

Kratek zgodovinski pregled arheološke geofizike v svetu in Sloveniji

A Short Historical Overview of Archaeological Geophysics in the World and Slovenia

© Igor Medarić

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo; igor.medaric@ff.uni-lj.si

DOI: 10.5281/zenodo.14418406

Izvleček: Prispevek prinaša kratek zgodovinski pregled arheološke geofizike s poudarkom na razvoju geofizikalnih tehnik, pomenu arheološke geofizike in njenem razvoju v Sloveniji od prvega preizkusa leta 1964 do danes. Posebej obravnava začetke, ključne mejnike in pomembne prispevke tujih in slovenskih raziskovalcev na področju arheološke geofizike. Začetnim prizadevanjem raziskovalcev Zavoda za varstvo kulturne dediščine v šestdesetih letih je v sedemdesetih sledil krajši premor, nato pa ponoven razcvet v drugi polovici osemdesetih let 20. stoletja. Do konca devetdesetih let je bila geofizika pri nas že uspešno vključena v standardne arheološke metode.

Ključne besede: arheološka geofizika, Slovenija, začetki, zgodovina, razvoj

Abstract: The paper provides a brief historical overview of archaeological geophysics with an emphasis on the development of geophysical techniques, the importance of archaeological geophysics, and its development in Slovenia from the first test in 1964 to the present. It specifically discusses the beginnings, key milestones, and important contributions of foreign and Slovenian researchers in the field of archaeological geophysics. The initial efforts of the researchers of the Institute for the Protection of Cultural Heritage in the 1960s were followed by a short break in the 1970s, and then by a revival in the second half of the 1980s. By the end of the 1990s, geophysics had been successfully integrated into standard archaeological methods.

Keywords: archaeological geophysics, Slovenia, beginnings, history, development

Uvod

Leta 2024 mineva 60 let od prvega dokumentiranega preizkusa uporabe ene izmed geofizikalnih metod na arheološkem najdišču pri nas. Ob tej obletnici je v prispevku podan strnjen zgodovinski pregled razvoja geofizike v arheologiji po svetu, s poudarkom na njenih začetkih, razvoju in uveljavljanju v Sloveniji.

Geofizikalne raziskave so danes sestavni del standardnih arheoloških raziskav. Področje v domeni plitve geofizike, za katero je od srede osemdesetih let prejšnjega stoletja v veljavi izraz arheološka geofizika, vključuje integracijo različnih neinvazivnih geofizikalnih tehnik, ki merijo spremembe v fizikalnih poljih Zemlje ali umetno ustvarjenih fizikalnih poljih za kartiranje podpovršinskih ostankov na arheoloških najdiščih (Scollar *et al.* 1990). Tehnike omogočajo poceni, hitro in učinkovito raziskovanje obsežnih območij in, v idealnem primeru, celovitega razumevanja podpovršinske razporeditve pokopanih arheoloških ostankov. Danes jih rutinsko uporabljamo pri odkrivanju novih oziroma kartiranju že znanih arheoloških najdišč in ocenjevanju njihovega arheološkega potenciala ter imajo pomembno vlogo pri varovanju kulturne dediščine. Apliciranje geofizikalnih raziskav, ki so se že od začetka 20. stoletja uporabljale za reševanje različ-

nih geoloških, inženirskih, geotehničnih ipd. problemov, v arheologijo ni bil enkrateno dogodek, temveč postopen proces, na katerega so vplivali različen razvoj instrumentov in stopnje zanimanja za njihovo apliciranje v arheologijo v različnih regijah sveta. Pot do njihovega postopnega vključevanja v arheološko stroko je bila dolga in zanimiva, zaznamovana s številnimi prizadevanji posameznikov in institucij, ki so vsak po svoje prispevali k uveljavitvi arheološke geofizike kot posebnega področja.

Vključevanje geofizikalnih raziskav v arheološke raziskave v Sloveniji je potekalo v več fazah, vsaka pa je bila tesno povezana z napredkom metod in tehnologij v svetovnem merilu. V šestdesetih letih 20. stoletja so pionirske poskuse in prizadevanja za njihovo uveljavitev v Sloveniji začeli raziskovalci zavoda za varstvo kulturne dediščine, sledila sta kratek premor v sedemdesetih letih in ponoven interes v drugi polovici osemdesetih let 20. stoletja. Do konca devetdesetih let je bila geofizika uspešno vključena v standardni del arheoloških raziskav. Ključno vlogo pri njeni vključitvi v arheološko stroko je odigral Oddelek za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani.

Kratek pregled razvoja arheološke geofizike v svetu

Obdobje pred letom 1945

Teoretične osnove za razpravo o uporabi geofizikalnih metod v arheologiji segajo v trideseta leta 20. stoletja. Francoski arheolog Robert du Mesnil du Buisson je leta 1934 v delu *La technique des fouilles archéologiques* (Tehnika arheoloških izkopavanj) prvi predstavil možnosti uporabe različnih geofizikalnih tehnik, vključno z gravimetrijo, magnetometrijo, električno upornostjo in seizmičnimi tehnikami, pri odkrivanju različnih arheoloških ostankov (Hesse 2000).

Prva neinvazivna tehnološka orodja za odkrivanje posameznih arheoloških artefaktov v medvojnem obdobju so bili detektorji kovin. Ta elektromagnetna metoda je bila zaradi razmeroma preproste zasnove in široke dostopnosti zelo priljubljena najprej med iskalci zakladov v Združenih državah Amerike (Santschi 1929), nato pa so njeno uporabnost začeli prepoznavati tudi arheologi. Prvi testni poskusi v arheologiji so bili opravljeni v Združenem kraljestvu v tridesetih letih 20. stoletja (Passmore, Jones 1930). Temu je sledila prva uspešna sistematična uporaba za identifikacijo in razmejitev območij različnih namembnosti na najdišču Provincial Fort Manucy v ZDA (Schoff 1937).

Danes za prvo sistematično geofizikalno raziskavo v arheologiji veljajo meritve, ki jih je opravil ameriški geofizik Mark Cyril Malamphy v Združenih državah Amerike na najdišču kolonialnega Williamsburga novembra 1938. V raziskavi, ki jo je izvedlo podjetje Hans Lundberg Ltd.,¹ so za iskanje zakopanega oboka, za katerega so domnevali, da je povezan z zgodnjo cerkvijo, uporabili meritve električnih potencialov (Bevan 2000). Leta 1946 je isto podjetje, tokrat pod vodstvom Hansa Lundberga, izvedlo še eno pionirsko raziskavo v Mehiki. Z isto metodo, pri kateri s pomočjo galvanometra spremljamo napetostne razlike med dvema vzporednima linijama ozemljenih elektrod s konstantnim tokom (Bevan 2000),

1 Hans Lundberg (1893–1971) je bil švedski rudarski inženir, geofizik in inovator, ki je v tridesetih letih 20. stoletja emigriral v Kana-do. Najbolj znan je po inovacijah in napredku na področju metode električne upornosti ter pionirskih magnetnih in elektromagnetnih raziskavah iz zraka. Geofizikalno raziskavo v kolonialnem Williamsburgu bi verjetno izvedel sam, vendar je bil ravno takrat udeležen v prometni nesreči (Bevan 2000).

so odkrili fosilne ostanke človeka iz Tepexpana (de Terra 1947; 1949).

Pionirsko obdobje (1946–1970)

Po prvih poskusih z detektorji kovin in meritvami električnih potencialov na ameriški celini so bile kmalu po koncu druge svetovne vojne geofizikalne metode prvič uporabljene na arheoloških najdiščih v Evropi. Leta 1946 je britanski arheolog Richard Atkinson na arheološkem najdišču Dorchester ob Temzi z merilnikom upornosti, imenovanim »Megger earth tester«, z Wennerjevo razvrstitvijo elektrod kartiral navidezno upornost tal. Med letoma 1946 in 1952 je v Združenem kraljestvu z isto metodo izvajal meritve na več arheoloških najdiščih iz različnih arheoloških obdobj (Atkinson 1953).

Kartiranje navidezne upornosti, imenovano tudi geoelektrično kartiranje, se je v arheologiji postopoma uveljavilo v petdesetih letih 20. stoletja in je bilo do redne uporabe magnetometrov v začetku šestdesetih let 20. stoletja edina metoda, ki se je uporabljala za arheološko prospek-cijo. Do leta 1960 so jo preizkušali in uporabljali v več evropskih državah. Raziskovalcem v Veliki Britaniji so leta 1953 sledili avstrijski (Schwarz 1959), leta 1954 so jo prvič uporabili na najdiščih v Italiji (Lerici 1958), sledili so raziskovalci iz Nemčije (Scollar 1959), Švice (Schwarz 1959) in Francije leta 1959 (Hesse 2000).

V petdesetih in šestdesetih letih so preizkušali različne načine merjenja upornosti in preverjali različne razvrstitve elektrod, da bi ugotovili, katere bi najbolj ustrezale arheološki prospek-ciji. Pot se je začela z uporabo Wennerjeve razvrstitve, ki ji je sledilo preizkušanje Schlumbergerjeve, pozneje pa so raziskovalci preizkušali možnosti razvrstitve z dvojnimi dipolom (Scollar *et al.* 1990). V arheologiji se je nato najbolj uveljavilo geoelektrično kartiranje z razvrstitvijo elektrodnih dvojčkov, ki izhaja iz klasične Wennerjeve elektrodne razvrstitve in se je brez večjih sprememb ohranilo vse do danes. Njegova preprosta zasnova, uporaba in interpretacija omogočajo jasno zaznavanje arheoloških ostalin brez večjih zunanjih vplivov. Metodo so v sedemdesetih letih 20. stoletja izpopolnili in popularizirali raziskovalci na Oddelku za arheološke vede Univerze Bradford v Angliji (Scollar *et al.* 1990).

Proces termoremanentne magnetizacije železovih oksidov v žganih materialih pri ohlajanju v prisotnosti

zemeljskega magnetnega polja je bil prepoznan že v 19. stoletju (Scollar *et al.* 1990), vendar so bili instrumenti za kartiranje v arheološke raziskave vključeni šele konec petdesetih let 20. stoletja. Po uspešnih terenskih poskusih z različnimi magnetometri konec leta 1957 so angleški raziskovalci leta 1958 za odkrivanje ostankov rimskih peči prvič uporabili protonski magnetometer (Aitken 1958; Scollar *et al.* 1990). Uporaba magnetometra se je zaradi sposobnosti zaznavanja širokega spektra arheoloških ostalin in razmeroma hitrega pridobivanja podatkov v šestdesetih letih hitro razširila med arheološke raziskovalne skupine po vsem svetu. Angleškemu raziskovalcem so sledili nemški, ki so leta 1959 na arheoloških najdiščih prvič uporabili napredne magnetometre lastne izdelave (Scollar 1961). Leta 1961 so magnetne meritve prvič izvedli v Italiji (Lerici 1961), v ZDA, Švici, Franciji in Sovjetski zvezi leta 1962, leto kasneje na Poljskem in leta 1965 na Danskem (Herbich 2015).

Sprva so uporabljali predvsem protonske magnetometre, vendar so meritve zaradi njihove teže, počasnosti (1 meritev na minuto) in omejene občutljivosti (1 nT) pomenile precejšen izziv (Aitken 1958). Kljub tem pomanjkljivostim so bili protonski magnetometri priljubljeni zaradi cenovne dostopnosti in enostavne izdelave (Herbich 2015). Da bi odpravili omenjene pomanjkljivosti in izboljšali magnetne raziskave, so raziskovalci kmalu začeli preizkušati še protonske gradiometre in pretočne magnetometre (Aitken 1960; Tite 1961). Izkazalo se je, da so ti magnetometri manj občutljivi na dnevna nihanja magnetnega polja in na motnje geološke podlage ter da so primernejši za arheološke raziskave (Tite 1961). Nato so leta 1964 uvedli še občutljivejše rubidijeve magnetometre, ki so uporabljali optično črpanje. Ti instrumenti, ki so omogočali tudi hitrejše pridobivanje podatkov, so omogočili zaznavanje šibkejših razlik med naravnimi in antropogenimi materiali (Ralph 1964; Breiner 1965). Konec šestdesetih let prejšnjega stoletja so v arheologiji preizkusili Overhauserjeve magnetometre (Salvi 1970).

V zgodnjih šestdesetih letih 20. stoletja se je v arheoloških raziskavah močno razširil nabor uporabljenih geofizikalnih metod. Poleg magnetometrije in geoelektričnega kartiranja so raziskovalci začeli eksperimentirati z drugimi tehnikami. Ena prvih takšnih metod so bile nizkofrekvenčne elektromagnetne metode, zlasti elektromagnetna indukcija (EMI). Prvi poskusi uporabe instrumentov EMI za odkrivanje arheoloških ostankov so bili opravljeni leta

1962, vendar niso dali prepričljivih rezultatov (Scollar *et al.* 1990). Kasnejše raziskave so pokazale, da so ti instrumenti primernejši za kartiranje magnetne susceptibilnosti (Howell 1966; 1968; Scollar *et al.* 1990). Preizkušene so bile še različne seizmične metode, vključno s seizmično refrakcijo (Carson 1962), metodo soničnega spektroskopa (Carabelli 1966) in seizmično refleksijo (McGhee *et al.* 1968). V arheologijo sta bili prvič uvedeni tudi gravimetrija (Linnington 1966) in metoda inducirane polarizacije (Aspinall, Lynam 1970).

V tem izredno pestrem pionirskem obdobju so bili ustanovljeni prvi oddelki in specializirani centri, namenjeni prvenstveno arheološki geofiziki. Med najdejavnejšimi sta bila raziskovalni laboratorij za arheologijo in zgodovino na Univerzi v Oxfordu, ustanovljen v Angliji leta 1955, in Arheološki inštitut Fundacije Lerici, odprt leto prej na Univerzi v Milanu, ki ga je vodil Carlo Lerici.² Slednja ustanova je imela pomembno vlogo pri popularizaciji arheološke geofizike v vzhodni Evropi in pri nas (Lerici 1980). Konec 50. let je začel pod vodstvom Irwina Scollarja s preizkušanjem in apliciranjem geofizike v arheologiji laboratorij za terensko arheologijo pri Rheinisches Landesmuseum v Bonnu (Nemčija) (Scollar 1959). Podoben center je v 60. letih deloval v Garchyju v Franciji (Centre de Recherches Geophysiques), C.N.R.S., ki se mu je leta 1960 pridružil Albert Hesse. Vsi omenjeni centri in raziskovalci so bili pomembni za uveljavitev in inovacije arheološke geofizike v svojih državah, pa tudi izven njihovih meja. Pomembno vlogo pri začetnem razvoju in sistematičnem apliciranju arheološke geofizike v Evropi je imela v tem času tudi Univerza v Pensilvaniji (ZDA), ki je sodelovala z inštitutom Lerici v Italiji (glej Ralph 1964). Manjši centri so nastali tudi v Sovjetski zvezi (Laboratorij za uporabne tehnologije v arheologiji na inštitutu za arheologijo, ki je bil del takratne leningrajske podružnice Akademije znanosti ZSSR) in na Poljskem (Univerza v Varšavi) (Herbich 2015).

Razvoj in uporaba arheološke geofizike v tem obdobju sta bila dokumentirana v uvodnih številkah britanske re-

2 »Istituto Lerici – Sezione Prospezioni Archeologiche della Fondazione Lerici del Politecnico di Milano« je bil inštitut, specializiran za arheološko geofiziko, ki je od leta 1954 geofizikalne raziskave učinkovito uporabljal najprej na arheoloških najdiščih v Italiji, pozneje pa je svoj vpliv razširil na druge države (Egipt 1961, Turčija in Bolgarija 1963, Jordanija in Španija 1964, Poljska 1965, Češka in Jugoslavija 1969) (Bonghi Jovino, Cavagnaro Vanoni, Linington 1980).

vije Archaeometry (1958–). Ključno vlogo pri razširjanju razvoja na področju arheološke geofizike prek uglednih znanstvenih publikacij pa je imela Fundacija Lerici iz Milana, pobudnica prvih konferenc, ki so vključevale tematiko arheološke geofizike. Od leta 1963 je organizirala letne seminarje, namenjene usposabljanju arheologov na področju najnovejših metodologij. Izdajala je revijo *Rivista di Geofisica Applicata*, med letoma 1966 in 1974 pa še specializirani reviji *Prospezioni Archeologiche* in *Prospezioni Archeologiche – Quaderni* ter posamezne monografije, ki so predstavljale najpomembnejšo literaturo o arheološki prospekcijski v tem obdobju.

Tehnične izpopolnitve in razvoj računalniške opreme (1970–1999)

Veliko večino metod, ki se danes uporabljajo v arheološki geofiziki, so preizkusili do leta 1970. V naslednjih dvajsetih letih je sledilo obdobje tehničnega izpopolnjevanja, utrjevanja in prilagajanja za njihovo širšo uporabo. Pomemben napredek pri arheogeofizikalnih raziskavah je pomenil razvoj računalnikov. Prvi preizkusi računalnikov za arheološko geofiziko so bili izvedeni v šestdesetih letih (Scollar, Kruckeberg 1966), vendar so jih začeli širše uporabljati šele v poznih sedemdesetih in osemdesetih letih.

Splošen tehnološki napredek, še posebej opazen pri obdelavi in vizualizaciji podatkov v 80. letih, je vplival tudi na razvoj geofizikalnih instrumentov in izboljšave, kot sta večja zmogljivost shranjevanja podatkov in možnost preklapljanja med različnimi funkcijami, razmiki elektrod ipd. Pomembne spremembe, kot je bilo izboljšanje ločljivosti magnetometrov, so dodatno vplivale na kakovost in količino podatkov, zbranih med posameznimi raziskavami. Poleg teh tehnoloških inovacij so se v arheologiji pojavile nove metode – predvsem za zagotavljanje želenih globinskih informacij, zlasti georadar – GPR (ang. *Ground penetrating radar*) – in električno profiliranje – ERT (ang. *Electrical resistivity tomography*). Ponovno so preizkušali tudi seizmično refrakcijo (glej Ovenden 1994).

Georadar so na arheoloških najdiščih začeli uporabljati v začetku sedemdesetih let 20. stoletja v ZDA. Prvič je bil uporabljen leta 1973 za odkrivanje arheoloških ostalin v kanjonu Chaco v Novi Mehiki (glej Bevan, Kenyon 1975). Georadarski sistemi so bili v začetku okorni.

Sprejemnik in oddajnik sta bila prek kablov povezana s tiskalnikom, ki je ustvarjal zapise odbojev radarskih valov na termičnem papirju, zaradi česar jih niso množično uporabljali za arheološko prospekcijsko. Vendar se je zaradi možnosti zajema vertikalnih globinskih prereзов, ki omogočajo kakovostno tridimenzionalno vizualizacijo, metoda hitro razvijala, njena uporaba na arheoloških najdiščih pa se je z razvojem opreme na prehodu tisočletja močno povečala.

V tem obdobju so preizkušali tudi večdimenzionalne meritve upornosti, zlasti električno upornostno tomografijo (ERT), ki so jo prvič uporabili na arheološkem najdišču Verulamium v St. Albans leta 1989 (Noel, Xu 1991). Prednosti ERT pred drugimi metodami vključujejo možnost raziskovanja večjih globin ter podroben vpogled v stratigrafijo arheoloških in geoloških plasti, zato se je ta metoda hitro vključevala v arheološke raziskave. Druga, manj pogosto uporabljena, vendar preizkušena metoda v arheologiji je metoda lastnih potencialov (MLP), ki sta jo prvič uporabila Wynn in Sherwood (1984) na različnih arheoloških najdiščih v ZDA. V sedemdesetih letih 20. stoletja so v Franciji za identifikacijo arhitekturnih ostankov prvič preizkusili termične metode (Tabbagh 1974). Z razvojem vseh teh metod se je v zgodnjih devetdesetih letih prejšnjega stoletja povsem uveljavil večmetodni pristop, ki je težil k celovitejšemu razumevanju arheoloških ostankov (Brizzolari *et al.* 1992).

Od začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja so imele ključno vlogo pri razvoju in uporabi geofizikalnih metod v arheologiji izobraževalne ustanove v Združenem kraljestvu, ki so geofiziko aktivno vključevale v svoje programe. Predvsem Univerza v Bradfordu je ob seminarjih in predavanjih iz arheološke geofizike v več letih preizkusila in razvila več prototipov instrumentov in programske opreme, specializirano za arheološko prospekcijsko, vključno z elektromagnetnimi, magnetnimi in upornostnimi metodami (Gaffney, Gater 2003).

Leta 1984 je Roger Walker, diplomant in sodelavec univerze v Bradfordu, ustanovil podjetje Geoscan Research, ki se je osredotočilo na izdelavo geofizikalnih merilnih instrumentov za arheologijo. Ti instrumenti, zlasti ročni pretočni gradiometer in merilnik električne upornosti, so v osemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja v Angliji postali zelo priljubljeni in imeli velik pomen pri arheoloških raziskavah po vsej Evropi, tudi pri nas.

Leta 1994 je bila na pobudo raziskovalcev iz Bradforda ustanovljena revija *Archaeological Prospection*. Ta publikacija je odpravila vrzel in razdrobljenost člankov na področju arheološke geofizike, do katerih je prišlo zaradi prenehanja izhajanja revije *Prospezioni archaeologice*. Revija, posvečena arheološki prospekciji, je še danes ugledna platforma za objavljane člankov s področja geofizike, pa tudi širšega področja arheološke prospekcije. Od leta 1995 vsaki dve leti organizira redna mednarodna srečanja.

V tem času je bilo tudi nekaj inovacij pri nizkofrekvenčnih (do 50 kHz) elektromagnetnih sistemih. V Franciji je geofizik Alain Tabbagh, znan po prispevkih s področja geoelektričnega in elektromagnetnega raziskovanja, razvil elektromagnetni sistem Slingram, ki je omogočal sočasno pridobivanje različnih vrst informacij, vendar je bilo treba na instrumente za uspešno razlikovanje med prevodnimi in magnetnimi značilnostmi na različnih globinah še počakati (Tabbagh 1986). V Veliki Britaniji so izdelali Bartingtonov MS2 elektromagnetni sistem z možnostjo delovanja z dvojno frekvenco, ki je bil uporaben predvsem pri študijah magnetne susceptibilnosti in kartiranju vrhnjega dela tal (Scollar *et al.* 1990).

V devetdesetih letih prejšnjega stoletja so znatno napredovale arheološke raziskave z magnetometri. Uvedba občutljivejših cezijevih magnetetrov, ki temeljijo na optičnem črpanju, je omogočila natančno kartiranje izjemno šibkih oziroma majhnih odstopanj v magnetiziranosti podzemnih struktur. Velik preskok so pomenile tudi raziskave konec devetdesetih let s posebej zasnovanimi vozički z več senzorji, ki so omogočili hitro in natančno pokrivanje velikih območij, kar je pomenilo velik napredek v raziskavah arheologije krajine. Pri uporabi teh tehnologij v praksi, s posebnim poudarkom na preučevanju prazgodovinskih struktur, so bili v ospredju nemški raziskovalci (Becker 1995). Zaradi velike količine izjemno kakovostnih podatkov in razvoja programske opreme je sledil prvi večji poudarek na kvantitativni analizi magnetnih podatkov z neposrednim in inverznim načinom interpretacije (Eder-Hinterleitner, Neubauer 1997).

Še pred tem so bile uvedene in preizkušane možnosti izvajanja geoelektričnih meritev na več globinskih intervalih sočasno in mobilne motorizirane elektrode, ki so omogočile še hitrejše pokrivanje večjih površin, vendar pa se zaradi nepraktičnosti, okornosti in omejenosti na le travnate terene brez podrastja niso povsem prijele (Scollar *et al.* 1990, 344; Panissod *et al.* 1998).

Obsežni podatki visoke ločljivosti, kombinacija več metod, kvantitativne analize (2000–danes)

V zadnjih dveh desetletjih se je izjemno povečala učinkovitost pridobivanja obsežnih geofizikalnih podatkov visoke ločljivosti za arheološko prospekcijo, in sicer pri magnetnih, georadarskih in ERT raziskavah. Uvajanje motoriziranih meritev je olajšalo raziskovanje celotnih arheoloških najdišč in pokrajin. V ospredju teh dosežkov je bil dunajski Inštitut Ludwiga Boltzmann za arheološko prospekcijo in virtualno arheologijo (LBI ArchPro). Omeniti velja raziskave, ki jih je inštitut opravil na rimskem najdišču Carnuntum (Avstrija) (Neubauer *et al.* 2002; 2012) in v Stonehengeu (Velika Britanija) (Gaffney *et al.* 2012; 2018). Ta razvoj je posledično pripeljal do bistveno večjega nabora geofizikalnih podatkov, kar zahteva sorazmerno povečanje učinkovitosti obdelave podatkov in analitičnih zmogljivosti. V luči tega tehnološkega napredka je opazen premik v smeri poudarjanja avtomatiziranega določanja anomalij (Pregesbauer *et al.* 2018; Verdonck, de Smedt, Verhegge 2019; Küçükdemirci, Sarris 2020), kvantitativnih analiz in interpretacije načina inverzije, pa tudi natančnih analiz okoljskih dejavnikov, naravnih struktur in arheoloških značilnosti (Cuenca-Garcia *et al.* 2018).

V tem času je močno napredovala georadarska tehnologija v smislu hitrosti, pokritosti velikih območij in zmogljivosti programske opreme. Z uvedbo večkanalnih sistemov v arheologijo na prelomu tisočletja je georadar postal eno glavnih orodij za določanje tridimenzionalnih podpovršinskih dimenzij (Trinks *et al.* 2018). Pri obravnavi zelo gostih naborov georadarskih podatkov novi pristopi k 3D prostorskemu upodabljanju omogočajo bolj realistično vizualizacijo podatkov (Verdonck *et al.* 2020). Velik napredek na področju instrumentarija in programske opreme je bil v zadnjih 10 letih dosežen tudi pri študijah profiliranja ERT z različnimi elektrodnimi razvrstitvami ter pri izdelavi inverznih modelov, ki omogočajo vse bolj kakovostno kvantitativno interpretacijo in se vse pogosteje uporabljajo na arheoloških najdiščih (Piro *et al.* 2019).

Pri nizkofrekvenčnih elektromagnetnih metodah je viden napredek predvsem pri senzorjih z več sprejemnih tuljav (ang. *multi coil*), ki delujejo sočasno na eni ali več frekvencah, kar omogoča sinhrono in zelo kvalitetno zajemanje meritev na različnih globinskih intervalih. Danes je najbolj uveljavljen nizkofrekvenčni EM instrument

CMD Mini – explorer (GF Instruments). Instrument sočasno meri električno prevodnost, ki je sorazmerna spremembam magnetne susceptibilnosti tal (Bonsall *et al.* 2013).

Uporaba brezpilotnih letalnikov za letalske raziskave, tehnologije LiDAR (*Light Detection and Ranging*) za analizo pokrajine in 3D-modeliranja za namene vizualizacije je še dodatno razširila možnosti arheološke geofizike. Poleg tega so bila v praksi magnetometrije nedavno vključena brezpilotna letala, ki že dajejo obetavne rezultate pri magnetnih meritvah iz zraka (Stele *et al.* 2023). Pričakovati je, da bo na tem področju svoj potencial kmalu pokazala tudi umetna inteligenca.

Pregled arheološke geofizike v Sloveniji

Začetki (1964–1970)

Zanimanje za uporabo geofizikalnih metod v arheologiji v Sloveniji sega v šestdeseta leta 20. stoletja. Pomembno vlogo pri njihovi popularizaciji pri nas ter v drugih regijah srednje in vzhodne Evrope so imele raziskave, ki jih je izvajal italijanski inštitut Lerici. Dosežki pri neinvazivnem odkrivanju etruščanskih grobnic na grobišču Cerveteri so odmevali tudi v slovenskem dnevnem časopisu (Ljudska pravica 1957; Tovariš 1958; Delo 1961) in v strokovni literaturi (Petru 1967). Italija je v tem času nasploh postala središče arheološko-geofizikalnih raziskav v Evropi, saj je inštitut pritegnil vse vidnejše svetovne raziskovalce in organiziral mednarodna srečanja, na katerih so imeli slovenski arheologi verjetno prvo priložnost bolje spoznati geofizikalne tehnike. Eno prvih srečanj je bilo marca 1962 v Benetkah, kjer so lahko prisluhnili predavanju M. J. Aitkena (1962a) o prvih magnetometričnih raziskavah v Italiji ter predstavitvam Carla Lericija in njegovih italijanskih kolegov (Lerici 1962). O tem srečanju so obsežneje poročali tudi pri nas (Tedenska tribuna 1962). Jeseni 1962 je M. J. Aitken predaval na kongresu prazgodovinarjev v Rimu (Aitken 1962b), in sicer o možnostih uporabe geofizikalnih metod v arheologiji – prisotni so bili tudi naši arheologi (Korošec 1962).

O možnostih praktične uporabe in izvajanja sodobnih neinvazivnih metod so prvi resno razmišljali konservatorji Inštituta za varstvo kulturne dediščine (Petru 1967). Pionirskim prizadevanjem v začetku šestdesetih let, ko so se za izvedbo geofizikalnih meritev dogovarjali z

arheologi iz tujine (Petru 1967),³ je 26. maja 1964 sledil prvi praktični preizkus ene od geofizikalnih metod na arheološkem najdišču v Sloveniji. Na rimskem vojaškem taboru v Ločici ob Savinji so uporabili protonski magnetometer (Petru 1964; 1967).

Preizkus je bil vezan na posodobitev in preverbo uporabnosti na različnih področjih protonskega magnetometra v gradientnem načinu, ki ga je fizik Stane Vrščaj izdelal na Institutu Jožef Stefan.⁴ Meritve so bile izvedene na pobudo arheologa in elektroinženirja Rudolfa Berceta⁵ z Instituta Jožef Stefan, s podporo takratnega Zavoda za varstvo spomenikov in narave (Petru 1964; 1967).⁶ Preizkusu je prisostvoval takratni vodja Arheološkega referata pri Zavodu za spomeniško varstvo Slovenije Peter Petru, ki je rezultate opisal kot »vzpodbudne«. Naprava je po Petrujevih besedah »na različnih sektorjih v tem rimskem taborišču dajala različne zvočne signale« (Petru 1964, 163).⁷ Iz zapisanega je mogoče sklepati, da je bila naprava uspešna pri zaznavanju razlik v magnetizaciji različnih materialov pod površjem. Ta pionirski preizkus kartiranja s protonskim magnetometrom v gradientnem načinu je bil ne glede na to, da ni imel pravega epiloga in nadalje-

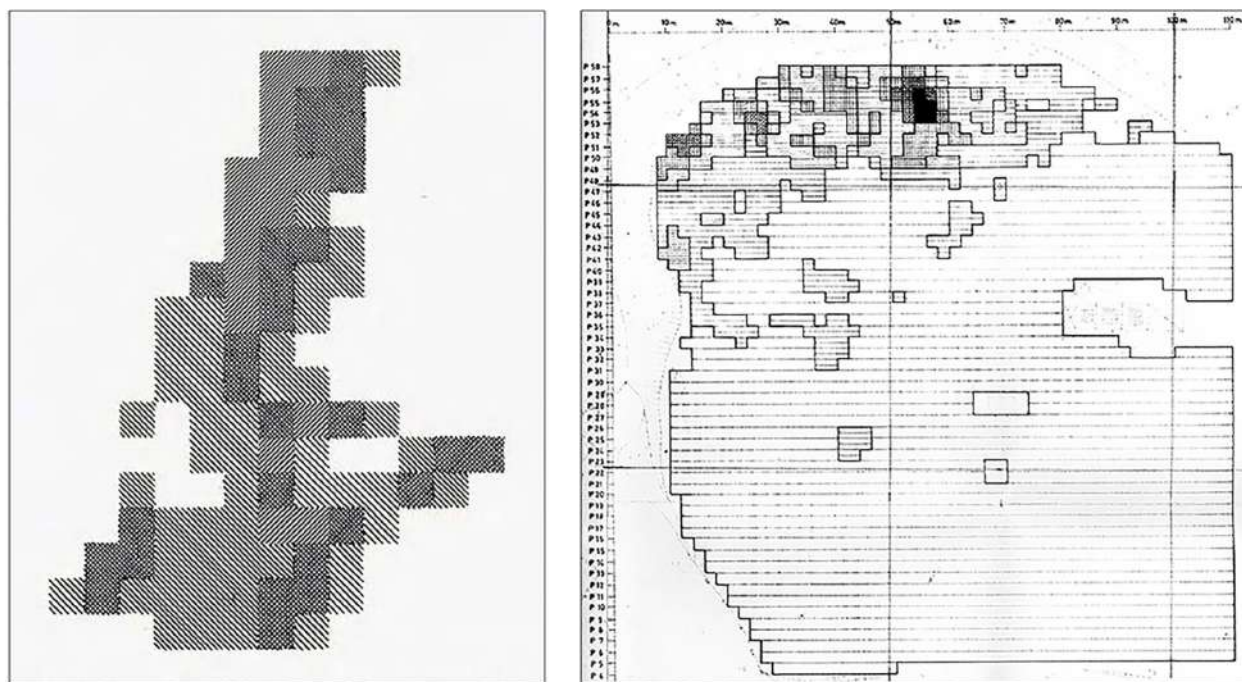
3 Nekaj let pred praktičnim preizkusom v Ločici ob Savinji leta 1964 so se za sodelovanje dogovarjali s Krzysztofom Dąbrowskim, enim izmed pionirjev arheološke geofizike na Poljskem. Že od leta 1961 je s preprostimi torzijskimi magnetnimi tehnicami presenetljivo učinkovito odkrival različne arheološke ostanke (glej Dąbrowski 1963, Herbich 2015). Žal do sodelovanja zaradi pomanjkanja finančnih sredstev ni prišlo (Petru 1967).

4 Stane Vrščaj je leta 1965 za razvoj protonskega magnetometra prejel nagrado sklada Borisa Kidriča. Ob nagradi so zapisali: »Predmet iznajdbe je izboljšava protonskega magnetometra, ki služi za natančnejše meritve zemeljskega magnetnega polja. Aparatura je praktično pomembna v geologiji, astrofiziki in seizmologiji. Natančnost, ki jo dosega, je na meji teoretsko dosegljive natančnosti protonskih magnetometrov. Predmet tehnične izboljšave je protonski gradientni magnetometer za meritve majhnih razlik vrednosti magnetnega polja zemlje. Prednost te izvedbe v primerjavi s podobnimi aparaturami v tujini je izredna okretost in uporabnost meritve na terenu ter daljinsko odčitavanje rezultatov, in je zlasti uporabna za arheološke raziskave« (Fatur 1966, 16).

5 Rudolf Berce, elektroinženir in arheolog (1910–1990), je bil soustanovitelj radia Kričič, ilegalne radijske postaje OF. Po vojni je v Narodnem muzeju Slovenije dobil nalogo vzpostaviti preparatorski laboratorij po sodobnih standardih in metodah (Nemeček 2014). Razvil je metodo čiščenja kovinskih arheoloških najdb s pomočjo elektrolize (Berce 1949a), med prvimi v Sloveniji je pisal o aerofotografiji v arheologiji (Berce 1949b) in objavil prvi priročnik za arheološka izkopavanja (Berce 1951).

6 Instrument so izdelali na Institutu Jožef Stefan pod vodstvom inženirja Igorja Levsteka (Petru 1967).

7 Merilni odčitek se je najverjetneje prenašal kot ustrezno število zvočkov, odvisno od stopnje motnje.



Slika 1. Dolge njive pri Vrhniku (levo) in Simonov zaliv (desno). Ročno izrisani karti navidezne specifične električne upornosti tal (prirejeno po Mikl Curk 1969; Lapajne, Kelhar 1970).

Figure 1. Dolge njive pri Vrhniku (left) in Simonov zaliv (right). Hand-drawn maps of apparent specific electrical resistivity of soil (adapted from Mikl-Curk 1969; Lapajne, Kelhar 1970).

vanja, povsem primerljiv z zgodnjimi raziskavami, ki so bile izvedene s tovrstnimi napravami drugod po svetu.⁸

Omeniti je treba, da so bile meritve v Ločici ob Savinji tudi prvi geofizikalni preizkus na arheološkem najdišču v Jugoslaviji, saj so bile opravljene štiri leta pred prvimi, sicer zelo uspešnimi sistematičnimi meritvami na najdišču Lepanski vir v Srbiji poleti 1968 pod vodstvom geofizika Ranka Mužijevića (1969).⁹ Po teh zelo obetav-

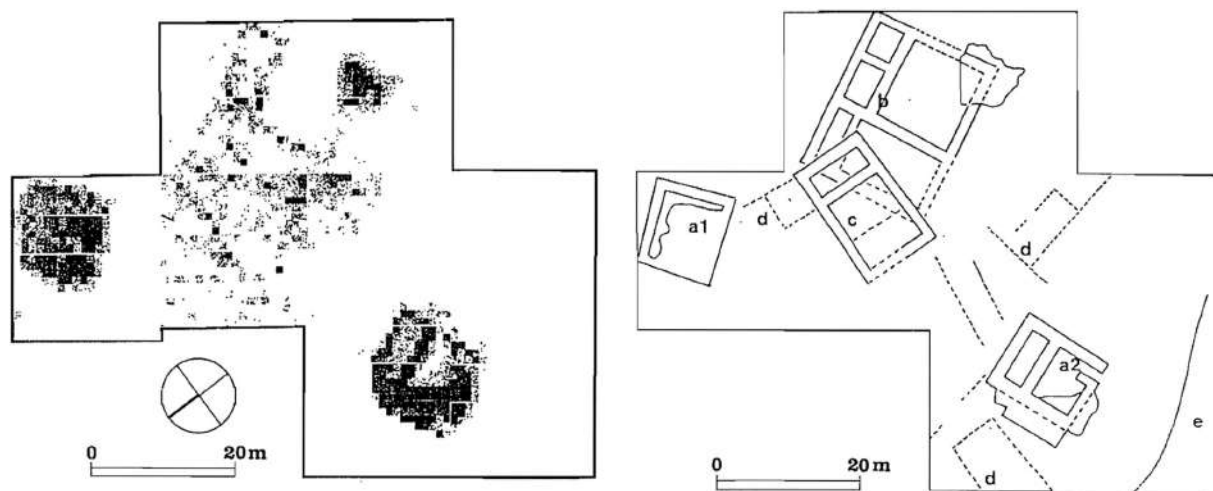
nih začetkih so magnetne meritve v slovenski arheologiji povsem zastale. Na naslednje magnetometrične meritve je bilo treba počakati 25 let.

Konec šestdesetih let 20. stoletja so naši arheologi na arheološkem najdišču prvič preizkusili metodo geoelektrične upornosti. Pobudnik je bil ponovno Republiški inštitut za varstvo naravne in kulturne dediščine. Septembra 1969 so na pobudo arheologinje Ive Mikl Curk raziskovalci Geološkega zavoda Ljubljana pod vodstvom geologa Janeza Lapajneteta opravili meritve specifične upornosti tal na najdišču Dolge njive pri Vrhniku (Mikl Curk 1969) (slika 1).¹⁰ Leto pozneje, oktobra 1970, so z isto metodo izvedli meritve na arheološkem najdišču Izola – Simonov zaliv (EŠD: 195) (Lapajne, Kelhar 1970). Vse meritve so bile opravljene z merilnikom upornosti z izmeničnim

⁸ Uporabo protonskih magnetmetrov v gradientnem načinu v arheologiji je leta 1960 prvič preizkusil Aitken (1960). Zdi se, da je bil pred našim preizkusom gradientni način meritev v arheologiji uporabljen le še v Nemčiji (Scollar 1964).

⁹ Meritve so bile opravljene s protonskim magnetometrom z občutljivostjo 0,5 gama, izdelanim na Geomagnetnem inštitutu Grocka (Mužijević 1969). Oktobra istega leta je Ranko Mužijević z istim instrumentom meritve opravil še na neolitskem najdišču Grivac, junija 1969 pa je Elisabeth K. Ralph z Univerze v Pensilvaniji (ZDA) na istem najdišču uporabila občutljivejši cezijev magnetometer MASCA, ki je omogočil jasno identifikacijo ostankov hiš z ostanki žgane gline (McPherron, Ralph 1970). Med letoma 1969 in 1971 je geofizikalne meritve v Jugoslaviji izvajala fundacija Lerici, in sicer na najdiščih Salona, Čitluk, Stari Grad in Stobreč (Lerici 1980).

¹⁰ Priprave za gradnjo avtomobilske ceste v neposredni sosesčini najdišča so zahtevale večja zaščitna izkopavanja v letih 1969 in 1970. Pri geofizikalnih meritvah in izkopavanjih je bil prisoten tudi takratni študent arheologije Božidar Slapšak (Mikl Curk 1974; Slapšak 2024).



Slika 2. Hrastje ob Bistrici. Rezultati meritev z merilnikom navidezne upornosti (Bradphys Mark IV Earth Resistance Meter) iz leta 1986 na levi in interpretacija na desni. Gre za enega prvih primerov računalniško generiranega grafičnega prikaza geofizikalnih podatkov v Sloveniji (po Waters 1989, 74–77).

Figure 2. Hrastje ob Bistrici. Results of the 1986 Bradphys Mark IV Earth Resistance Meter measurements on the left and the interpretation on the right. This is one of the first examples of computer-generated graphical display of geophysical data in Slovenia (after Waters 1989, 74–77).

napajalnim tokom, izdelanim na Oddelku za geofiziko Geološkega zavoda iz Ljubljane. Specifična upornost tal je bila kartirana z Wennerjevo elektrodno razvrstitvijo s štirimi elektrodami. V Simonovem zalivu so poleg geoelektričnega kartiranja na treh lokacijah izvedli vertikalno geoelektrično sondiranje in meritve navidezne električne upornosti vzorcev kamnin za boljšo potrditev geofizikalnih rezultatov (Lapajne, Kelhar 1970).

O interesu Zavoda za varstvo kulturne dediščine za geofizikalne metode priča tudi dejstvo, da sta se leta 1970 dva naša arheologa¹¹ v Rimu udeležila štirinajstdnevnega informativnega tečaja o uporabi sodobnih metod v arheologiji, ki ga je od leta 1963 vsako leto organizirala Fundacija Lerici. Na predavanjih in na terenu so se seznanili z načeli uporabe aerofotografije, z merjenjem električne upornosti tal in zemeljskega magnetizma ter s seizmičnimi tehnikami. Tu so se naši arheologi seznanili z možnostmi in omejitvami posameznih metod ter primerjali rezultate že opravljenih meritev na dveh najdiščih v Sloveniji (Mikl Curk 1970).

Čeprav so na obeh najdiščih pri nas uspešno prepoznali anomalna območja povišane vrednosti navidezne upornosti potencialnih antičnih zidov, je zaradi pomanjkljive interpretacije, morda tudi zaradi neprilagojenosti instrumentov za arheologijo, počasnega pridobivanja in ročnega zapisovanja podatkov ter izdelave kart, zanimanje arheologov pri nas tudi za to metodo razmeroma hitro zamrlo.¹² Tudi drugod po svetu se po začetnem navdušenju posameznikov, ki so preizkušali instrumente in ugotavljali učinkovitost metod pri arheogeofizikalnih raziskavah v sedemdesetih in zgodnjih osemdesetih letih, kaže stagnacija raziskav in publikacij. Ob zgoraj omenjenih razlogih lahko ta splošni hiatus povežemo tudi z dejstvom, da je vse slonelo na posameznih navdušencih za geofiziko, ki pa so počasi zapuščali oder (Herbich 2015).

Sodelovanje z univerzo v Bradfordu (1986–1989)

Na konkretne korake pri uporabi geofizikalnih metod v Sloveniji je bilo treba počakati do obdobja pomembne modernizacije slovenske arheologije v osemdesetih in

¹¹ Tečaja se je udeležila avtorica Iva Mikl Curk. Verjetno jo je spremljal Marijan Slabe (Kreft 1991, 236). Leta 1972 se je tečaja udeležil tudi prof. Božidar Slapšak (2022, 140; 2024a).

¹² Sredi sedemdesetih let je prof. Božidar Slapšak skupaj z geologom Ljubom Žlebnikom iz geološkega zavoda z metodo kartiranja specifične upornosti tal raziskoval še na enem najdišču v bližini Vrhnike, vendar brez rezultatov (Slapšak 2024b).

devetdesetih letih 20. stoletja, ko sta bila z uvajanjem konceptov angloameriške arheologije jasno opredeljena tudi prostorski in krajinski pristop. Z razvojem metodologije terenskega dela na Oddelku za arheologijo FF UL so se hitro uveljavljale nove tehnike: stratigrafska izkopavanja, sistematični terenski pregled, aerofotografija in geofizikalna prospekcija (Novaković 2003).

Prve geofizikalne raziskave na arheoloških najdiščih po letu 1970 so bile izvedene spomladi 1986 v sodelovanju z Oddelkom za arheološke vede Univerze v Bradfordu v Veliki Britaniji, in sicer prek mednarodnih povezav Božidarja Slapšaka (1989; Waters 1989). Z merilnikom navidezne upornosti »Bradphys Mark IV earth resistance meter«, izdelanim na isti univerzi, ki je bil prirejen za arheološke terene, je študent arheologije Andy Waters v sklopu programa študijske prakse izvajal meritve na več rimskih najdiščih po Sloveniji (Breščak 1988; Slapšak 1989; Waters 1989).¹³

Ta merilnik navidezne upornosti brez samodejnega zapisovalnika podatkov je bil zgodnejša različica kasnejšega instrumenta Geoscan RM4, Geoscan Research. Pri teh raziskavah sta bila prvič pri nas uporabljena prenosni računalnik (EPSON HX-20) in specializirana geofizikalna programska oprema. Programsko opremo, namenjeno vizualizaciji podatkov, so razvili na Oddelku za arheološke vede Univerze v Bradfordu (Waters 1989) (slika 2). Spodbudni rezultati, ponekod preverjeni z izkopavanji, so bili predstavljeni na konferenci v Bradfordu decembra 1987 in v Sloveniji na Filozofski fakulteti v Ljubljani januarja 1988 (Slapšak 1989).

Delo sta v sklopu skupnega arheološkega projekta prek pogodbenih del na Oddelku za arheologijo Filozofske fakultete v Ljubljani v letih 1988 in 1989 nadaljevala Andy Waters in Chris Gaffney – takratni sovodja skupine za geofizikalne raziskave v Bradfordu v Veliki Britaniji. Meritve so izvajali s posodobljenima instrumentoma na-



Slika 3. Benečija pri Trebnjem (1988). Andrew Waters (desno) izvaja meritve z merilnikom navidezne upornosti Geoscan RM4 (foto: D. Breščak).

Figure 3. Benečija pri Trebnjem (1988). Andrew Waters (right) conducting measurements with a Geoscan RM4 apparent resistivity meter (Photo: D. Breščak).

videzne upornosti (Geoscan RM4, Geoscan research in Geoscan RM4 s samodejnim zapisovalnikom podatkov DL-10; Geoscan research) (Waters 1989). Geofizikalne metode so ponovno preizkušali predvsem na antičnih najdiščih, vendar so prvič vključili tudi srednjeveška in prazgodovinska najdišča.¹⁴ Najobsežnejše in zelo uspešne raziskave, pri katerih so z merilnikom električne upornosti izmerili skoraj 4 ha, so potekale na mestu antičnega naselja Benečija pri Trebnjem v okviru načrtovane širitve avtoceste (slika 3) (Breščak 1988; 1989; 1990). Poleg tega so leta 1988 za izvedbo meritev prvič usposobili nekaj študentov arheološkega seminarja na Oddelku za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani (Slapšak 1989).¹⁵

Jeseni 1989 so bile poleg električnih meritev v Sloveniji izvedene prve uspešne meritve z magnetometrom. Pretočni gradiometer angleške izdelave (Fluxgate gradiometer Geoscan FM36; Geoscan Research) so prvič uporabili

¹³ Leta 1986 je Andy Waters v sodelovanju z našimi strokovnimi in znanstvenimi ustanovami kot zunanji sodelavec Znanstvenega inštituta Filozofske fakultete v Ljubljani opravil meritve na naslednjih lokacijah: Simonov zaliv (EŠD: 195) (Stokin, Zanier 2012), Pomjan – Arheološko najdišče Straža (EŠD: 17031), Pomjan – Arheološko najdišče Monte Romano (EŠD: 20887) (Stokin 1987, 262); Hrastje ob Bistrici – Rimska naselbina Banova njiva (EŠD: 4602), Loke pri Gorici – Villa rustica Kolenovca (EŠD: 21218) (Žbona - Trkman 1987, 259), Trebnje - Rodine (Breščak 1987a, 267), Zloganje - Rimskodobna naselbina (EŠD: 8628) (Breščak 1987b, 272) in Velike Malence (Belak 1987, 271).

¹⁴ Leta 1988 so meritve izvajali na naslednjih najdiščih: Benečija pri Trebnjem (Breščak 1989, 220), Velike Malence (Breščak 1989, 263), Maribor – Villa rustica in staroslovansko grobišče Radvanje (EŠD: 6406) (Strmčnik-Gulič 1989, 236), Sveto pri Batah (Osmuk 1989, 243) ter Čentur – Arheološko najdišče Mali in Veliki Čentur (EŠD: 1408) (Mušič 1996, 90).

¹⁵ Ena izmed raziskav, ki jih je Oddelek za arheologijo FF UL opravil samostojno, je bila izvedena na najdišču Sveto pri Batah. Meritve sta izvajala študenta arheologije V. Janežič in A. Djurdjević (Osmuk 1989, 243).

na treh lokacijah v Ljubljani: na Ljubljanskem gradu, na območju izkopavanj Nuk II, na Zoisovi cesti (Vidmajer 1989) in na najdiščih Trebnje - Benečija (Breščak 1990, 187) ter Rigonce (Breščak 1990, 185).¹⁶

Vzpostavitev sistematičnih geofizikalnih raziskav na Oddelku za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Pristop uporabe več metod (1990–2000)

Leta 1989 je Oddelek za arheologijo FF UL s pomočjo raziskovalne skupnosti kupil računalniško in geofizikalno opremo: merilnik navidezne električne upornosti (Geoscan RM4 s samodejnim zapisovalnikom podatkov DL-10; Geoscan research) in pretočni gradiometer (Fluxgate gradiometer Geoscan FM36; Geoscan Research) (Budja 1989). S tem so bili postavljeni pomembni temelji za začetek izvajanja sistematične geofizikalne raziskave v Sloveniji. Hkrati so leta 1991 na oddelku zaposlili mladega raziskovalca, geologa Branka Mušiča (Novaković 2003, 93). Po nekaj testnih meritvah, izvedenih v Ljubljani, so prve meritve z novimi instrumenti poleti 1991 izvedli na območju legijskega tabora na Ravni pri Knjaževcu (Mušič 1994; Slapšak 2024c).

Sledilo je desetletje, ko so se geofizikalne meritve uveljavile kot povsem standardni del arheološke prospekcije. Pod vodstvom Branka Mušiča so bili v arheološko geofiziko vpeljeni inovativni pristopi, preizkušali so več različnih metod in uvajali metodologijo prekrivanja različnih geofizikalnih podatkov (Mušič 2000). V tem obdobju velja izpostaviti raziskave na poznoantičnem gradišču Ajdovščina nad Rodikom. Na tem arheološkem najdišču je bil uporabljen edinstven pristop s kombinacijo nedestruktivnih tehnik, kot so magnetometrija, meritve električne upornosti in navidezne magnetne susceptibilnosti, meritve z georadarjem in analiza lastnih potencialov, kar je prvi primer tako celovitega pristopa na arheološkem najdišču pri nas (Mušič 2000). V sodelovanju z drugimi ustanovami in zasebnimi podjetji so bili pri arheoloških raziskavah preizkušeni tudi različni instrumenti, kot sta protonska magnetometra Geometrics G-819 in GemSystem GSM19 ter georadar GSSI SIR 3, opremljen s 500 MHz anteno (Mušič, Orengo 1999). Poleg tega je vključitev geoloških in geokemičnih študij ter laboratorijskih meritev magnetne susceptibilnosti tal dodatno obogatila geofizikalna prospekcijska prizadevanja na najdišču (Mušič 2000).

¹⁶ Poleg meritev v Sloveniji so izvajali še meritve na Hrvaškem, in sicer na Brionih in v Glasincu (Budja 1989; Gaffney 2013).



Slika 4. Osijek, Hrvaška (2001). Georadarske meritve s starejšim modelom georadarja GSSI SIR-3 z 200 MHz anteno, brez prenosne kontrolne enote (foto: D. Snoj).

Figure 4. Osijek, Croatia (2001). GPR measurements with an older model GSSI SIR-3 with a 200 MHz antenna, without a portable control unit (Photo: D. Snoj).

Med letoma 1991 in 2000 je Oddelek za arheologijo FF UL pod vodstvom Branka Mušiča izvedel več kot 150 geofizikalnih raziskav na arheoloških najdiščih v Sloveniji in tujini. Te raziskave so zajemale različna arheološka obdobja ter so bile metodološko prilagojene specifičnim arheološkim strukturam in posebnostim naravnega okolja (Mušič 1999, Soklič 2000). Geofizikalna oprema na oddelku je bila leta 1999 dopolnjena z nakupom merilnika konduktivnosti in magnetne susceptibilnosti (nizkofrekvenčna elektromagnetna metoda) (Geonics EM38). Raziskave, ki so vključevale inovativne pristope, so bile povsem primerljive z raziskavami v svetu. Oddelek za arheologijo FF UL je v devetdesetih letih izvajal

raziskave tudi v drugih republikah nekdanje Jugoslavije ter na projektih v Franciji in Avstriji (Mušič 1999).

Med letoma 1994 in 2008 so imele geofizikalne raziskave, ki jih je izvajal Oddelek za arheologijo FF UL v sodelovanju z Zavodom za varstvo kulturne dediščine med gradnjo avtocestnega križa, pomembno vlogo tudi pri uvajanju metodologij preventivne arheologije v Sloveniji (Guštin 2012; Novaković 2021, 71). V okviru odkrivanja potencialnih najdišč je bilo na trasi bodoče avtoceste izvedenih več deset geofizikalnih raziskav. V tem obdobju je Oddelek za arheologijo FF UL arheološko geofiziko vključil v svoj učni načrt – najprej kot posamezna predavanja pri predmetu metodologija, nato pa kot del predmeta naravoslovje v arheologiji, prvič v študijskem letu 1998/99 (Novaković 2003, 96).

Vzporedno z raziskavami, ki jih je izvajal ljubljanski arheološki oddelek, so od začetka devetdesetih let 20. stoletja arheološke-geofizikalne raziskave ponujala najprej tuja (Sogest, Tecno futur Service idr.), nato pa še domača zasebna podjetja,¹⁷ ki so izvajala predvsem še vedno drage georadarske meritve (slika 4). Georadar je bil v Sloveniji prvič uporabljen julija 1993 v Pretorski palači v Kopru (Sogest, 1994). Metoda se je zaradi učinkovitosti prepoznavanja ostankov temeljev zidov in arhitektur najprej uporabljala le v urbanih okoljih (glej Sogest 1994; Eurocos 1996; Maselli, Monti 1997), kasneje pa so jo uporabili tudi v kompleksnejših raziskovalnih okoljih, npr. v okviru raziskav Oddelka za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani na Ajdni nad potokom, Rodiku, žički kartuziji itd. (Mušič 1999).

Razvoj in dosežki geofizikalnih raziskav na Oddelku za arheologijo FF UL: od uvedbe novih instrumentov prek kvantitativnih analiz do interdisciplinarnih mednarodnih projektov (2000–danes)

Nakup cezijevega magnetometra Geometrics G-858 leta 2001 je omogočil hitrejšo in natančnejšo magnetno kartiranje ter se še danes najpogosteje uporablja pri raziskavah Oddelka za arheologijo. Instrument je bil prvič uporabljen na lokaciji Družmirje pri Šošanju novembra 2001 (Mušič 2002). Od leta 2000 se je uspešnost metod, izkušenj in znanj oddelka odražala v pomembnih sodelovanjih geofizi-

¹⁷ Kot prvo podjetje v Sloveniji je od sredine devetdesetih let geofizikalne raziskave z georadarjem (GSSI SIR-3) ponujal MIC, d. o. o., ki ga je vodil arheolog Damijan Snoj.



Slika 5. Sagalassos – Turčija (julij 2009). Izvajanje georadarskih meritev z georadarjem GSSI 3000 in 200 MHz anteno s prenosno kontrolno enoto (zgoraj) in magnetnih meritev s cezijevim magnetometrom na optično črpanje Geometrics G-858 (spodaj) (foto: T. Šoba in U. Kirn).

Figure 5. Sagalassos - Turkey (July 2009). GPR measurements with a GSSI 3000 and a 200 MHz antenna with a portable control unit (top) and magnetic measurements with a Geometrics G-858 caesium magnetometer on a Geometrics G-858 optical pumping unit (bottom) (photos: T. Šoba and U. Kirn).

kalne ekipe s tujimi univerzami pri odmevnih mednarodnih projektih. Med letoma 2001 in 2015 je geofizikalna ekipa Oddelka za arheologijo FF UL pod vodstvom Branka Mušiča sodelovala pri raziskovalnih projektih na arheoloških najdiščih v Grčiji (Univerza Leiden) in Turčiji (Univerza Leuven) (slika 5), Dominikanski republiki (Univerza Leiden), Italiji (Univerza Ghent), na Mauritiusu (Univerza Cambridge), v Rusiji (Univerza Pittsburgh) itd.¹⁸

¹⁸ Jedro ekipe so sestavljali arheologi in študentje Oddelka za arheologijo FF UL: Uroš Kirn, Igor Medarić, Matjaž Mori in Jurij Soklič.



Slika 6. Prva izvedba meritev upornosti za 2D geoelektrično tomografijo (ERT) z instrumentom ARES na gomilnem grobišču Poštela (foto: I. Medarić, 2015).

Figure 6: The first 2D geoelectric tomography (ERT) resistivity measurements with the ARES instrument at the Poštela burial mound (Photo: I. Medarić, 2015).

Čeprav je bilo v zadnjih dvajsetih letih pri nas opravljene veliko dela in bi bilo preobsežno zajeti vse raziskave, je treba omeniti zelo uspešne geofizikalne raziskave in analize, izvedene v naselbinskih kontekstih iz rimskega obdobja (Mušič, Horvat 2007; Martens *et al.* 2012; Groh, Sedlmayer 2017; Mušič, Horvat 2020), ter raziskovalna prizadevanja, namenjena raziskovanju in reševanju izzivov, povezanih z geofizikalnimi raziskavami na arheoloških najdiščih v kompleksnih kraških okoljih. Pri tem je bila preizkušena učinkovitost različnih metod v takšnih okoljih, raziskane pa so bile možnosti različnih načinov pridobivanja podatkov, naprednih tehnik obdelave, transformacij, vizualnih predstavitev in kvantitativnih analiz (glej Mušič 1997; Mušič, Orenko 1999; Medica, Mušič, Samson 2010; Medarić, Mušič, Vynke 2011; Mušič *et al.* 2015; Horn *et al.* 2018).

Omeniti je treba tudi raziskave, ki potekajo od leta 2010 in so usmerjene v raziskovanje potenciala geofizikalnih raziskav pri preučevanju prazgodovinskih najdišč (Mušič, Črešnar, Medarić 2014; Mušič *et al.* 2015, Medarić 2018). Interdisciplinarne raziskave so bile opravljene na različnih prazgodovinskih naselbinah, med drugim na Pošteli (Mušič, Črešnar, Medarić 2014), Novinah (Mušič *et al.* 2015), Čreti (Mušič, Medarić, Horn 2017), Cvingerju (Črešnar *et al.* 2019), Debeli griži (Mušič, Medarić, Horn 2018), Kaštelirju pri Kortah (Medarić 2023),

pa tudi na naselbinah na Hrvaškem, Madžarskem in v Avstriji. V okviru nacionalnih in mednarodnih raziskovalnih projektov so bile geofizikalne meritve prvič pri nas zelo uspešno uporabljene za odkrivanje vsebine prazgodovinskih gomil (Teržan, Črešnar, Mušič 2012; Medarić 2018; Mušič *et al.* 2018) ter žganih grobišč (Medarić, Mušič, Črešnar 2016; Mušič, Črešnar, Medarić 2017).

Leta 2015 je bila na arheoloških najdiščih v Sloveniji prvič uvedena električna upornostna tomografija (Mušič *et al.* 2015) (slika 6). Poleg tega je bil v okviru raziskovanja prazgodovinskih najdišč eksperimentalno preizkušen in dosledno uporabljen instrument elektromagnetne indukcije EMI (Basar 2018). V geofizikalne raziskave so bile prvič pri nas vključene meritve totalnega Zemljinega magnetnega polja z baznim magnetometrom (Geometrics G-856AX) in georadarski sistem RTA s 50 MHz anteno (Mušič, Črešnar, Medarić 2014). Rezultate vseh teh geofizikalnih raziskav, ki vsebujejo podatkovne sloje različnih metod, danes rutinsko združujejo z rezultati terenskih pregledov, geokemičnih, pedoloških in geoarheoloških analiz, testnih sondiranja in drugih.

Leta 2008 je bil predmet Arheološka geofizika uveden kot del dodiplomskega bolonjskega študijskega programa. Danes oddelek arheološke geofizikalne vsebine ponuja pri predmetih arheometrija ter geoarheologija in arheološka geofizika, kjer študenti svoje znanje redno preverjajo tudi v praksi.

Po letu 2000 so v Sloveniji arheološke geofizikalne raziskave začela izvajati tudi domača zasebna podjetja. Nekatera, kot npr. Tica Sistem, d. o. o., in Arhej, d. o. o., katerih osrednja dejavnost so bile arheološke raziskave, so geofizikalne metode (predvsem georadar in geoelektrično kartiranje) uporabljala le občasno. Edino podjetje v Sloveniji, specializirano izključno za arheološko geofiziko, je Gearh, d. o. o., ki vodi po številu izvedenih raziskav in raznolikosti uporabljenih geofizikalnih metod. Podjetje poleg obsežnega dela po Sloveniji deluje tudi v mednarodnem prostoru.

Z ustanovitvijo Centra za preventivno arheologijo leta 2009 so po 45 letih geofizikalne raziskave končno začeli izvajati tudi na Zavodu za varstvo kulturne dediščine (glej Rutar *et al.* 2012), kjer se je pravzaprav začela zgodba o arheološki geofiziki pri nas. Geofizikalne raziskave so postale ena izmed standardnih metod, ki jih Center za preventivno arheologijo izvaja pri predhodnih arheoloških raziskavah. Vključevanje rezultatov geofizikalnih raziskav

v GIS podatkovne zbirke je prispevalo k razvoju učinkovitejših raziskovalnih strategij in izboljššanemu upravljanju dediščine ter pomembno optimiziralo načrtovanje izkopavanj. Danes center uspešno deluje na področju arheološke geofizike, podprt z dolgoletnimi izkušnjami in obsežno podatkovno zbirko. V zadnjih 15 letih je zavod izvedel že 103 geofizikalne raziskave na arheološko zaščitene območjih, kjer so bile uporabljene različne metode, kot so georadar, magnetna metoda, metoda električne upornosti in elektromagnetna indukcija (Rutar 2024).

Zaključek

Razvoj arheološke geofizike v Sloveniji je potekal bolj ali manj vzporedno s svetovnim napredkom na tem področju, naši raziskovalci pa so pozorno spremljali rezultate mednarodnih raziskav. To se kaže v komunikaciji in sodelovanju z vodilnimi svetovnimi raziskovalci in ustanovami, kot sta bila inštitut Lerici v šestdesetih letih 20. stoletja in Univerza v Bradfordu v osemdesetih letih 20. stoletja. Do devetdesetih let se je arheološka geofizika v Sloveniji že povsem uveljavila. Zaznamovalo jo je tesno sodelovanje med arheologi, geofiziki, geologi, pedologi in drugimi strokovnjaki. Za to obdobje so bile značilne nenehne inovacije ter uvajanje najsodobnejših instrumentov in metod v skladu s svetovnimi standardi. Danes slovenski raziskovalci še naprej uvajajo novosti pri uporabi različnih tehnik obdelave podatkov in pomembno prispevajo k razvoju področja z reševanjem kritičnih izzivov, kot sta uporaba in preizkušanje različnih merilnih metod v specifičnih naravnih okoljih ter na različnih tipih arheoloških najdišč in posameznih struktur. Skratka, uvedba področja arheološke geofizike je pomembno prispevala k izboljšanju arheoloških raziskav in razumevanja naše preteklosti. Z združevanjem najsodobnejše tehnologije s »tradicionalnimi« arheološkimi metodami raziskovalci v Sloveniji še naprej uspešno razkrivajo skrivnosti bogate zgodovinske in kulturne dediščine pod zemeljskim površjem.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem Božidarju Slapšaku, Mitji Guštinu, Danilu Breščaku in Gašperju Rutarju za deljenje spominov, ki so pripomogli k mojemu boljšemu razumevanju posameznih faz razvoja arheološke geofizike v Sloveniji. Prav tako se zahvaljujem Snježani Karinji za posredovano literaturo in vsem avtorjem za dovoljenje za uporabo njihovih fotografij.

Literatura

- AITKEN, M. J. 1958, Magnetic prospecting. I – The Water Newton Survey. – *Archaeometry* 1, 24–29.
- AITKEN, M. J. 1960, Magnetic prospecting—the proton gradiometer. – *Archaeometry* 3, 38–40.
- AITKEN, M. J. 1962a, The proton magnetometer—principles of operation and its use in archaeology. – V / In: *Relazione presentata al Convegno Promosso dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. May 1962, Venezia*. – Benetke, Fondazione Cini, 1–12.
- AITKEN, M. J. 1962b, Archaeological applications of geophysical methods. – V / In: *Atti del VI Congresso Internazionale delle Scienze Preistoriche e Protostoriche I*. – Firenze, G. C. Sansoni, 21–32.
- ASPINALL, A., J. T. LYNAM 1970, An induced polarisation instrument for the detection of near surface features. – *Prospezioni Archaeologiche* 5, 67–75.
- ATKINSON, R. J. C. 1953, *Field Archaeology* (2. izd. / ed). – London, Methuen.
- BASAR, P. 2018, *Geofizikalne raziskave prazgodovinskih najdišč z nizkofrekvenčno elektromagnetno metodo CMD Mini-Explorer* (Neobjavljeno magistrsko delo / Unpublished master's thesis, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta). – Ljubljana.
- BECKER, H. 1995, From Nanotesla to Picotesla – a New Window for Magnetic Prospecting in Archaeology. – *Archaeological Prospection* 2, 217–228.
- BELAK, M. 1987, Velike Malence. – *Varstvo spomenikov* 29, 271.
- BERCE, R. 1949a, Konserviranje železa. – *Varstvo spomenikov* 2/3–4, 28–30.
- BERCE, R. 1949b, Letalski posnetki in arheologija. – *Proteus* 11/1, 10–16.
- BERCE, R. 1951, Tehnična dokumentacija na arheološkem terenu. – *Zbornik zašтите spomenika kulture* 2, 125–142.
- BEVAN, B., J. KENYON, 1975, Ground-penetrating radar for historical archaeology. – *MASCA Newsletter* 11, 2–7.

- BEVAN, B. 2000, An early geophysical survey at Williamsburg, USA. – *Archaeological Prospection* 7, 51–58.
- BONGHI JOVINO, M., L. CAVAGNARO VANONI, R.E. LININGTON 1980, *Gli Etruschi e Cerveteri: nuove acquisizioni delle civiche raccolte archeologiche : la prospezione archeologica nell'attività della Fondazione Lerici: Milano, Palazzo Reale, settembre 1980 - gennaio 1981*, Issue 16263. – Milano.
- BONSALL, J., R. FRY, C. GAFFNEY, I. ARMIT, A. BECK, V. GAFFNEY 2013, Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. – *Archaeological Prospection* 20, 219–231.
- BREINER, S. 1965, The rubidium magnetometer in archaeological exploration. – *Science* 150, 185–193.
- BREŠČAK, D. 1987a, Rodine pri Trebnjem. – *Varstvo spomenikov* 29, 267–268.
- BREŠČAK, D. 1987b, Zloganje pri Škocjanu. – *Varstvo spomenikov* 29, 272.
- BREŠČAK, D. 1988a, Kaj vse bo izkopala avtomobilska cesta? – *Dolenjski list* XXXIX/13, (31. 3. 1988), 12.
- BREŠČAK, D. 1989, Benečija pri Trebnjem. – *Varstvo spomenikov* 31, 220.
- BREŠČAK, D. 1990, Benečija pri Trebnjem: Trebnje. – V / In: D. Breščak (ur. / ed.), *Arheološka najdišča Dolenjske*, Posebna številka Arhea, izdana ob 100 letnici arheoloških raziskav v Novem mestu 13. 9. 1890 - 13. 9. 1990, Novo Mesto. – Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo.
- BRIZZOLARI, E., F. ERMOLLI, L. ORLANDO, S. PIRO, L. VERSINO 1992, Integrated Geophysical Methods in Archaeological Surveys. – *Journal of Applied Geophysics* 29, 47–55.
- BUDJA, M. 1989, Napovednik. – *Arheo* 9, 79–80.
- CARSON, H. A. 1962, Seismic survey at Harpers Ferry. – *Archaeometry* 5, 119–122.
- CARABELLI, A. 1966, New tool for archaeological prospecting – the sonic spectroscopy for the detection of cavities. – *Prospezioni Archeologiche* 1, 25–35.
- CUENCA-GARCIA, C., K. ARMSTRONG, E. AIDONA, P. DE SMEDT, A. ROSEVARE, M. P. SCHNEIDHOFER, C. WILSON, J. FASBINDER, I. MOFFAT, ... K. LOWE 2018, The Soil science & Archaeo-Geophysics Alliance (SAGA): going beyond prospection. – *Research Ideas and Outcomes* 4, 25.
- DABROWSKI, K. 1963, Application of geophysical methods to archaeological research in Poland. – *Archaeometry* 6, 83–88.
- Delo 1961: Tehnika pomaga arheologiji. – *Časnik Delo*, 13. 8. 1961 (letnik III, št. 220).
- DE TERRA, H. 1947, Preliminary note on the discovery of fossil man at Tepexpan in the Valley of Mexico. – *American Antiquity* 13, 40–44.
- DE TERRA, H. 1949, Early man in Mexico. – V / In: De Terra, H., J. Romero, T. D. Stewart, *Tepexpan man*, Viking fund publications in anthropology 11. – New York, Viking Fund, 13–86.
- EDER-HINTERLEITNER A., W. NEUBAUER 1997, Improvements of 3D magnetic modelling and reconstruction through an archaeological-geophysical experiment. – *Annales Geophysicae* 15/Supplement I, 84.
- EURECOS 1996, *Indagine G.P.R (Ground Probing Radar) per l'individuazione di strutture sepolte a Capodistria in piazza Tito e dietro la rotonda* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS, OE Piran). – Portogruaro.
- FATUR, B. (ur. / ed.) 1966, *Sklad Borisa Kidriča. Poročilo o delu za leto 1965*. – Ljubljana.
- GAFFNEY, C., J. GATER 2003, *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. – Stroud, Tempus publishing.
- GAFFNEY, C., V. GAFFNEY, W. NEUBAUER, E. BALDWIN, H. CHAPMAN, P. GARWOOD, H. MOULDEN, T. SPARROW, R. BATES, ... M. DONEUS 2012, The Stonehenge Hidden Landscapes Project. – *Archaeological prospection* 19, 147–155.
- GAFFNEY, V., W. NEUBAUER, P. GARWOOD, C. GAFFNEY, K. LOCKER, R. BATES, P. De SMEDT, E. BALDWIN, H. CHAPMAN, A. HINTERLEITNER 2018, Durrington walls and the Stonehenge Hidden

- Landscape Project 2010–2016. – *Archaeological prospection* 25, 255–269.
- GAFFNEY, C. 2013, Geofizikalne meritve v Simonovem zalivu, Brionih in Glasincu leta 1989 (osebni vir / personal communication, 18. 3. 2013). – Ljubljana.
- GROH, S., H. SEDLEMAYER 2017, *Otium cum dignitate et negotium trans mare, La villa marittima di San Simone (Simonov zaliv) in Istria (Slovenia)*. – Ricerche series Maior 7. – Bologna, Ante Quem.
- GUŠTIN, M. 2012, Odstiranje prostora in zgodovine. – V / In: Migotti, B., P. Mason, B. Nadbath, T. Mulh (ur. / eds.), *Scripta in honorem Bojan Djurić*, Monografije CPA 1. – Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, 33–55.
- HERBICH, T. 2015, Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. – *Archaeologia Polona* 53, 21–68.
- HESSE, A. 2000, Count Robert du Mesnil du Buisson (1895–1986), a French Precursor in Geophysical Survey for Archaeology. – *Archaeological Prospection* 7, 43–49.
- HORN, B., B. MUŠIČ, M. ČREŠNAR, P. BASAR 2018, Geofizikalne raziskave v kraškem okolju: rezultati električne upornostne tomografije in nizkofrekvenčne elektromagnetne metode na primeru utrjene naselbine Gradišnica pri Dolenjem Gradišču. – *Arheo* 35, 7–31.
- HOWELL, M. 1966, A Soil Conductivity Meter. – *Archaeometry* 9, 20–23.
- HOWELL, M. 1968, The soil conductivity anomaly detector (SCM) in archaeological prospection. – *Prospezioni archeologiche* 3, 101–104.
- KOROŠEC, J. 1962, VI. Internacionalni kongres prazgodovinarjev in protozgodovinarjev 1962. leta v Rimu. – *Zgodovinski časopis* 16, 233–236.
- KREFT, I. 1991, *Kdo je kdo za Slovence*. – Ljubljana, Založba FAGO.
- KÜÇÜKDEMIRCI, M., A. SARRIS 2020, Deep learning based automated analysis of archaeo-geophysical images. – *Archaeological Prospection* 27, 107–118.
- LAPAJNE, J., T. KELHAR 1970, *Simonov zaliv – Izola. Geofizikalne raziskave* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani Pomorski muzej Sergej Mašera, Piran). – Ljubljana.
- LERICI, C. M. 1958, Le applicazioni geofisiche nella ricerca archeologica. – *Studi Etruschi* 26, 297–301.
- LERICI, C. M. 1961, Archaeological surveys with the proton magnetometer in Italy. – *Archaeometry* 4, 76–82.
- LERICI, C. M. 1962, New archaeological techniques and international cooperation in Italy. – *Expedition* 4/3, 5–10.
- LININGTON, R. E. 1966, Test use of a gravimeter on Etruscan chamber tombs at Cerveteri. – *Prospezioni Archeologiche* 1, 37–41.
- Ljudska pravica 1957: Brez krampa in lopate. – *Ljudska pravica*, 18. 4. 1957 (letnik XXXIII, št. 92).
- MASELLI, G., F. MONTI 1997, Relazione sulle indagini diagnostiche effettuate della tecno future service (TFS) nella cattedrale di santa maria di Capodistria (Slovenia). – *Annales: anali za istrske in mediteranske študije. Series historia et sociologia* 7, 37–42.
- MCGHEE, M., B. LUYENDYK, D. BOEGEMEN 1968, Location of an ancient Roman shipwreck by modern acoustic techniques. – V / In: *A critical look at marine technology; Marine Technology Society, 4th annual conference and exhibit, 8-10 July, 1968, Washington, D.C.* – Washington, Marine Technology Society, 127–132.
- MCPHERRON, A., E. K. RALPH 1970, Magnetometer Location of Neolithic Houses in Yugoslavia. – *Expedition* 12, 10–17.
- MEDARIĆ, I., B. MUŠIČ, K. VYNCKE 2011, Vrednotenje rezultatov magnetne metode z uporabo 2D magnetnega modeliranja na primeru arheološkega najdišča Düzen Tepe v Turčiji. – *Arheo* 28, 35–72.
- MEDARIĆ, I., B. MUŠIČ, M. ČREŠNAR 2016, Tracing the flat cremation graves using integrated advanced processing of magnetometry data (case study of Poštela near Maribor, NE Slovenia). – V / In: Armit, I., H. Potrebica, M. Črešnar, P. Mason, L. Büster, (ur./eds.), *Cultural encounters in Iron Age Europe*, Archaeolingua, Series Minor 38. – Budapest, Archaeolingua alapítvány, 67–93.

MEDARIĆ, I. 2018, *Kvantitativna analiza arheoloških struktur z uporabo 2D in 3D magnetnega modeliranja* (Neobjavljena doktorska disertacija / Unpublished doctoral dissertation, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta). – Ljubljana.

MEDARIĆ, I. 2022, Project MagIstra – magnetic mapping of archaeological structures in soils on flysch: case studies from Slovenian Istria. – V / In: Miloglav, I. (ur. / ed.), *Proceedings from the 8th and 9th Scientific Conference Methodology and Archaeometry*. – Zagreb, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Zagreb, 47–62.

MEDICA, D., B. MUŠIČ, A. SAMSON 2010, Prepoznavanje in interpretacija plitvih mikoreliefnih oblik v apnenčevi podlagi s pomočjo georadarske metode na primeru El Caba v Dominikanski Republiki. – *Arheo* 27, 15–43.

MIKL CURK, I. 1969, Zapažanja ob orientacijskem raziskovanju arheološkega terena na Vrhniki z merjenjem specifične upornosti tal. – *Varstvo spomenikov* 13–14, 39–40.

MIKL CURK, I. 1970, Mednarodni tečaji, ki jih prireja Fondazione Lerici v Rimu. – *Varstvo spomenikov* 15, 244–245.

MIKL CURK, I. 1974, Utrdbe Nauporta ob Ljubljani na Vrhniki = Nauportus fortresses by the river Ljubljani-ca at Vrhnika. – *Arheološki vestnik* 25, 370–386.

MUŠIČ, B. 1994, *Geofizikalne raziskave v arheologiji* (Neobjavljeno magistrsko delo / Unpublished master's thesis, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo). – Ljubljana.

MUŠIČ, B. 1996, Geofizikalne raziskave antičnega podeželja Slovenije. – V / In: Guštin, M., P. Novaković, D. Grosman, B. Mušič, M. Lubšina Tušek (ur. / eds.), *Rimsko podeželje = Roman countryside*, Razprave FF. – Ljubljana, Znanstveni inštitut Filozofske fakultete, 83–137.

MUŠIČ, B. 1997, Magnetic susceptibility measurements in dolinas. – *Annales* 10, 37–42.

MUŠIČ, B., L. ORENGO 1999, Magnetometrične raziskave železnodobnega talilnega kompleksa na Cvingerju pri Meniški vasi. – *Arheološki vestnik* 49, 157–186.

MUŠIČ, B. 2000, *Raziskave arheoloških najdišč z metodami geoelektrične upornosti in geomagnetizma* (Neobjavljena doktorska disertacija / Unpublished doctoral dissertation, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta). – Ljubljana.

MUŠIČ, B. 2002, *Poročilo o geofizikalnih raziskavah na lokaciji Družmirje pri Šoštanju* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS, OE Celje). – Ljubljana.

MUŠIČ, B., J. HORVAT 2007, Nauportus – an Early Roman trading post at Dolge njive in Vrhnika, the results of geophysical prospecting using a variety of independent methods. – *Arheološki vestnik* 58, 219–283.

MUŠIČ, B., M. ČREŠNAR, I. MEDARIĆ 2014, Možnosti geofizikalnih raziskav na najdiščih iz starejše železne dobe. Primer arheološkega kompleksa Poštela pri Mariboru. – *Arheo* 31, 19–48.

MUŠIČ, B., M. VINAZZA, M. ČREŠNAR, I. MEDARIĆ 2015, Integrirane neinvazivne raziskave in terensko preverjanje. Izkušnje s prazgodovinskih najdišč severovzhodne Slovenije. – *Arheo* 32, 37–64.

MUŠIČ, B., I. MEDARIĆ, M. MORI, E. NAS 2015, Geofizikalne raziskave na Novinah in Plačkem vrhu. – V / In: Črešnar, M., M. Mele, K. Peitler, M. Vinazza (ur. / eds.), *Archäologische Biographie einer Landschaft an der steirisch-slowenischen Grenze : Ergebnisse des grenzübergreifenden Projekts BorderArch-Steiermark = Arheološka biografija krajine ob meji med avstrijsko Štajersko in Slovenijo, rezultati čezmejnega projekta BorderArch-Steiermark*. – Graz, Universalmuseum Joanneum; Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 86–119.

MUŠIČ, B., I. MEDARIĆ, B. HORN 2017, *Poročilo o geofizikalnih raziskavah na lokacijah Čreta pri Slivnici, Botanični vrt na Pivoli in Hočko pohorje* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS, OE Ljubljana). – Ljubljana.

MUŠIČ, B., I. MEDARIĆ, M. ČREŠNAR 2017, *Poročilo o geofizikalni raziskavi: Brinjeva gora* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani Univerza v Ljubljani, Filozofska Fakulteta, Oddelek za Arheologijo). – Ljubljana.

- MUŠIČ, B., M. ČREŠNAR, I. MEDARIČ, B. HORN 2018, Neinvazivne raziskave gomil, pomnikov starejše železne dobe pod Poštelu pri Mariboru. – V / In: Črešnar, M., M. Vinazza (ur. / eds.), *Srečanja in vplivi v raziskovanju bronaste in železne dobe na Slovenskem, zbornik prispevkov v čast Bibi Teržan*. – Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani, 317–334.
- MUŠIČ, B., I. MEDARIČ, B. HORN 2018, *Poročilo o geofizikalnih raziskavah na arheološkem najdišču Debeli griža* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani Gearh d. o. o.). – Maribor.
- MUŠIČ, B. 2020, Geofizikalne raziskave. – V / In: Horvat, J., B. Mušič, A. Dolenc Vičič, A. Ragolič (ur. / ed.), *Arheološka najdišča Ptuja = Archaeological sites of Ptuj: Panorama*. – Ljubljana, Založba ZRC, 14–27.
- MUŽIJEVIČ, R. 1969, Geofizička ispitivanja. – V / In: Srejšević, D. (ur. / ed.), *Lepenski Vir, nova praistorijska kultura u Podunavlju*. – Beograd, Srpska književna druga, 193–202.
- NEUBAUER, W., A. EDER-HINTERLEITNER, S. SEREN, P. MELICHAR 2002, Georadar in the roman civil town Carnuntum, Austria. An approach for archaeological interpretation of GPR data. – *Archaeological prospection* 9, 135–156.
- NEUBAUER, W., M. DONEUS, I. TRINKS, G. VERHOEVEN, A. HINTERLEITNER, S. SEREN, K. LÖCKER 2012, Long-term Integrated Archaeological Prospection at the Roman Town of Carnuntum/Austria. – V / In: Johnson, P., M. Millett (ur. / eds.), *Archaeological Survey and the City*. – Havertown, Oxbow Books, 202–221.
- NEMEČEK, N. 2014, Zgodovinski razvoj konservatorsko-restavratske dejavnosti v Narodnem muzeju Slovenije. – V / In: Motnikar, A. (ur. / ed.), *Konservator-restavrador: povzetki strokovnega srečanja* 2014. – Ljubljana, Skupnost muzejev Slovenije in Društvo restavradorjev Slovenije, 79–85.
- NOEL, M., B. XU 1991, Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. – *Geophysical Journal International* 107/1, 95–102.
- NOVAKOVIČ, P. 2003, *Osvajanje prostora. Razvoj prostorske in krajinske arheologije*. – Ljubljana, Filozofska fakulteta.
- NOVAKOVIČ, P. 2021, *The History of Archaeology in the Western Balkans*. – Ljubljana, Založba Univerze v Ljubljani.
- OVENDEN, S. M. 1994, Application of Seismic Refraction to Archaeological Prospecting. – *Archaeological Prospection* 1, 53–63.
- OSMUK, N. 1989, Sveto pri Batah. – *Varstvo spomenikov* 31, 243.
- PASSMORE, A. D., A. J. JONES 1930, An Aid to Excavators. – *The Antiquaries Journal* X, 389.
- PANISSOD C., M. DABAS, N. FLORSCH, A. HESSE, A. JOLIVET, A. TABBAGH, J. TABBAGH 1998, Archaeological prospecting using electric and electrostatic mobile arrays. – *Archaeological Prospection* 5/4, 239–251.
- PREGESBAUER, M., I. TRINKS, W. NEUBAUER 2014, An object oriented approach to automatic classification of archaeological features in magnetic prospection data. – *Near Surface Geophysics* 12/5, 651–656.
- PETRU, P. 1964, Poizkus ugotavljanja arheoloških ostalin s pomočjo protonskega gradientnega magnetometra. – *Argo: časopis slovenskih muzejev* 3–4, 143.
- PETRU, P. 1967, Sodobni načini preučevanja arheoloških spomenikov. – *Varstvo spomenikov* 12, 84–90.
- PIRO, S., E. PAPALE, D. ZAMUNER, M. KUCUKDEMIRCI 2019, Multimethodological approach to investigate urban and suburban archaeological sites. – V / In: Persico, R., S. Piro, N. Linford (ur. / eds.), *Innovation in Near Surface Geophysics. Instrumentation, application and data processing methods*. – Amsterdam, Elsevier, 461–504.
- POSCETTI, V., G. ZOTTI, W. NEUBAUER 2015, Improving the GIS-based 3D mapping of archeological features in GPR data. – V / In: Rzeszutarska-Nowakiewicz, A. (ur. / ed.), *Archaeological Prospection, Proceedings of the 11th International Conference on Archaeological Prospection, Warsaw, Poland, 15–19 September 2015*. – Varšava, The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, 603–607.
- RALPH, E. K. 1964, Comparison of a Proton and a Rubidium Magnetometer for Archaeological Prospecting. – *Archaeometry* 7, 20–27.

- RUTAR, G., M. BRICELJ, M. ČREŠNAR, Š. KARO, B. NADBATH, T. MULH, T. ŽERJAL 2012, *Preventivna arheologija v Centru za preventivno arheologijo*. – Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije.
- RUTAR, G. 2024, Število geofizikalnih prospekcij, ki jih je opravil center za preventivno arheologijo med letoma 2008 in 2024 (osebni vir / personal communication, 13. 6. 2024). – Ljubljana.
- SALVI, A. 1970, Perfectionnements Apportés aux Magnetomètres a Résonance Magnétique Nucléaire a Pompe Électronique. – *Revue de Physique Appliquée* 5, 131–134.
- SANTSCHI, R. J. 1928, *Modern 'Divining Rods': A History and Explanation of Geophysical Prospecting Methods, Including Descriptions of Instruments, and Useful Information for Prospectors and Treasure Seekers* (2. izd. / ed.). – Illinois, CreateSpace Independent Publishing Platform.
- SCHWARZ, G. T. 1959, Geoelektrische Bodenuntersuchungen als Hilfsmittel der Archäologie: Test - Versuche in Aventicum. – *Jahresbericht der Schweizerischen Gesellschaft für Urgeschichte* 47, 96–102.
- SCOFF, H. L. 1937, The Excavation of the Site of Provincial Fort Manucy. – *The Pennsylvania Archaeologist* 7, 9–11.
- SCOLLAR, I. 1959, Einführung in die Widerstandsmessung, eine geophysikalische Methode zur Aufnahme von archäologischen Befunden unter der Erdoberfläche. – *Bonner Jahrbücher* 159, 284–313.
- SCOLLAR, I. 1961, Magnetic Prospecting in the Rhineland. – *Archaeometry* 4, 74–75.
- SCOLLAR, I., F. KRUCKEBERG 1966, Computer treatment of magnetic measurements from archaeological sites. – *Archaeometry* 9, 61–71.
- SCOLLAR, I., A. TABBAGH, A. HESSE, I. HERZOG 1990, *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. – Cambridge, Cambridge University Press.
- SOGEST 1993, *Palazzo Pretorio – Capodistria. Indagine georadar sulle pareti e sulle pavimentazioni dei vani dell'ex-ristorante »Capris«*. (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS, OE Piran). – Koper.
- SOKLIČ, J. 2000, *Podatkovna baza geofizikalnih terenskih pregledov*. (Neobjavljeno diplomsko delo / Unpublished diploma thesis, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta). – Ljubljana.
- SLAPŠAK, B. 1989, Arheogeofizika - podpora načrtovanju prostorskega razvoja. Bodo odslej arheologi brez lopat in krampov. – *Delo*, 18. januar 1989 (letnik XXXI, št. 13).
- SLAPŠAK, B. 2020, Mojih arheoloških petdeset let na filozofski fakulteti. – V / In: Pompe, G., B. Pihler Ciglič. (ur. / ed.), *Slavnostni zbornik ob 100-letnici Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani*. – Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze, 140–142.
- SLAPŠAK, B. 2024a, Udeležitev seminarja Lericci v Rimu 1972 (osebni vir / personal communication, 18. 3. 2024). – Ljubljana.
- SLAPŠAK, B. 2024b, Meritve specifične upornosti tal sredi 70. let. (osebni vir / personal communication, 18. 3. 2024). – Ljubljana.
- SLAPŠAK, B. 2024c, Prve meritve z geofizikalno opremo oddelka za arheologijo (osebni vir / personal communication, 18. 3. 2024). – Ljubljana.
- SLAPŠAK, B. 2024, Sodelovanje pri izvajanju meritev specifične upornosti tal na arheološkem najdišču Dolge njive pri Vrhniki. (osebni vir / personal communication, 18. 3. 2024). – Ljubljana.
- STELE, A., R. LINCK, M. SCHIKKORA, J. W. E. FASSBINDER 2022, UAV Magnetometer Survey in Low-Level Flight for Archaeology: Case Study of a Second World War Airfield at Ganacker (Lower Bavaria, Germany). – *Archaeological Prospection* 29, 645–650.
- STOKIN, M. 1987, Pomjan. – *Varstvo spomenikov* 29, 262.
- STOKIN, M., K. ZANIER 2012, *San Simone – Simonov zaliv*. – Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije.
- STRMČNIK GULIČ, M. 1989, Radvanje – villa rustika. – *Varstvo spomenikov* 31, 236–239.
- TABBAGH, A. 1974, Les propriétés thermiques des sols, premiers résultats utilisables en prospection archéologique. – *ArcheoPhysica* 6, 128–148.

- TABBAGH, A. 1986, Applications and advantages of the slingram EM method for archaeological prospecting. – *Geophysics* 51, 576–584.
- Tedenska tribuna 1962: Najnovejša »igračka« arheologov. Kje je Sibaris? – *Tedenska tribuna*, 12. junij. 1962 (letnik X, št. 23).
- TERŽAN, B., M. ČREŠNAR, B. MUŠIČ 2012, Pogledi v preteklost: Poštela – »staro mesto« na obronkih Pohorja in njegova okolica: o arheoloških raziskavah. – *Dialogi* 48/1–2, 17–58.
- TITE, M. S. 1961, Alternative instruments for magnetic surveying: comparative tests at the iron age hill-fort at Rainsborough. – *Archaeometry* 4/1, 85–90.
- Tovariš 1958: »2000 let stara tajna«. – *Tovariš*, 19. 1. 1958 (letnik XIV, št. 2).
- TRINKS, I., A. HINTERLEITNER, W. NEUBAUER, E. NAU, K. LOCKER, M. WALLNER, M. GABLER, R. FILZWIESER, J. WILDING, H. SCHNIEL 2018, Large area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospection. – *Archaeological Prospection* 25, 171–195.
- VERDONCK, L., P. DE SMEDT, J. VERHEGGE 2019, Making sense of anomalies: practices and challenges in the archaeological interpretation of geophysical data. – V / In: Persico, R., S. Piro, N. Linford (ur. / ed.), *Innovation in Near-Surface Geophysics. Instrumentation, application, and data processing methods*. – Amsterdam, Elsevier, 151–194.
- VERDONCK, L., A. LAUNARO, F. VERMEULEN, M. MILLETT 2020, Ground-penetrating radar survey at Falerii Novi: A new approach to the study of Roman cities. – *Antiquity* 94/375, 705–723.
- VIBERG, A., I. TRINKS, K. LIDEN 2011, A review of the use of geophysical archaeological prospection in Sweden. – *Archaeological Prospection* 18, 43–56.
- VIDMAJER, S. 1989, Geofizikalne arheološke raziskave v Ljubljani. – *Delo*, 13. november 1989 (letnik XXXI, št. 13).
- WATERS, A. 1989, Merjenje specifične upornosti tal v arheološkem terenskem pregledu na področju Slovenije. – *Arheo* 9, 74–77.
- WYNN, J. C., S. I. SHERWOOD 1984, The self-potential (SP) method: an inexpensive reconnaissance and archaeological mapping tool. – *Journal of Field Archaeology* 11, 195–204.
- ŽBONA TRKMAN, B. 1987, Loke. – *Varstvo spomenikov* 29, 259.

A Short Historical Overview of Archaeological Geophysics in the World and Slovenia

(Summary)

The theoretical foundations for the use of geophysical methods in archaeology date back to the 1930s, when the French archaeologist Robert du Mesnil du Buisson first explored their potential. The first systematic archaeological survey using geophysical methods took place in 1938 in Williamsburg, USA, where electrical potential measurements were used to locate a buried vault. Between 1946 and 1970, archaeological geophysics entered its pioneering phase. During the 1950s and 1960s, methods such as resistance mapping and magnetometry were widely used in Europe. The 1960s also saw the introduction of other methods, including low-frequency electromagnetic induction and seismic techniques. Specialised centres for archaeological geophysics were established, and publications dedicated to the field began to appear, along with the organisation of conferences to share and develop research and advances in these techniques. One of the key centres during this period was the Lericci Institute in Milan, the contributions of which played a crucial role in the dissemination of these methods to other countries, including those of Central and Eastern Europe. From 1970 to 1999, the field underwent significant technical advances. A major development during this period was the introduction of computer technologies, which revolutionised data processing and visualisation in geophysical surveys. The 1970s saw the introduction of Ground Penetrating Radar (GPR), a technique that enabled the ability to collect data on the depth of buried archaeological structures (Figures 4 and 5). For the same reason, electrical resistivity tomography (ERT) was introduced in the late 1980s (Figure 6). During the 1980s and 1990s, further innovations in electromagnetic systems and high-sensitivity magnetometers advanced archaeological research. These technological advances were complemented by the development of new software and multi-sensor platforms that allow archaeologists to conduct faster, more accurate surveys and to collect more data with greater efficiency.

The use of geophysical methods in Slovenian archaeology began in the 1960s, inspired by early Italian research using geophysical techniques for detecting Etruscan tombs. In 1964, Slovenia conducted its first trial of geophysical methods at the Roman military camp at Ločica

pri Savinji, using a proton magnetometer in gradiometer mode. This trial marked the beginning of geophysical experimentation in Slovenian archaeology, supported by the Institute for the Protection of Cultural Heritage of Slovenia. In the late 1960s, resistivity measurements were carried out in co-operation with the Geological Survey of Slovenia at the sites of Dolge njive near Vrhnika and Simonov zaliv (Figure 1). After this, interest in geophysical methods in Slovenia waned for a while. The 1980s saw a revival in the use of these methods, largely due to the modernisation of Slovenian archaeology and the adoption of Anglo-American research practices. In 1986, due to the international connections of Božidar Slapšak, the Department of Archaeology at the University of Ljubljana, in collaboration with the University of Bradford, conducted extensive geophysical surveys of Roman sites in Slovenia using resistivity instruments (Figure 2, 3). This marked a significant step forward in the application of advanced archaeological techniques. It also marked a turning point in the introduction of computerised data analysis of geophysical data to Slovenian archaeology. In 1989, the Department acquired its own geophysical equipment, which allowed for more detailed and systematic surveys of archaeological sites. By the 1990s, geophysical methods had become an integral part of both archaeological surveys and the educational curriculum of the Department of Archaeology in Slovenia. By the year 2000, over 150 sites had been surveyed under the direction of geologist Branko Mušič. Techniques such as magnetometry, resistivity measurements, and ground penetrating radar (GPR) were often used in combination. These methods integrated disciplines such as geology and geochemistry to improve the interpretation of geophysical data. During and after this period, geophysical methods also expanded beyond academic institutions, with private companies offering services to archaeologists. The Department of Archaeology at the University of Ljubljana continued to play a central role in the institutionalisation and standardisation of geophysical techniques, both in Slovenia and internationally. In 2009, archaeological geophysics was established at the Institute for the Protection of Cultural Heritage of Slovenia, where the history of archaeological geophysics in Slovenia began.