

Prepoznavanje in interpretacija plitvih mikroreliefnih oblik v apnenčevi podlagi s pomočjo georadarske metode na primeru El Caba v Dominikanski republiki

Recognition and Interpretation of Shallow Microrelief Features in Limestone Bedrock Using the Ground Penetrating Radar Method, the case of El Cabo, Dominican Republic

© David Medica

medicadavid@gmail.com

© Branko Mušič

Gearh d.o.o, brankomusic1@yahoo.com

© Alice Samson

Leiden University, Faculty of Archaeology, Caribbean Research Group, a.v.m.samson@arch.leidenuniv.nl

Izvleček: Cilj geofizikalne raziskave je identifikacija plitvih, mikroreliefnih oblik v apnenčevi podlagi za potrebe arheološke prospekcije z analizo georadarskih odbojev. Majhne negativne arheološke oblike v apnenčevi podlagi (npr. jame za sohe) veljajo še vedno za zelo težak, če ne nerešljiv problem za geofizikalno metodo. Šibka kontrastnost majhnih negativnih ciljnih objektov je pogosto zastrta za več velikostnih redov močnejšimi signali morfološko razgibanega površja nehomogenega, pogosto tanko plastnatega apnenca z subvertikalnimi vpadi in raznimi oblikami zakrsevanja. Kot ključni primer so uporabljeni podatki georadarskih meritev na arheološkem najdišču El Cabo v Dominikanski Republiki, kjer potekajo od leta 2005 arheološke raziskave nekdanje naselbine Taino Indijancev. Z identičnimi prazgodovinskimi naselbinskimi ostanki v apnenčevi podlagi se srečujemo tudi povsod na Krasu. V članku je poudarek na analizi georadarskih profilov, izmerjenih z visoko ločljivostno 900 MHz anteno. Izračunane radarske odboje za reprezentativne 2D modele smo uporabili za primerjavo z izmerjenimi radarskimi odboji. Podajamo nekaj pomembnih in v marsičem pionirskih izsledkov analize rezultatov georadarske raziskave visoke ločljivosti, ki nekoliko odstirajo zapleteno pot do arheološko pomenljivih rezultatov. Pomemben prispevek za arheološko prospekcijo je pristop z definiranjem georadarskih ploskev in facij.

Ključne besede: arheološka prospekcija, geofizikalna raziskava, georadarska metoda, magnetna metoda, Taino Indijanci, Dominikanska republika, predkolumbovska arheologija

Abstract: The basic intention of geophysical survey is the identification of shallow, micromorphological features in limestone bedrock for archaeological prospection with analysis of Ground Penetrating Radar echoes. Small negative archaeological features in limestone bedrock (post holes) are still considered as a very difficult or unsolvable problem for the geophysical method. Weak contrasts of small negative targeted objects are often curtailed by several magnitude order stronger signals received from the morphologically variable surface of non-homogenous, frequently thinly bedded limestone with sub vertical inclination and different karstic features. As a key study, GPR results were used from the Taino settlement in El Cabo, Dominican Republic, where archaeological research has been conducted since 2005. Identical prehistoric archaeological settlement remains can be encountered also everywhere in Karst regions. In the article the accent is placed on analysis of GPR profiles attained by high a resolution 900 MHz antenna. Calculated GPR echoes for representative 2D models were used for correlation with measured GPR echoes. This article gives some important, and in several points pioneering results on high resolution ground penetrating radar survey, which unveils to some extent the complicated path to archaeologically significant results. An important contribution for archaeological prospection is the approach with defining GPR planes and facies.

Keywords: archaeological prospection, geophysical research, ground penetrating radar, magnetic method, Taino Indians, Dominican Republic, pre-Columbian archaeology

1. Uvod

Veliki Antili so bili ena od najgostejše naseljenih in socialno zapletenih regij novega sveta, ko je tja stopil Krištof Kolumb leta 1492. Za ljudstvo Taino, ki je naseljevalo Bahame, Velike in Male Antile, naj bi bil usoden stik z zahodnim svetom, kar jih je privedlo do izumrtja konec 16. stoletja. Multidisciplinarni projekt, ki se ukvarja z življenjem Taino Indijancev med pozno keramično dobo (1000-1492 n.š.) na vzhodni obali Dominikanske repu-

blike, vodita prof. dr. Corrine Hoffman in prof. dr. Menno Hoffman z Univerze v Leidnu (Nizozemska). Projekt je usmerjen v zbiranje podatkov o socialni organizaciji Taino indijancev, ki je z izjemo zgodnjih zgodovinskih spisov, prvi na območju Velikih Antilov.

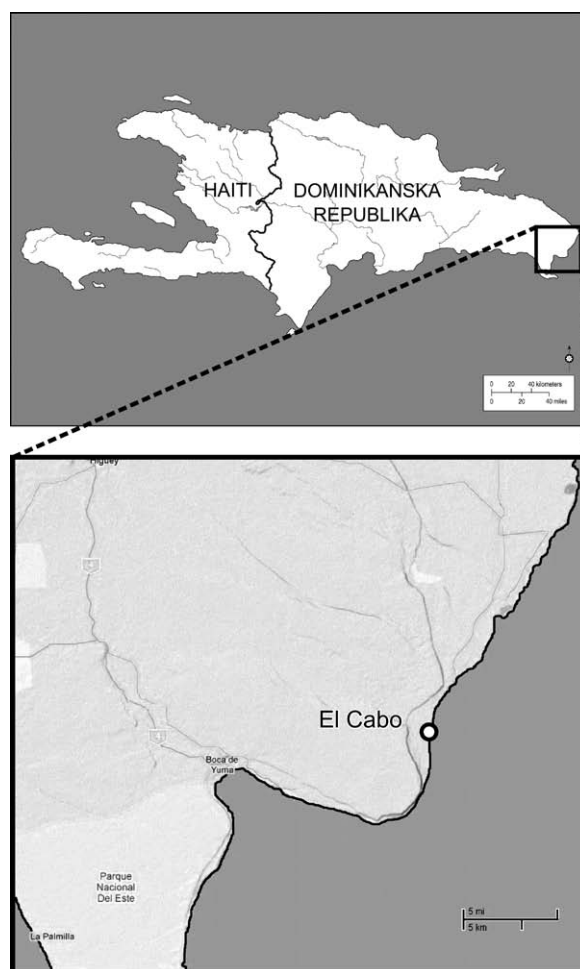
Etnoarheološke raziskave potekajo v okviru več projektov: *Houses for the living and the dead. Organisation of settlement space and residence rules among the Taino, the indigenous people of the Caribbean encountered*

by Columbus), ki ga financira Nizozemska fundacija za znanstveno raziskovanje (*Netherlands Foundation for Scientific Research (NWO)*), je povezan s širšim Evropskim projektom *Living and dying in a Taíno community, The interplay of quotidian and ritual behaviours in the pre-Columbian Dominican Republic*, ki ga vodi mednarodna skupina raziskovalcev iz Fakultete za arheologijo Univerze v Leidnu (dr. M.L.P. Hoogland in dr. C. L. Hoffman); Inštitut za arheologijo, University College London (Dr. J.R. Oliver); in CNRS (Centre National de Recherche Scientifique)/UMR des Amériques, Univerze v Parizu X-Nanterre (Dr. S. Rostain) v sodelovanju z Museo del Hombre Dominicano, Universidad Autónoma de Santo Domingo in Fundacijo García Arévalo, vsi iz Santo Dominga.

Taino Indijanci so živeli v majhnih izoliranih naselbinah, kot tudi velikih, gosto naseljenih vaseh z več deset do več sto hišami (Hoffman et al. 2006). Na območju El Caba (slika 1) so izkopavanja razkrila sledi dveh faz poselitve Anadel in Boca Chica, datiranih približno od leta 600 do leta 1400 našega štetja. Veliko število jam za sohe, ki so jih odkrili v El Cabu leta 2005, nakazuje gosto poselitev na tem območju. Raznoliki artefakti pričajo o širokem spektru dejavnosti, povezanih z obrtjo in trgovanjem z dobrinami, kar kaže na regionalni ter tudi širši pomen naselbine (Hoffman et al. 2006).

Geofizikalne raziskave prvotno sicer niso bile predvidene, vendar so bili nosilci projekta po prvi sezoni raziskav v letu 2005, ko je bil ocenjen potencial najdišča, pripravljeni uvesti geofizikalne metode na celotni površini nekdanje naselbine Taino Indijancev pri El Cabu. Prva geofizikalna raziskava v letu 2006 je bila izvedena na povabilo voditeljice projekta »*Houses of living and dead*« prof. dr. Corrine Hoffman z Oddelka za Karibsko arheologijo Univerze v Leidnu (Nizozemska). Drugo sezono geofizikalnih raziskav v letu 2007 je v celoti finančno podprla institucija National Geographic Society v okviru projekta *Reading the features: A geophysical (re)construction of Taíno house structures at El Caba, Dominican Republic*. V tem prispevku povzemamo pomembnejše ugotovitve diplomske naloge Davida Medice zagovarjane na Oddelku za geologijo, NTF pod mentorstvom izr. prof. dr. Andreja Gosarja in somentorstvom doc. dr. Branka Mušiča, ki je bila usmerjena v vrednotenje rezultatov georadarske metode. Meritve na najdišču El Caba so opravili Igor Medarič, Matjaž Mori in Uroš Kirn.

V nadaljevanju članka se zaradi lažje berljivosti uporablja namesto izraza jama(e) za sohe, ki je pravilen izraz za ciljne objekte te geofizikalne raziskave, izraz stojka(e). V tem primeru ga uporabljamo kot sinonim za pokončni valj, ki je geometrijski približek jamam za sohe.



Slika 1. Geografski položaj najdišča El Caba na vzhodu Dominikanske republike (Vir: Splet 1).

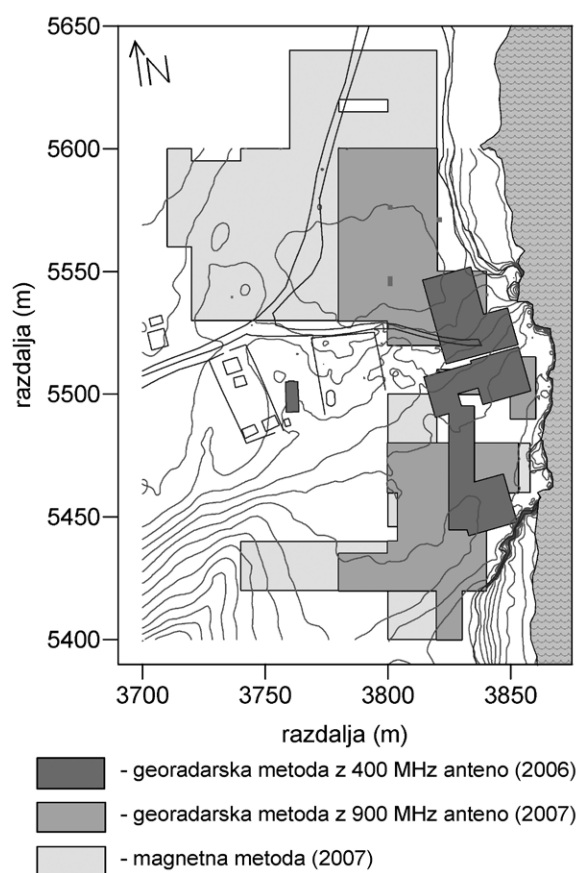
Figure 1. Situation map of the archaeological site of El Caba in the most eastern part of the Dominican Republic (Source: Web 1).

Cilji geofizikalnih raziskav:

- Prepoznavnost posameznih stolk v apnenčevi in peščeni podlagi: geometrija, velikost in razlike v odzivnosti med apnenčevo in peščeno podlago.
- Definiranje območij z anomalijami, ki so lahko učinek gruče stolk. Z izkopavanj je namreč znano, da se stojke zaradi relativno dolge stavbne zgodovine posameznih objektov pojavljajo v gručah različno velikih stolk, ki so posledica reorganizacije in popravljanj oz. vzdrževanja in dodatnega utrjevanja hiš.
- Kartiranje morfološko razgibanih apnenčevih površin in jih ločiti od tistih, ki so relativno izravnane. Glede na naravno razgiban mikorelief površine apnenca je verjetno, da so Taino Indianci določene površine znotraj naselbine zaradi posebne rabe izravnali. To lahko predstavlja poleg stolk drugi spekter anomalij, ki jih lahko uvrstimo med naselbinske oblike.
- Površinske najdbe na El Cabu kažejo na obstoj površin z zavrženim materialom (*midden deposits*) iz časa poselitve Taino Idijancev. Sprašujemo se, ali je mogoče te plasti z odpadki prepoznati na rezultatih geofizikalne raziskave.
- Ugotavljanje odnosa med rezultati geofizikalnih raziskav, terenskega pregleda, jedri vrtin, testnimi sondami in večjimi izkopnimi polji.
- Eno od ključnih vprašanj je tudi zanesljivost določanja robov naselbine. To je aktualno vprašanje zaščite naselbin Taino Idijancev pred neusmiljenimi pritiski današnjih lastnikov zemlje, ki gradijo nove in širijo obstoječe turistične kapacitete vzdolž obale, ki so jo naseljevali Taino Idijanci.
- Pomembno je tudi ločevanja plastnatega od masivnega apnenca, ker je verjetno, da so nekdanji prebivalci pri gradnji hiš, zaradi različnih mehanskih lastnosti, favorizirali katerega od teh dveh različkov apnenca.

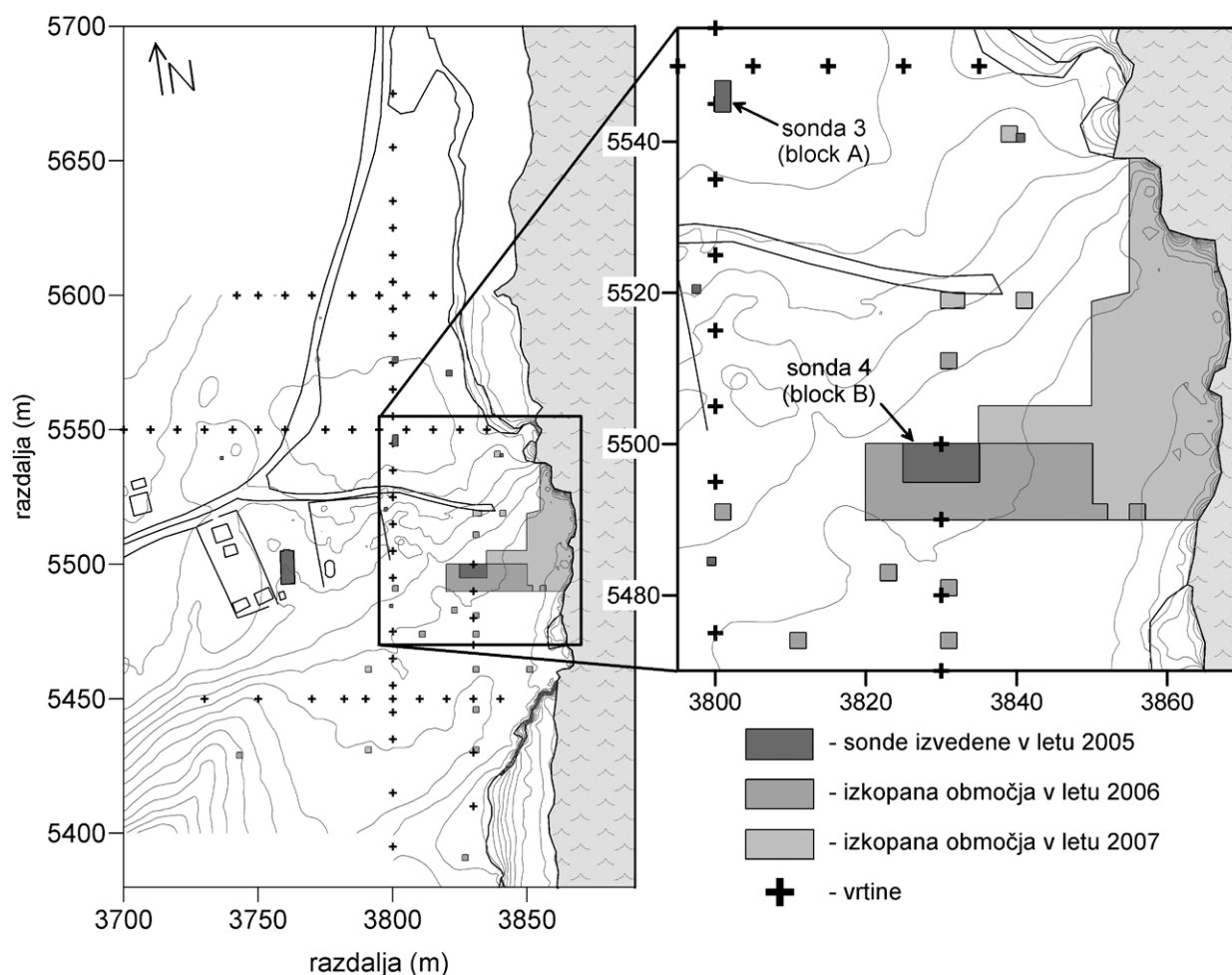
Posebnosti naravnega okolja in vrsta arheoloških ostankov (izključno negativne oblike) predstavljajo zelo zahtevno izhodišče za načrtovanje učinkovite geofizikalne raziskave. Ker so v literaturi dostopne primerljive raziskave izredno redke (glej npr. Pincusa et al. 2004, Whiting et al. 2001), smo se odločili za kombinacijo georadarske metode z 400 in 900 MHz antenama ter magnetno metodo s cezijevim magnetometrom. Izbira je bila smiselna, ker gre za kombinacijo dveh v fizikalnem smislu neodvisnih metod z visoko ločljivostjo.

Preverjanje ustreznosti geofizikalnih metod za prepoznavanje in kartiranje negativnih struktur na najdišču El Cabo je potekalo 14 dni v aprilu in maju leta 2006. Opravljene so bile magnetne (Geometrics G-858) in georadarske raziskave (GSSI SIR3000, 400 MHz antena) na površini 4000 m² (slika 2). Meritev je potekala po vzporednih profilih z medsebojno oddaljenostjo 25 cm. V letu 2007 pa so potekale meritve na obsežnejšem območju v skupni površini 17.543 m². Georadarske meritve so bile izvedene z 900 MHz anteno, magnetne meritve pa z istim cezijevim magnetometrom, kot že leto prej (slika 2). V tem članku podajamo izbrane rezultate georadarske metode, ki so podprti z rezultati magnetne metode objavljeni drugje (Mušič et al. 2010).



Slika 2. Območja na najdišču El Cabo, raziskana z georadarsko in magnetno metodo v letih 2006 in 2007.

Figure 2. Areas at El Cabo site surveyed by the ground penetrating radar and magnetic method in 2006 and 2007.



Slika 3. Topografska karta najdišča z vrtinami, manjšimi testnimi sondami in večjimi izkopnimi polji.

Figure 3. Topographic map of the site with boreholes, small scale test soundings and larger excavated areas.

Za oceno arheološkega potenciala najdišča so poleg rezultatov intenzivnega terenskega pregleda uporabili še podatke jeder iz 64 plitvih vrtin in 8 testnih sond velikosti 1 m² (slika 3). Na osnovi pozitivnih rezultatov so dve sondi razširili v večji izkopni polji velikosti 50 oz. 8 m². Prva sonda, ki se nahaja na apnenčevi osnovi (slika 3: sonda 4/*Block B*), je odkrila veliko število stojk za stabiliziranje lesenih nosilnih elementov hiš, izdolbenih v relativno mehkem pleistocenskem apnencu. Stojke s premeri od 5 do 40 cm se nahajajo od 5 do 20 cm pod današnjo površino in segajo do največ 90 cm globoko v apnenec. Iz dokumentacije sonde 4 (*Block B*) (slika 3) je razvidno, da gre za razgibano mikromorfologijo površ-

ja apnenca. Druga sonda velikosti 8 m² je bila izkopana na peščeni osnovi (slika 3: sonda 3/*Block A*) in je prav tako odkrila nekaj stojk večjih premerov. Pri večjih izkopavanjih, ki so sledila v letih 2006 in 2007, so izkopali območje v izmeri 1000 m² (slika 3) (za podrobnejšo razlago glej: Hoffman et al. 2006, Samson 2010).

1.1 Geološke in geomorfološke značilnosti najdišča El Cabo

Na južni polovici vzhodnega dela Dominikanske republike so zelo razširjeni obalni grebenški apnenci, kjer skupaj

z zagrebenskim faciesi izdanjajo na obsežnih področjih v zaledju obale (Bowin 1975). Tovrstne kamnine izdanjajo tudi na najdišču El Cabo. Na posameznih izdankih so lepo vidni grebenški apnenci in plastnate breče, ki se vertikalno in horizontalno izmenjujejo z obalnimi peski. Slednje so del zagrebenskega faciesa, kjer se odlagajo tako peski kot grušč, iz katerih nastajajo breče. Pri procesu progradacije pride do prekrivanja omenjenih sedimentov z mlajšimi, kar prepoznamo v profilu na najdišču El Cabo (slika 4). Relativna trdnost vseh kamninskih različkov na najdišču je zaradi nepopolne kompakcije majhna in jih zlahka mehansko preoblikujemo z lesenim in koščenim orodjem.



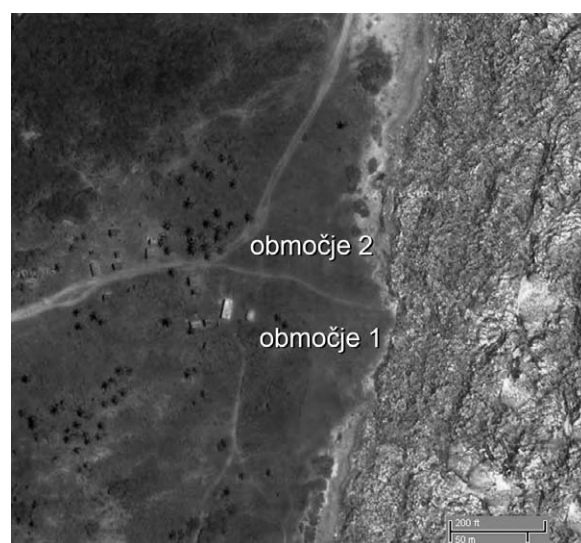
Slika 4. Plastnate apnenčeve breče med plastmi slabo konsolidiranih peščenjakov iz obalnih peskov na območju El Cabo.

Figure 4. Bedded limestone breccia intercalations within badly consolidated sandstones of beach sand at the area of El Cabo.

V geomorfološkem smislu se najdišče El Cabo nahaja na relativno ravni priobalni karbonatni stopnji pliocenske do pleistocenske starosti, ki je danes pašniška površina in sega približno 150 m od obale proti zahodu in 280 m vzdolž obale v smeri sever – jug (slika 5). Velikost najdišča je ocenjena na podlagi površinskih najdb (keramika in kamniti artefakti), odpadnem materialu in na izsledkih vrtin ter testnih sond, izkopanih na najdišču.

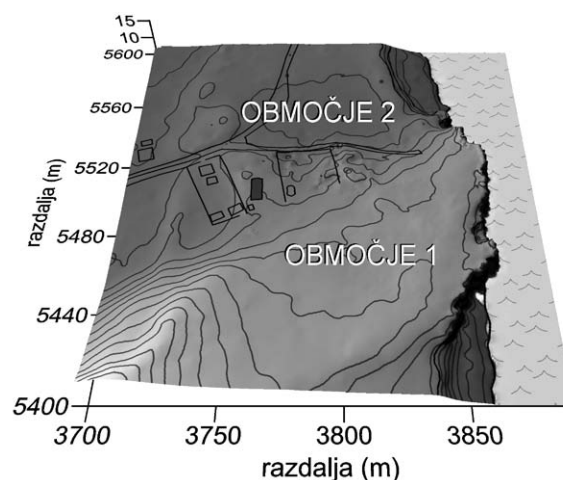
Približno čez polovico najdišča poteka v smeri vzhod-zahod geološka meja, ki se odraža v oblikovanosti današnjega površja. Za južno polovico najdišča (sliki 5 in 6: Območje 1) so značilni grebenški apnenci, ki jih pokriva tanek sloj glinasto peščenega humusnega materiala, medtem ko so za severni del (sliki 5 in 6: Območje 2)

značilni različki tal, nastali na nekonsolidiranih, srednje do drobnnozrnatih obalnih peskih. Območji 1 in 2 ločuje blag pregib v smeri geološke meje, pri čemer južni del z grebenškimi apnenci predstavlja relativno najvišji del



Slika 5. Satelitski posnetek najdišča El Cabo (Vir: Splet 1).

Figure 5. Satellite image of the El Cabo site (Source: Web 1).



Slika 6. Digitalni model reliefa izdelan iz topografske karte najdišča z Območji 1 in 2.

Figure 6. Digital elevation model created from a topographic map of the site with Areas 1 and 2 indicated.

najdišča nasproti severnemu, peščenemu območju rahlo kadunjaste oblike (slika 6). Arheološke naselbinske oblike pred-kolumbijskega izvora so odkrili na obeh območjih (glej: Hoffman et al. 2006, Samson 2010).

2. Georadarska metoda in strategija raziskav

2.1. Splošno

Arheološka stroka je že pred časom izkoristila možnosti georadarja (GPR–*Ground Penetrating Radar*) za odkrivanje podpovršinskih arheoloških objektov in z njimi povezanih stratigrafskih enot oz. arheoloških kulturnih horizontov. Med prvimi je bila metoda uporabljena v zvezni državi New Mexico v Chaco kanjonu leta 1976 (Vickers et al. 1976). Georadarska metoda se odlej uporablja za odkrivanje številnih arheoloških objektov.

Za arheološko prospekcijsko je pomembna tipologija radarskih odbojev, ki se pogosto pojavljajo na arheoloških najdiščih (Bevan 1996): izraziti posamični odboji, odboji od (sub)horizontalnih reflektorjev, odboji od povitih plasti, odboji od nagnjenih plasti, kaotični odboji ipd., ki jih pripisujemo različnim vrstam arheoloških ostankov in/ali paleoekolojskim oblikam: npr. vse vrste zidov in izoliranih arhitekturnih elementov/ kamninskih blokov, večji kovinski predmeti, podzemni prostori, nekdanje hodne površine, ruševinske plasti, naselbinske negativne oblike, grobovi, itd.

Z refleksijsko georadarsko tehniko smo z vzporednimi profili, medsebojno oddaljenimi 25 cm, in usmerjenimi vzhod-zahod, zajeli površine, označene na sliki 2. Samo na preizkusnem območju testne sonde (slika 3: sonda 4/ *Block B*) je znašala razdalja med profili 10 cm. Za meritve smo uporabili krmilno-procesno enoto TerraSIRch SIR-3000 System proizvajalca *Geophysical Survey Systems, Inc* z 900 MHz anteno (Model 3101D) istega proizvajalca. Za določanje ustrezno majhne in enakomerno odčitane razdalje med sledmi vzdolž profila (na 2 cm) smo uporabili umerjeno merilno kolo (slika 7). Za ostale podrobnosti glej diplomsko nalogo Davida Medice (2010).



Slika 7. Georadarske meritve z visoko ločljivostno 900 MHz anteno (foto: Uroš Kirn).

Figure 7. GPR survey with a high resolution 900 MHz antenna (photo: Uroš Kirn).

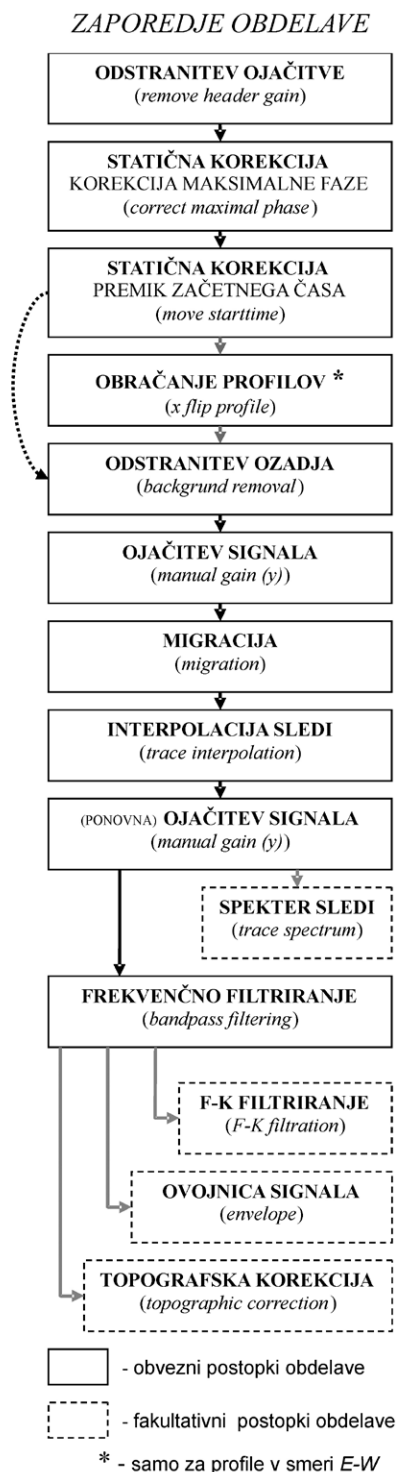
2.2. Obdelava podatkov

Obdelava podatkov obsega zaporedje postopkov, ki omogočajo povečanje razmerja med koristno informacijo oz. signalom in vsemi drugimi motečimi viri anomalij oz. šumom. Zaporedje korakov pri obdelavi podatkov ni točno določeno in je odvisno od načina meritev in ciljev raziskave (Yilmaz 1987).

Na sliki 8 je prikazano končno zaporedje vseh postopkov obdelave, ki izhaja iz številnih poskusov v različnih smereh procesiranja. Obdelavo podatkov smo izvajali s programsko opremo Reflexw verzija 5.0.7 podjetja Sandmeier software. V nadaljevanju pa so opisani samo nekateri ključni postopki obdelave, prilagojeni za reševanje problemov definiranih v uvodu članka.

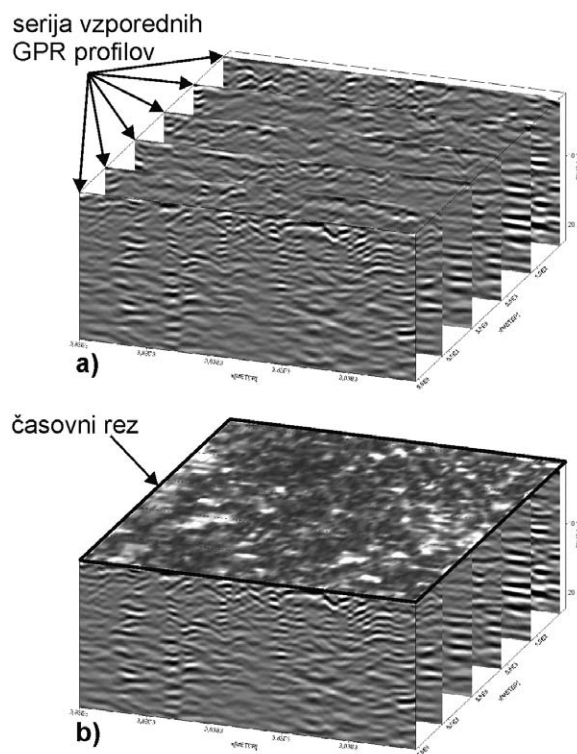
2.3. Prikazovanje podatkov

Časovni rezi so rezi zaporedja praviloma vzporednih in enako oddaljenih profilov pri istem dvojnem času t . Časovne reze je možno prikazati le v 3D modulih, kjer program združi več med seboj vzporednih profilov v enotno datoteko, v kateri so vrednosti med posameznimi profili interpolirane (slika 9). V primeru El Caba gre za izravnano površino najdišča in ob poznavanju ustreznega približka hitrosti EM valovanja v tleh lahko štejemo časovne reze za realne globinske horizontalne preseke.



Slika 8. Diagram uporabljenega zaporedja postopkov obdelave za georadarsko metodo.

Figure 8. GPR processing flow diagram.



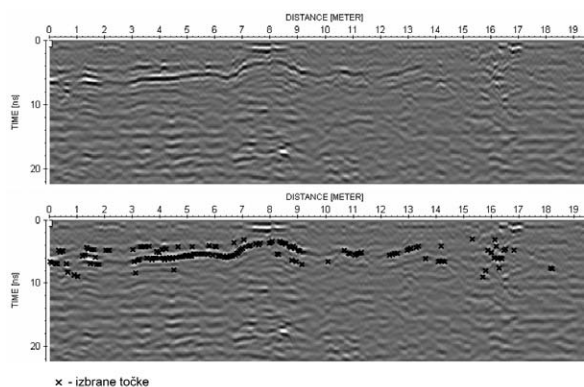
Slika 9. Prikaz vzporednih georadarskih profilov (a) in časovnega reza (b).

Figure 9. Presentation of parallel GPR profiles (a) and time slices (b).

2.3.1. Izbiranje objektov

Rezultat georadarskih meritev so štiri-dimenzionalni podatki in vsebujejo: x, y, z – koordinato ter amplitudo. Programi za obdelavo georadarskih podatkov lahko le te prikazujejo v obliki profilov, s pomočjo interpolacije v obliki horizontalnih in drugih poljubnih rezov. Možni so tudi prikazi v obliki aksonometričnih projekcij ter prikazi izo-površin (*isosurfaces*). Posamezne odboje, za katere utemeljeno spredpostavljamo, da predstavljajo odziv ciljnih objektov, lahko označimo z orodji samodejnega izbiranja (*auto picks*) (slika 10). Samodejno izbiranje deluje na podlagi razlike v amplitudi odbojev. Točke, ki pripadajo dobro vidnim odbojem, imajo praviloma večjo amplitudo od sosednjih.

Iz množice zbranih podatkov smo izdvojili tiste, ki odražajo zveznost odbojev. Podatki, ki kažejo zvezne lastnosti, so tisti pri katerih je odstopanje z – koordinate pri zapo-



Slika 10. Izbiranje zveznih georadarskih odbojev s pomočjo orodja za samodejno izbiranje (*auto picks*).

Figure 10. Selecting continuous GPR echoes with the tool for automatic picking (*auto picks*).

rednih podatkih relativno majhno. Velikost odstopanja z – koordinate lahko določimo s pomočjo standardnega odklona zaporednih izbranih točk. Standardni odklon je bil izračunan za vsako izbrano točko posebej, pri čemer je bilo pri izračunu upoštevanih sedem zaporednih točk: tri pred in tri za izbrano točko. Velikost intervala je določena empirično. Manjša kot je vrednost standardnega odklona, večja je zveznost podatkov (sliki 11 in 12).

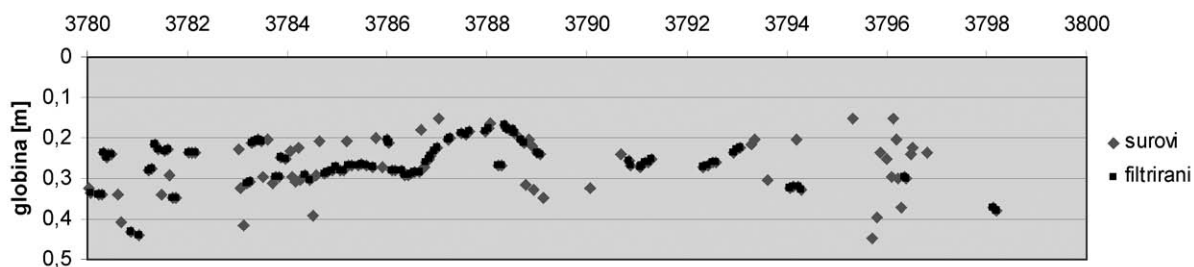
Poleg standardnega odklona lahko za ločevanje zveznih odbojev uporabimo tudi »prostorske filtre«. Gre za preproste filtre oz. funkcije, ki odstranijo točke, katerih sosednje točke so v x - oz. z - smeri oddaljene več kot za neko določeno vrednost. Filter ne odstrani vseh izstopajočih točk, vendar pripomore k zmanjševanju šuma (sliki 11 in 12). V primerjavi s standardnim odklonom, kjer priredimo vsaki točki novo vrednost, »prostorski

filter« izloči določen del podatkov. Posledica tega je binarni rezultat obdelave (da/ne kriterij), v nasprotju z zveznim rezultatom, ki ga predstavlja izračunana vrednost standardnega odklona. Najustreznejše nastavitve okna izberemo empirično glede na zastavljene cilje.

S primerjavo topografije označenih vrednosti prepoznamo učinek določenega filtra (slika 12). Stopnja homogenosti spektra sivih odtenkov označuje zveznost odbojev. Enotno obarvana območja, oz. tista z enakomernim prehodom svin, vidna na topografiji surovih podatkov (slika 12: c) se pojavljajo tudi na drugih dveh filtriranih topografijah (slika 12: a in b). Območja z večjim deležem šuma se na filtriranih topografijah zelo zmanjšajo v primerjavi s topografijo surovih podatkov. Iz opisanega lahko razberemo, da sta metodi učinkoviti pri ločevanju zveznih odbojev od vseh drugih nezveznih oblik.

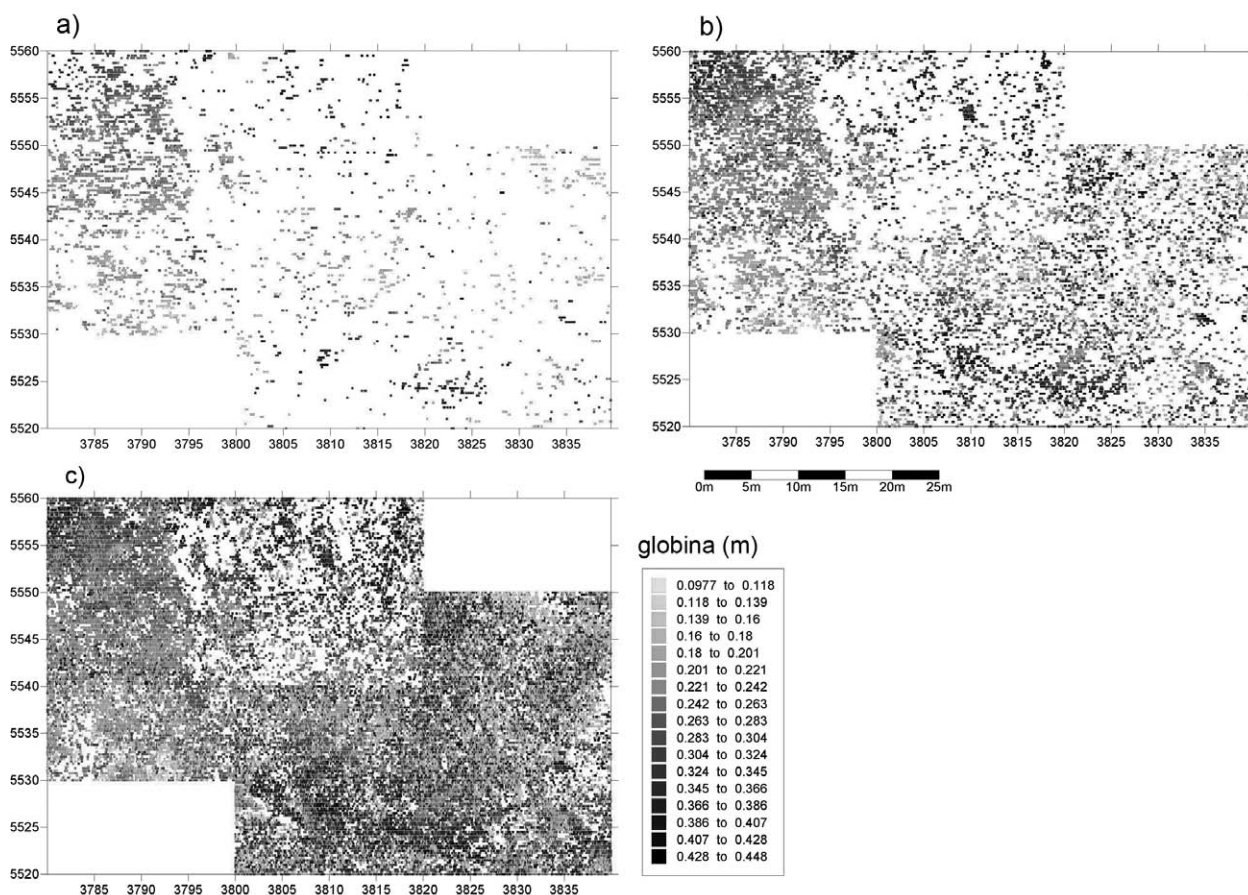
2.4. Georadarsko modeliranje

Za prepoznavanje določenega objekta v georadarskem profilu je potrebno predhodno ustvariti teoretični približek odbojev, ki jih lahko naš ciljni objekt povzroča. Ti postopki sodijo v domeno arheološko-fizikalnega modeliranja. Georadarsko modeliranje zahteva opredeljevanje fizikalnih (dielektričnost, konduktivnost in magnetna permeabilnost) in geometrijskih posebnosti ciljnega objekta z upoštevanjem fizikalnih lastnosti njegove neposredne okolice. Za modeliranje smo uporabili programsko opremo Reflexw oz. njen modul *modelling*. Algoritmi za izračunavanje odbojev elektromagnetnih valov izhajajo iz numeričnih postopkov metode končnih razlik v časovni domeni (FDTD- *Finite-Difference Time Domain*), ki sodi v domeno direktnega problema modeliranja (glej npr: Mušič 2008).



Slika 11. Prikaz učinka »prostorskega« filtra.

Figure 11. Portrayal of the space domain filter efficiency.



Slika 12. Topografija označenih vrednosti: a) Filter s standardnim odklonom [pogoj: standardni odklon po $Z < 0,03$ m]; b) Prostorsko filtriranje [pogoj: $\Delta X < 0,2$; $\Delta Z < 0,01$ m]; c) Surovi podatki

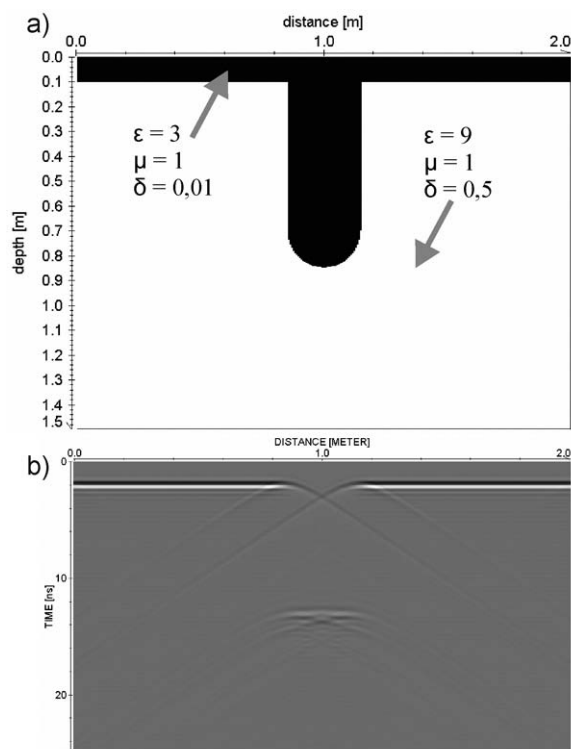
Figure 12. Topology of indicated values: a) Filter applying standard deviation [condition: standard deviation of $Z < 0.03$ m]; b) Space domain filtering [condition: $\Delta X < 0.2$; $\Delta Z < 0.01$ m]; c) Raw data

Na sliki 13 je prikazan geometrijski model stojke z določenimi fizikalnimi parametri (slika 13: a) in izračunani georadarski odboji za centralno frekvenco oddajne antene 900 MHz in časovno okno povratnih radarskih valov 25 ns (slika 13: b). Upoštevati moramo tako natančne geometrijske, kot najverjetnejše približke fizikalnih parametrov, ki najbolj opredeljujejo naš model. Geometrijski parametri se nanašajo na obliko in velikost modela: npr. debelina plasti apnenca z določenim navideznim vpadom oz. posamezni objekti-stojke s premerom in globino. Fizikalni parametri so približki dielektričnosti ϵ , relativne permeabilnosti μ in statične prevodnosti σ .

S pomočjo opisov in podatkov o velikosti stojk iz arheoloških izkopavanj smo izdelali nekaj modelov, ki

upoštevajo na dnu zaokrožene stojke s premeri 40, 30, 20, 10 in 5 cm z razmerjem med globino in premerom 2,5, ki se nahajajo v homogeni apnenčevi podlagi 10 cm pod današnjim površjem. V prvem modelu (slika 14: Model 1) je pet stojk razporejenih po velikosti od največje ($\Phi = 0,4$ m) do najmanjše ($\Phi = 0,05$ m). Podlaga na globini 0,1 m je izravnana.

Na sintetičnem Modelu 1 (slika 14: b) nastopajo hiperbolične difrakcije, ki se tvorijo na robovih stojk. Odbojev od sten stojk ni videti, ker tako kot prava antena niti simulator ne generira odbojev od njih, saj se radarsko valovanje zaradi nizkega vpadnega kota odbija stran od antene. Pri večjih stojkah opazimo na dnu t.i. metuljkast

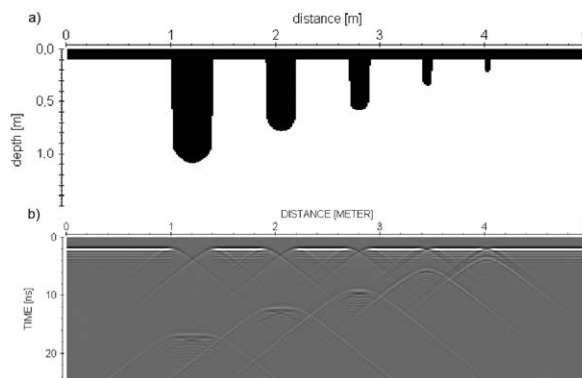


Slika 13. Geometrijski model stojke, skupaj s fizikalnimi parametri; dielektričnost - ϵ , relativna permeabilnost - μ in statična prevodnost - σ (a) in rezultat georadarskega modeliranja stojke (b).

Figure 13. Geometrical model of a single post hole joined by physical parameters; dielectric permittivity - ϵ , relative permeability - μ , static conductivity - σ (a) and results on GPR signal modeling for a single post hole (b).

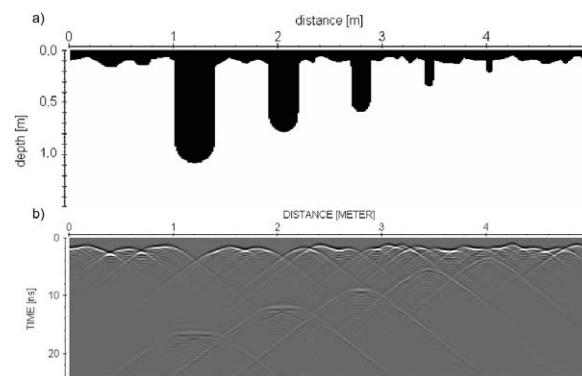
vzorec (*bow tie*), ki kaže konkavno obliko. Pri manjših stojkah te oblike ne prepoznamo več, ker so le te mnogo manjše od ukrivljenosti radarskega čela.

Model 2 (slika 15) vsebuje enake elemente kot Model 1 (slika 14), s tem da je mikromorfologija površja apnenčeve podlage, v kateri se stojke nahajajo, razgibana in s tem bolj ustreza dejanskemu stanju. Sintetični Model 2 (slika 15) karakterizirajo številne difrakcije razgibane podlage. Na območjih, kjer ležijo manjše stojke, ne moremo več razpoznati posameznih difrakcij od robov stojk. Pri večjih stojkah ($\Phi = 0,4$ in $0,3$ m) pa lahko še vedno opazujemo vrzel v odboju od podlage ter difrakcijo na robovih.



Slika 14. Model 1; Geometrijski model stojk v apnenčevi podlagi z izravnano površino (a) in sintetični georadarski profil za Model 1 (b).

Figure 14. Model 1; Geometrical model of post holes in limestone bedrock with leveled surface (a) and synthetic GPR profile for Model 1 (b).

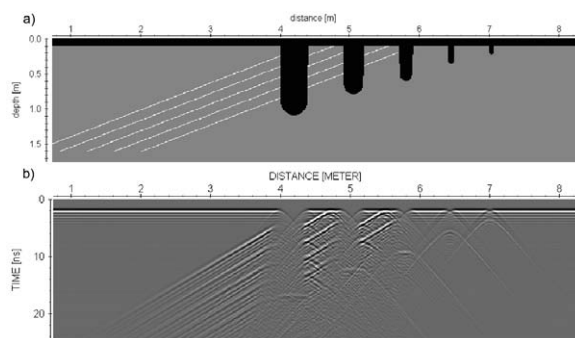


Slika 15. Model 2; Geometrijski model stojke na razgibani podlagi (a) in sintetični georadarski profil za Model 2 (b).

Figure 15. Model 2; Geometrical model of post holes in limestone bedrock with variable surface morphology (a) and synthetic GPR profile for Model 2 (b).

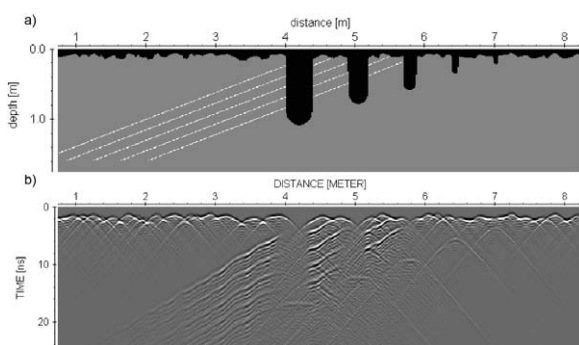
Model 3 upošteva tudi plastovitost apnenca (slika 16). Odboji zaradi plastovitosti so na sintetičnem modelu lepo vidni, vendar so zaradi številnih difrakcij nižji odboji nekoliko zabrisani in ustvarjajo navidezno širšo vrzel, kot bi sicer pričakovali od stojke. Na mestu stojke je množica drobnih med seboj prepletenih šibkih odbojev.

Najbolj kompleksen model je Model 4 (slika 17: a), ki poleg stojk in plastovitosti upošteva tudi razgibano



Slika 16. Model 3; Geometrijski model stojk skupaj s plastovitostjo (a) in sintetični georadarski profil za Model 3 (b).

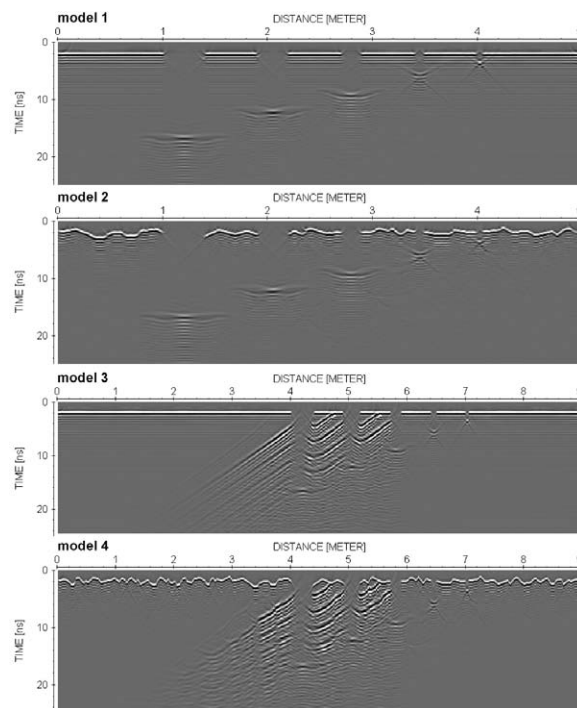
Figure 16. Model 3; Geometrical model of post holes within bedded limestone bedrock (a) and synthetic GPR profile for Model 3 (b).



Slika 17. Model 4; Geometrijski model stojk v razgibani podlagi skupaj s plastovitostjo (a) in sintetični georadarski profil Modela 4 (b).

Figure 17. Model 4; Geometrical model of post holes in bedded limestone bedrock with variable surface morphology (a) and synthetic GPR profile for Model 4 (b).

morfologijo površja apnenčeve podlage. Odboji od plastovitosti, ki so bili še v prejšnjem modelu (slika 16) povsem ravni, so sedaj močno razgibani (slika 17: b). Navidezna deformacija plastovitosti je izključno posledica razgibanega površja apnenčeve podlage. Hitrost EM valovanja je večja v polnili kot v podlagi, kar je odraz nižje dielektričnosti polnila v primerjavi s podlago. Tam, kjer je debelina polnila večja, bo signal hitreje prišel do cilja, v našem primeru diskontinuitete, in nato nazaj, kot pa tam, kjer je polnila manj. Dvojni čas t bo tako manjši zaradi hitreje opravljene poti, grafični prikaz sledi pa pre-



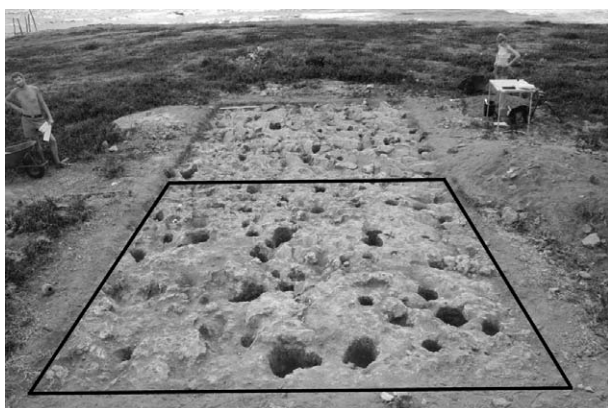
Slika 18. Sintetični georadarski profili po opravljeni migraciji za izbrane modele (glej tudi slike od 15 do 17).

Figure 18. Synthetic GPR profiles after migration routine was applied for selected models (see also figs. 15 to 17).

maknjen višje glede na okolico. Odboji od dna stojk, ki so dobro vidni v Modelu 3 (slika 16), pa so zaradi vpliva razgibanega površja podlage slabše definirani.

Sintetični modeli predstavljajo surove neobdelane georadarske profile. Izpovednost profilov lahko tako kot na pravih profilih povečamo s postopki naknadne obdelave. Na morfologijo odbojev ima največji vpliv migracija. Poleg odpravljanja difrakcij popravi tudi naklon odbojev poševnega reflektorja (plastovitost) v pravo lego. Na migriranih sintetičnih profilih (slika 18) vidimo učinkovito odstranjenost difrakcije na odbojih od podlage, ne glede na to, ali je podlaga razgibana ali ne. Manjša uspešnost je migracije pri plastovitosti pa je v skladu s pričakovanji, saj imajo odboji na filtriranih profilih večji naklon kot odboji na nefiltriranih profilih.

Stojke na sintetičnem georadarskem profilu v splošnem tvorijo značilno združbo različnih georadarskih odbojev. V prvi vrsti so to difrakcije na robovih stojk, drugi pa



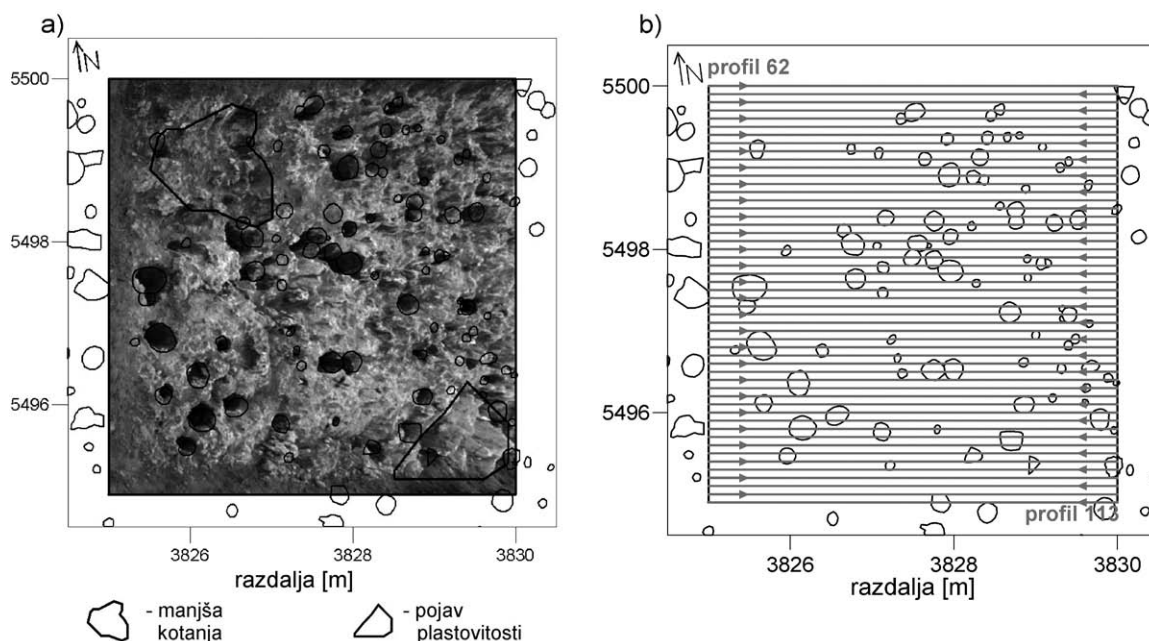
Slika 19. Pogled na testno sondo (Block B) z zahoda. Območje testnih georadarskih meritev je uokvirjeno (foto: Alice Samson).

Figure 19. View on test sounding area Block B from the west. The Area of testing GPR survey is outlined (photo: Alice Samson).

so značilni »metuljkasti« odboji od dna stojke. Možnost ločevanja odbojev stojk od okolice se z razgibanostjo podlage močno zmanjša, ker se značilne difrakcije robov stojk zabrišejo. Migracija podatkov znatno prispeva k prepoznavanju robov stojk, medtem ko so prekinitve v plastovitosti zaradi stojk bolj prepoznavne na nemigriranih profilih. Po migraciji so stojke najboljše definirane z odboji na meji polnila in podlage.

2.5. Georadarske meritve na območju testne sonde

V razširjeni testni sondi 4 (Block B), ki se nahaja na višje ležečem terenu na južnem delu najdišča (slika 3 in 19), so odkrili 188 negativnih oblik (v glavnem stojk) izklesanih v grebenski apnenec. Apnenčevo podlago je prekrivala od 10 do 15 cm debela plast peščene, temnorjave prsti, v kateri so bili najdeni artefakti tipa Boca Chica. Geološko podlago predstavlja plastovit apnenec, ki upada proti jugozahodu. Večina negativnih oblik je bila zaradi pravilnega okroglega horizontalnega preseka na površju apnenčeve podlage, kakor tudi podobnega razmerja



Slika 20. Delno razpačena fotografija testne sonde s stojkami in razgibano morfologijo apnenčeve podlage (a) in prikaz georadarskih profilov v smeri zahod-vzhod na območju testne sonde (Block B) (b).

Figure 20. Partly rectified oblique photography of area Block B with post holes and limestone bedrock variable surface morphology (a) and depicted GPR profiles in the direction west-east at the area of test sounding Block B (b).

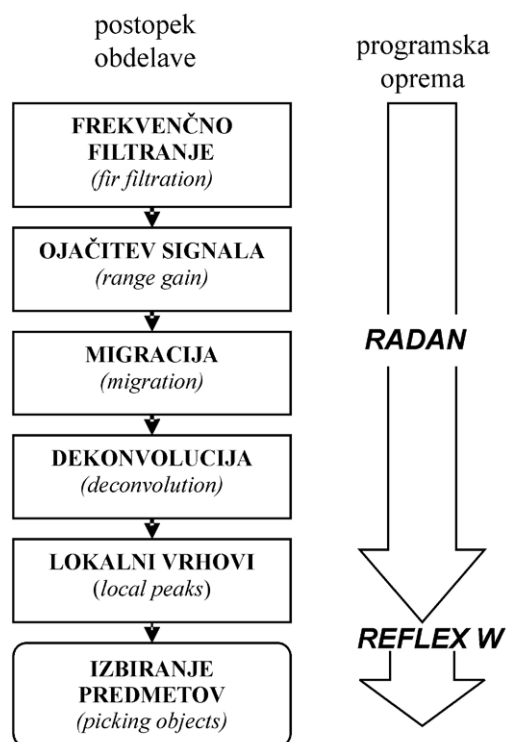
med njihovim presekom in globino, interpretiranih kot antropogene oblike oz. stojke, ki so služile stabiliziranju lesenih nosilnih elementov hiš Taino Indijancev. Globine stojk segajo od 0,08 do 0,8 m, v preseku pa merijo od 0,08 do 0,3 m. V nekaterih primerih globlje oblike prebadajo plast apnenca in segajo do spodaj ležečih rumenih obalnih peščenih sedimentov. Stojke se na dnu zaključujejo z zaokroženo ali stožčasto obliko (Hoffman et al. 2006).

Za potrebe geofizikalne raziskave je bil del razširjene testne sonde (*Block B*) ponovno prekrit z izkopanim materialom. S tem smo ustvarili podobne (nikakor identične) pogoje za preizkusne georadarske meritve s 400 in 900 MHz antenama na majhnem območju z natančno dokumentiranimi stojkami. Na površini 5 x 5 m je bilo izmerjenih 52 profilov v smeri S-N in enako število profilov pravokotno na to smer (slika 20). Dolžina posamičnega profila je bila tako 5 m, medsebojna oddaljenost pa 10 cm.

Profile iz poskusne sonde smo prvotno obdelali po postopku, prikazanem na sliki 21. Kasneje smo postopek obdelave za vse raziskane površine poenotili (glej sl. 8).

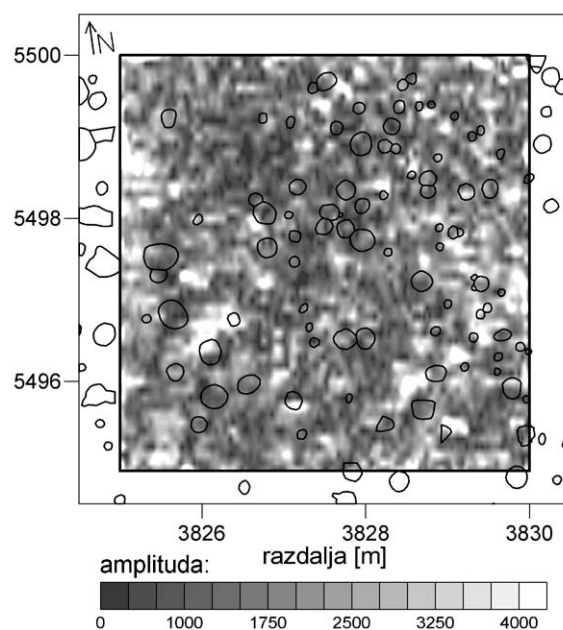
2.5.1. Horizontalni rezi na testni sondi

Za izdelavo horizontalnih rezov smo izbrali profile, merjene v smeri zahod-vzhod, kar je olajšalo prepoznavanje prečno ležečih prekritih morfoloških oblik v smeri apnančevih plasti. Horizontalni rezi jasno kažejo, da so najmočnejši odboji na manjših globinah posledica razgibane morfologije apnenčeve podlage. Glede na sintetične profile na osnovi modelov lahko pričakujemo najbolj zanesljive dokaze o obstoju stojk prav v časovnem intervalu od 0 do 2 ns. Pri podrobnem pregledu plitvih rezov vidimo razmeroma dobro prostorsko korelacijo med območji šibkih odbojev in območji z večjimi stojkami (slika 22). Za podrobnejšo primerjavo med jakostjo odbojev in



Slika 21. Postopek obdelave georadarskih signalov v začetni fazi raziskave.

Figure 21. Processing flow for GPR echoes in the initial phase of research.



Slika 22. Horizontalni rez na območju testne sonde (*Block B*) pri dvojnem času 1,074 ns.

Figure 22. Time slice at the area of test sounding Block B for two-way travelling time 1.074ns.

stojkami so bili v tem primeru izbrani horizontalni rezi pri dvojnem času 1,074 ns. Primerjava s položajem in premerom stojk, dokumentiranih pri arheoloških izkopavanjih, vidimo, da je stojk v splošnem več na območjih, kjer so bile izmerjene nižje amplitude odbojev, kot na tistih z višjimi vrednostmi amplitud (slika 22), kar je jasna indikacija, da je možno z georadarsko metodo odkrivati gruče stojk.

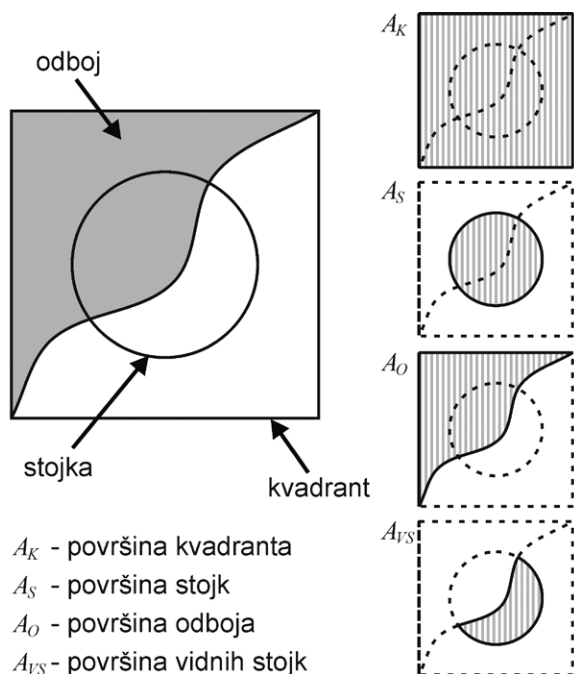
2.5.1.1. Optimalne nastavitve za prepoznavanje stojk na horizontalnih rezih

Zaradi narave georadarskega signala območij brez odbojev ni, obstajajo le območja relativno šibkejših odbojev. Ločevanje »pomembnih« in »nepomembnih« odbojev na osnovi mejne amplitude je lahko zelo zapleteno. V splošnem velja, da se premajhna spodnja vrednost mejne

amplitude kaže v preveliki pokritosti raziskanega območja s »karakterističnimi« odboji, prevelika vrednost pa nasprotno v premajhni pokritosti. V obeh primerih je prepoznavanje tarč otežena oz. povsem onemogočena. Za določanje mejne amplitude, ki bi lahko dala ustrezne rezultate, smo opredelili objektivnejše kriterije, ki temeljijo na odstotku pokritosti kvadranta z odboji in odstotku vidnih stojk (sliki 23 in 24). Pokritost kvadranta z odboji je opredeljena kot razmerje med površino, kjer so odboji vidni, in celo površino kvadranta, od katere smo odšteli površino vseh stojk. Podobno je odstotek vidnih stojk definiran kot razmerje med površino vidnih stojk in površino vseh stojk v kvadrantu. Pri tem je mejna amplituda, ki daje najboljše rezultate, tista, ki ima največji zmnožek med obema faktorjema.

Ocenjujemo, da nam lahko ta postopek izdatno pomaga pri določanju nastavitvev za horizontalne reze in druge načine prikazovanja podatkov na najdiščih, kjer so bila znotraj površine, raziskane z georadarsko metodo, opravljena vsaj manjša testna izkopavanja.

Na horizontalnem rezu 1,074 n lahko pričakujemo največjo učinkovitost pri mejni vrednosti amplitude 6000.



Slika 23. Prikaz elementov za izračun učinkovitosti na teoretičnem horizontalnem rezu.

Figure 23. Elements for effectiveness calculation portrayed on the theoretical horizontal section.

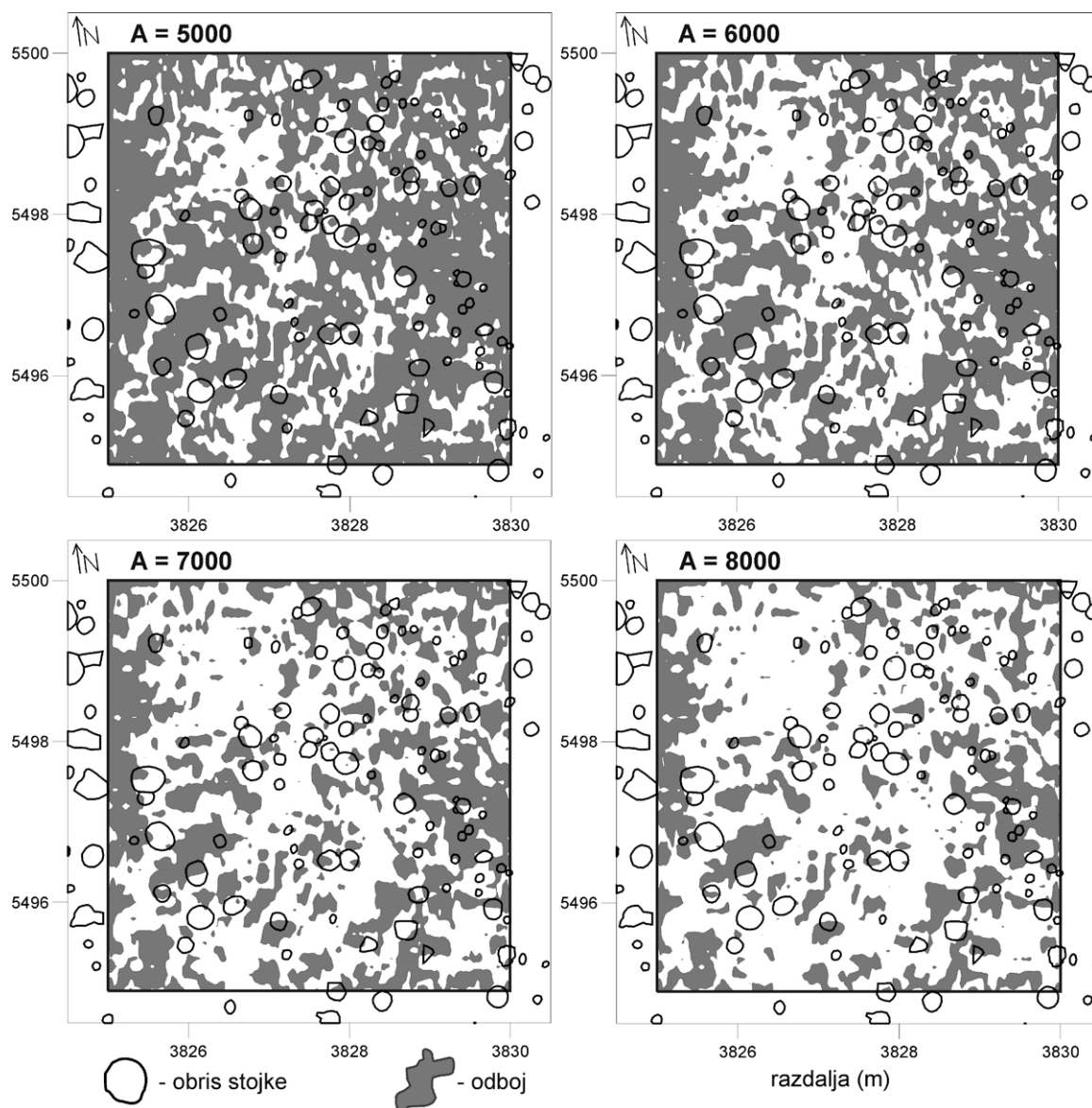
P_K - pokritost kvadranta, A_O - površina odbojev, A_K - površina kvadranta, A_S - površina stojk, A_{VS} - površina vidnih stojk, V_S - vidnost stojk in U - učinkovitost.

2.5.1.2. Horizontalni rezi na f-k filtriranih podatkih

Na profilih poskusne sonde so dobro vidni vzporedni odboji od poševne plastovitosti. S pravilnimi nastavitvami f-k filtriranja lahko dosežemo, da se ohranijo zgolj željeni poševni odboji, v našem primeru odboji zaradi plastovitosti. Izhodišče je predpostavka, da na območju kjer se nahaja stojka, ne more biti izražena plastovitost, kar kažejo tudi izsledki georadarskega modeliranja. Na ta način bi lahko na horizontalnih rezih določili območja z manjšo verjetnostjo, da se tam nahajajo stojke. V ta namen smo izdelali horizontalne reze v časovnem razponu od 0 do 22 ns. Da bi lahko določili učinkovitost f-k filtriranih podatkov za iskanje stojk, smo izbrali horizontalni rez na globini, za katero predpostavljamo, da najverjetneje vključuje večje število stojk. V ta namen smo izbrali časovni rez pri dvojnem času 2,002 ns (slika 25).

Mejna amplituda, ki daje najboljše rezultate, je približno enaka 1000, njena učinkovitost pa znaša 0,364 (slika 26).

Če primerjamo ugotovljeno učinkovitost s tisto na nefiltriranih horizontalnih rezih (rez na 1,074 ns) ugotovimo,



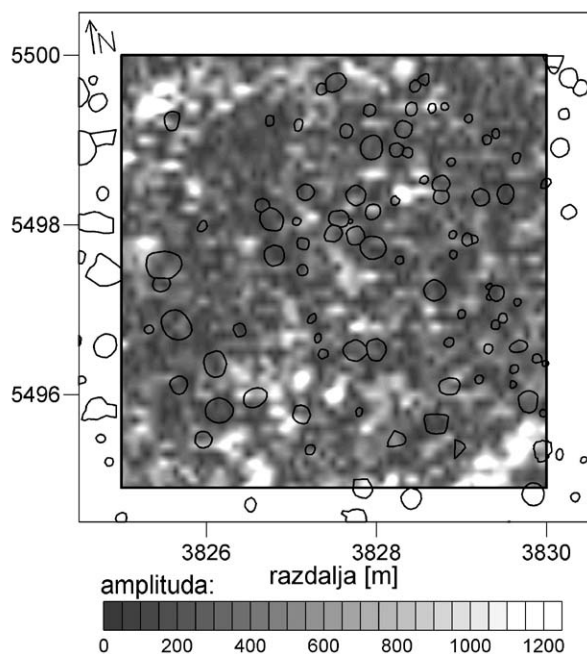
Slika 24. Časovni rez testne sonde (Block B) pri 1,074 ns pri različnih vrednostih mejne amplitude.

Figure 24. Time slice at test soundings Block B at 1.074ns for different values of calculated amplitude.

da daje f-k-filtriran rez nekoliko boljše rezultate in sicer za vrednost 0,024. Je pa omenjena metoda vezana na plastovita območja, sicer se njena uporabnost precej zmanjša.

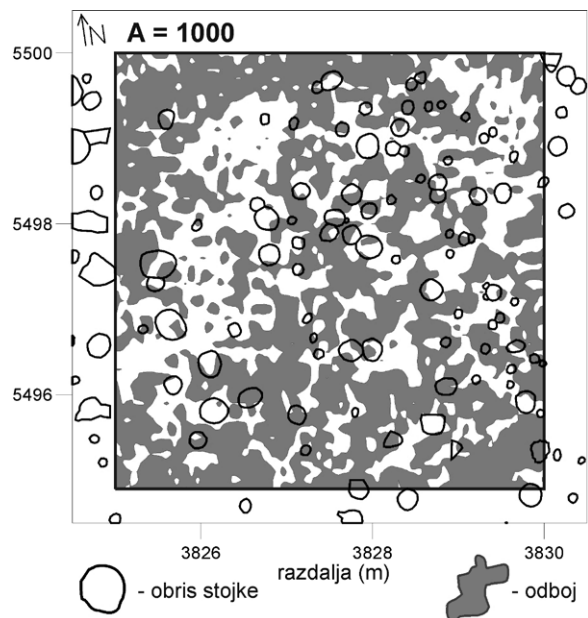
2.5.1.3. Določanje učinkovitosti na združenih rezih

Do sedaj smo ugotovili, da je pojav stojk povezan z območji šibkejših odbojev, prav tako so stojke povezane z odsotnostjo odbojev plastovitosti na rezih podobne globine. Oba kriterija za določanje stojk lahko združimo za boljše ločevanje stojk in s tem učinkovitejši postopek. Če npr. združimo optimalna horizontalna reza tako f-k filtri-



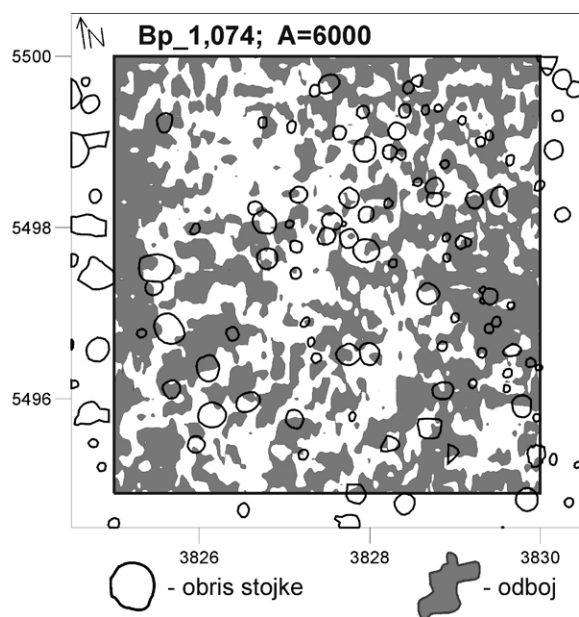
Slika 25. Horizontalni rez pri f-k filtriranih podatkih, dvojni čas 2,002 ns.

Figure 25. Time slices for f-k filtered data, two-way travelling time 2.002ns.



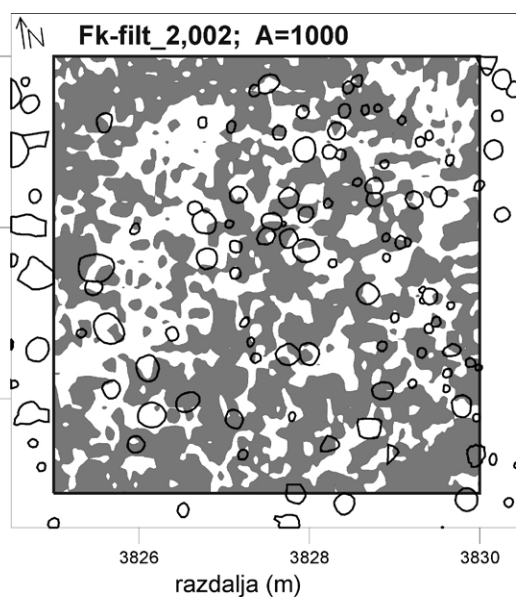
Slika 26. Horizontalni rez pri mejni amplitudi 1000.

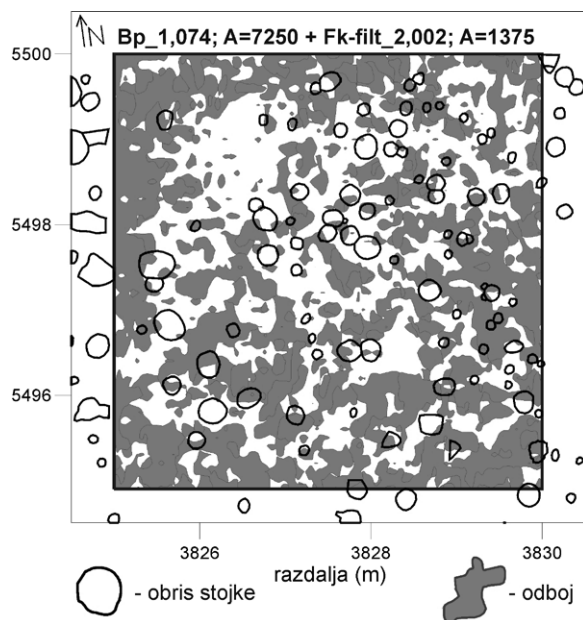
Figure 26. Time slices at calculated amplitude 1000.



Slika 27. Optimalna horizontalna reza za bp_1,074 in fk-filt_2,002.

Figure 27. Optimal time slices for bp_1,074 in fk-filt_2.002.



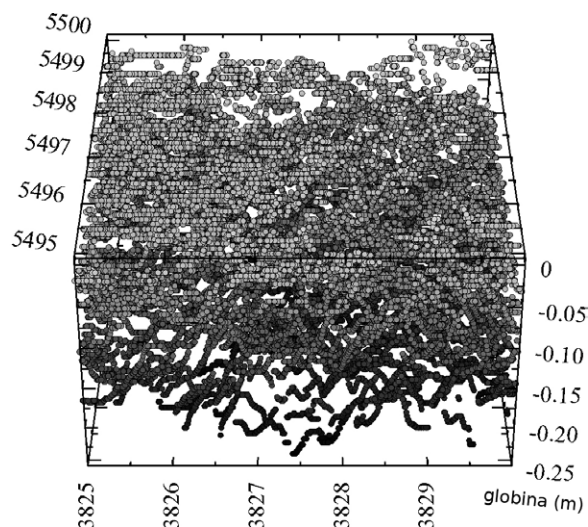


Slika 28. Združeni rez Bp_1,074 pri mejni amplitudi 7250 in fk-filt 2,002 pri mejni amplitudi 1375.

Figure 28. Combined time slices Bp_1,074 at calculated amplitude 7250 and fk-filt 2.002 at calculated amplitude 1375.

ranih (fk-filt_2,002) in normalnih podatkov (bp_1,074), ugotovimo, da se njuna skupna učinkovitost zmanjša v primerjavi z učinkovitostjo posameznih rezov. Za določevanje optimalnih nastavitvev učinkovitosti za združena reza je potrebno določiti učinkovitost večjega števila rezov z različnimi nastavitvami mejne amplitude za obe vrsti rezov. Na območju, kjer je učinkovitost najboljša, je bila mreža izračunov zgoščena in dobljena maksimalna vrednost učinkovitosti znaša 0,39137 pri mejni amplitudi za bp_1,074, ki je enaka 7250 ter mejni amplitudi za fk-filt_2,002, ki znaša 1375. Optimalna horizontalna reza za bp_1,074 in fk-filt_2,002 sta prikazani na sliki 27.

Za doseganje boljše učinkovitosti smo povečali vrednost mejne amplitude tako na enem kot na drugem horizontalnem rezu. Optimalna vrednost horizontalnega reza bp_1,074 se je s prej optimalnih 6000 povečala na 7250, vrednost reza fk-filt_2,002 pa s 1000 na 1375. Povečanje mejne amplitude posameznih rezov za doseganje večje učinkovitosti je v skladu s krivuljami učinkovitosti posameznih rezov. Učinkovitost namreč pada hitreje z manjšanjem mejne amplitude kot z njenim naraščanjem. Ko združimo dva reza med seboj, se pokritost skokovito



Slika 29. 3D prikaz točk, ki predstavljajo izbrane georadarske odboje.

Figure 29. 3D presentation of points, representing selected GPR echoes.

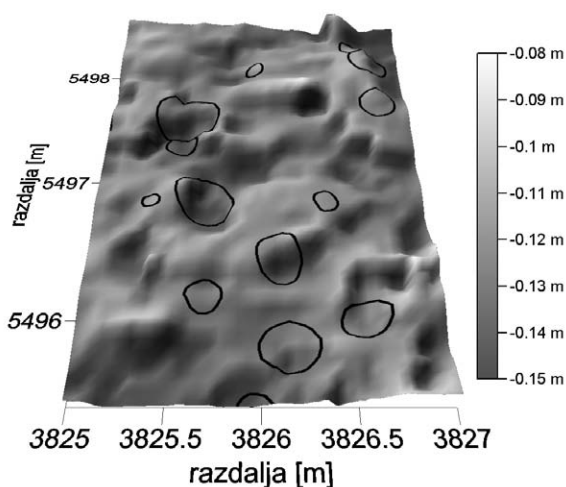
poveča, podobno kot če bi zmanjšali vrednost mejne amplitude. Razumljivo je, da s povečanjem mejne amplitude na obeh horizontalnih rezih, zmanjšamo pokritost, ki je posledica združevanja rezov, in s tem omogočimo ponoven porast učinkovitosti, ki je v našem primeru za 7,4 % boljša od najboljše učinkovitosti pred tem (slika 28).

2.5.2. Morfologija odbojev poskusne sonde

V nasprotju s horizontalnimi in frekvenčnimi rezi, kjer opazujemo amplitudo odbojev na določenem intervalu dvojnega časa t , lahko s pomočjo avtomatskega izbiranja točk, opazujemo tudi morfologijo določenega odboja. Za prikaz konkavnega odboja v tlorisu je najbolj primerna metoda topografije odbojev oz. izbranih točk. S to metodo lahko razberemo tudi morebitne druge podobne morfološke oblike.

Topografsko karto odbojev smo izdelali s pomočjo izbiranja predmetov (*picking objects*) na profilih, obdelanih s funkcijo lokalni vrhovi (*local peaks*). Izbiranje smo omejili samo na prve pozitivne odboje, ki se pojavljajo tik pod površjem in so se že izkazali kot del georadarskega profila, ki nosi največ potencialno koristnih informacij o stojkah. Rezultat izbiranja sta oblak točk (slika 29) in di-

gitalni model reliefa (slika 30), ki ponazarjata topografijo georadarskih odbojev 52 profilov v smeri zahod-vzhod.



Slika 30. Primerjava digitalnega modela reliefa georadarskih odbojev s položajem stolk.

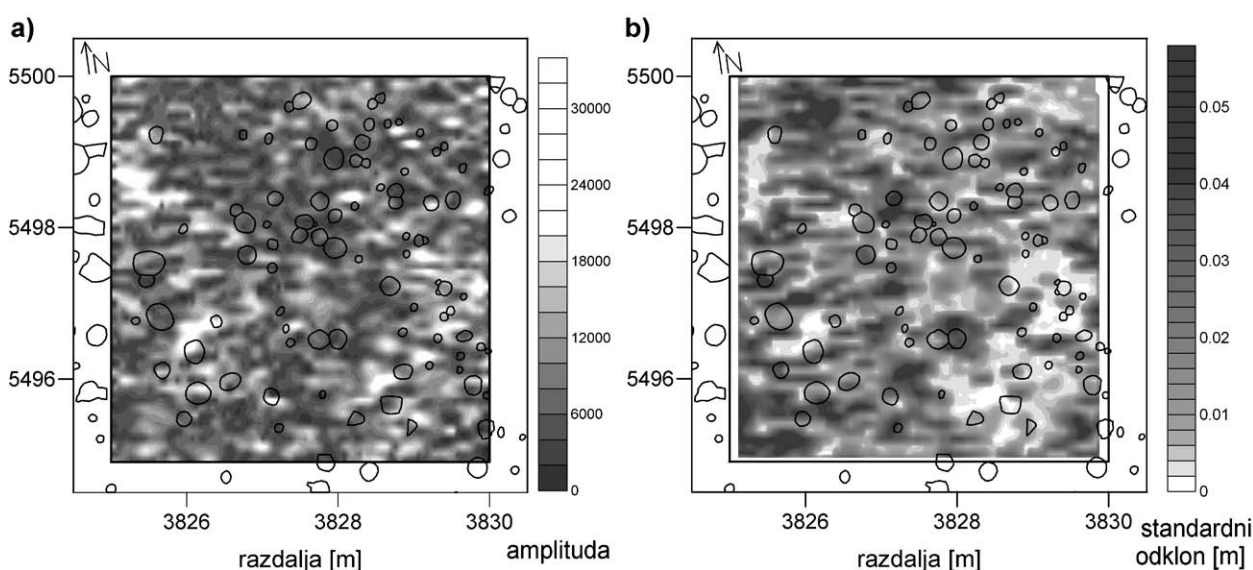
Figure 30. Comparison of GPR echoes digital elevation model with post holes overlayed.

2.5.3. Vpliv topografije odbojev na njihovo jakost

Na horizontalnih rezih je jasno izražena pozitivna korelacija med razgibanostjo mikroreliefa apnenčeve podlage in šibkejšimi radarskimi odboji. Predpostavko o vplivu razgibanosti reliefa apnenčeve podlage na jakost odbojev lahko dokažemo s pomočjo analize morfologije odbojev. Relativno izravnanoost odboja določamo s pomočjo standardnega odklona globin točk, ki tvorijo topografijo izbranega odboja. Območja z majhnim standardnim odklonom (slika 31. a) prekrivajo z območji močnejših amplitud (slika 31. b).

2.6. Določanje hitrosti elektromagnetnega valovanja v tleh

Za dobre približke globin radarskih odbojev je potrebno določiti hitrost elektromagnetnega valovanja za vse različne materiale pod površino. Najpogosteje uporabljena je CMP (*common mid point*) metoda skupne sredinske točke (Neal, 2004). Georadarski sistem, uporabljen v našem primeru, ne omogoča izvajanja te metode. Zaradi tega so bile hitrosti določene z orodjem prilagajanja hitrosti. V ta namen je potrebno najti primeren hiperboličen



Slika 31. Prikaz amplitud (a) in standardnih odklonov (b).

Figure 31. Display of amplitudes (a) and standard deviations (b).

odboj od točkastega telesa ter prirediti hiperbolo, da se kar najbolje prilega obstoječemu odboju. Četudi je podlaga na različnih delih najdišča različna, je hitrost bolj ali manj enotna in znaša 0,1 m/ns.

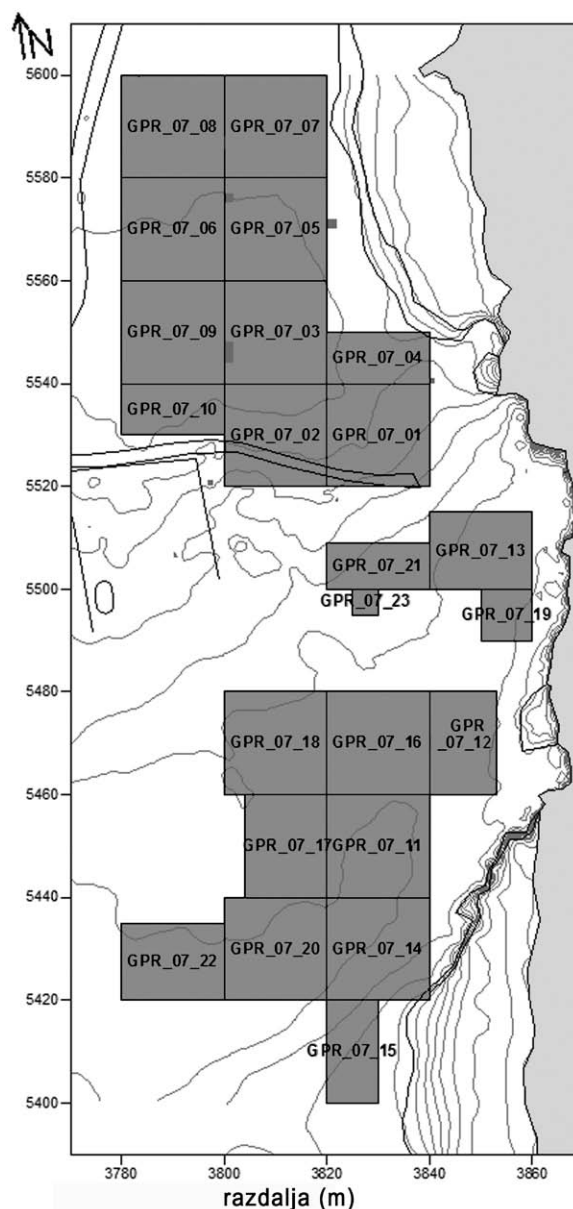
2.7. Izdelava enotnih horizontalnih rezov za celo raziskano površino

Horizontalne reze smo naredili po opravljenem frekvenčnem filtriranju (glej sl. 8). V kolikor delamo horizontalne reze na profilih enega kvadranta, je število rezov, ki jih lahko dobimo, enako številu vzorcev na sledi. Pri velikih območjih, ki vsebujejo več kvadrantov, pa se moramo omejiti na določeno število skupnih rezov, sicer postane množica podatkov neobvladljiva. Poleg horizontalnih rezov na frekvenčno filtriranih podatkih smo izdelali horizontalne reze tudi na podatkih po opravljenem f-k filtriranju. V tem primeru smo izdelali združene horizontalne reze od globine 1,5 do 22 ns, kar da integralno informacijo o pojavljanju plastovitosti.

Kljub razlikam med testno sondo in ostalimi kvadranti, so bile na podlagi relativno majhne razlike učinkovitosti uporabljene iste nastavitve za kvadrante, za katere pričakujemo podobne pogoje, primerljive s testno sondo. Primerljivost se nanaša predvsem na podobnost v sestavi apnenčeve podlage, kar lahko zanesljivo trdimo za kvadrante, ki ležijo na Območju 1. V ta namen smo za kvadrante 11, 13, 14, 16, 19 in 21 izdelali horizontalne reze na istih globinah ter z istimi nastavitvami kot na testni sondi (sliki 32 in 33).

Prva skupina rezov so rezi na frekvenčno filtriranih podatkih. Globina reza (dvojni čas) je 1,074 ns, mejna amplituda pa znaša 6000. Drugo skupino predstavljajo rezi na f-k filtriranih podatkih, dvojni čas 2,002, mejna amplituda 1000.

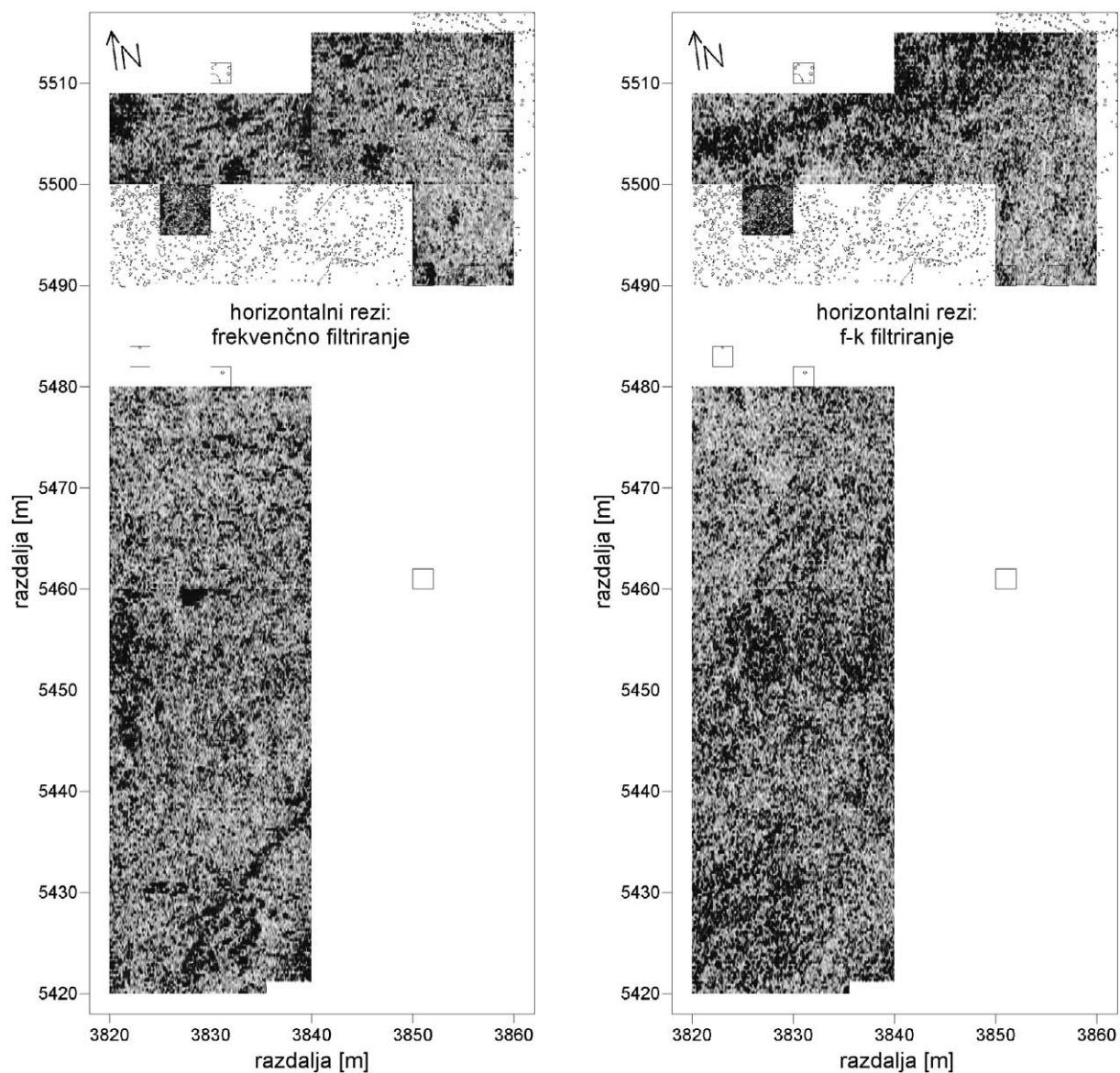
Odboji prve skupine nakazujejo območja večjih izravnanih podlage, ki izključujejo pojav stojk. F-k filtrirani odboji pa predstavljajo pojave plastovitosti kot tudi razčlenjenosti podlage. Tudi pojav plastovitosti načeloma izključuje obstoj stojk. Očitno je npr. medsebojno izključevanje normalnih in f-k filtriranih odbojev, kar je do neke mere tudi logično. Tako f-k filtrirani kot normalni odboji pa so spremenljivi. Na severnem delu območja 1, v kvadrantih 13, 19, 21 in 23 (sliki 32 in 33) imajo f-k filtrirani odboji lepo izražene meje, za razliko od kvadrantov 11, 14 in 16



Slika 32. Shematski prikaz površine, raziskane z GPR, razdeljene na manjše površinske enote – kvadrante.

Figure 32. Schematic depiction of area explored by GPR subdivided into smaller units – grids.

(sliki 32 in 33), kjer so te meje slabše izražene. Tudi sama plastovitost je na severu bolj izražena. Na frekvenčno filtriranih odbojih prav tako opazimo bolj poudarjene odboje v severnih kot v južnih kvadrantih. Na podlagi obeh prikazov sklepamo, da imamo na severu bolj izraženo



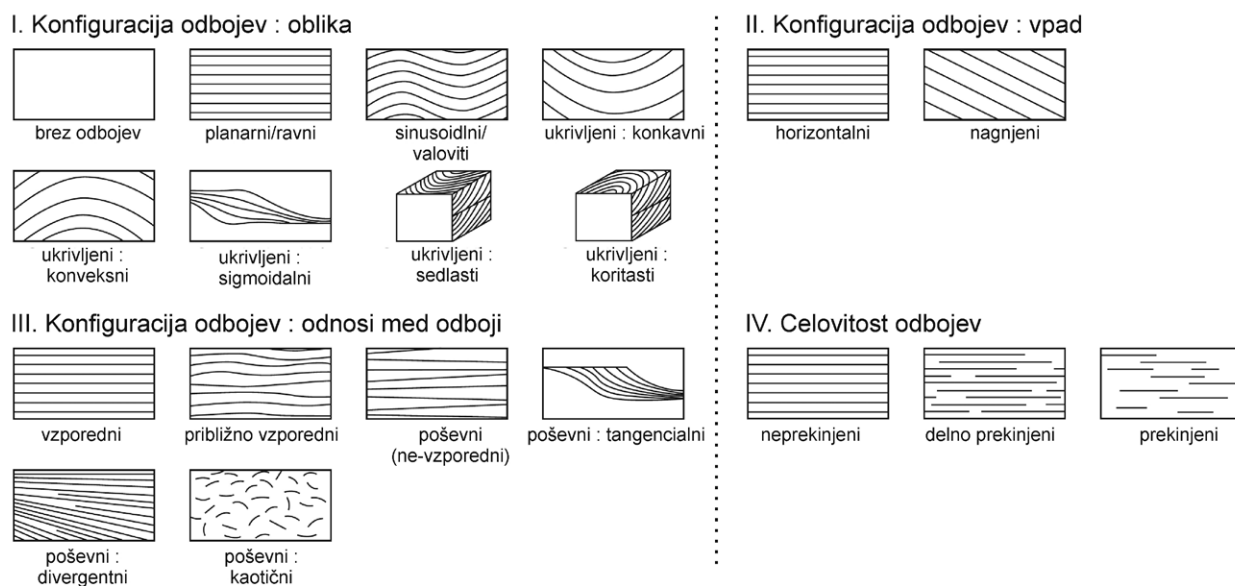
Slika 33: Horizontalni rezi na frekvenčno filtriranih in f-k filtriranih kvadrantih 13, 14, 16, 19, 21 in 23 (slika 32).

Figure 33: Time slices of grids 13, 14, 16, 19, 21 and 23 (Figure 32) after applying frequency and f-k based filtering.

morfolologijo, se pravi, da se izmenjujejo relativno izravnana območja z drugimi bolj razčlenjenimi območji (tudi plastovitostjo), na jugu pa je, generalno gledano, manj izražena morfolologija podlage oziroma bolj enakomeren, drobno razgiban relief.

2.8. Radarski faciesi

Za interpretacijo rezultatov georadarske metode na celotni raziskani površini (slika 2) je bil uporabljen alternativni pristop, ki celostno obravnava množico odbojev. Gre za metodo, ki združuje in vrednoti vse vrste odbojev in ne samo tistih, ki kažejo očitno povezavo s pojavom stojk. Tudi na prvi pogled manj pomembni elementi lah-



Slika 34. Terminologija za določanje georadarskih faciesov (po Neal 2004).

Figure 34. Terminology for defining GPR facies (after Neal 2004).

ko v sebi nosijo informacijo, ki je z arheološkega vidika relevantna za oceno arheološkega potenciala. Uporabili smo metodo radarskih faciesov, ki ni samo nadgradnja opisovanja različnih georadarskih odbojev, temveč izdatno prispeva k interpretaciji.

Za potrebe sistematične interpretacije seizmičnih podatkov in opisovanje stratigrafije ter sedimentacijskega okolja je naftna industrija v sedemdesetih letih 20. stoletja razvila seizmično stratigrafijo (Mitchum et al., 1977). Izvajalci georadarskih raziskav so v začetku devetdesetih let prevzeli metode seizmične stratigrafije za interpretacijo georadarskih profilov (Baker 1991; Beres & Haeni 1991; Jol & Smith 1991).

Termini seizmične stratigrafije razlikujejo:

- Seizmične pakete; sedimentni sklopi genetsko povezanih plasti, omejenih z diskontinuitetami.
- Seizmični facies, ki označuje dvo in tri dimenzionalne pakete odbojev, ki ležijo med dvema seizmičnima ploskvama. Odboje seizmičnega faciesa določajo: oblika, amplituda, kontinuiteta, frekvenca ter intervalna hitrost.

Kljub temu, da je globinski doseg seizmičnih raziskav za nekaj velikostnih redov večji od radarskega, so fizikal-

ni kontrasti, ki določajo sedimentne sekvence, podobni. Radarske ploskve, radarski paketi in radarski faciesi so določeni na enak način kot ekvivalentni termini seizmične stratigrafije in so gradniki radarske stratigrafije za georadarski refleksijski profil (Neal 2004) (slika 34).

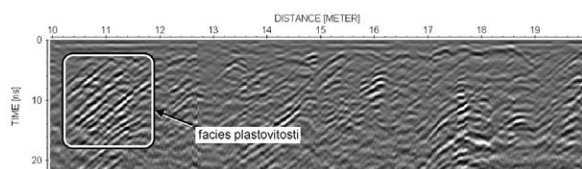
Pri opisu radarskih faciesov navajamo:

- obliko odbojev
- vpad odbojev
- odnose med odboji
- celovitost odboja

2.8.1. Facies plastovitost

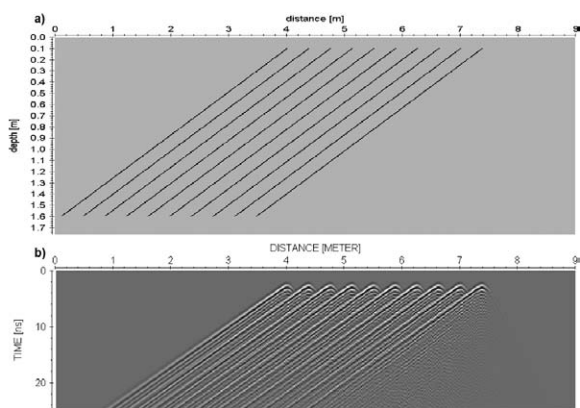
Facies določajo ravni, nagnjeni, vzporedni, zvezni in delno prekinjeni odboji. Glede na izdanke v arheoloških sondah lahko z gotovostjo trdimo, da ta facies predstavlja plastovitost (slika 35).

Primerljivi odboji so ugotovljeni tudi s pomočjo georadarskega modela, sestavljenega iz več med seboj vzporednih nagnjenih elementov, ki ponazarjajo lezike med plastmi. Debelina lezike je 0,9 mm (slika 36).



Slika 35. Primer faciesa plastovitosti (kvadrant 21, profil 85).

Figure 35. Example of bedding facies (grid 21, profile 85).



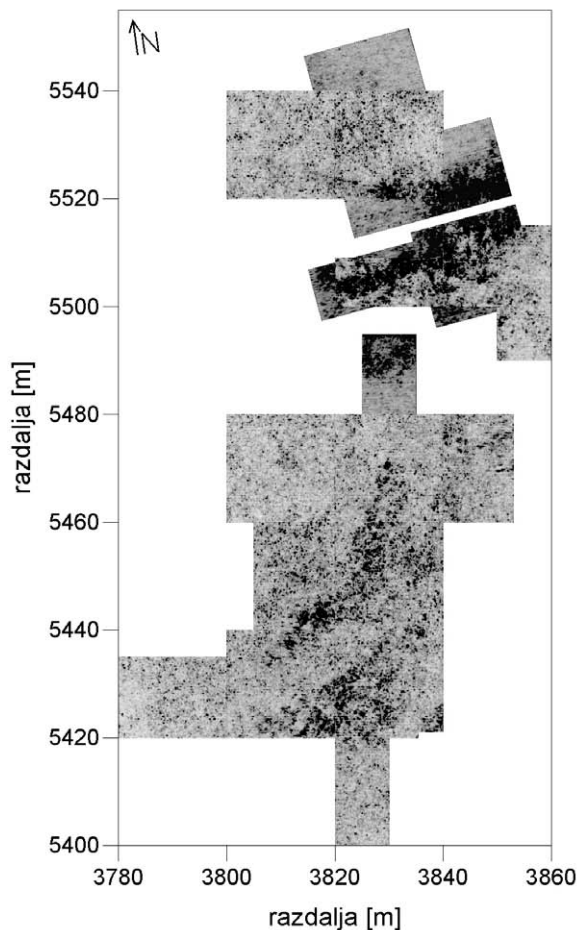
Slika 36. Geometrijski model plastovitosti (a) in modelirana plastovitost glede na geometrijski model.

Figure 36. Geometrical model of bedded limestone (a) and synthetic GPR echoes based on this model.

Za določitev razsežnosti faciesa na horizontalnih rezih se poslužujemo združenih horizontalnih rezov na f-k filtriranih podatkih (slika 37).

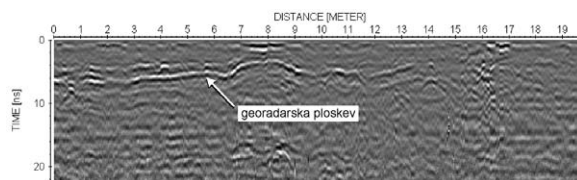
2.8.2. Georadarske ploskve

Georadarska ploskev praviloma ločuje dva georadarska faciesa oziroma označuje neko diskontinuiteto znotraj enega in istega faciesa. V primeru, da se pojavlja georadarska ploskev med dvema različnima medijema, ki povzročata podobne odboje, ju samo na osnovi morfologije odbojev težko ločimo. Tudi v našem primeru se georadarske ploskve pojavljajo med dvema medijema, katerih odbojev ni mogoče jasno ločiti. Zaradi tega smo omenjen facies, ki obsega večji del raziskane površine in predstavlja različne medije, pogojno opredelili kot facies kaotičnih odbojev (*chaotic echoes*, po Bevan 1996) (slika 38).



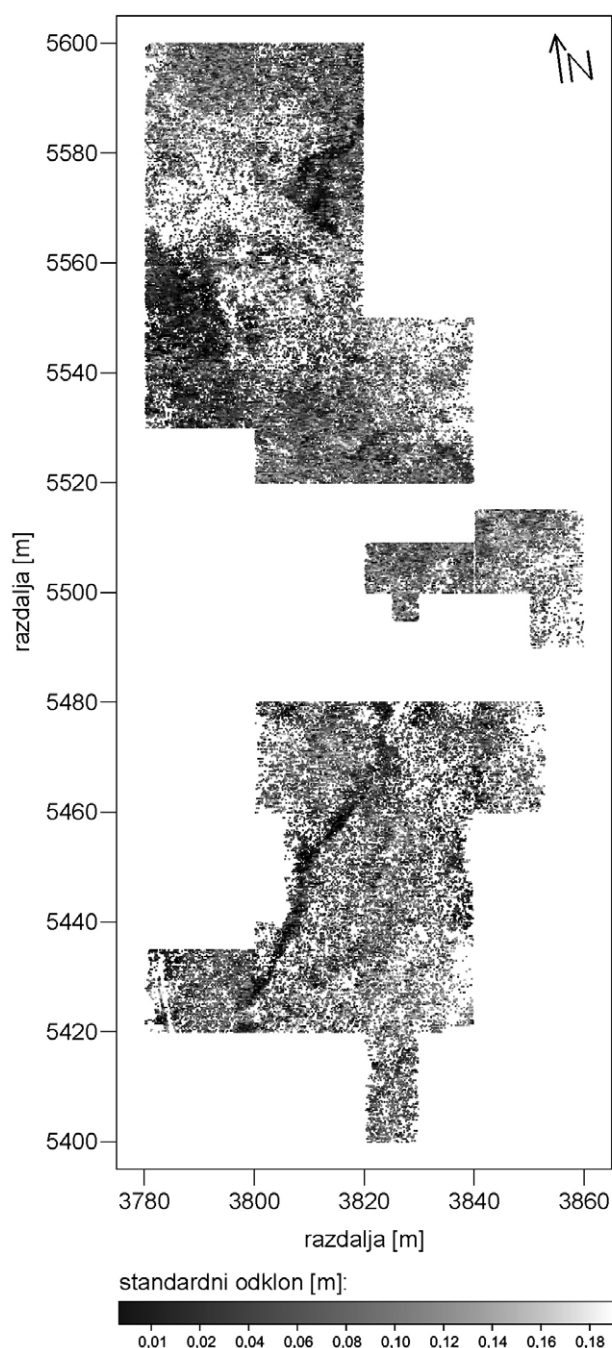
Slika 37. Integralna vrednost amplitud odbojev za celotno raziskano površino na intervalu dvojnega časa od 1 do 20 ns.

Figure 37. Integral amplitude values of echoes for entire surveyed area at a two-way travelling time span from 1 to 20ns.



Slika 38. Primer georadarske ploskve.

Figure 38. Example of the GPR plane.



Slika 39. Karta standardnih odklonov v smeri z (po globini) za območji 1 in 2.

Figure 39. Map of standard deviations in direction z (over depth) for Areas 1 and 2.

Georadarske ploskve najlažje določimo z izračunom standardnega odklona na točkah samodejnega izbiranja. Vrednost standardnega odklona po globini kažejo na uravnano odbojev, gostota samih točk pa nam priča o zveznosti takšnih odbojev. Če imajo točke samodejnega izbora nizko vrednost standardnega odklona in so gosto razporejene imamo opravka z georadarsko ploskvijo. Ko opravimo samodejno izbiranje na določenem intervalu globine na izbranih kvadrantih, lahko hitro ločimo georadarske ploskve od ostalih odbojev. V našem primeru mora biti vrednost standardnega odklona po globini manjša od 0,04, da lahko omenjene točke štejemo za točke georadarskih ploskev. Na karti prepoznamo tri večja območja, ki ustrezajo zahtevam georadarske ploskve. Omenjena območja, so bila vidna že na horizontalnih rezih, vendar posamično in ne integralno (slika 39).

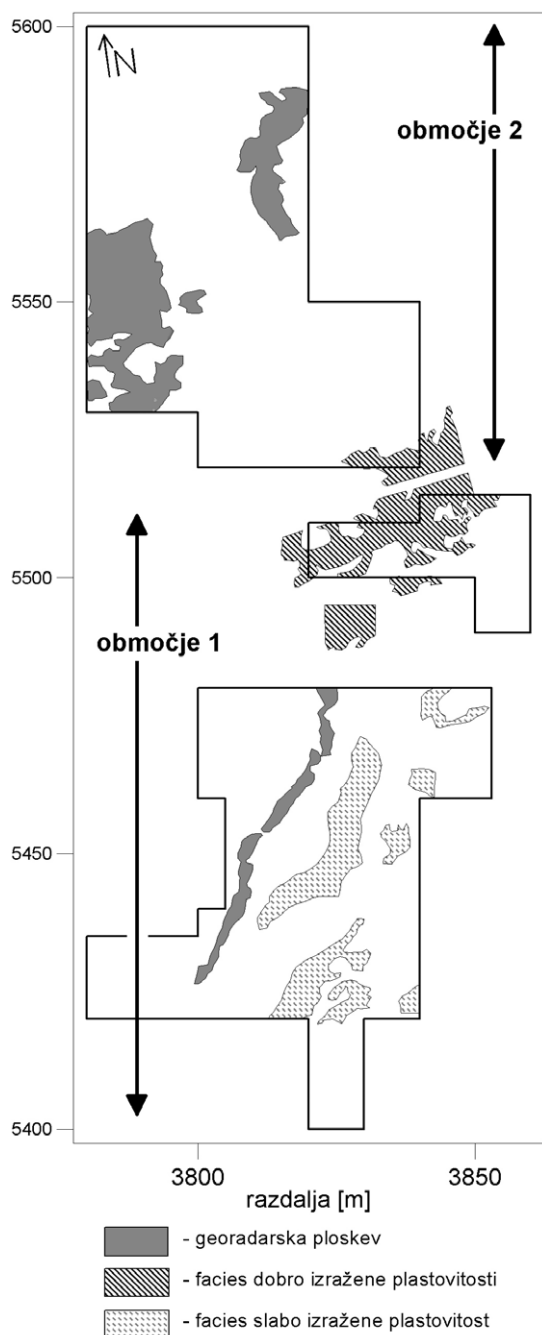
Faciesi, georadarske ploskve in njihov obseg na raziskanem območju so prikazani na sliki 40. Pri faciesu plastovitosti je bila poleg razširjenosti določena tudi intenziteta, ker je plastovitost nekje boljše, drugje slabše izražena. Zaradi preglednosti so v facies plastovitosti vključena tudi območja merjena z 400 MHz anteno (slika 37).

Rezultati razširjenosti določenih georadarskih faciesov se ujemajo s splošnimi opisi območij 1 in 2 (slika 8). Na območju 1 je dobro izražena plasovitost, na severni strani nekoliko bolj kot na južni. Plastovitost se pojavlja v pasovih oz. lečah, usmerjenih NNE-SSW, kot so usmerjene anomalije od bolj izražene plastovitosti. Tudi georadarska ploskev sledi orientaciji pasov plastovitosti. Tudi na območju 2 je vidna plastovitost, ki pa je omejena samo na skrajni jugovzhodni del tega območja. Sicer prevladujejo peski brez jasno izražene plastovitosti. Georadarski ploskvi na območju 2 sta nepravilne oblike in ne kažeta jasne usmerjenosti.

2.8.3. Interpretacija georadarskih faciesov s pomočjo podatkov vrtin in sond

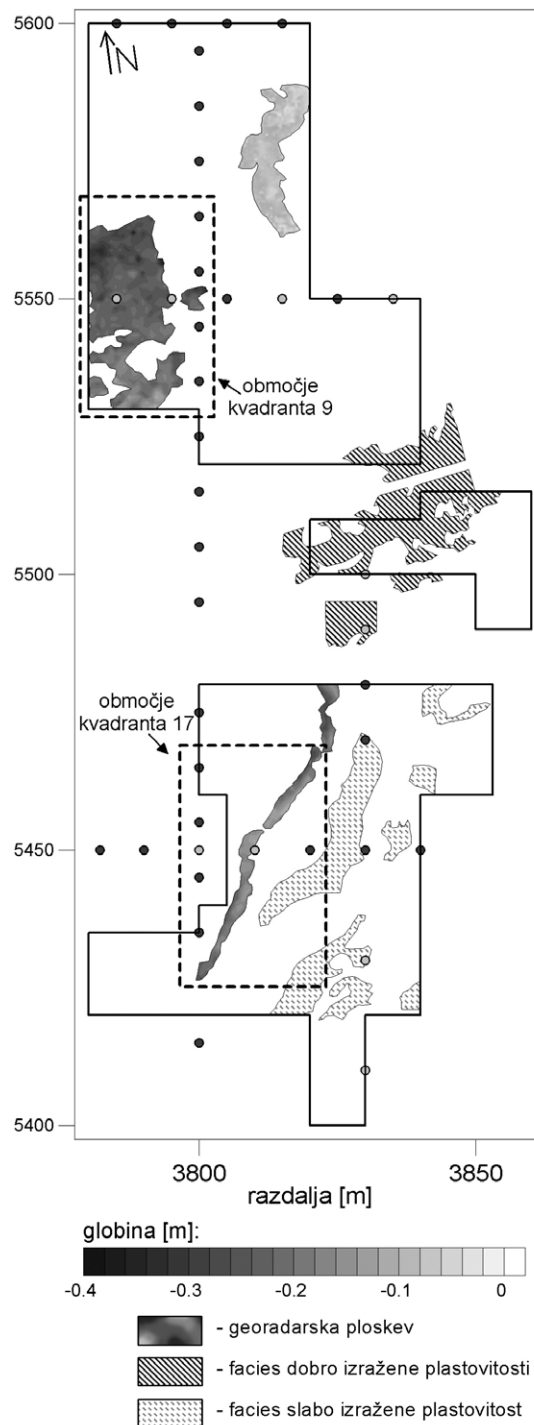
Za verodostojnejšo interpretacijo georadarskih faciesov in ploskev smo upoštevali rezultate vrtin in testnih sond (sliki 3 in 41).

V ta namen smo izbrali na območju 2 kvadrant 9 in na območju 1 kvadrant 17 (sliki 32 in 41). Testna sonda *Block A* na območju 2 (slika 42) je bila izkopana na podlagi predhodnih rezultatov izvrtanih jeder s plastmi oglja in



Slika 40. Karta georadarskih faciesov.

Figure 40. Map of GPR facieses.



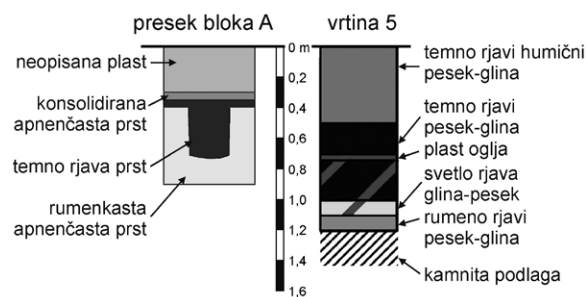
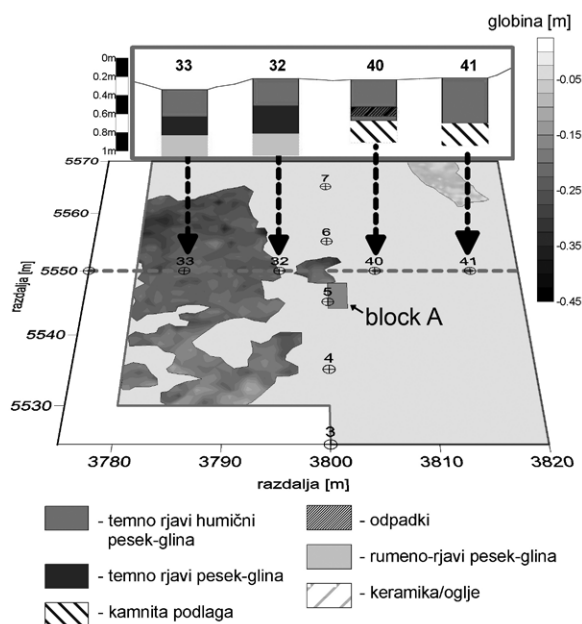
Slika 41. Karta georadarskih faciesov skupaj z morfologijo georadarskih ploskev.

Figure 41. Map of GPR facies together with morphology of GPR planes.

Slika 42. Pogled na *Block A* (foto: Alice Samson).Figure 42. View on *Block A* (photo: Alice Samson).

pepela na globini 0,7 m. Stojke so odkrili na globini 0,3 m, pod plastjo temnorjavih tal, prekritih s skorjo delno konsolidiranih apnenčastih tal. Polnilo stojk je bilo mnogo temnejše od rumenkaste apnenčaste prsti, v katero so bile vkopane. Geneza relativno tanke apnenčaste skorje, ki je ponekod boljše, drugod slabše konsolidirana, naj bi bila bolj recentnega nastanka (Hoffman 2006).

Ko primerjamo med seboj izsledke vrtine 5 s shematskim prikazom preseka testne sonde, ugotovimo, da v opisu vrtine ni sledi o konsolidiranem pesku, kakor tudi ne o rumenkasti apnenčevi prsti, v kateri ležijo stojke (slika 43). V primeru, da je bila vrtina natančno na območju stojke, je možno, da bi se svetlejša prst pojavila globlje, kakor je razvidno iz vrtine 5. Omenjena skorja konsolidirane apnenčaste plasti se tako nahaja v območju *temno rjavi humični pesek-glina*, pod katero leži tudi druga podobna plast *temno rjavi pesek-glina* (opisi plasti vrtin so arheološki opisi in se nanašajo predvsem na videz posamezne plasti, manj pa na njeno sestavo). Z veliko

Slika 43. Shematski prikaz arheološkega profila testne sonde (*Block A*) in primerjava z jedrom vrtine.Figure 43. Schematic display of archaeological section in test sounding *Block A* and comparison with bore hole core description.

Slika 44. Primerjava georadarskih ploskev z vrtinami 33, 32, 40 in 41.

Figure 44. Comparison of GPR planes with descriptions of cores in bore holes 33, 32, 40 and 41.

verjetnostjo lahko trdimo, da je plast temno rjavi pesek-glina tista plast, ki ustreza temno rjavi plasti iz opisa za testno sondo *Block A*.

Iz primerjave vrtin 33 in 32, ki ležita na območju georadarske ploskve z vrtino 5, vidimo, da imajo vse

naštete vrtnice enako zaporedje prvih dveh plasti (slika 44). Prisotnost plasti *temno rjavi pesek-glina* bi lahko bila povezana z georadarsko ploskvijo. Še bolj kot sama plast, pa bi lahko bil vzrok močnih odbojev georadarske ploskve prisotnost apnenčaste skorje, ki se nahaja tik nad omenjeno plastjo. Posredni dokaz za to so ostale vrtnice v bližini, kjer ni plasti *temno rjavi pesek-glina*, kot tudi ne georadarske ploskve.

V primerjavi z interpretacijo georadarske ploskve na območju kvadranta 9 je interpretacija georadarske ploskve na območju kvadranta 17 mnogo bolj enoznačna (slika 32 in 45). V tem primeru imamo na razpolago opise vrtnice št. 58, ki prebada georadarsko ploskev. Vrhnjih 7 cm jedra vrtnice nad apnenčevo podlago je opisanih kot *rjavi pesek-glina*. Glede na dve bližnji vrtnici 59 in 57 (slika 45), kjer se peščena podlaga nahaja na globini 62 oz. 68

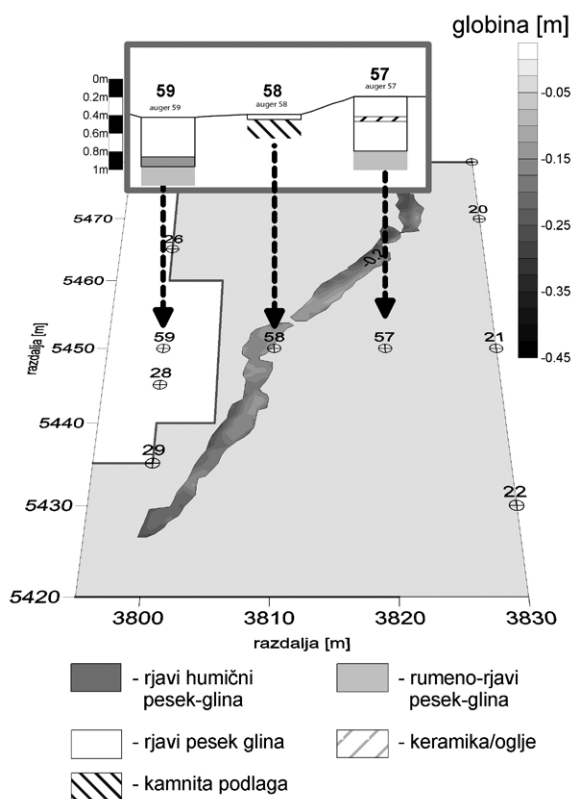
cm, lahko z veliko verjetnostjo trdimo, da je georadarska ploskev na tem območju posledica plitvo ležeče kamnin-ske podlage.

3. Razprava o rezultatih in zaključki

Iz primerjave sintetičnih georadarskih profilov z izmerjenimi profili ugotavljamo, da so slednji mnogo bolj kompleksni, kot bi si želeli. Vrzeli v plitvih odbojih od podlage, ki na sintetičnih profilih natančno označujejo stojke, v izmerjenih profilih ni. Podobno se tudi predpostavljani in z georadarskimi modeli izračunani odboji od dna stojke izgubijo v množici ostalih odbojev. Edini element, ki je viden tako na izmerjenih, kot tudi sintetičnih profilih, je plastovitost. Izraziti radarski odboji na prostorih med stojkami, kjer jih ne pričakujemo, kažejo na razliko med elektromagnetnimi lastnostmi polnila stojk in neposredne okolice. Odboje med različnimi polnili stojk je težko ločiti od odbojev med preperinskim pokrovom in apnenčasto podlago. Poleg tega je apnenčasta podlaga tudi zelo porozna, kar dodatno prispeva k šumu. Odboji pa vsebujejo informacijo o apnenčevi podlagi. Del te informacije se skriva v amplitudnem spektru, kar je dobro razvidno iz morfologije posameznih odbojev tudi na horizontalnih rezih. Z ustreznim pristopom lahko ločimo območja nižjih amplitud plitvih horizontalnih rezov, ki so povezana s pojavljanjem stojk in večjo razgibanostjo reliefa podlage, od območij z večjimi amplitudami, ki nakazujejo bolj izravnano podlago brez večjih stojk.

Posamezne stojke, večje od cca. 35 cm, ki ležijo na izravnani podlagi, je mogoče jasno prepoznati le na profilih testne sonde, kjer je bila oddaljenost med profili 10 cm. Na ostalih kvadrantih z gostoto profilov na 25 cm pa je bilo to sorazmerno manj zanesljivo. Kljub temu smo predvsem po zaslugi orodja izbiranje premetov (*picking objects*) dosegli dobre rezultate pri določanju splošne morfologije površja apnenčeve podlage. Slabše rezultate smo dobili s horizontalnimi rezi, vendar najboljše možne, predvsem zaradi uporabe postopka določanja učinkovitosti za različne amplitude.

Obdelava podatkov celotnega območja meritev je zahtevala prilagojen niz obdelave. Jedro obdelave tvori deset zaporednih faz v natančno določenem zaporedju. Ugotovitve na območju testne sonde so bile zaradi nehomogenega medija uporabljene samo na manjšem območju. Uvajanje koncepta radarskih faciesov smo iz-



Slika 45. Primerjava georadarskih ploskev z vrtnicami 59, 58 in 57.

Figure 45. Comparison of GPR planes with descriptions of cores in bore holes 59, 58 and 57.

vedli v želji po bolj celovitem obravnavanju rezultatov predvsem v smislu interpretacije vseh odbojev ne glede na njihov izvor. Primerjava georadarskih faciesov z rezultati arheološke prospekcije je prispevala k razumevanju razširjenosti in oblikovanosti določenih plasti in struktur. Interpretacija oz. vrednotenje konkretnih struktur, še posebej tistih, ki nimajo neizpodbitne geološke osnove, pa ostaja predmet nadaljnjih raziskav predvsem v odnosu do rezultatov magnetne metode.

Tudi po facialni analizi je velik del območja ostal nedefiniran. To predvsem zaradi tega, ker ni kazal nobenih izstopajočih lastnosti, ki bi jih bilo moč izdvojiti oz. interpretirati s pomočjo podatkov iz vrtin in sond. S pomočjo primerjave vrtin in testnih sond s položajem georadarskih ploskev smo ugotovili, da imata georadarski ploskvi, ki smo ju določili različna izvora. Ploskev na območju 2 verjetno predstavlja plast konsolidirane apnenčaste prsti, medtem ko razpotegnjena ploskev na območju 1 odraža plitvo ležečo kamnito podlago. Kamnita podlaga je z veliko verjetnostjo umetno izravnana koralni apnenec, ker nima izražene plastovitosti.

V primerih, kjer se arheološki in geološki elementi med seboj prekrivajo, bi bilo potrebno pred geofizikalnimi raziskavami izvesti natančno geološko kartiranje. Ločevanje geološkega ozadja od antropogenih vplivov je pomemben korak k učinkovitejšemu reševanju tega problema. Večjo učinkovitost pri sprejemljivi hitrosti obdelave podatkov lahko iščemo v smeri bolj uspešnih metod obdelave. Posebno težavo, ki jo je zelo težko odpraviti s posameznimi postopki obdelave, je odstranitev podvojenih odbojev oz. duplesov. Navodila raznih programov za obdelavo georadarskih podatkov svetujejo postopek dekonvolucije, ki pa se v našem primeru ni obnesel. Kar najbolj optimalno obdelani georadarski profili pa so pogoj za samodejno interpretacijo georadarskih podatkov s pomočjo nevronske mreže, kjer program naučimo prepoznavanja določenih vrst odbojev v bazi podatkov.

Recognition and Interpretation of Shallow Microrelief Features in Limestone Bedrock Using the Ground Penetrating Radar Method, the case of El Cabo, Dominican Republic

(Summary)

Negative archaeological features in limestone bedrock such as post holes of relatively small diameter and depth, shallow artificial depressions and levelled unevenness are still considered as very difficult or insoluble problem for geophysical methods. Weak contrasts of small negative targets are often masked by signals of several magnitude orders of greater strength received from the morphologically variable surface of non-homogenous, frequently thinly bedded limestone with sub vertical inclination and different karst features.

The pertinence of our research topic and the necessity of a suitable solution is indirectly demonstrated by the support of the National Geographic Society, which permitted the pilot geophysical exploration at the archaeological site of El Cabo in the Dominican Republic by assuring total financial support for the project »Reading the features: A geophysical (re)construction of Taíno house structures at El Cabo, Dominican Republic«. This article gives some important and in several points pioneers' results on high resolution ground penetrating radar survey, which unveils to some extent the complicated path to archaeologically significant results.

The geophysical research is focused on the procedures, including the collecting and processing data for the recognition of shallow micro topographic features in limestone bedrock for the purpose of archaeological prospection. Key data for the study were obtained with the GPR and magnetometric survey on the archaeological site of El Cabo in the Dominican Republic, where extensive archaeological research was carried out from 2005 to 2009 as part of the project »Houses for the living and the dead«, which deals with ancient settlement of the pre-Columbian Taíno Indians.

The survey was carried out with a 900 MHz antenna, which along with the short wavelength of the emitted EM waves, assures an appropriate resolution. Test measurements took place in a trial trench measuring 5 by 5 m, where a large number of postholes were found. The trial trench was subsequently filled with soil, allowing for GPR measurements. Results obtained in the trial trench revealed that only larger (>35 cm) postholes, lying on a relatively even bedrock surface could be detected. On the other hand, GPR models made on the topographic excavation data showed very neat postholes that correlated with reflections.

There was also strong correlation between the evenness of the bedrock and the amplitudes of the GPR reflections that were observed. The remaining part of the site was surveyed with a profile distance of 0.25 m, unlike that of the trial trench, which was just 0.1 m. The ability to detect postholes drastically diminished, because of the relatively small density of the measurements.

Nevertheless, with the help of advanced data processing procedures and obtained consistency between different quadrants, we succeeded in applying GPR facies analysis. The analysis is based on the separation of different groups of reflections based on their morphology. Some of the facies were subsequently interpreted with the help of the auger drill holes located throughout the site. The results of the GPR facies analysis show the extension of some geological structures (bedding), and other GPR surfaces possibly correlated with anthropogenic factors.

Literatura

- BAKER, P. L. 1991, Response of ground-penetrating radar to bounding surfaces and lithofacies variations in sand barrier sequences. – *Exploration Geophysics* 22, 19–22.
- BERES, M., F. P. HAENI 1991, Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. – *Groundwater* 29, 375–386.
- BEVAN, B. 1996, *Geophysical exploration for archaeology. Volume B. Introduction to geophysical exploration. Archaeological question and answers*. – Geosight technical report 4.
- BOWIN, C. 1975, The geology of Hispaniola. – V: A. Naim, F. Stehli (ur.), *The ocean basins and margins. The Gulf of Mexico and the Caribbean* 3, New York, 501–552.
- HOFFMAN, C. L., M. L. P. HOOGLAND, J. R. OLIVER, A. SAMSON 2006, Archeological Investigations at El Cabo, Eastern Dominican Republic. Preliminary Results of the 2005 Campaign. – *El Caribe Arqueológico* 9, 95–106.
- JOL, H. M., D. G. SMITH 1991, Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. – *Canadian Journal of Earth Sciences* 28, 1939–1947.
- MITCHUM R.V., P. R., VAIL, J. B. SANGREE 1977, Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. – V: C. E. Payton (ur.), *Seismic-Stratigraphy Application to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir 16, 117–123.
- MUŠIČ, B. 2008, Nastavki za kvantitativno analizo rezultatov arheološke geofizike na primeru Sagalassos, Turčija (Starting points for a quantitative analysis of archaeological geophysics results on the example of Sagalassos, Turkey). – *Arheo* 25, 53–67.
- MUŠIČ, B., D. MEDICA, I. MEDARIČ, A. SAMSON 2010, Recognition and interpretation of shallow microrelief features in limestone bedrock using ground penetrating radar and magnetic method, the case of El Cabo, Dominican Republic. – V: A. Samson, C. Hofman, M. Hoogland (ur.), *Houses for the living and dead, organisation of settlement space and domestic life in the Late ceramic age Caribbean* (v tisku).
- MEDICA, D. 2010, Prepoznavanje in interpretacija plitvih mikroreliefnih oblik v apnenčevi podlagi s pomočjo georadarske metode (Recognition and interpretation of shallow microrelief features in limestone bedrock using ground penetrating radar). – *Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta*. Ljubljana.
- NEAL, A. 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology. Principles, problems and progress – *Earth-Science Reviews* 66, 261–330.
- PINCUS, J., R. S. CARR, D. WHITMAN 2004, Imaging Sub-surface Features of the Miami Circle with Ground Penetrating Radar. – *Archaeological Sciences of the Americas, The Inaugural Symposium*, Tuscon, 1–16.
- SAMSON, A. V. M. 2010, *Renewing the house. Trajectories of social life in the yucayeque (community) of El Cabo, Higüey, Dominican Republic, AD 800 to 1504*. – PhD dissertation, Leiden.
- VICKERS, R. S., L. T. DOLPHIN, D. JOHNSON 1976, Archaeological Investigation at Chaco Canyon Using Subsurface Radar. – V: T.R. Lyons (ur.), *Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies*, Albuquerque, 81–101.
- WHITING, B. M., D. P. McFARLAND, S. HACKENBERGER 2001, Three-dimensional GPR study of a prehistoric site in Barbados, West Indies. – *Journal of Applied Geophysics* 47, 217–226.
- YILMAZ, Ö. 1987, Seismic Data Processing. – V: Doherty, S. M. (ur.), *Investigations in Geophysics* 2, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 1–30.

Spletni vir

Splet 1 / Web 1: <http://maps.google.com>