

Projekt:

**POROČILO MERITEV Z GEORADARSKO METODO NA OBMOČJU
GRAJSKE BASTIJE IN STOLPA PISKAČEV, LJUBLJANSKI GRAD**



Izvajalec georadarskih meritev:

KONSTAT BIRO d.o.o.
Vurnikova 2, 1000 Ljubljana

Meritev izvedel:

Kosta Štok, dipl. arheol. (UN), georadarski tehnik

 **KONSTAT
BIRO**
d.o.o. Ljubljana

Ljubljana, februar 2025.

KAZALO VSEBINE:

| | |
|--|---|
| 1 UVOD | 3 |
| 2 POTEK MERITEV | 4 |
| 3 DISPOZICIJA GEORADARSKIH PROFILOV..... | 6 |
| 4 UGOTOVITVE MERITEV Z GEORADARSKO METODO..... | 7 |

PRILOGE:

I) GEORADARSKI PROFILI



KONSTAT BIRO

d.o.o. Ljubljana

KONSTAT BIRO d.o.o., Vurnikova 2, 1000 Ljubljana; 01/433-86-24; konstat.biro@siol.net;
www.konstatbiro.com

1 UVOD

V sklopu projekta prenove grajske Bastije na Ljubljanskem gradu, smo v skladu z naročilnico 91/2025-N, z dne 30.1.2025, 11. 02.2025 izvedli georadarske meritve globine zidov obrambnega obzidja in Stolpa piskačev, ter preverili strukturo tal pod temelji zidov in strukturo tal na območju nekdanjega Stolpa piskačev.



Slika 1: Območje grajske Bastije, kjer smo izvedli meritve z georadarsko metodo. (Zajem zaslona: Google Maps, 2025)

2 POTEK MERITEV

Izvedli smo 34 georadarskih profilov, ki smo jih izvedli na platoju in poglobitvi pod grajskim Palacijem in na območju Stolpa piskačev. Za določitev kontaktne linije med raščenim terenom, oziroma kamninsko osnovo in temelji obrambnega obzidja smo izvedli obodne profile vzdolž razgledne poti pod obzidjem.

Dispozicija izvedenih in analiziranih georadarskih profilov je predstavljena v poglavju 3 - Dispozicija profilov z georadarsko metodo.

Tehnični podatki o meritvi – uporabljen instrumentarij

Georadarske meritve smo izvedli z 450 MHz HDR zakrito anteno švedskega proizvajalca georadarske opreme Mala GeoScience. 450 MHz anteno smo uporabili, ker ima dober globinski doseg.

Uporabili smo naslednje nastavitve antene:

število vzorcev/sled: 512

število bitov/vzorec: 8 bit

dielektrična konstanta: 16

število sledi na sekundo: 64

Glede na vremenske razmere, meritve so potekale v relativno suhem in hladnem vremenu, in poznavanje strukture zemljine smo pričakovali, da bi z georadarjem lahko dosegli globino 5 m. Na globinski doseg vpliva nekaj dejavnikov. Od naravnih sta pomembna dušenje (zmanjševanje amplitude) in odbojne značilnosti meje, kjer pride do sprememb električnih lastnosti kamnin in zemljine. Amplituda radarskega vira se zmanjšuje zaradi sferičnega oddaljevanja EM valovanja od antene.

Vrednost hitrosti poti elektromagnetnega valovanja preko različnih materialov so v večji meri že določene in se gibljejo pri podobnih vrednostih zato smo pri analizi georadarskih profilov smo upoštevali dielektrične konstante in hitrosti, ki so splošno uveljavljene pri analizi in interpretaciji.

Table 12.3 Table of relative dielectric constants and radiowave velocities for a range of geological and man-made materials

| Material | ϵ_r | V (mm/ns) |
|------------------------|--------------|-------------|
| Air | 1 | 300 |
| Water (fresh) | 81 | 33 |
| Water (sea) | 81 | 33 |
| Polar snow | 1.4–3 | 194–252 |
| Polar ice | 3–3.15 | 168 |
| Temperate ice | 3.2 | 167 |
| Pure ice | 3.2 | 167 |
| Freshwater lake ice | 4 | 150 |
| Sea ice | 2.5–8 | 78–157 |
| Permafrost | 1–8 | 106–300 |
| Coastal sand (dry) | 10 | 95 |
| Sand (dry) | 3–6 | 120–170 |
| Sand (wet) | 25–30 | 55–60 |
| Silt (wet) | 10 | 95 |
| Clay (wet) | 8–15 | 86–110 |
| Clay soil (dry) | 3 | 173 |
| Marsh | 12 | 86 |
| Agricultural land | 15 | 77 |
| Pastoral land | 13 | 83 |
| Average 'soil' | 16 | 75 |
| Granite | 5–8 | 106–120 |
| Limestone | 7–9 | 100–113 |
| Dolomite | 6.8–8 | 106–115 |
| Basalt (wet) | 8 | 106 |
| Shale (wet) | 7 | 113 |
| Sandstone (wet) | 6 | 112 |
| Coal | 4–5 | 134–150 |
| Quartz | 4.3 | 145 |
| Concrete | 6–30 | 55–112 |
| Asphalt | 3–5 | 134–173 |
| PVC, Epoxy, Polyesters | 3 | 173 |

 Data from Johnson *et al.* (1979), McCann *et al.* (1988), Morey (1974), Reynolds (1990b, 1991b)

Slika 2: Podatki o hitrostih in dielektrični konstantah merjenih reflektorjev. (Conyers, 2004)

Kalibracija hitrosti merjenega medija ni bila izvedena, ker gre za teren ki je po svoji sestavi heterogen, zato smo pri analizi upoštevali arbitrarno hitrost $v = 0.10$ m/ns. Pomembno je izpostaviti, da pri navedenih globinah v profilih in v globinskih rezih govorimo o nekalibriranih globinah.

Georadarski sistemi delujejo tako, da se visokofrekvenčni elektromagnetni valovi oddajajo v tla, valovi pa se ob stiku z različnimi materiali odbijejo nazaj. Odbiti signali se beležijo v časovni domeni, kar pomeni, da sistem beleži, koliko časa je trajalo, da so se radarski valovi vrnili. Ta čas imenujemo "two way time". Čas potovanja je odvisen od globine odbojnih površin in lastnosti materialov, na katere naletimo. Ker georadarski signal potuje z znano hitrostjo skozi različne materiale, je čas poti povezan z globino podpovršinskih značilnosti. Z analizo časa, ki je potreben, da se signali vrnejo iz različnih globin, je mogoče določiti položaj predmetov ali struktur pod površjem.

Akvizicijo georadarskih profilov smo izvedli s programom Groundvision2, medtem smo analizo in interpretacijo uporabili programa MalaVision. Podatki ki smo jih z meritvijo so bili zelo dobri in čitljivi in so omogočali dobro analizo "in situ", z upoštevanjem hitrosti pri nadaljnji analizi smo



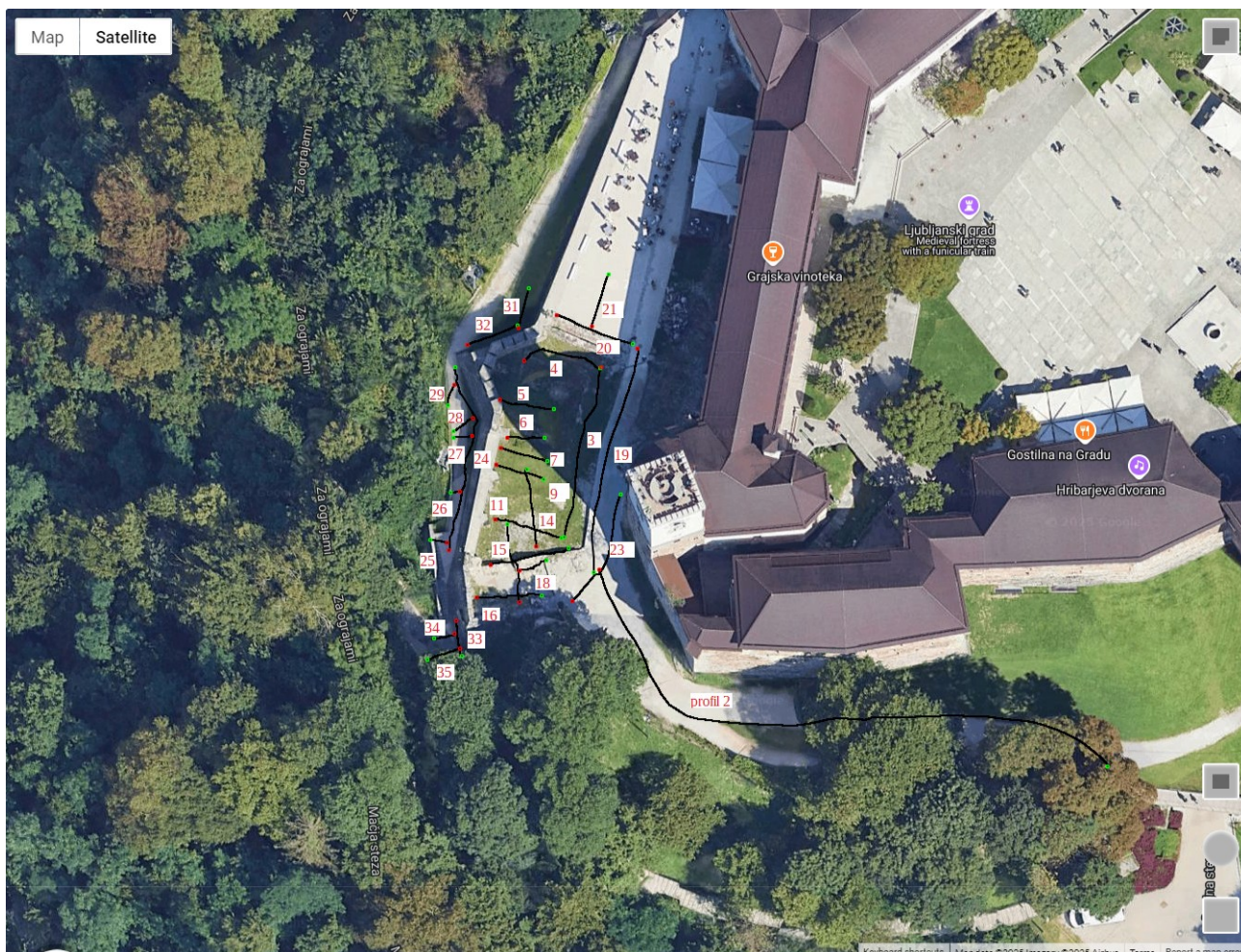
KONSTAT BIRO

d.o.o. Ljubljana

KONSTAT BIRO d.o.o., Vurnikova 2, 1000 Ljubljana; 01/433-86-24; konstat.biro@siol.net;
www.konstatbiro.com

poleg časovne korekcije (hyperbola fitting) in uporabe odstranitve odstopanja električnega toka (DC removal filter) uporabili še ojačitev signala (AGC) in pasovno odstranitev določenih frekvenčnih spektrov, ki so izpostavili spremembe v strukturi apnenca. Za preverbo pristnosti praznin in praznih razpok smo uporabili filter za odstranitev zračnega odboja (Air reflection removal).

3 DISPOZICIJA PREGLEDA Z GEORADARSKO METODO



Slika 3: Dispozicija izvedenih in analiziranih georadarskih profilov. (Zajem zaslona; Google Maps 2025)

4 UGOTOVITVE MERITEV Z GEORADARSKO METODO

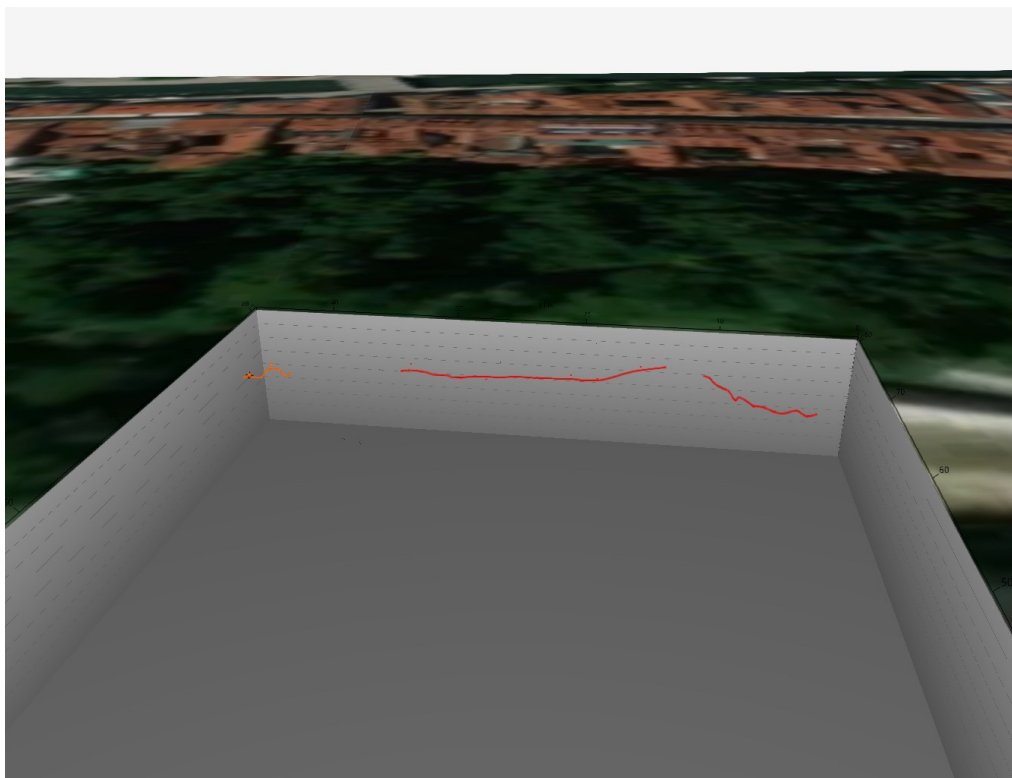
Georadarske meritve na temeljenja obrambnega obzidja na območju Bastije so podale naslednje ugotovitve; kontaktna linija med peto zidov in kamnino osnovo poteka na globini 2,5 m od pohodne površine (sedanja pot ob obzidju), z manjšimi odstopanji v obe smeri. Na georadarskem profilu 24, pozicioniranem levo od trikotnega dela obzidja, je georadar jasno zaznal potek kamninske osnove, ki se kaže kot vodoravni odboj. Georadarski profili, 33, 34 in 35, izvedeni za izmero temeljev kamnite obloge stolpa piskačev so pokazale, da se kontaktna linija med kamnitim zidom in kamninsko osnovo poteka na globini 2 m, merjeno od pohodne površine (pri vznožju stopnic).



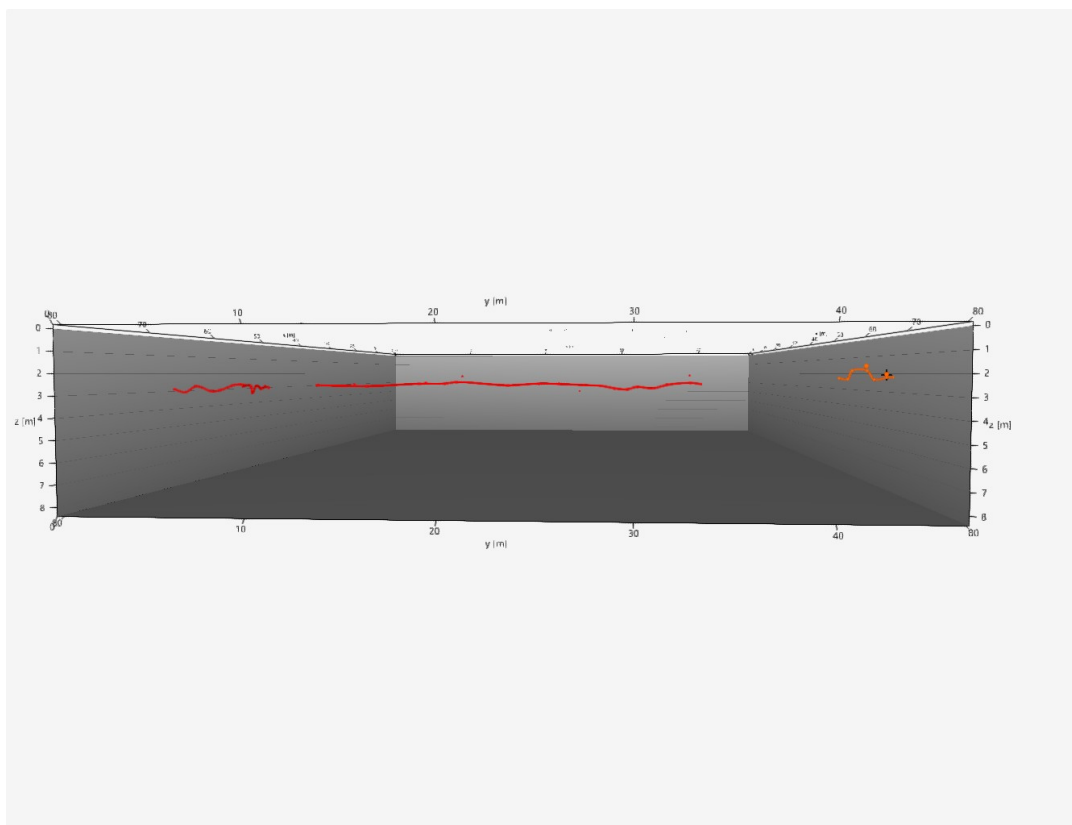
Slika 4: Prikaz posnete kontaktne linije med temelji zidov in kamninsko osnovo. Z rdečo so zidovi obrambnega obzidja, z oranžno pa je označen zid Stolpa piskačev.

Za obliko vkopanega dela zidov, je georadar pokazal možnost razširitve zidu; temelja peta bi morala biti 50 cm širša v smeri poti, torej se zid glede na odboj nadaljuje s obstoječo poševnino (prikaz v načrtu – prerezi, georadarski profili 25 - 29).

Struktura vkopanega dela zidu tvorijo kamniti bloki in kosi kamna različnih dimenzij, heterogenost odbojev kaže, da je bil zid v preteklosti na določenih delih ponovno pozidan, na georadarskem profilu 24 (dolžine profila med 0 in 3 m, med 7 in 8 m in med 9 in 12 m).

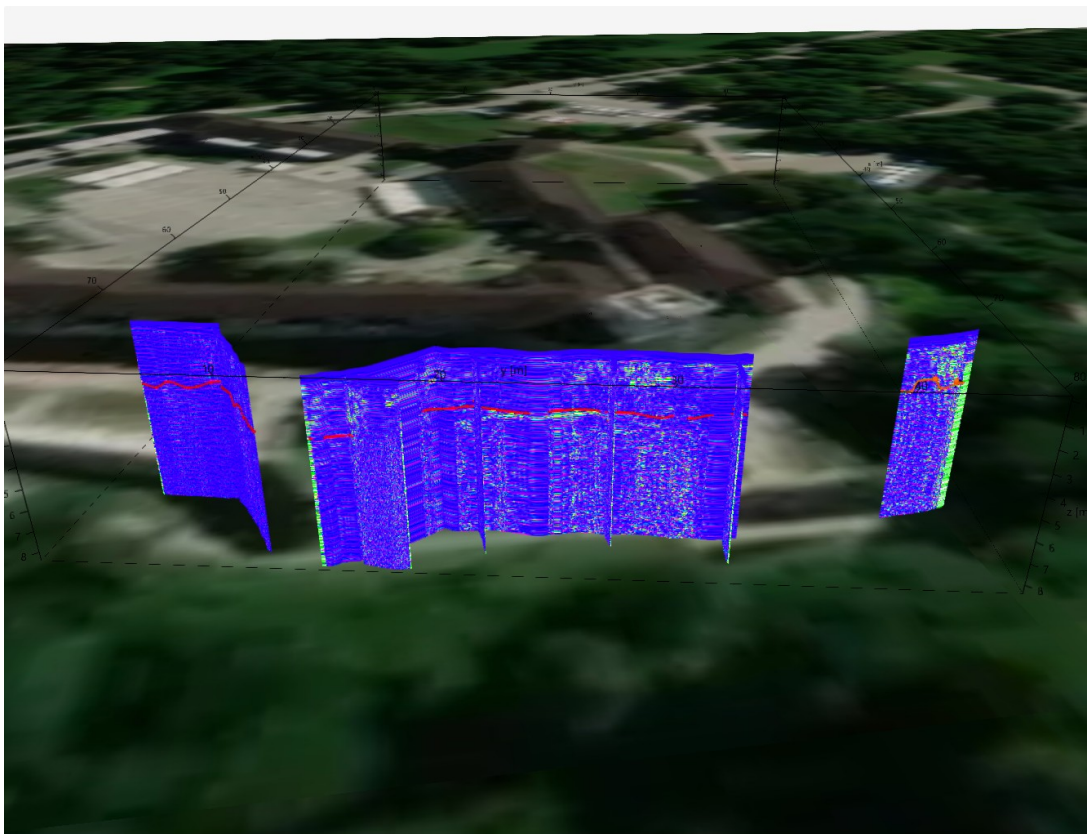


Slika 5: Prikaz posnete kontaktne linije med temelji zidov in kamninsko osnovo. Z rdečo je označena globina zidov obrambnega obzidja, z oranžno pa je označena globina temeljev kamnite obloge ob zidu stolpa piskačev.



Slika 6: Prikaz posnete kontaktne linije med temelji zidov in kamninsko osnovo. Z rdečo je označena globina zidov obrambnega obzidja, z oranžno pa je označena globina temeljev kamnite obloge ob zidu stolpa piskačev.

Pri pregledu vkopanega dela zidu pri stolpu piskačev je takoj opazna razlika v odboju glede na zidove obrambnega obzidja; ker gre za dodano oblogo iz večjih klesanih kamnitih blokov, je sestava bolj homogena, večjo spremembo je georadar posnel pri stopnišču (georadarski profil 33), na dolžini med 60 cm in 2 m; na tem delu so v vkopanem delu zidu prisotne večje praznine med posameznimi bloki.



Slika 7: Prikaz posnete kontaktne linije med temelji zidov in kamninsko osnovo, vpete v georadarske profile, na sredini je jasno viden vodoraven odboj kamninske osnove.

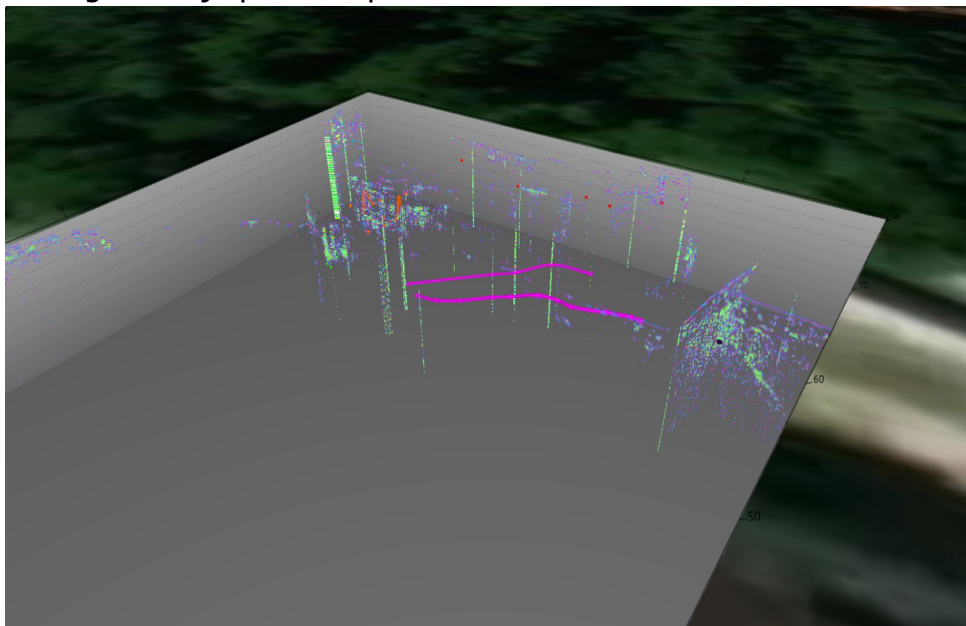
Posnetek na območju Stolpa pikačev je pokazal odboje zasutji grušč in peska do globine 1,5 m, nato pa je do globine vsaj 5 m (merjeno od pohodne površine) prisotno zasutje bolj heterogenim in naključno odloženim materialom, po vsej verjetnosti gre za gradbeni material, večje kose kamna (georadarski profil 15). V obodnih zidovih Stolpa pikačev je georadar zaznal sledi ločne konstrukcije, tako na zunanjem kot tudi na notranjem zidu. Oba vhodna portala sta pozidana, notranji, glede na odboje, verjetno le delno. Vrh notranjega portala se nahaja na globini -2,2 -2,3 m, merjeno od pohodne površine in se nahaja tik ob notranjem prečnem zidu (georadarski profil 18, 12, za zunanji portal

georadarski profil 16). Podatka o pohodni površini in temeljih pod portaloma z georadarjem nismo pridobili zaradi zadužitve signala, iz določenih sledi se da sklepati o poteku linije poti. Levo od stolpa, je georadar posnel večje nasutje širine 2 m, z dnem na globini -3 m; nasutje je bilo po vsej verjetnosti izvedeno zaradi zaščite oziroma stabilizacije zidu Stolpa (georadarski profil 14).

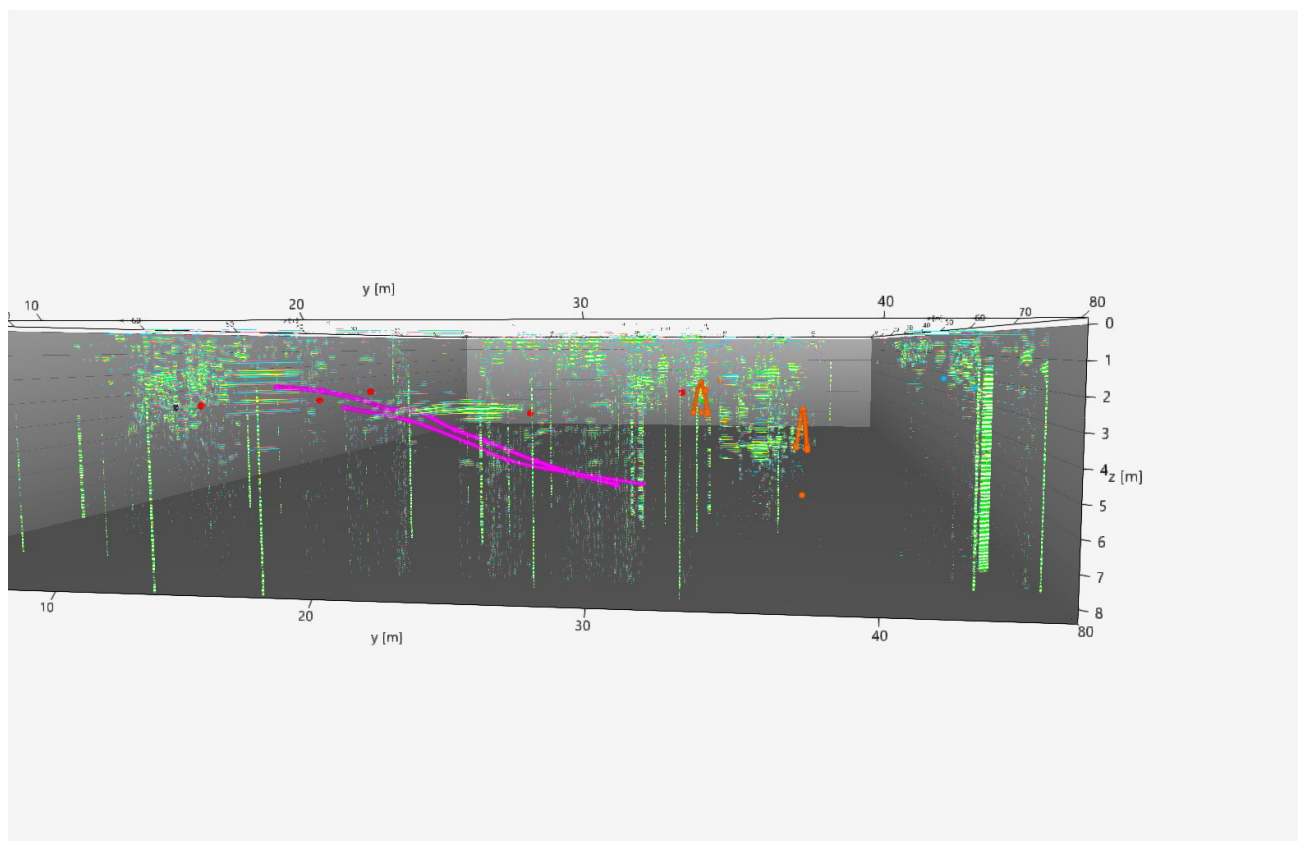
Z georadarjem smo posneli obstoječi zid, v smeri razglednega stolpa, ki je bil po vsej verjetnosti del obrambnega obzidja; širina zidu je 100 cm, dno temelja pa na treh metrih (georadarska profila 19 in 23).

Dvojni zid pri platoju razgledne terase, se prilagaja poteku kamninske osnove in začetni točki ob poti je njegova globina na -2,5 m (merjeno od pohodne površine), na končni točki, kjer se stikata zidova z obrambnim obzidjem, pa je globina zidu 4,5 m; točne globine ni mogoče določiti zaradi zadužitve signala (georadarski profil 20). Globino zidu smo preverili tudi s pravokotnim profilom na zid (georadarski profil 21), ki je pokazal, da je globina zidu na sredini platoja razgledne terase -3 m (merjeno od pohodne površine).

Kamninska osnova oziroma raščen teren se od Stolpa piskačev v smeri platoja razgledne terase postopoma dviguje z ocenjenih -6 m globine na -3 m pri dvojnem zidu na sredini, v smeri obrambnega obzidja pa teren pada.



Slika 8: Prikaz poteka raščenege terena znotraj obzidja, od Stolpa piskačev do razgledne terase.



Slika 9: Prikaz poteka raččenega terena znotraj obzidja, od Stolpa piskačev do razgledne terase, prikazani so zaznani portali v zidovih Stolpa piskačev.