm**



**Slika 16d: sektor 1, poševni pogled
proti jugu, globina 120 cm**

Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

Slika 17a: horizontalni
rez na globini približno
140 cm

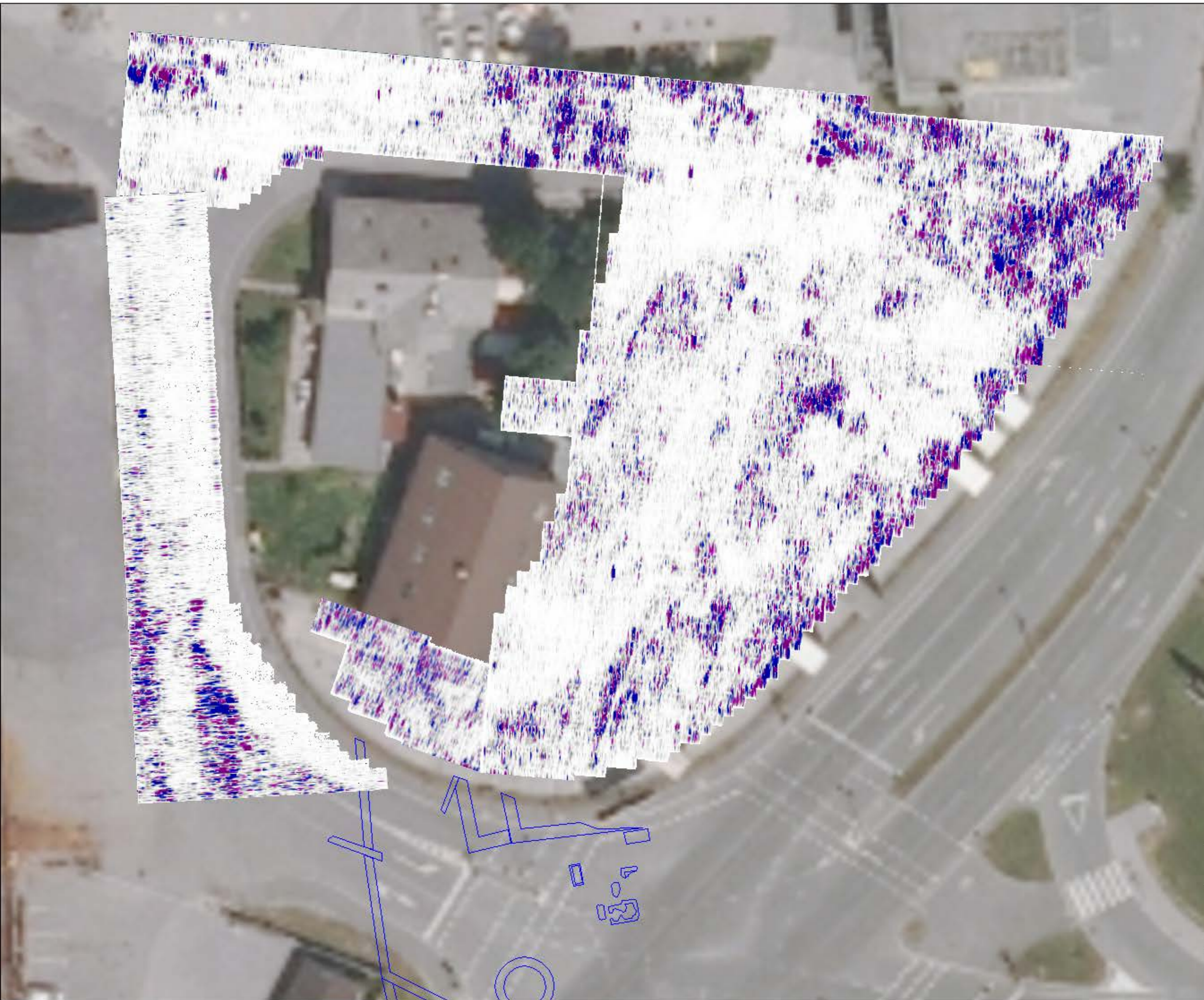
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m



maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

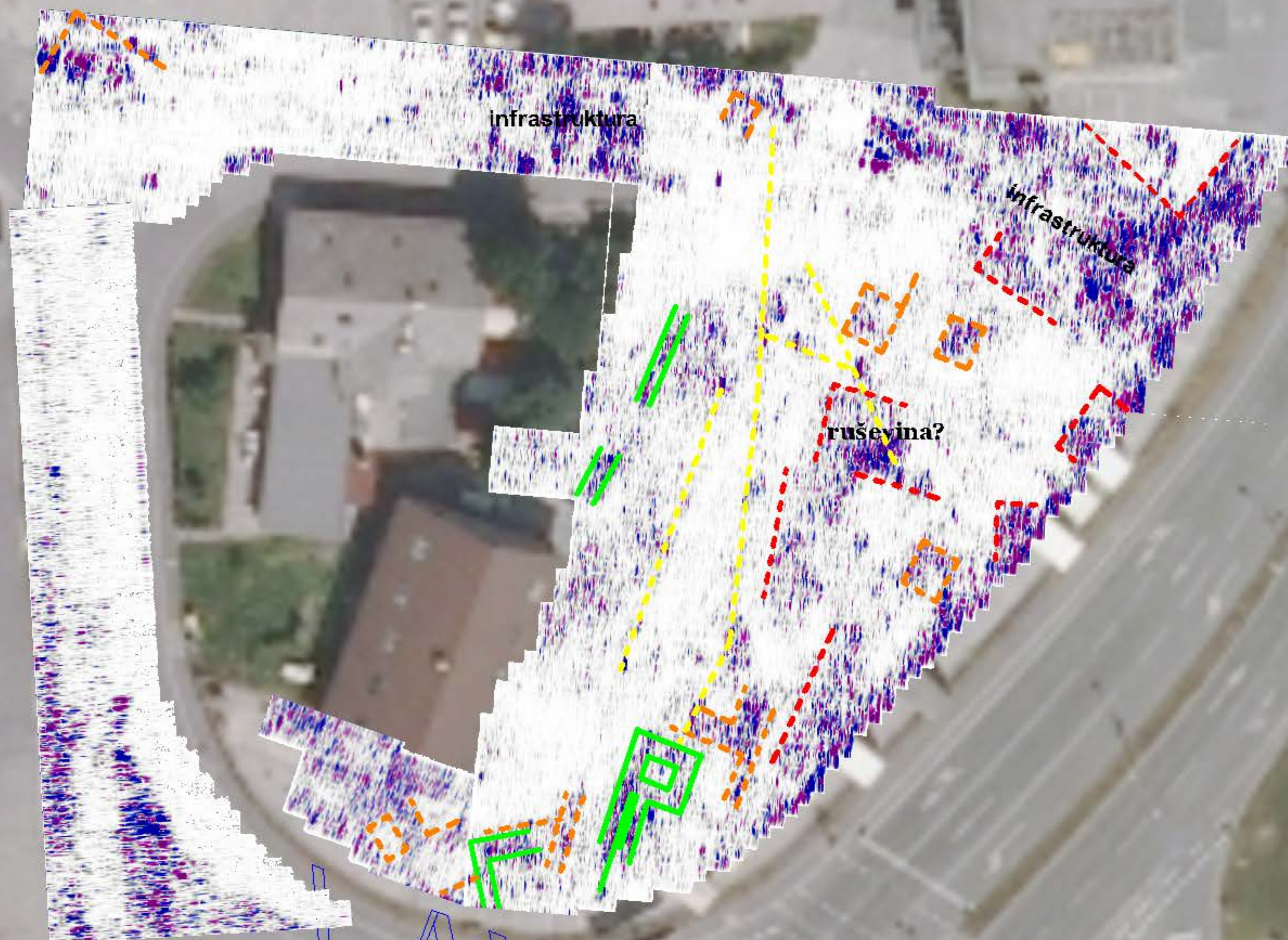
Slika 17b: horizontalni
rez na globini približno
140 cm

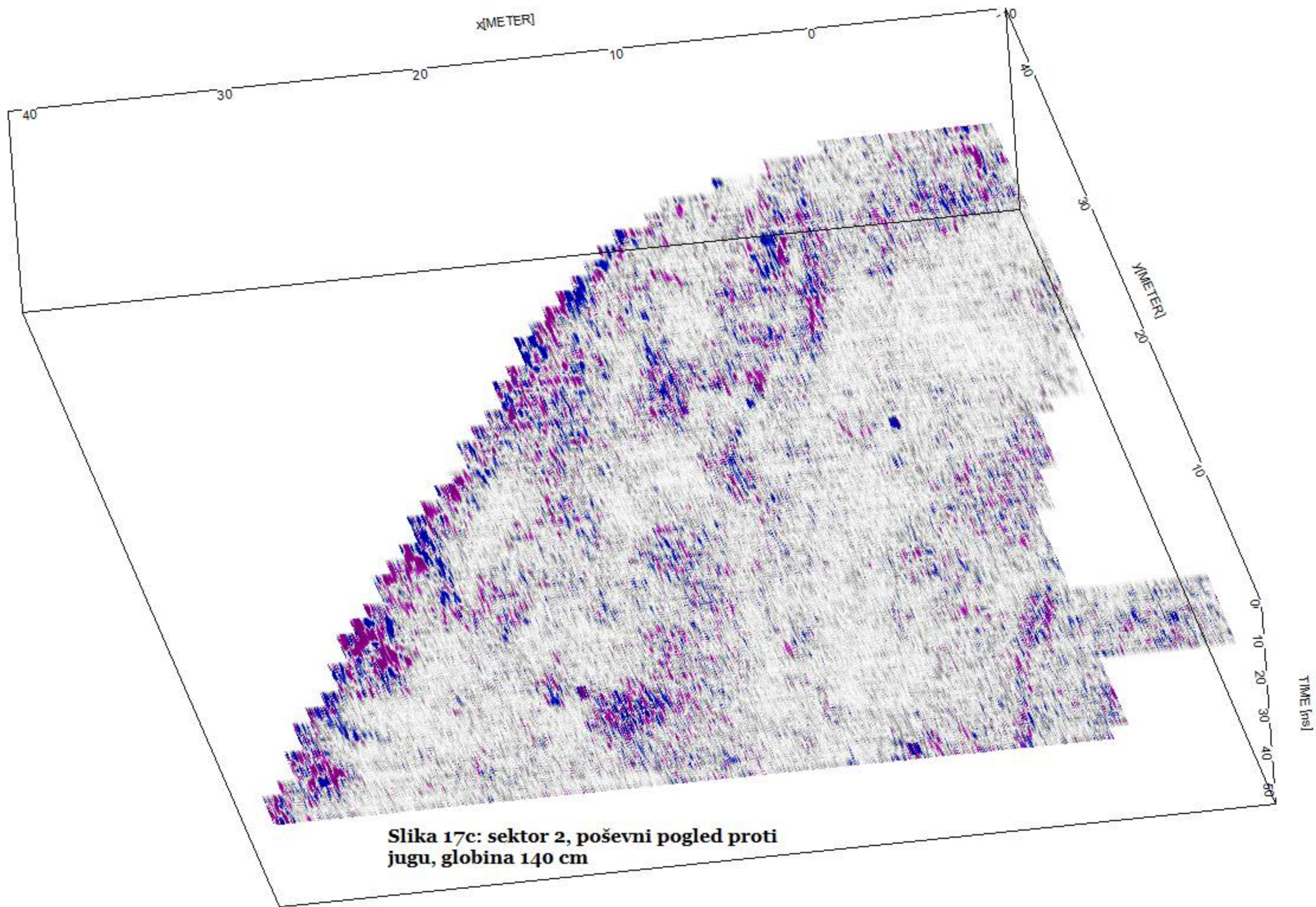
Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

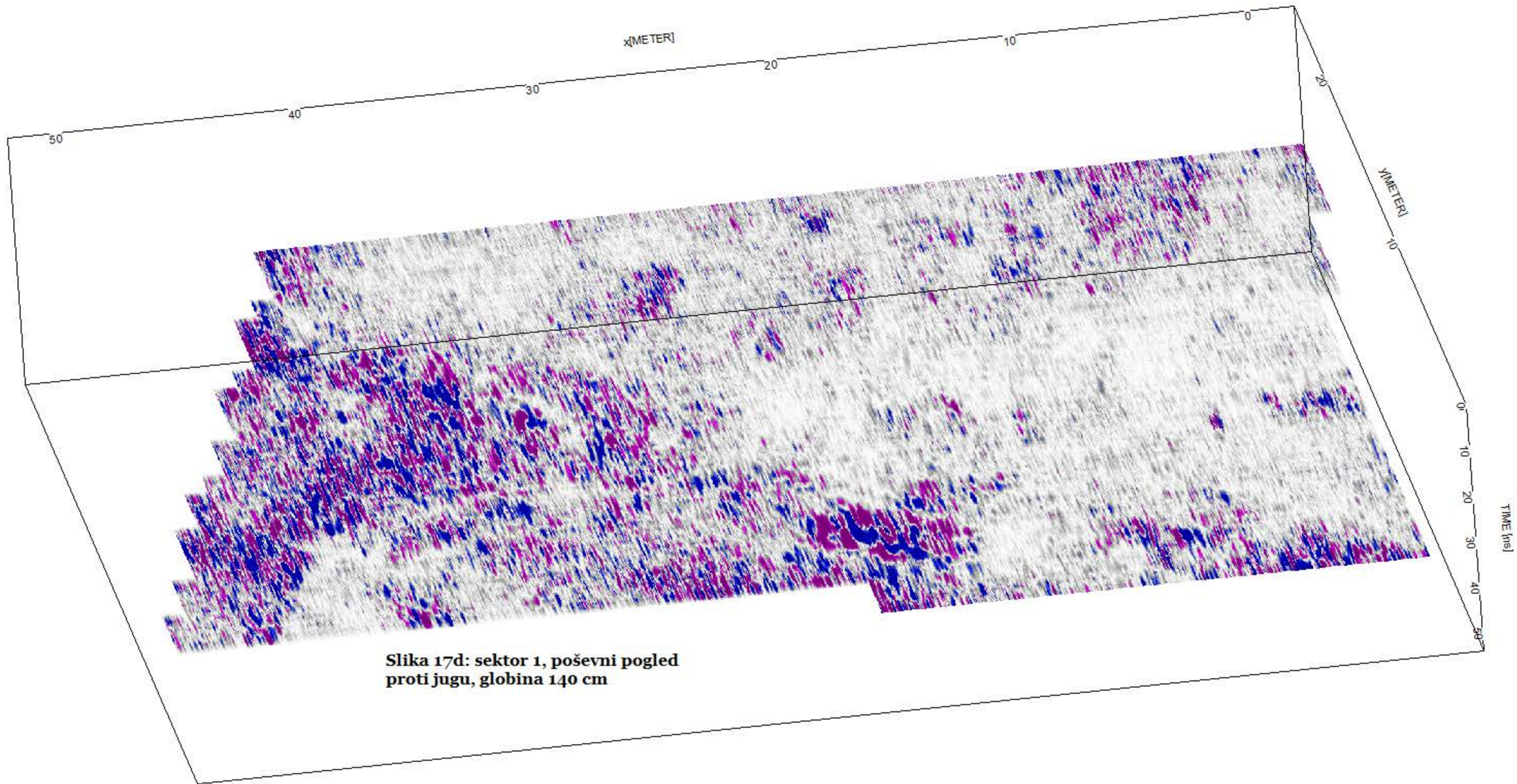
maj 2019

arhe,





Slika 17c: sektor 2, poševni pogled proti jugu, globina 140 cm



Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

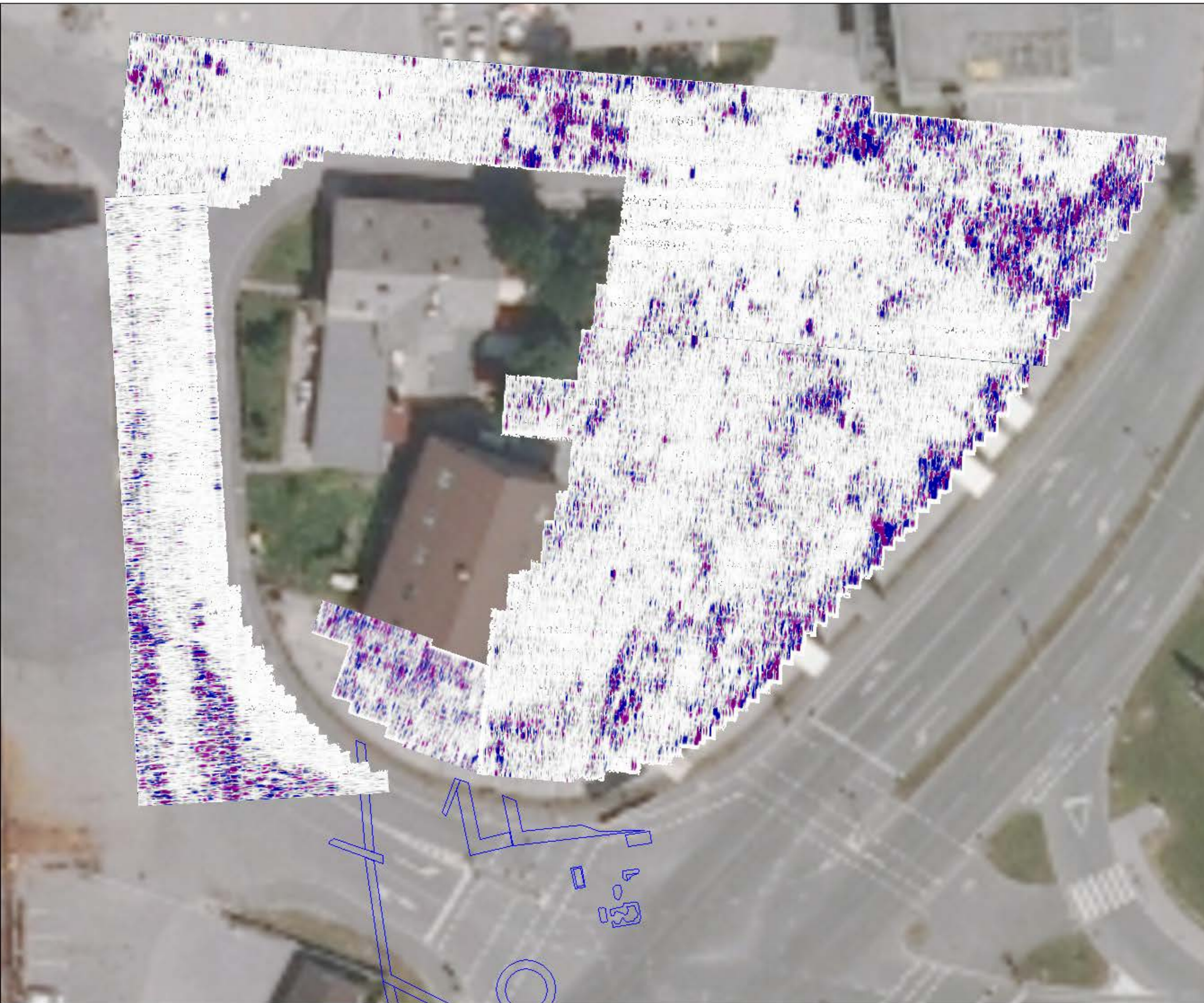
Slika 18a: horizontalni
rez na globini približno
160 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,




Georadarska raziskava


Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

 zidovi, temelji

 infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)

 linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije

 neopredeljeni linearni
radarski odzivi

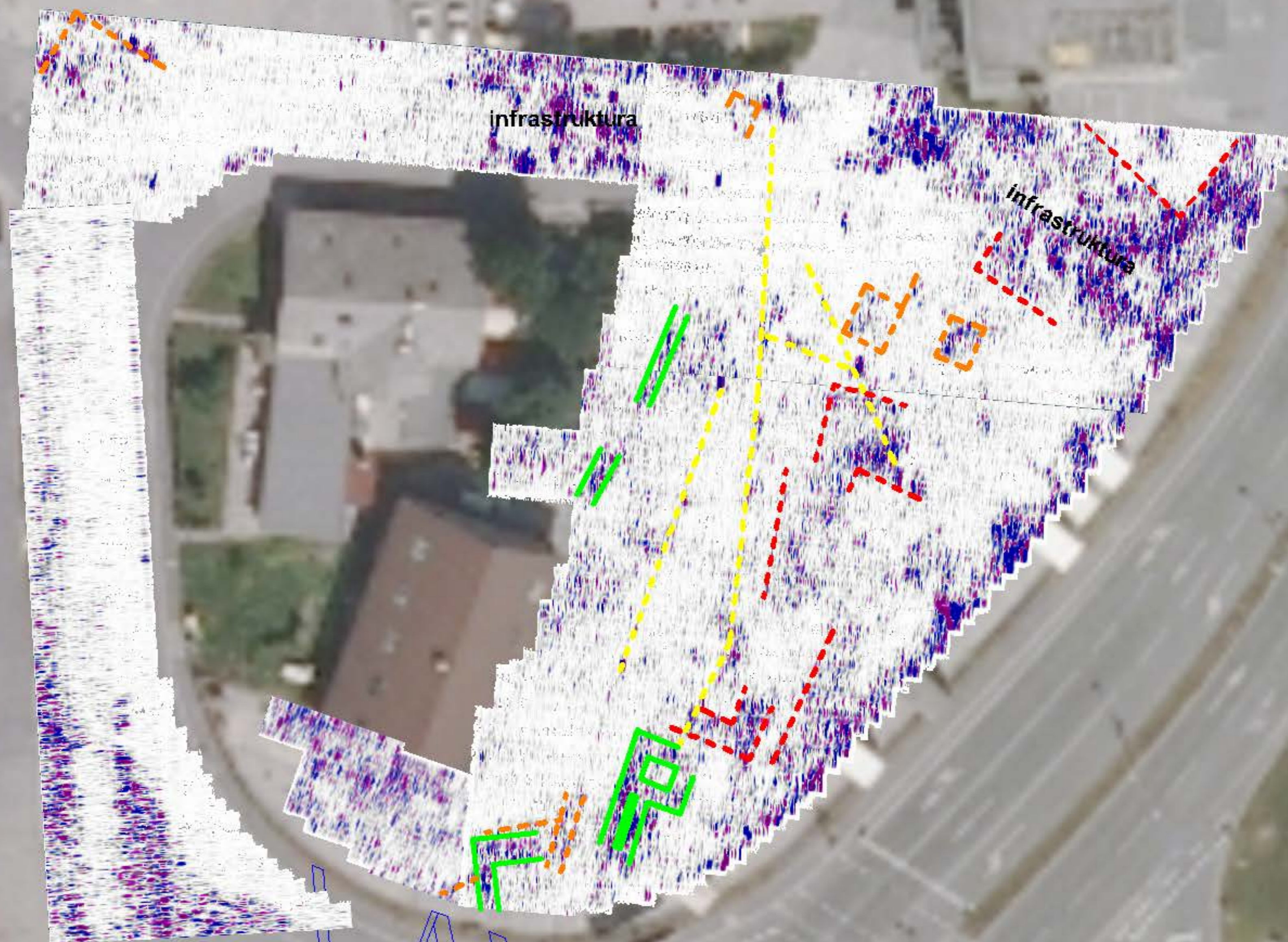
Slika 18b: horizontalni
rez na globini približno
160 cm

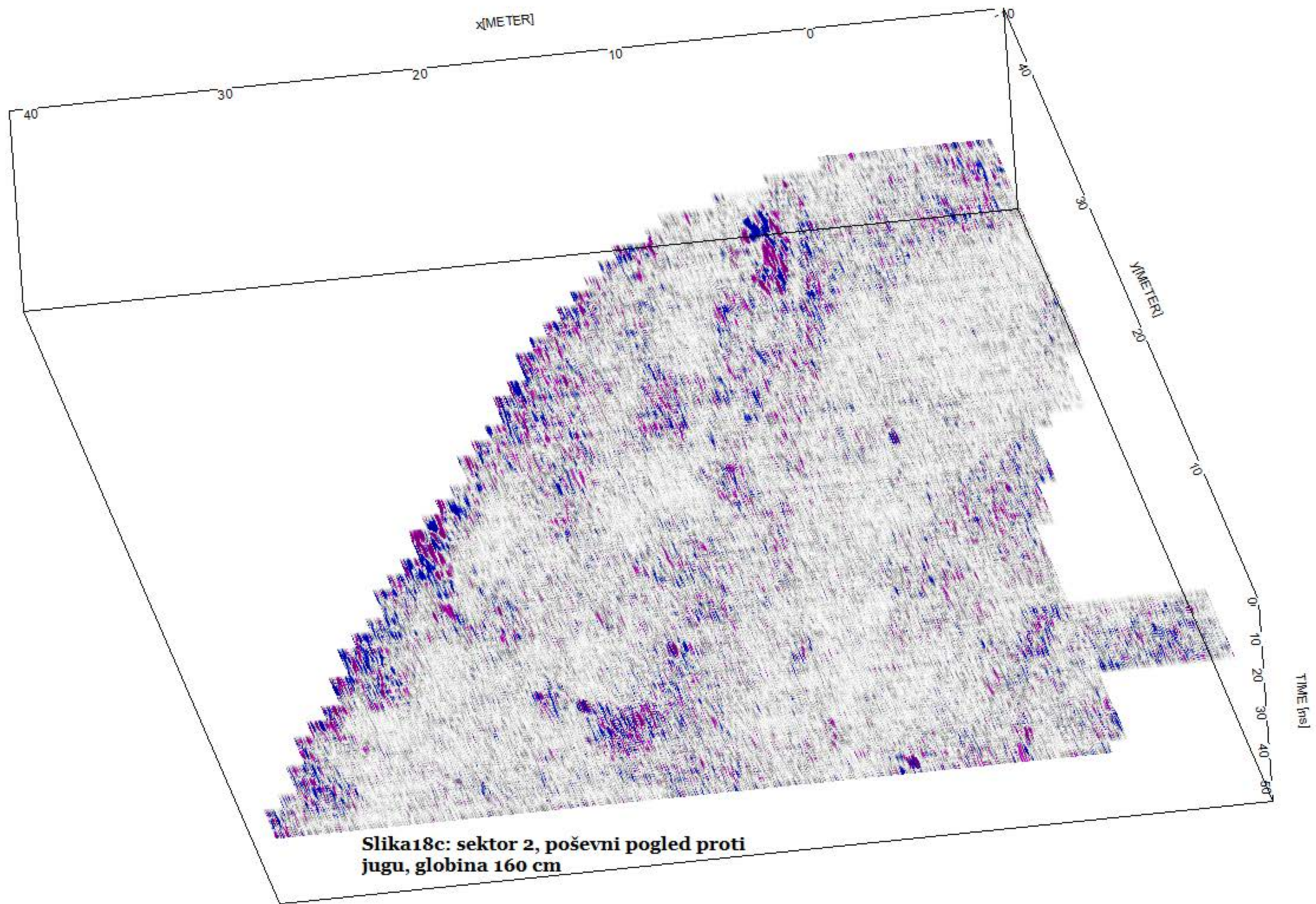
Podlaga: DOF ©GURS

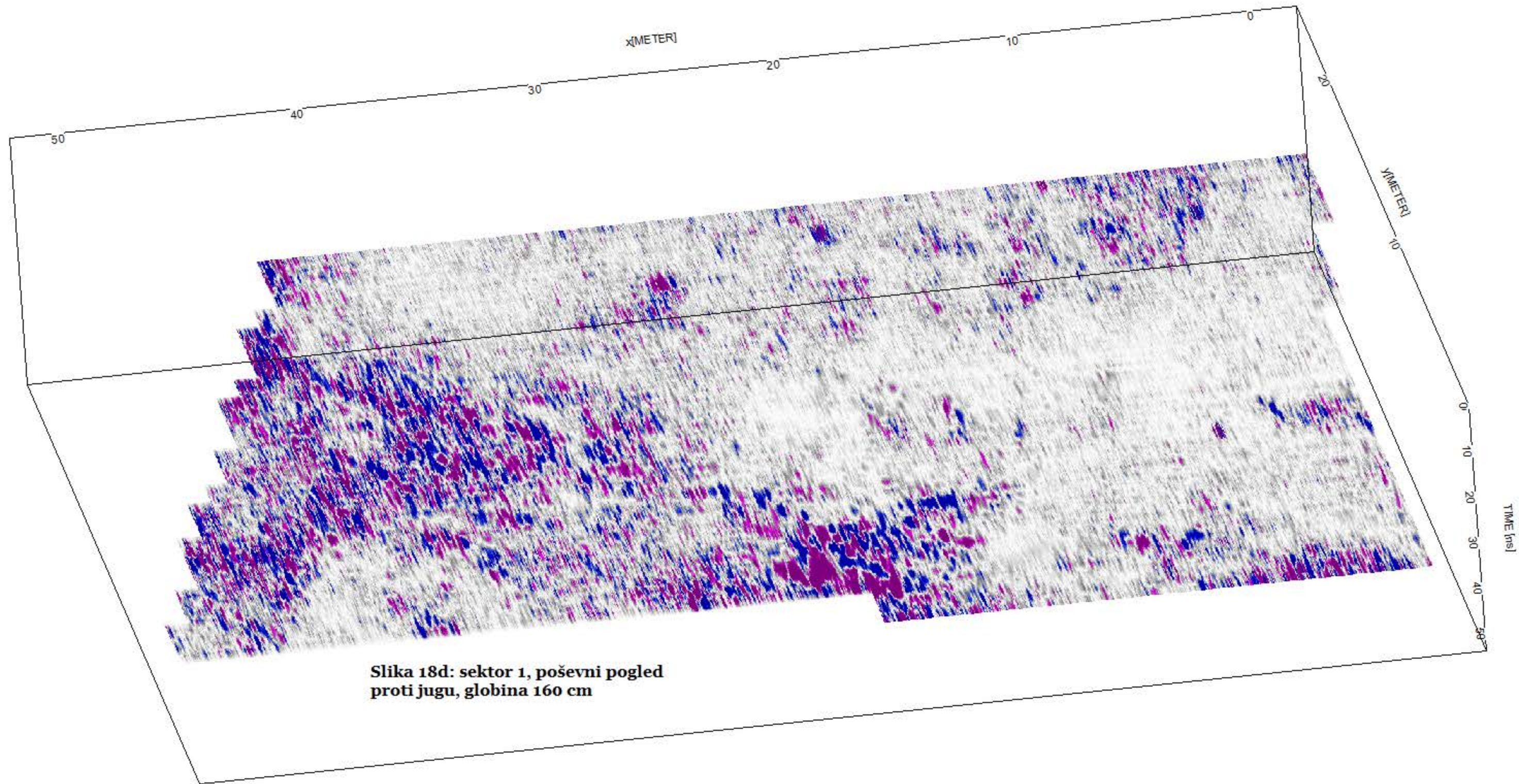
0 5 20m


maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

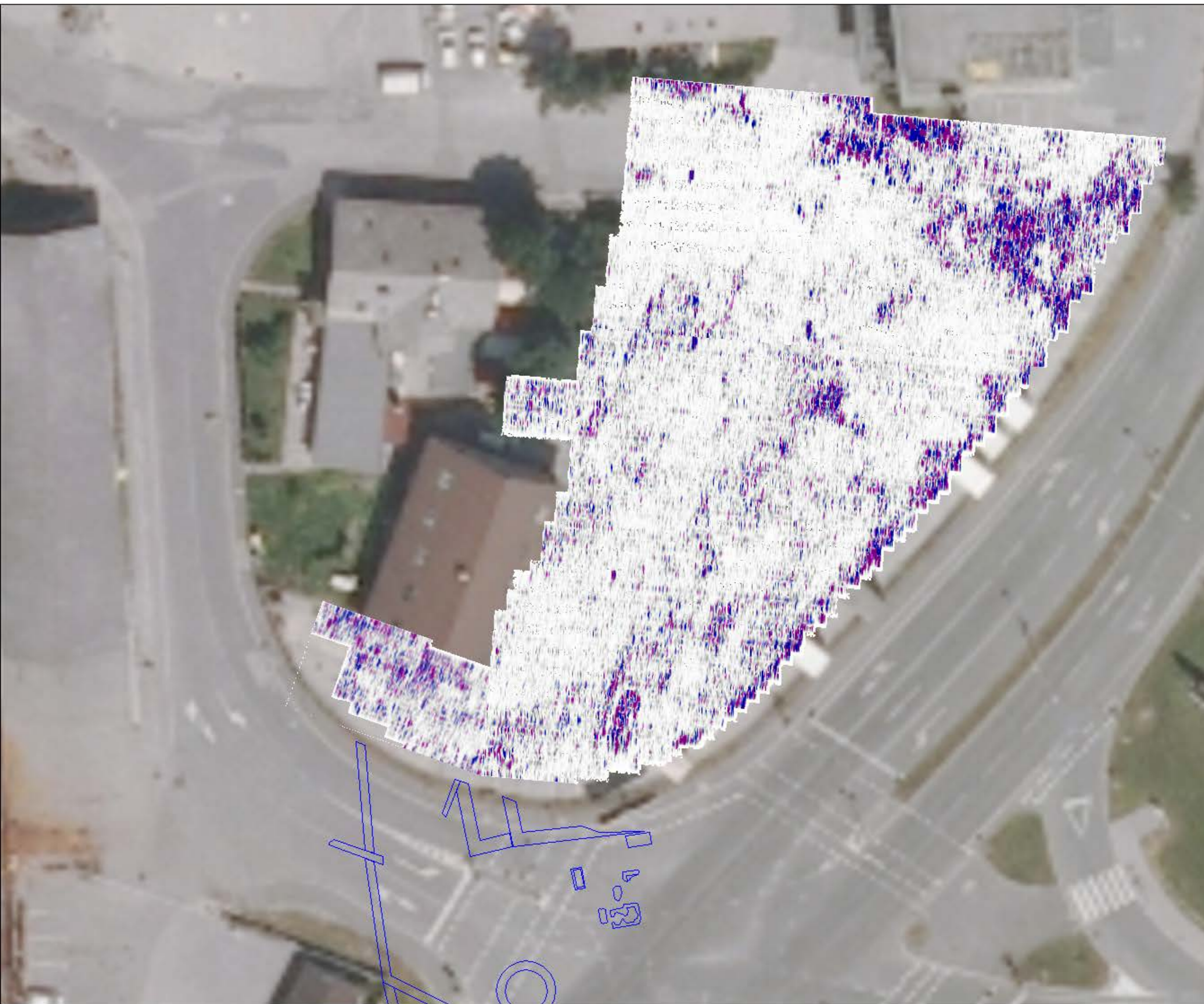
Slika 19a: horizontalni
rez na globini približno
180 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,







Georadarska raziskava

Kranj-Nekropola ob
Savi (EŠD 5541)

Naročnik:
KOLODVOR d.o.o.
Kolodvorska cesta 4
4000 Kranj

LEGENDA

-  zidovi, temelji
-  infrastruktura?
(neidentificirana v katastru)
-  linearni rob spremembe
odzivnosti tal na EM
valove - brez dodatne
interpretacije
-  neopredeljeni linearni
radarski odzivi

Slika 19b: horizontalni
rez na globini približno
180 cm

Podlaga: DOF ©GURS

0 5 20m

maj 2019

arhe,

Priloga 2: Georadarska metoda

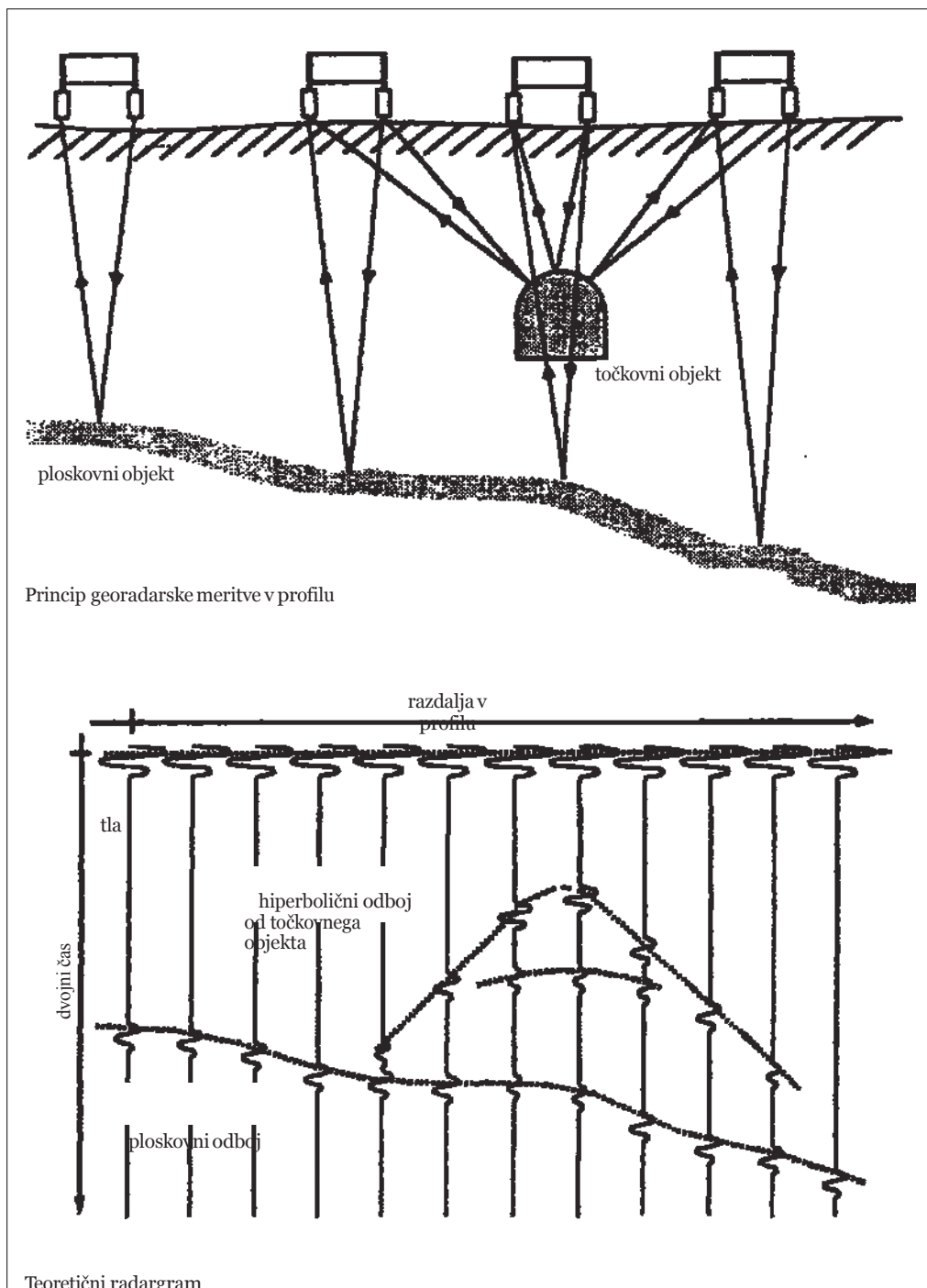
RADAR je akronim, skovan leta 1934 iz angleškega izraza *Radio Detection And Ranging*. Georadar je že uveljavljen izraz v slovenski strokovni javnosti in opisuje elektromagnetno napravo, s katero preiskujemo različne naravne in tudi nekatere umetne agregate. V angleškem jeziku je zanj bolj uveljavljen izraz *ground penetrating radar* (GPR), zasledimo pa tudi sinonime, kot so *ground probing radar*, *subsurface radar* in *georadar*. Prve georadarske meritve segajo že v leto 1929, in sicer prav v zvezi z ugotavljanjem debeline ledenika v Avstriji. Radarska tehnologija se je na eni strani močno razvila predvsem v letalstvu, pri preiskovanju materialov pa je bil georadar bolj ali manj pozabljen vse do poznih petdesetih let prejšnjega stoletja. Pred tem je kar nekaj letal ameriške vojske strmoglavilo, ko so skušala pristajati na Grenlandiji oziroma Antarktiki s pomočjo radarske kontrole. Radarski valovi prodrejo v led, a se odbijejo od podlage, zato so letala v slabem vremenu popolnoma zgrešila višino tal in strmoglavila na ledeno površino. Te nesreče so posredno vzbudile zanimanje za uporabo radarskih signalov za ugotavljanje sestave tal.

Do začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja je več raziskovalnih ustanov projektiralo unikatne georadarske naprave za svoje potrebe. Georadar je bil predvsem orodje za preiskovanje stalno zamrznjenih tal ter ledu. Šele leta 1972 je podjetje *Geophysical Survey Systems Inc.* tržišču ponudilo prve komercialne naprave. Tedaj se je razvoj usmeril v številna nova področja (preglednica 1). Na tržišču danes zasledimo številne ponudnike georadarske opreme, velika večina deleža pa pripada trem firmam: že omenjeni *Geophysical Survey Systems Inc.* iz ZDA, *Sensors & Software* iz Kanade in *Mala GeoScience* iz Švedske.

Preglednica 1: Glavna področja uporabnosti georadarja z nekaterimi aplikacijami.

področje	aplikacija
geologija in sorodne vede	debelina tal ali naplavin (zemljine) nad hribino, prelomi in razpoke, plastnatost, spremembe v litologiji, sedimentne teksture, nivo podtalnice, podpovršinski kraški pojavi, debelina ledu, debelina plazečega materiala ...
gradbeništvo	debelina in kvaliteta vgrajenih materialov (beton, asfalt ...), detekcija infrastrukture iz različnih materialov (na primer cevi in kabli) ...
hidrologija	globina vode, morfologija tal pod vodo, debelina sedimentov na dnu (jezera) ...
arheologija	prekrita arhitektura, zasuti izkopi (grobovi ...), prekrita infrastruktura (na primer ceste)
umetnostna zgodovina	prezidave sten, oken ali vrat, spremembe v tlorisih oziroma temeljih
varstvo okolja	detekcija prekritih odlagališč, prepojenost tal z nevarnimi snovmi ob izlitihih
forenzika	detekcija prekritih grobov

Slika 1: Temeljna teoretična načela georadarske meritve (Mala Geoscience 1999).



Georadar je nedestruktivna elektromagnetna geofizikalna metoda za raziskovanje, pregledovanje in opazovanje (prekritih) materialov. Raziskovalno orodje so elektromagnetni valovi, ki jih oddajna antena pošilja v preiskovani material. Spremenljive lastnosti materiala(ov) so razlog, da se del valovanja ob različnih nezveznostih odbije – to zajame sprejemna antena, del pa pot nadaljuje. Različne »tarče«, ki jih georadar zazna, so nezveznosti v dielektričnosti in električni prevodnosti. Georadarska kontrolna enota meri čas, v katerem je signal opravil pot od oddajne antene do tarče in nazaj do sprejemne antene. Meritve večinoma opravljamo v linijah oziroma prerezih. Ker hitrost elektromagnetnih valov v različnih materialih lahko izmerimo, metoda omogoča dvodimenzionalno sliko preiskovanega materiala. Georadar je torej zelo podoben refleksijski seizmiki, le da pri slednji uporabljamo akustične (seizmične) valove. Slika 1 shematsko prikazuje princip georadarskih meritvev.

Komponente georadarske naprave

Opis temelji na georadarski napravi *RAMAC/GPR* izdelovalca *Mala GeoScience*, vendar se tudi druge naprave bistveno ne razlikujejo od opisane. Oprema tega proizvajalca je projektirana tako, da celotno meritvev v običajnih razmerah lahko izvaja ena sama oseba. Georadarsko napravo sestavlja več elementov: kontrolna enota, elektronska enota (oddajnik in sprejemnik), antene, kableske povezave, baterije, merilec razdalje in osebni računalnik z ustrezno programsko opremo za akvizicijo.

Kontrolna enota generira visokonapetostne električne signale, ki se prek optičnih kablov prenesejo do oddajnika. Tu se signal dodatno oblikuje in okrepi, nakar prek oddajne antene prodira v preiskovani material. Frekvenca generiranja signala je 100 kHz, kar omogoča do 200 meritvev (sled) v sekundi. Ko se signal odbije od tarče, ga zajame sprejemna antena, prek sprejemne elektronske enote (sprejemnika) in optičnega kabla pa se prenese nazaj do kontrolne enote. Kontrolna enota je povezana s prenosnim računalnikom. Akvizicijski program omogoča on-line spremljanje poteka (surovih) meritvev na ekranu.

Vse našteje enote imajo lastno električno napajanje. Sistem *RAMAC/GPR* omogoča različne načine sprožanja signala. Signal lahko sprožimo prek tipkovnice ali posebnega stikala, lahko z določitvijo

časovnega intervala, največkrat pa v praksi uporabljamo merilec razdalje, ki avtomatično sproži signal na zelenem dolžinskem intervalu. Kot merilec razdalje uporabljamo merilno kolo (na ravni površini) ali merilno »vrstico«. Omogočena je tudi GPS podpora.

Pri georadarskih meritvah poznamo tri vrste anten: ločene bistatične (nezaščitene), zaščitene in antene za meritve v vrtinah. Ločene bistatične antene (oddajna in sprejemna) imajo tudi ločeni elektronski enoti. Večinoma bistatične antene uporabljamo pri nižjih frekvencah, od 200 MHz navzdol vse do 10 MHz. Gre za povsem funkcionalno omejitev, saj je dolžina 50 MHz antene (razdalja med dipoloma) že štiri metre in je praktično ni možno okviriti. Bistatične antene imajo pred okvirjenimi veliko prednost, saj lahko z njimi z različnimi metodami izmerimo hitrost elektromagnetnih valov na lokaciji. Po drugi strani pa je v nekaterih akvizicijskih okoliščinah očitna tudi njihova pomanjkljivost, saj prestrežejo več nezaželenega šuma kot zaščitene okvirjene. Okvirjene antene zaradi funkcionalnih omejitev običajno pokrivajo le frekvence od 200 MHz do nekaj GHz. Antene za meritve v vrtinah so ločene bistatične, vendar za specifične potrebe posebej oblikovane.

Frekvenčno območje, globinski doseg meritev in ločljivost

Frekvenčno območje, globinski doseg meritev in ločljivost so med seboj povezani, in sicer teoretično velja: višja frekvenca določa manjši globinski doseg in večjo ločljivost. Na doseg meritev in ločljivost seveda vplivajo še številne lastnosti preiskovanega materiala ter razmere na mestu snemanja. Na splošno pa je dušenje (izraz za pojemanje amplitude) pri nižjih frekvencah manjše, vendar je to hkrati povezano z večjo valovno dolžino, ki zmanjšuje ločljivost.

Antene so naravnane na neko centralno frekvenco, ki jo oddajajo in sprejemajo, vendar so seveda dovzetne za cel frekvenčni pas ob centralni frekvenci. Antene, ki so dostopne na tržišču, imajo večinoma frekvenčno širino dve oktavi, to pomeni, da frekvenčno območje zajema od polkratnika do dvakratnika centralne frekvence. Za 500 MHz anteno pomeni, da sprejema (oddaja) signal v frekvenčnem obsegu 250 do 1000 MHz.

Ločljivost je po Rayleighovem kriteriju velikostna kategorija, s katero opredeljujemo zmožnost ločevanja dveh bližnjih oblik, preden za opazovalca postaneta ena oblika. V prvi vrsti jo opredeljuje centralna frekvenca antene, hkrati pa nanjo močno vpliva relativna dielektrična konstanta oziroma dielektričnost materiala, v katerem izvajamo meritve. Valovna dolžina elektromagnetnih valov 500 MHz antene je v zraku 0,6 m. V materialu z relativno dielektrično konstanto 15 se ta zmanjša na 0,15 m. Valovna dolžina pa neposredno določa ločljivost. Nasploh je pojmovanje ločljivosti povezano z vprašanjem, ali želimo najti tridimenzionalni objekt, ali le ploskev ali pa morda le infrastrukturni kabel ali plastično cev. Da bi izločili tridimenzionalni objekt, na primer plast s spodnjo in zgornjo mejo, mora biti ta debelejša od četrte valovne dolžine ($\lambda/4$). To je primer vertikalne ločljivosti. Obstaja modelni diagram vertikalne ločljivosti v odvisnosti od frekvence (Davis, Annan 1989; Brezigar, Tomšič, Štern, Rašković 1996).

Horizontalna ločljivost je definirana s prvim Frenselovim območjem (na primer Sigurdsson 1995). Premer tega območja ($r_f \approx \sqrt{\lambda Z : 2}$) približno določa horizontalno ločljivost (r_f je polmer prvega Frenselovega območja, λ je valovna dolžina, Z pa globina tarče). Če je tarča približno enako velika ali večja kot prvo Frenselovo območje, je na radargramu korektno prikazana. Če pa je manjša ali celo bistveno manjša, se na radargramu pojavijo difrakcijski vzorci, ki popačijo dejansko sliko tarče na radargramu. Horizontalne ločljivosti torej ne smemo enačiti z zmožnostjo detekcije. Horizontalna ločljivost torej upada z globino tarče. V zgornji modelni formuli pa ni zajet vpliv dielektrične konstante, ki v naravnih razmerah prav tako vpliva na površino prvega Frenselovega območja.

Nizkofrekvenčne antene generirajo elektromagnetno energijo z večjo valovno dolžino. Ti imajo v določenih pogojih sposobnost globoke penetracije. Led je medij, ki izrazito dobro prevaja radarsko energijo, na Antarktiki so z georadarskimi meritvami določevali debelino ledu, ki marsikje presega 3 km. Na enak način so odkrili številna jezera pod antarktičnim ledom. Glede na naše izkušnje dajejo georadarske meritve na apnencih s 100 MHz antenami zelo dobre rezultate tudi na globini do 20 m. Po drugi strani pa je doseg 800 MHz antene v običajnih tleh (zemljini) manj kot meter. Hkrati pa je ločljivost v takih razmerah zelo velika, georadar s takimi antenami lahko »vidi« (izloči) plast debelo le nekaj cm. Pri kovinskih predmetih, na primer kovinski žici, pa loči tudi takšno, ki ni debelejša od nekaj mm.

Elektromagnetne lastnosti materialov in dušenje elektromagnetnih valov

Globina dosega elektromagnetnih valov, njihova hitrost in amplituda v različnih materialih je poleg izbire anten odvisna tudi od lastnosti materiala, skozi katerega penetrirajo. Nanje vplivajo poroznost, zrnatost, orientiranost zrn, namočenost in prisotnost soli, mineralna sestava in druge lastnosti. Ti parametri vplivajo na elektromagnetne lastnosti materialov. Za nas je najbolj pomembna dielektričnost, to je lastnost (konstanta), ki določa gostoto električnega polja v materialu glede na električno polje v vakuumu. Prsti ali kamnine, ki so visoko »dielektrične«, prepuščajo elektromagnetno energijo, ne da bi se ta razpršila. Višja dielektričnost določa manjšo hitrost elektromagnetnih valov. Večja je razlika v dielektričnosti materialov, ki jih preiskujemo, bolj izrazit je odboj elektromagnetnih valov, ki se generirajo na stiku. Če se dielektričnost spreminja postopoma z globino in je razlika v dielektričnosti na kratkih razdaljah majhna, dobimo le šibke odboje ali pa sploh ne.

Na prehod radarskih valov skozi material med fizikalnimi lastnostmi vplivata še električna prevodnost in magnetna prepustnost. Magnetna prepustnost je merilo sposobnosti materiala postati magneten, če je izpostavljen elektromagnetnemu polju. Večja je magnetna prepustnost, bolj se bo elektromagnetni signal oslabil med prehodom skozi material. Tla, ki vsebujejo večje količine železovih oksidov in hidroksidov, imajo visoko magnetno prepustnost in zato so slab prevodnik radarske energije. Električna prevodnost je merilo sposobnosti materiala, da prevaja električni tok. Če ima material visoko električno prevodnost, se bo elektromagnetna energija pri prehodu skozenj močno oslabila. Pri visoko prevodnem materialu se električna komponenta elektromagnetne energije v glavnem prenaša stran in se tako izgubi. Če se izgubi ena komponenta, elektromagnetno polje izgine. Visoko prevodni materiali so na primer tisti, ki so prepojeni s slano vodo (ali drugim elektrolitom) in tisti z veliko količino glinaste komponente. V določenih razmerah radarski valovi ne prodrejo globlje kot meter ne glede na frekvenco.

Oblika georadarskega signala

Številni uporabniki menijo, da radarska energija prodira iz antene v globino v obliki kot igla tankega curka. Dejstvo je seveda drugačno. Vse georadarske naprave, ki jih lahko dobimo na tržišču, oddajajo energijo v tla v obliki, podobni eliptičnemu stožcu.

Antena (zaščiten ali nezaščiten), položena na tla, ustvari tako imenovani talni spoj (*ground coupling*). Talni spoj je zmožnost elektromagnetnega polja, da se bolj usmeri v tla kot v zrak. Višja je dielektričnost površinskega materiala, manjša je hitrost elektromagnetnih valov in ožji je snop eliptičnega stožca. Eliptični stožec se širi počasneje, če si v globino sledijo plasti z vedno večjo dielektričnostjo.

Preglednica 2: Dielektrična konstanta, hitrosti radarskih valov in njihovo dušenje v različnih materialih. Posamezne vrednosti so za različne materiale navedene v intervalnih vrednostih, ker nanje vplivajo številni specifični dejavniki. V praksi imata na širino intervala največji vpliv stopnja nasičenosti z vodo in kemična sestava te vode (Davis, Annan 1989; RAMAC/GPR Operating Manual 1999; Sigurdsson 1995).

material	dielektrična konstanta	prevodnos t (mS/m)	hitrost EM valov(m/ns)	dušenje (dB/m)
zrak	1	0	0,3	0
sladka voda	80	0,01–30	0,03	0,1–20
morska voda	81–88	30.000	0,01	100–1000
led	3–4	0,01	0,15–0,17	0,01
permafrost	4–8		0,10–15	
pesek, suh	3–5	0,01	0,10–,15	0,01–5
pesek, namočen	20–30	0,03–0,3	0,05–,08	0,03–0,3
melj	3–30	1–100	0,06–0,100	1–100
glina	4–40	1–300	0,07–0,15	4–800
premog	4–5		0,13–0,15	
apnenec	4–16	0,4–1	0,07–0,11	0,5–20
dolomit	6–8		0,09–0,12	
skrilavec, glinovec	5–15	1–100	0,07–0,13	1–100
granit	5–15	0,01–1	0,11–13	0,04–2
kvarcit	4		0,15	
beton	4–10		0,09–0,15	
asfalt	3–5		0,13–,17	

Če je dielektričnost plasti v podlagi vedno manjša, je stožec že pri majhnih globinah lahko dokaj širok. Lom elektromagnetnih valov v plasteh z različno dielektričnostjo je zato izredno pomemben in določa kvaliteto meritev. Velikost eliptičnega prereza, ki ga imenujemo tudi tipalo ali stopalo, lahko približno ocenimo z naslednjo formulo (Conyers, Goodman, 1997, Annan, Cosway 1992):

$$R \approx (\lambda : 4) + (Z : \sqrt{K + 1}),$$

kjer je R daljša polos elipse, λ valovna dolžina elektromagnetnih valov v materialu, Z globina tarče oziroma eliptičnega prereza in K dielektrična konstanta materiala.

Tipalo georadarja torej nima oblike igle temveč obliko eliptičnega stožca, v preseku elipse, imenujemo ga tudi stopalo. Tako georadar ne »vidi« oziroma ne snema le neposredno pod anteno, ampak tudi pred in za njo ter ob njej. Velikost preseka stopala je odvisna od globine preiskovanega horizonta, snemalne frekvence in elektromagnetnih lastnosti materiala.

Šum

Šum pri georadarskih meritvah predstavljajo različne komunikacijske naprave, ki uporabljajo elektromagnetne valove: radio, televizija, mobilna telefonija in druge. Pri delu ob teh aparatih lahko pride do interference med napravo in georadarjem. Večina teh naprav uporablja ozek pas frekvenčnega območja, tako da lahko ta šum pri obdelavi naknadno izločimo, vendar je bolj priporočljivo, da se mu, če je možno, izognemo že pri akviziciji. Večja težava je v bližini stacionarnih anten, letališč in podobno. Pri nezaščitenih antenah moramo upoštevati še

objekte na mestih georadarskih meritev: drevje, zgradbe, zračne vode in podobno. Večino teh шумov moramo na terenu najprej natančno evidentirati, da nas pri interpretaciji ne zavajajo. Lažne odboje dobimo tudi pri snemanju v zaprtih prostorih, na primer rudnikih ali predorih. Georadarsko snemanje z nezaščitenimi antenami je močno omejeno v gozdu z gostimi krošnjami.

Posebno vrsto šuma predstavljajo tudi vsi objekti v tleh, ki niso tarča našega zanimanja, pa jih georadar zazna. Pri interpretaciji nas ti objekti lahko zmotijo. Proti takemu šumu se praktično ne moremo zavarovati, lahko le izberemo antene, za katere menimo, da bodo objekt, ki ga želimo poiskati, najbolj kvalitetno izločile.

Faktor učinka naprave RAMAC/GPR je 150 dB in več. To jo glede na dostopno literaturo (Davis, Annan 1989) uvršča v zgornji kakovostni razred dostopnih georadarskih naprav. Davis in Annan (1989) sta konstruirala modelni diagram vpliva kvalitete georadarske naprave na globinski doseg v odvisnosti od dušenja (glej tudi Brezigar, Tomšič, Štern, Rašković 1996).

(Tomaž Verbič)