

Georadar – visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava

Georadar – high resolution geophysical electromagnetic device

Aleksander Brezigar, Boris Tomšič & Janez Štern

Geološki zavod Ljubljana

Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko

Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

Glišo Rašković

GEOS, p.o., Stjepana Radića 27, 52110 Rovinj, R Hrvatska

Kratka vsebina

Georadar je visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava, ki so jo razvili v prvi polovici 80. let. V Sloveniji smo ga prvič preskusili leta 1991 na nekaj objektih geološko-ekonomske, geotehnične in hidrogeološke narave. Podajamo še primer uporabnosti v krasoslovju. Prvi del prispevka je posvečen opisu merilne tehnike in metodoloških osnov, v drugem delu pa podajamo merske izkušnje in rezultate meritev na konkretnih primerih. Prikazani so radargrami iz kamnoloma okrasnega kamna Hotavlje, rudnika kalcita Stahovica, Golobje jame pri Divači in z avtoceste Razdrto-Čebulovica. Vse meritve so bile opravljene z georadarsko napravo Pulse EKKO IV, 100MHz po metodi refleksijskega profiliranja.

Abstract

Georadar is a high resolution geophysical electromagnetic device that was developed in the first part of the 1980's. In Slovenia it was first tested in 1991 on several objects of economicgeological, geotechnical and hydrogeologic nature. Here its usefulness in karst studied is presented. The first part of the paper deals with description of measurement procedure and methodological bases, and the second part with experience and results of case histories. Shown are radargrams from ornamental stone quarry Hotavlje, calcite mine Stahovica, Golobja jama karst cave near Divača and from highway construction site Razdrto-Čebulovica. All measurements were performed with the georadar instrument Pulse EKKO IV with a 100MHz antenna according to the method of reflection profiling.

Uvod

Georadar (po angleško GPR Ground-penetrating radar) je novejša elektromagnetna visokoločljiva merilna naprava. Začetki njegovega razvoja segajo v prvo polovico 80. let. Pomemben preobrat je pomenilo leto 1985, ko je v sodelovanju z Geološkim za-

vodom Kanade tvrdka A-Cubed Inc. razvila zelo kakovosten digitalni sistem Pulse EKKO III. Danes je na tržišču nekaj georadarskih sistemov, med katerimi ni večje razlike v kvaliteti. Prednost Pulse EKKO pred drugimi je v tem, da je primeren za delo v težavnih terenskih razmerah, npr. na hribovitem površju, meritve so preproste tudi v bočni in stropni smeri. Merilne antene namreč ročno premikamo kar po koraku meritev. Nasprotje temu je georadarski tip GSSI-SIR (Geophysical Survey System Inc.-Sub-surface Interface Radar), kjer so antene pričvrščene na voziček, ta pa je pripet na avtomobilsko vlečno kljuko. GSSI-SIR radar je primernejši za geofizikalno kartiranje na ravnih površinah, npr. travnikih, cestnih trasah in mestnih ulicah. Tretji sistem je prirejen za meritve v vrtinah. Razvila ga je Swedish Geological Company s švedsko družbo ABEM AB in se imenuje RAMAC.

Z georadarjem snemamo predvsem kompaktne kamnine. Ločljivost je lahko v območju nekaj decimetrov, globinski doseg pa pri 100MHz oddajni anteni v splošnem od 10 do 30m. V suhih sipkih kamninah je nepogrešljiv tam, kjer odpovedo druge cenejše geofizikalne metode, npr. na meliščih ali suhih prodnih zasipih. Splošno ga uporabljamo v kamnolomih okrasnih kamnov za določitev kakovosti kamna in odkopnih zalog, dalje v rudnikih boksita pri iskanju boksitnih gnezd in ločevanju kamninske boksitne podlage. Preskušen je v rudnikih kovin (določevanje geoloških mej, ugotavljanje razpok, iskanje rudnih teles, Piccolo, 1991) in premogovnikih (določevanje razpokanosti in zdobljenosti premoga, tektonskih drs, Coon et al., 1981). V hidrogeologiji določujemo z njim gladino podtalnice in hidrogeološko-litološke značilnosti kamnin (Beres & Haeni, 1991), v krasoslovju pa razpokanost kamnin in podzemne jame. Množično ga uporabljajo v arheologiji pri odkrivanju z zemljo prekritih ruševin in artefaktov (Vaughan, 1986). V ekologiji je uporaben pri iskanju skritih smetišč, odpadnih jam, pri ugotavljanju debeline snežne odeje na plazovih, pri ugotavljanju spremenjenega kemijskega stanja podtalnic. Nepogrešljiv je pri gradnjah predorov, cestogradnjah za določanje debelin preperine in geotehničnih ocenah kompaktnosti oziroma razpokanosti hribin (Cook, 1975). V mestih iščemo podzemne vodovodne in električne napeljave. Znani so primeri določitve debelin permafrosta, večnega ledu ali pozimi recentnih jezerskih sedimentov skozi poledenelo jezero. Z georadarjem si pomagamo še pri fundamentalnih geoloških študijah, npr. pri mikrorefleksijskih in litostratigrafskih snemanjih recentnih usedlin ali pri iskanju litostratigrafskih stikov (Davis & Annan, 1989).

V splošnem je naloga georadarja razločevanje geofizikalnih anomalij, tj. mest ali ploskev s spremenjenimi fizikalnimi lastnostmi (Fisher & McMechan, 1992). Pri tem je lahko anomalija kakršnakoli oblika ali snov, ki je predmet preiskav (npr. cev, prekriti zid, podzemni rov, razpoka, spremenjena kompaktnost, litološke spremembe ...). Georadar je soočen s podobnimi težavami kot druge geofizikalne metode. Rezultati meritev so namreč lahko večpomenski in je pri interpretaciji potrebna izkušnost in poznavanje merilne tehnike. Meritve onemogočajo podzemni električni vodi, vodovodne cevi in razne podzemne instalacije, ki niso predmet preiskav (Greenhouse et al., 1993), v rudnikih pa jekleno podporje. Prednosti georadarskega snemanja so preprosta terenska izvedba in meritve v razmerah, kjer druge geofizikalne metode odpovedo; v delovni obliki je rezultat meritev dosegljiv takoj. Je nedestruktivna in okolju zelo sprejemljiva metoda. Slabost je v tem, da še vedno spada med dražje geofizikalne metode. Globinski doseg je majhen, prodornost v globino pa zmanjšujeta predvsem vsebnost gline in vlaga.

V Sloveniji smo ga prvič uporabili leta 1991 pri preiskavah zemeljskih plazov in melišč v bližini rudnika kaolina Črna pri Kamniku. Kasneje smo opravili še več meri-

tev za najrazličnejše namene. Tukaj smo zbrali nekaj značilnih primerov georadarskega snemanja, da bi predstavili metodo s praktičnimi primeri. Snemanja so plačali različni naročniki, na kraških območjih pa smo merili s finančno pomočjo Ministrstva za znanost in tehnologijo pri raziskovalni nalogi Geofizikalne metode za reševanje kraške problematike.

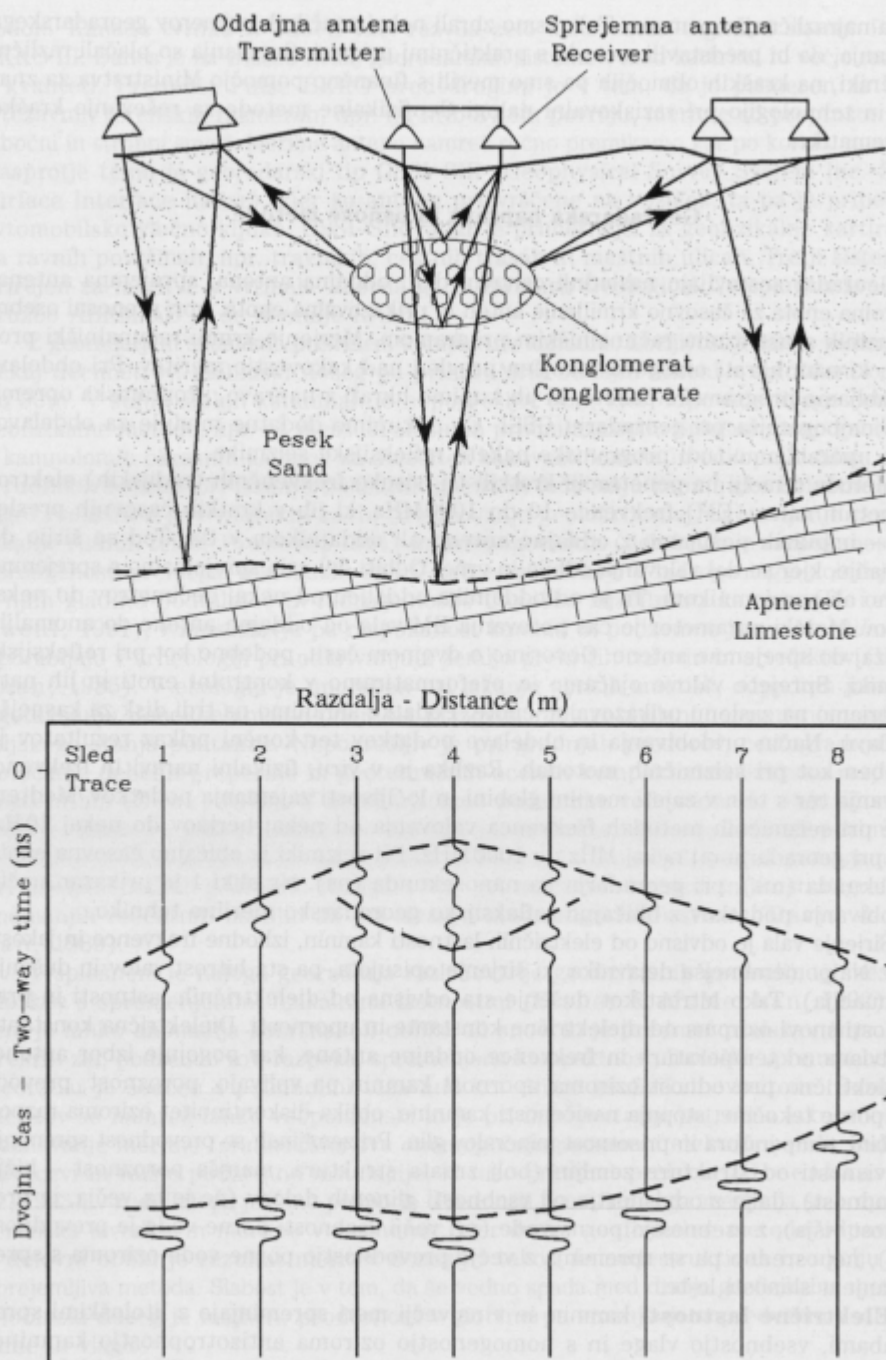
Georadarska naprava in osnove metode

Georadar sestavljajo naslednji osnovni deli: oddajna antena, sprejemna antena, kontrolna enota za časovno krmiljenje anten in prikazovalna enota, npr. prenosni osebni računalnik z ustreznim računalniškim programom. Merjenje krmili računalniški program, ki nam hkrati omogoča takojšen pregled nad kakovostjo meritev. Pri obdelavi uporabljamo programske pakete, ki jih kupimo hkrati z napravo, programska oprema pa je najbogatejša pri georadarju GSSI. Če dokupimo dodatne module za obdelavo, lahko uporabljamo tudi programske pakete refleksijske seizmike.

Metoda temelji na penetraciji kratkih t.i. visoko frekvenčnih (radijskih) elektromagnetnih valov (EM) frekvence 10 do 1000 MHz, ki jih v kratkih časovnih presledkih – impulzih pošiljamo z oddajno anteno ali oddajnikom v tla. Tod se širijo do anomalije, kjer se del valovanja odbije in vrne. Odbiti del vala sprejemamo s sprejemno anteno ali sprejemnikom. Ta je od oddajnika oddaljen od nekaj decimetrov do nekaj metrov. Merski parameter je čas potovanja EM vala od oddajne antene do anomalije in nazaj do sprejemne antene. Govorimo o dvojnem času, podobno kot pri refleksijski seizmiki. Sprejete valove ojačamo in preformatiramo v kontrolni enoti in jih nato preverjamo na zaslonu prikazovalne enote. Podatke shranimo na trdi disk za kasnejšo obdelavo. Način pridobivanja in obdelave podatkov ter končni prikaz rezultatov je podoben kot pri seizmičnih metodah. Razlika je v viru, fizikalni naravi in frekvenci valovanja ter s tem v zajeti merilni globini in ločljivosti zajemanja podatkov. Medtem ko je pri seizmičnih metodah frekvenca valovanja od nekaj hertzov do nekaj 10 Hz, je ta pri georadarju od nekaj MHz do 1000 MHz. Pri seizmiki je običajno časovna enota milisekunda (ms), pri georadarju pa nanosekunda (ns). Na sliki 1 je prikazan način pridobivanja podatkov z običajno refleksijsko georadarsko merilno tehniko.

Širjenje vala je odvisno od električnih lastnosti kamnin, izhodne frekvence in jakosti valov. Najpomembnejša dejavnika, ki širjenje opisujeta, pa sta hitrost valov in dušenje (atenuacija). Tako hitrost kot dušenje sta odvisna od dielektričnih lastnosti in prevodnosti snovi oziroma od dielektrične konstante in upornosti. Dielektrična konstanta je odvisna od temperature in frekvence oddajne antene, kar pogojuje izbor antene. Na električno prevodnost oziroma upornost kamnin pa vplivajo: poroznost, prevodnost porne tekočine, stopnja nasičenosti kamnine, oblika diskontinuitet oziroma razpok v hribini, temperatura in prisotnost mineralov glin. Pri zemljinah se prevodnost spreminja v odvisnosti od strukture zemljin (bolj zrnata struktura, manjša poroznost – nižja prevodnost), dalje z odvisnostjo od vsebnosti glinenih delcev (če je ta večja, je prevodnost višja), z vsebnostjo porne vode (pri večji vsebnosti porne vode je prevodnost višja), neposredno pa se spreminja z večjo prevodnostjo porne vode oziroma s spreminjanjem slanosti le-te.

Električne lastnosti kamnin se v največji meri spreminjajo z litološkimi spremembami, vsebnostjo vlage in s homogenostjo oziroma antizotropnostjo kamnine. Spremembe teh lastnosti povzročijo, da se del vala odbije in da odbiti del lahko za beležimo s sprejemno anteno. Odbiti del vala na radargramu vidimo kot del refleksa.



Sl. 1. Načelo georadarske meritve in rezultati v obliki radargrama

Fig. 1. Conceptual illustration of the radar profiling and resulting radargram

Frekvenca. Operativno frekvenčno delovanje GPR je med 10MHz in 1000MHz. V tem območju je namreč hitrost elektromagnetnega valovanja konstantna (če je prevodnost materiala pod 100mS/m, kar velja za hribine) in ne prihaja do disperzije signala. Tabela 1 prikazuje vrednosti dielektrične konstante ϵ , električne prevodnosti σ (mS/m), hitrosti v (m/ns) in dušenja ali atenuacije α (dB/m) za najpogostnejše kamnine. Vrednosti se nanašajo na oddajno anteno 100MHz. Iz tabele 1 vidimo, da je dielektrična konstanta vode 80, v večini suhih kamnin pa se giblje od 4–8. Razlika kaže, kako zelo je hitrost radarskega vala odvisna od vlažnosti kamnin. Podobno kot za hitrost velja tudi za dušenje valovanja. Dušenje se namreč nad frekvenco 100MHz izredno hitro povečuje. Razvidni so kontrasti v parametrih npr. med apnenecem in glino, suhim peskom in z vodo nasičenim peskom, morsko vodo in sladko vodo (lastnost, pomembna za raziskave iz varstva okolja). Valovi se zelo hitro širijo v kompaktnih kamninah in snoveh (granit, apnenec, led) in v suhih kamninah (suh pesek). Najvišje hitrosti imamo v kraških kavernah, kjer pravzaprav merimo njihovo širjenje v zraku. Počasneje pa se širijo v glinah in meljih in z vodo nasičenih peskih. Najnižje hitrosti so v vlažnih plastičnih glinah, kjer je dušenje tudi največje.

Jakost valov – dušenje – doseg. Z georadarjem iščemo anomalijo pri omejenem globinskem dosegu in v območju znane ločljivosti. Zanima nas optimalna sestavljenost naprave, ki bi zagotavljala največji globinski doseg pri največji možni ločljivosti. Na globinski doseg vpliva nekaj dejavnikov. Od naravnih sta najpomembnejša dušenje (zmanjševanje amplitude) in odbojne značilnosti meje, kjer pride do sprememb električnih

Tabela 1. Značilne vrednosti dielektrične konstante ϵ , električne prevodnosti σ , hitrosti v in dušenja α za nekaj snovi pri 100MHz oddajni anteni (Davis & Annan, 1989, 536)

Table 1. Typical dielectric constant ϵ , electrical conductivity σ , velocity v and attenuation α in selected materials at 100MHz. From Davis & Annan, 1989, 536

Snov - Material	ϵ	σ (mS/m)	v (m/ns)	α
Zrak - Air	1	0	0.3	0
Destilirana voda - Distilled water	80	0.01	0.033	0.002
Sladka voda - Fresh water	80	0.5	0.033	0.1
Morska voda - Sea water	80	30 000	0.01	1000
Suh pesek - Dry sand	3 - 5	0.01	0.15	0.01
Z vodo nasičen pesek - Saturated sand	20 - 30	0.1 - 1	0.06	0.03-0.3
Apnenec - Limestone	4 - 8	0.5 - 2	0.12	0.4 - 1
Glinovec - Shale	5 - 15	1 - 100	0.09	1 - 100
Melj - Silt	5 - 30	1 - 100	0.07	1 - 100
Glina - Clay	5 - 40	2 - 1000	0.06	1 - 300
Granit - Granite	4 - 6	0.01 - 1	0.13	0.01 - 1
Suha sol - Dry salt	5 - 6	0.01 - 1	0.13	0.01 - 1
Led - Ice	3 - 4	0.01	0.16	0.01

lastnosti kamnin. Običajno vpliva teh dveh dejavnikov ne poznamo ali ju ne moremo nadzirati. Po drugi strani, to je tehnični, pa je daleč najpomembnejša lastnost kakovost radarskega sistema (Q). Kakovost bi lahko opisali kot skupek tehničnih oziroma merskih lastnosti tega sistema, s katerimi si zagotovimo optimalno meritev in ustrezni globinski doseg. Izražamo jo v decibelih. Odvisnost med globinskim dosegom in kakovostjo GPR sistema (Davis & Annan, 1989, 536) podaja naslednja enačba:

$$Q = \frac{TA \times RA \times G_T \times G_R \times g \times c \times e^{-4\alpha \times L}}{64 \times \pi^3 \times f^2 \times L^4}$$

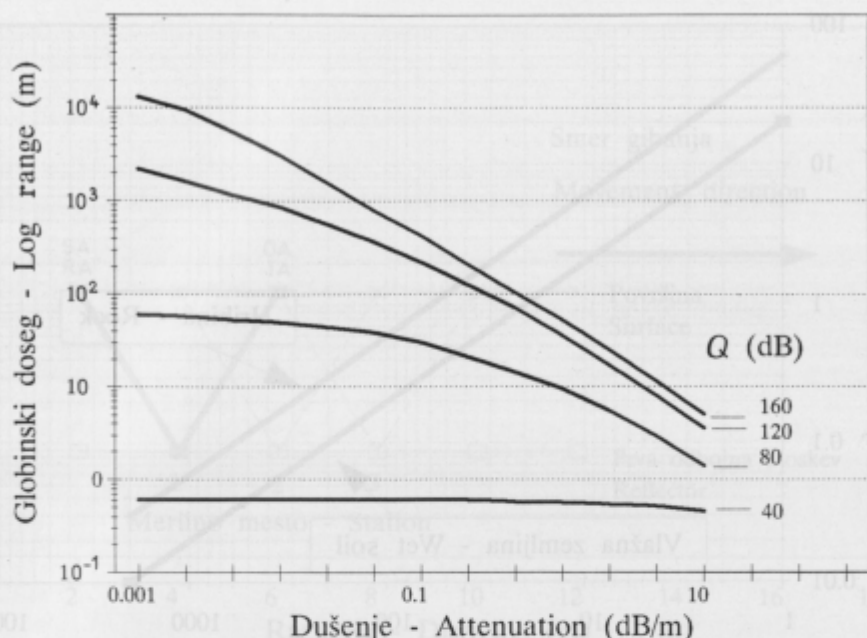
kjer je

- Q – vrednost tehnične kakovosti GPR sistema,
- TA – moč oziroma jakost oddajne antene (zmogljivost oddajanja),
- RA – moč oziroma jakost sprejemne antene (zmogljivost sprejemanja),
- G_R – ojačitev sprejemne antene,
- G_T – ojačitev oddajne antene,
- L – doseg (razdalja od sprejemne antene do anomalije),
- f – frekvenca valovanja,
- α – dušenje v kamnini,
- g – jakost odbitega valovanja,
- c – površina odbojne ploskve oziroma ploskev anomalije,
- π – 3,14,
- e – osnova naravnega logaritma.

Z drugimi besedami nam kakovost določuje, za koliko lahko sprejeti signal ojačamo, oziroma kako globoko lahko z meritvami sežemo, da pri tem še vedno ohranimo zadovoljivo razmerje signal/šum, oziroma da ne popačimo sprejetega signala. Običajen georadar ima tehnično kakovost od 120 do 160 dB. Georadarska naprava s $Q=140$ dB ima pri dušenju valov v kamnini 0,1–10 dB/m, npr. globinski doseg med 50 m in 2 m. Naprava s $Q=80$ dB pa ima pod enakimi pogoji doseg le 15 m do 1 m. Slika 2 prikazuje globinski doseg radarskih sistemov različne kakovosti v odvisnosti od dušenja.

Amplituda radarskega vira se zmanjšuje zaradi sferičnega oddaljevanja EM valovanja od antene. Kot smo že omenili, pride do zmanjšanja amplitude tudi na mestu, kjer se spremenijo električne lastnosti kamnin (meja običajno sovпада z litološko mejo, vendar ne vedno), zmanjšanje pa je odvisno tudi od debelin posameznih plasti. Tako je predvideni globinski doseg pri oddajni anteni 100 MHz v apnencu do 50 m, v flišu do 30 m, v srednje trdi glini do 10 m in v mehki plastični glini do 2 m.

Ločljivost. Pri georadarju želimo, da je frekvenčni spekter oddajanja karseda ozek in da se čimbolj približa srednji frekvenci npr. 100 MHz. Ločljivost je v splošnem geofizikalnem smislu definirana z Rayleighjevim kriterijem ločevanja dveh oblik, ki sta druga zraven druge. Slikovit prikaz razumevanja ločljivosti je naslednji: kako daleč se lahko oddaljimo od dveh točkastih svetil, medsebojno oddaljenih npr. 1 m, da ju še vedno vidimo. Ločljivost je obratno sorazmerna valovni dolžini in premosorazmerna frekvenci. Pri georadarskih meritvah je spodnja meja ločljivosti enaka najmanjši debelini litološke plasti, za katero še lahko razločimo zgornjo in spodnjo mejo, kar v praksi pomeni blizu 1/4 valovne dolžine. V merskem smislu je ločljivost določena z ustreznim razmerjem dolžina signala – širina frekvenčnega spektra. Krajšanje dolžine signala nam povečuje širino frekvenčnega spektra, kar je nezaželeno. Sl. 3 prikazuje odvisnost ločljivosti naprave od frekvence oddajne antene. Iz slike je razvidno, da z izbiro frekvence pravzaprav določujemo ločljivost sistema. Višja je frekvenca, večja



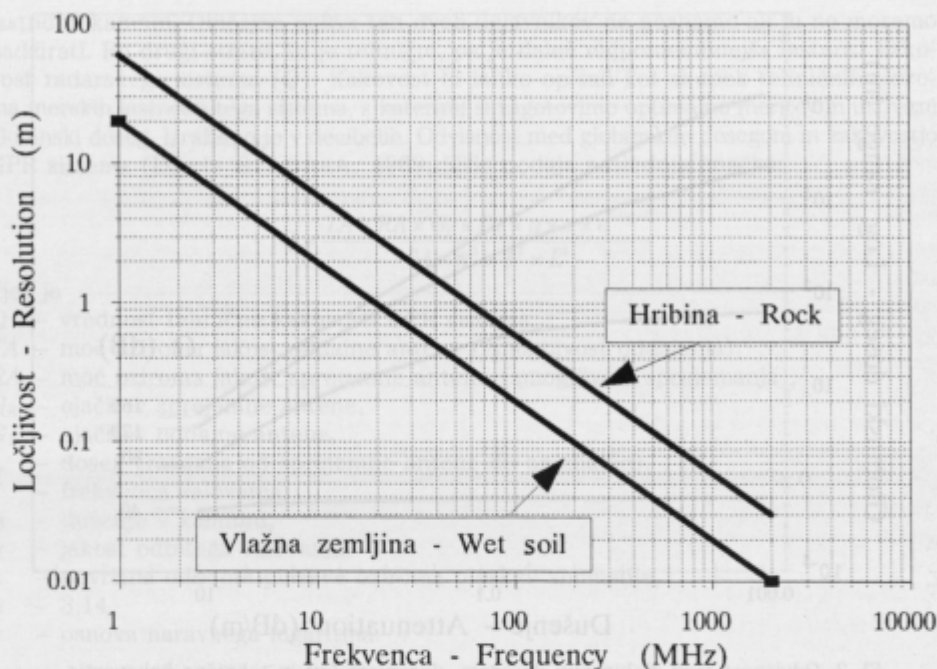
Sl. 2. Odvisnost med globinskim dosegom, dušenjem (α) in tehnično kakovostjo sistema GPR (Q) (Davis & Annan, 1989, 538)

Fig. 2. Relation between signal range and attenuation (α) for georadar systems with different performances (Q)

je ločljivost, vendar se s tem zmanjšuje globinski doseg. Primer: pri 100MHz anteni je ločljivost od 0,25 do 0,5m, pri 350MHz anteni pa le nekaj centimetrov, vendar je pri tej anteni v npr. apnencih globinski doseg komaj 10 do 20m. Danes so na razpolago georadarski sistemi, ki imajo vključeno široko paleto različnih oddajnih anten z različnimi frekvencami (25, 50, 100, 200, 500, 1000MHz). Velja splošno pravilo, da se dušenje valovanja v kamninah zmanjšuje ob zniževanju oddajne frekvence. Zato lažje povečamo moč oddajne antene pri nižji frekvenci kot pri višji in s tem izboljšamo kakovost georadarja in njegov doseg. Nasprotno pa z zviševanjem frekvence povečujemo ločljivost sistema. Ugotovljeno je, da se je bolje zadovoljiti z nekoliko manjšo ločljivostjo na račun večjega dosega. Testne meritve v različnih geoloških okoljih so pokazale, da predstavlja radarski sistem s frekvenco oddajne antene 100MHz nekakšen kompromis.

Načini meritev

Razvitih je več načinov merjenja. Podobni so tistim pri seizmičnih raziskavah, vendar so pri izvedbi preprostejši. Osnovno pravilo je, da se tako oddajna kot sprejemna antena v vsej svoji dolžini tesno prilegata na kamnino. Pri merjenju se izogibamo predmetom, ki povzročajo motnje. V predorih in vrtinah se moramo izogibati lažnim signalom, ki nastanejo zaradi valovanja vzdolž tunela ali vrtine (t.i. multipli refleksi). Najpogostnejši

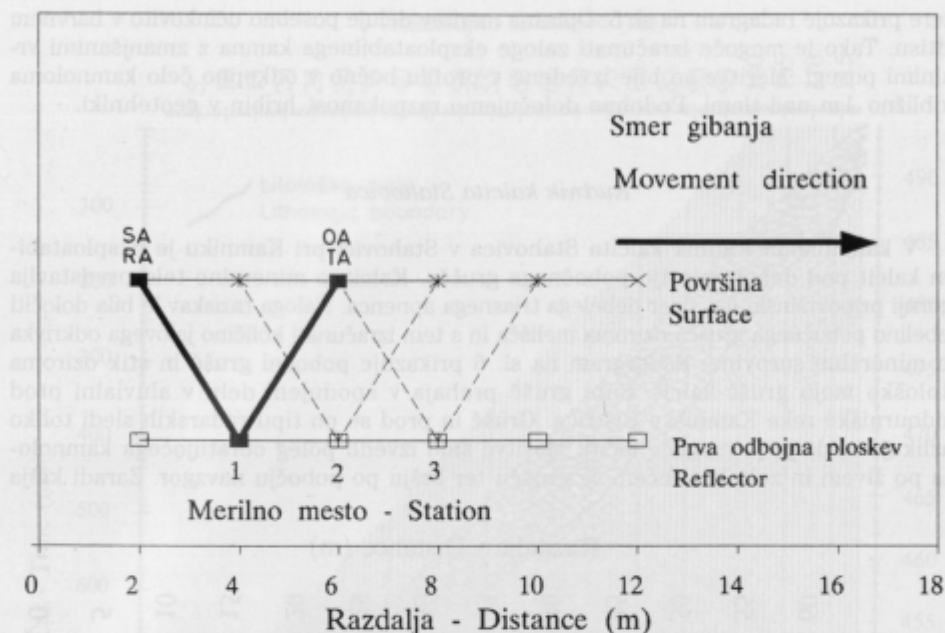


Sl. 3. Odvisnost ločljivosti od frekvence oddajne antene

Fig. 3. Relation between resolution and frequency of transmitter (Davis & Annan, 1989, 540)

način meritev je refleksijsko profiliranje, manj pa CMP (common mid point), WARR (wide angle reflection and refraction) in geotomografija. Refleksijsko profiliranje je podobno common-offset seizmični refleksijski metodi (metoda enakih razdalj). Uveljavlja se že tudi večkanalno radarsko snemanje oziroma obdelava (multichannel acquisition, Fisher & McMechan, 1992; Fisher et al., 1992), ki je podobno refleksijski metodi večkratnega sredinskega prekrivanja globinske točke (CMP). Refleksijsko profiliranje poteka takole: med oddajno in sprejemno anteno določimo optimalni razmik (npr. 1 m). Z njim se nato pomikamo vzdolž profila od merske točke do merske točke oziroma med stojišči. Razmik med antenami nam v praksi pomeni gostoto sledi oziroma gostoto prostorskega vzorčevanja. Opisano velja za napravo Pulse EKKO, medtem ko je pri napravi GSSI razmik med stojišči tako majhen, da je praktično zvezen. Način meritve z refleksijsko metodo je prikazan na sl. 4. Oznaka OA pomeni položaj oddajne antene in SA položaj sprejemne antene pri enem stojišču. Rezultati so prikazani na radargramu, kjer predstavlja horizontalna os dolžino profila, vertikalna pa dvojni čas potovanja EM valovanja do odbojne ploskve. Običajno je vertikalna os preračunana v globinsko merilo. Globina do reflektorja je določena s hitrostjo širjenja valovanja. Hitrost določimo z nadaljnjo meritvijo WARR ali CMP, ali pa izvedemo globinsko korelacijo na podlagi znanih podatkov, npr. iz poznavanja geoloških podatkov, vrtnja ali drugih površinskih geofizikalnih meritev.

Sledita merski metodi CMP in WARR, ki služita za določitev hitrosti širjenja EM valov v kamnini. Sta ekvivalent seizmični refrakcijski metodi. Izvedba je preprosta:



Sl. 4. Refleksijska merilna tehnika

Fig. 4. Georadar used in the reflection profiling mode

oddajna antena je med meritvijo nepremična, s sprejemno pa se s stalnim korakom (npr. 0,3m) oddaljujemo.

Metoda radarske preslikave ali geotomografija je uporabna pri geotehničnih delih v rudnikih, predorih, med vrtinami ali med dvema rovoma. Gradnja slike je podobna kot pri seizmični preslikavi – geotomografiji. Služi za določitev hitrosti in, če merimo tudi amplitudo signala, dušenja vala v kamnini. Preslikava je primerna za ugotavljanje geotehničnega stanja kamnin in daje osnovne podatke za geotomografsko rekonstrukcijo.

Primeri uporabe

Sledijo praktični primeri uporabe v kamnolomih, hidrogeologiji, geotehnik, speleologiji in stratigrafskih kartiranjih. Vse predstavljene meritve smo izvedli po metodi refleksijskega profiliranja, z georadarsko napravo Pulse EKKO IV in 100MHz oddajno anteno. Pri posameznih meritvah je bil različen le korak snemanja.

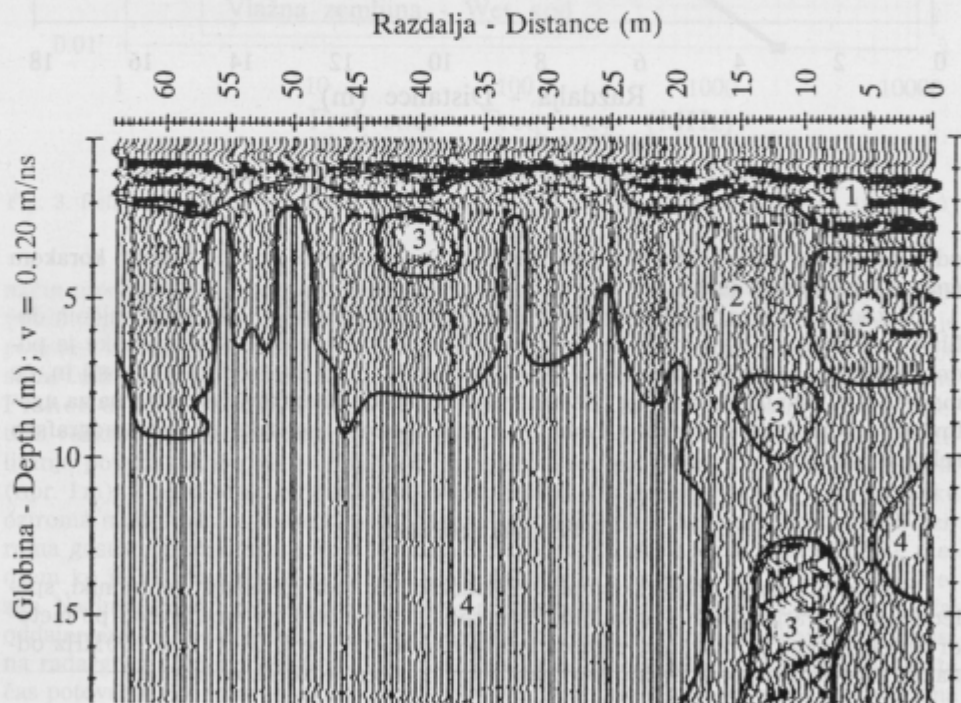
Kamnolom Hotavlje

V kamnolomu Hotavlje pridobivajo okrasni apnenec, imenovan hotaveljski marmor. Apnenec je ponekod razpokan, kar zmanjšuje izplen. Z georadarjem smo razlikovali apnenec po njegovi stopnji razpokanosti oziroma njegovi kvaliteti. Ugotovljene raz-

mere prikazuje radagram na sl. 5. Opisana meritev deluje posebno učinkovito v barvnem odtisu. Tako je mogoče izračunati zaloge eksploataibilnega kamna z zmanjšanimi vrstalnimi posegi. Meritve so bile izvedene v profilu bočno v odkopno čelo kamnoloma približno 1 m nad tlemi. Podobno določujemo razpokanost hribin v geotehniki.

Rudnik kalcita Stahovica

V kamnolomu Rudnik kalcita Stahovica v Stahovici pri Kamniku je eksploatabilen kalcit pod debelo plastjo pobočnega grušča. Kalcitno mineralno telo predstavlja zgornji pripovršinski del sicer debelega triasnega apnenca. Naloga raziskav je bila določiti debelino pobočnega grušča oziroma melišča in s tem izračunati količino jalovega odkrivanja do mineralne surovine. Radargram na sl. 6 prikazuje pobočni grušč in stik oziroma litološko mejo grušč-kalcit. Suhi grušč prehaja v spodnjem delu v aluvialni prod hudourniške reke Kamniške Bistrice. Grušč in prod se po tipu radarskih sledi toliko razlikujeta, da ju je mogoče ločiti. Meritve smo izvedli poleg obratujočega kamnoloma po živem in zelo kotalečem se grušču ter kršju po pobočju navzgor. Zaradi kršja

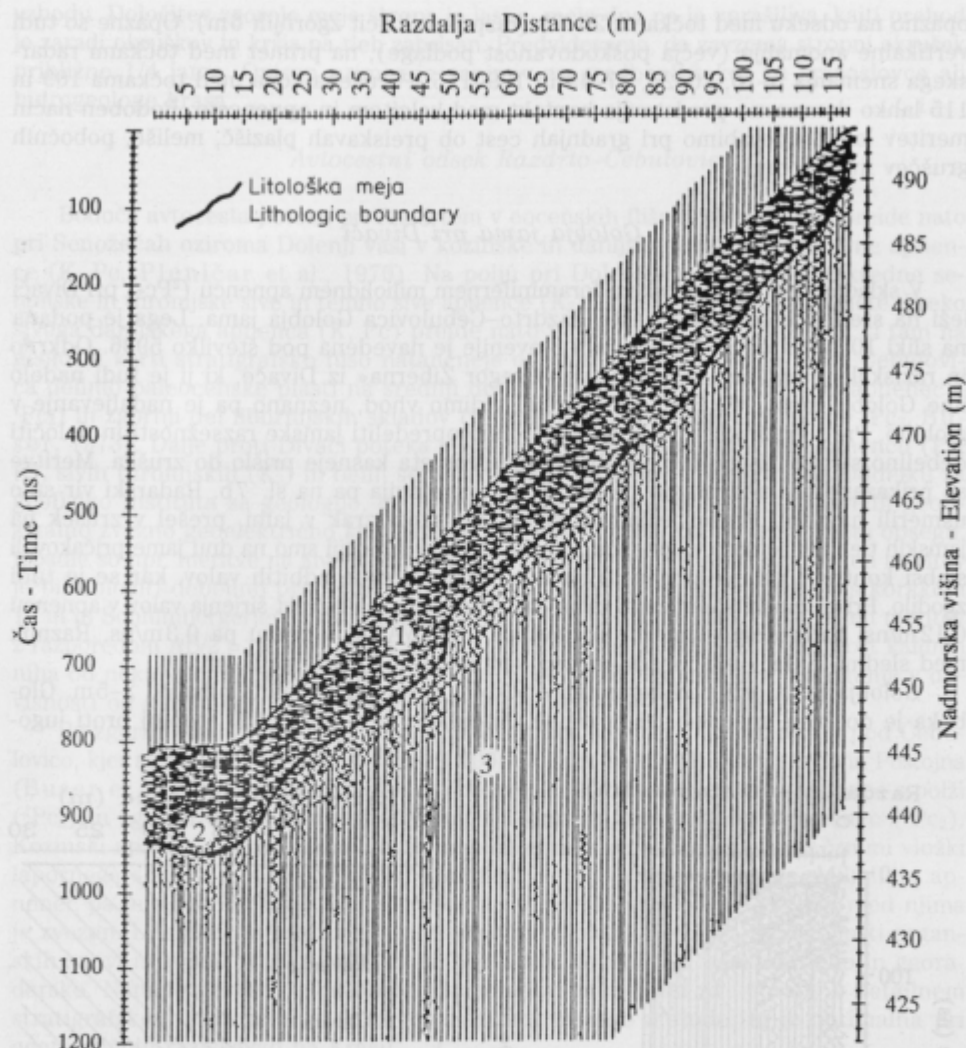


Sl. 5. Radargram iz kamnoloma Hotavlje

- 1 Preperinski pokrov; 2 Tektonsko razpokani apnenec; 3 Kaverne, zapolnjene z zdrobljeno kamnino; 4 Homogeni apnenec

Fig. 5. Radargram from the Hotavlje quarry

- 1 Weathering cover; 2 Tectonically damaged limestone; 3 Caverns filled with crushed rocks; 4 Homogeneous limestone



Sl. 6. Radargram iz kamnoloma Rudnika kalcita Stahovica
 1 Pobočni grušč; 2 Aluvialni prod; 3 Kalcit – apnenec

Fig. 6. Radargram from calcite quarry of the Stahovica calcite mine
 1 Talus rubble; 2 Alluvial gravel; 3 Calcite – limestone

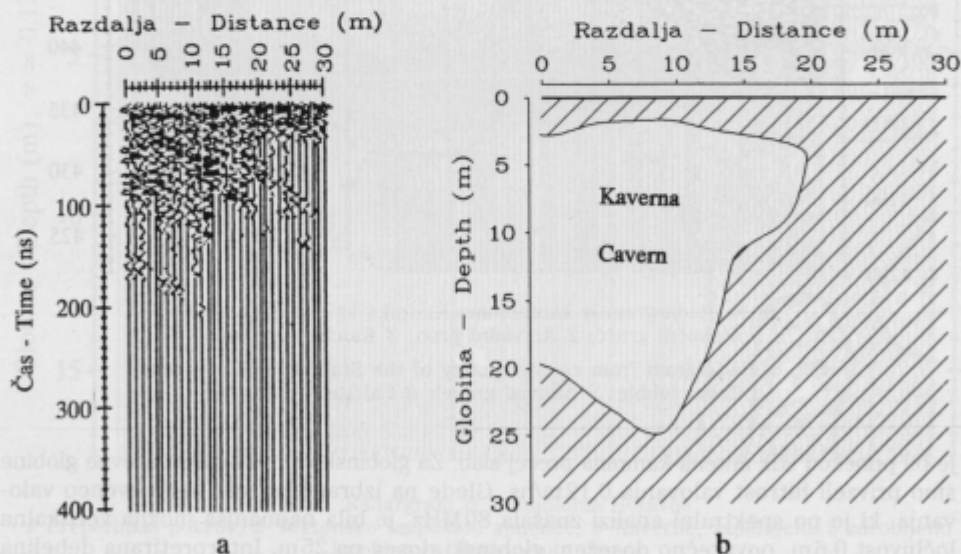
je bil ponekod stik antena-kamnina precej slab. Za globinsko spremembo časovne globine smo privzeli hitrost valovanja $0,12\text{m/ns}$. Glede na izbrano hitrost in frekvenco valovanja, ki je po spektralni analizi znašala 80MHz , je bila najmanjša možna vertikalna ločljivost $0,6\text{m}$, povprečno doseženi globinski doseg pa 25m . Interpretirana debelina grušča je od $2\text{--}9\text{m}$. V spodnjem delu je debelina grušča približno 5m , debelina hudourniškega zasipa pa še nadaljnje 4m . Kalcitna podlaga grušča je relativno kompaktna. Zdrobljena je le nekaj metrov tik pod kontaktom z gruščem, kar je najbolj

opazno na odseku med točkama 20–75 (razpokan kalcit zgornjih 6 m). Opazne so tudi vertikalne anomalije (večja poškodovanost podlage), na primer med točkami radar-skega snemanja 5–10, 20–24, 47–49 in 109–115. Porušena cona med točkama 109 in 115 lahko domnevno predstavlja kontakt med kalcitom in apnencem. Podoben način meritev lahko uporabimo pri gradnjah cest ob preiskavah plazišč, melišč, pobočnih gruščev in podobno.

Golobja jama pri Divači

V skladovitem paleocenskem foraminifernem miliolidnem apnencu ($^2\text{Pc}_2$) pri Divači leži na sredini bodoče avtoceste Razdrto–Čebulovica Golobja jama. Lega je podana na sliki 10. V Katastru kraških jam Slovenije je navedena pod številko 5936. Odkrilo in raziskalo jo je Jamarsko društvo »Gregor Žiberna« iz Divače, ki ji je tudi nadelo ime Golobja jama, VG 316. Na površini vidimo vhod, neznano pa je nadaljevanje v globino. Pred gradnjo ceste je bilo potrebno opredeliti jamske razsežnosti in določiti debelino stropa, da ne bi pod obtežitvijo prometa kasneje prišlo do zruška. Meritve so prikazane na radargramu na sl. 7a, interpretacija pa na sl. 7b. Radarski vir smo usmerili navzdol. Prešel je jamski strop, šel skozi zrak v jami, prešel v zrušek na jamskih tleh ter se nato v apnencu zadušil. Ob taki litologiji smo na dnu jame pričakovali slabši kontrast kot na stropu in na dnu veliko sipanje odbitih valov, kar se je tudi zgodilo. Pri globinski spremembi radargrama smo privzeli hitrost širjenja valov v apnencu 0,12 m/ns, katero smo izmerili po metodi CMP/WARR, v zraku pa 0,3 m/ns. Razmik med sledmi je 1 m, izračunana možna vertikalna ločljivost pa 0,4 m.

Golobja jama leži pod kamnitim obokom, katerega debelina niha od 2–5 m. Globoka je do 25 m, merjeno od površine. Nadaljuje se v smeri 150 stopinj proti jugo-



Sl. 7. Radargram Golobje jame pri Divači (a), interpretacija (b)

Fig. 7. Radargram from the karstic cave Golobja jama near Divača (a), interpretation (b)

vzhodu. Določitev zgornje meje stropa je jasna, meja dna pa je vprašljiva, kajti prehod je zaradi okruškov in kršja na tleh zabrisan. Predvidevamo, da zavzema stropni okrušek približno 1/4 jame. Opisan primer je zanimiv za gradbenike kot za krasoslovce ali hidrogeologe krasa.

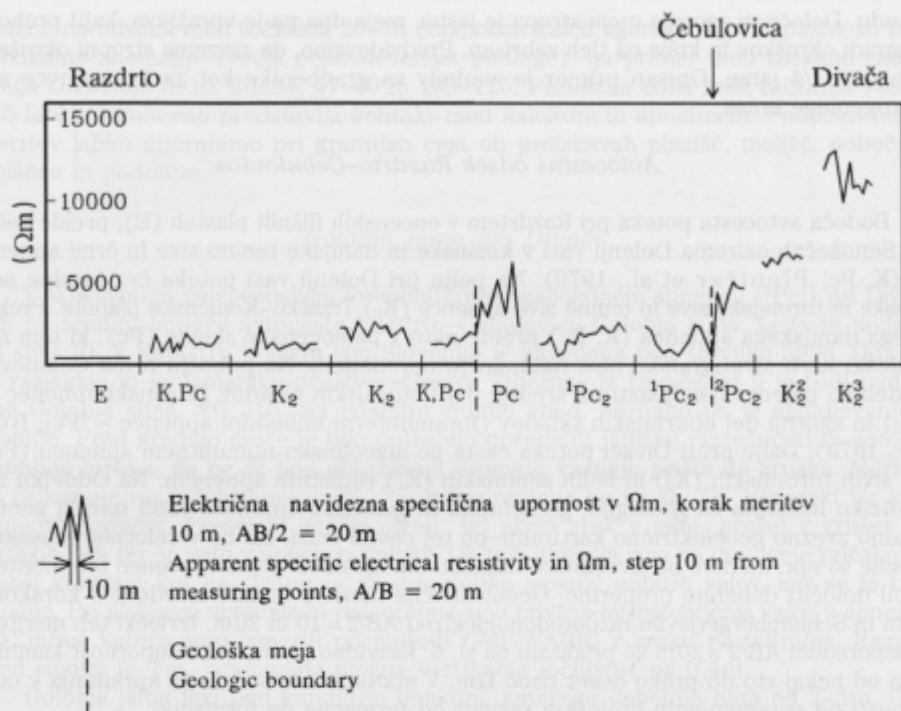
Avtocestni odsek Razdrto-Čebulovica

Bodoča avtocesta poteka pri Razdrtem v eocenskih flišnih plasteh (E), preide nato pri Senožeah oziroma Dolenji vasi v kozinske in danijske temno sive in črne apnenec (K, Pc, Pleničar et al., 1970). Na polju pri Dolenji vasi poteka čez kredne senonske in turonijske sive in temno sive apnenec (K_2) Tržaško-Komenske planote. Preko sivega danijskega apnenca (K, Pc) preide nato v paleocenske sklade (Pc), ki tam na geološki karti stratigrafsko niso natančneje opredeljeni. Na pobočju hriba Čebulovica delimo paleocenske plasti na srednji del liburnijskih skladov (kozinski apnenec – 1Pc_2) in zgornji del liburnijskih skladov (foraminiferni miliolidni apnenec – 2Pc_2 , Buser, 1973). Dalje proti Divači poteka cesta po alveolinsko-numulitnem apnencu (Pc, E), sivih turonijskih (K_2^2) in belih senonskih (K_2^3) rudistnih apnencih. Na Oddelku za geofiziko Inštituta za geologijo, geotehniko in geofiziko smo leta 1989 izvedli geofizikalno zvezno geoelektrično kartiranje po tej cestni trasi, žal ne v celotnem obsegu. Izpadle so npr. meritve na alveolinsko-numulitnem apnencu. Osnovni namen teh meritev je bil določiti debelino preperine. Geoelektrične meritve so bile izvedene s korakom 10 m in Schlumbergerjevim razporedom elektrod AB/2 = 10 in 20 m. Izvlečki teh meritev z razporedom AB/2 = 20 m so prikazani na sl. 8. Razvidno je, da elektropornost kamnin niha od nekaj sto do preko deset tisoč Ωm . V statističnem smislu se spreminja v odvisnosti od spremenjenih litoloških razmer od formacije do formacije.

Po zgornji analizi smo si za testno georadarsko snemanje izbrali odsek pod Čebulovico, kjer se po Osnovni geološki karti 1:100 000, lista Gorica (Buser, 1968) in Postojna (Buser et al., 1967) stikata srednji del liburnijskih skladov – kozinski apnenec s polži (1Pc_2) in zgornji del liburnijskih skladov, tj. foraminiferni miliolidni apnenec (2Pc_2). Kozinski apnenec je gost skladovit apnenec temno sive barve s tankimi črnimi vložki lapornega skrilavca in makrofavno. Ponekod vsebuje vložke premoga. Miliolidni apnenec pa je skladovit zrnat apnenec sive in temnejše sive barve. Prehod med njima je zvezen. Litološko se razlikujeta predvsem po vložkih skrilavca in vsebnosti organskih snovi in pričakovati je bilo, da se bosta razlikovala tudi geoelektrično in georadarsko. Namen meritev je bil preveriti georadarsko metodo za uporabo v detajlnem stratigrafskem kartiranju in jo predstaviti kot mersko metodo, ki je optimalna pri geotehničnih raziskavah na Krasu.

Okrog 215 m dolg georadarski profil je prikazan na sl. 9, njegov položaj in geološka skica pa na sl. 10. Na sl. 9 podajamo za primerjavo tudi meritve navidezne specifične upornosti v Ωm . Geološka skica na sl. 10 je prirejena po manuskriptni geološki karti 1:10 000, ki sta jo izdelala geologa dr. Bogdan Jurkovšek in Martin Toman. Prikazuje razširjenost kozinskega apnenca (1Pc_2), foraminifernega miliolidnega (2Pc_2) in foraminifernega alveolinsko-numulitnega apnenca (Pc, E), katerega pa geofizikalne meritve niso več zajele. Geološka skica nam je na koncu služila za verifikacijo geofizikalnih rezultatov. Profil smo merili od severovzhoda proti jugozahodu. Način meritev, ki je opisan pri Golobji jami, velja tudi za tukajšnje meritve, pri obdelavi podatkov pa smo privzeli hitrost širjenja valov 0,1 m/ns.

Iz radargrama se vidi, da v celoti poteka v karbonatni kamnini. Litološka meja je razpoznavna do globine okrog 17 m in sovпада z zvišanjem električne navidezne specifične

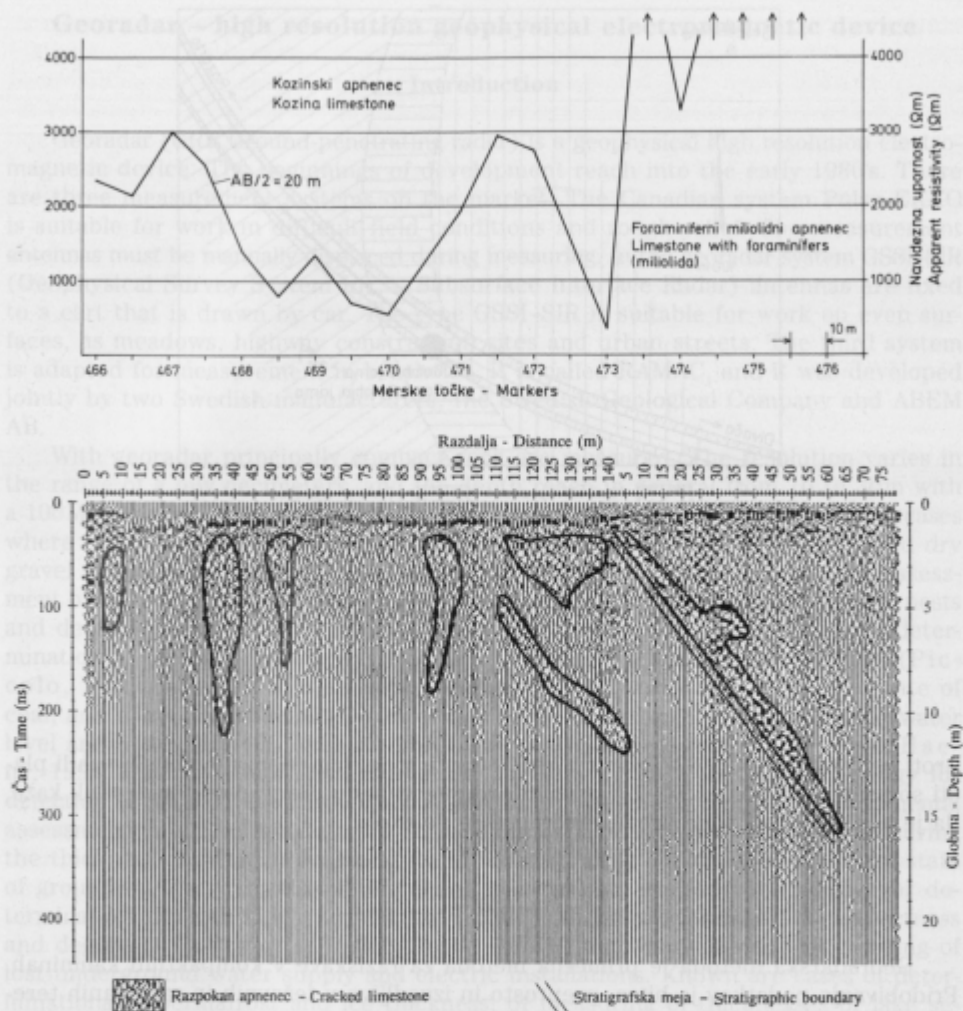


Sl. 8. Primerjava meritev geoelektričnega kartiranja (profiliranja) različnih stratigrafskih členov na cestni trasi Razdrto-Čebulovica

- E Eocenski fliš (menjavanje laporja in peščenjaka)
²Pc₂ Zgornji del liburnijskih skladov (foraminiferni miliolidni apnenec)
¹Pc₂ Srednji del liburnijskih skladov (kozinski sivi apnenec)
 Pc Paleocen (apnenec)
 K, Pc Spodnji del liburnijskih skladov (danij in kozinski skladi – temno sivi in sivi apnenec)
 K₂³ Senonski beli apnenec (rudistni apnenec)
 K₂² Turonijski sivi apnenec (rudistni apnenec in plastoviti apnenec)
 K₂ Kredni senonski in turonijski apnenec (plastoviti sivi in temno sivi apnenec Tržaško-Komenske planote)

Fig. 8. Comparison of geoelectrical profiling of different stratigraphic members on the Razdrto-Čebulovica highway

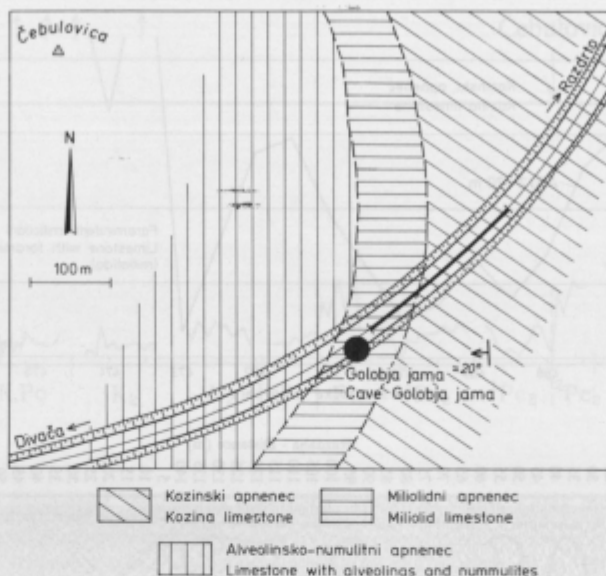
- E Eocene flysch (alternation of marl and sandstone)
²Pc₂ Upper part of Liburnian beds (limestone with foraminifers miliolides)
¹Pc₂ Middle part of Liburnian beds (grey Kozina limestone)
 Pc Paleocene beds (limestone)
 K, Pc Lower part of Liburnian beds (undivided Danian and Kozina limestone – dark grey and grey limestone)
 K₂³ Senonian white limestone (rudist limestone)
 K₂² Turonian grey limestone (rudist limestone and stratified limestone)
 K₂ Cretaceous Senonian and Turonian limestone (stratified grey and dark grey limestone of Triest-Komen plateau)



Sl. 9. Geoelektrični profil in radargram z avtoceste na hribu Čebulovica

Fig. 9. Geoelectric profile and radargram from highway at the Čebulovica hill

upornosti v delu foraminifernega miliolidnega apnenca (2Pc_2), kjer upornosti prese-gajo $5000 \Omega m$. Kot meja je označen debelejši odsek zveznega prehoda iz ene forma-cije v drugo. Razpokanost tako kozinskega kot foraminifernega apnenca je različna, posebno je izrazita ob opisani meji. Izmerjeni geoelektrični minimum med merskima točkama 468 in 471 ne predstavlja z glino zapolnjeno jamo, kar bi lahko bila možna interpretacija geoelektričnih meritev, temveč le relativno bolj razpokan apnenec. Zgoraj opisana litološka in hkrati stratigrafska meja leži pri merski georadarski točki 140 (geometrijska točka cestne trase 473) in vpada pod navideznim vpadnim kotom 14°



Sl. 10. Položaj geoelektričnega in georadarskega profila na Čebulovici

Fig. 10. Situation of geoelectric and georadar profile on the Čebulovica hill

proti geometrijski točki 477 oziroma proti jugozahodu. Izmerjeni površinski vpadi plasti so na tem mestu od 17–22° proti zahodujugozahodu. Georadarski posnetek kaže, da je apnenec praktično brez preperinskega pokrova.

Sklep

Georadarska metoda je primerna metoda za raziskave v kompaktnih kamninah. Pridobivanje podatkov je hitro, preprosto in izvedljivo v težavnih in razgibanih terenih. Velja za eno najnatančnejših geofizikalnih metod, ki je poleg tega zvezna. Vendar je plitvega dosega. Največji doseg v trdnih kamninah je okrog 50m. Prednost je v tem, da v raziskovalni medij ni potrebno postavljati sond ali različnih detektorjev, kot to zahtevajo druge geofizikalne metode; je nedestruktivna in ekološko sprejemljiva metoda. Meritve lahko zmotijo visokopredvodni predmeti, kot so železne cevi, električne napeljave in podobno. Preliminarni rezultati so dostopni takoj.

Z njim iščemo geološke strukture, diskontinuitete, določujemo različne stopnje kompaktnosti hribin in različna fizikalna stanja kamnin. Tudi v Sloveniji smo ga prekusili na številnih objektih raziskav. Vendar je interpretacija rezultatov zahtevna in je pri tem potrebna pazljivost in izkušnost. Posebej moramo biti pozorni na pojave difrakcije in na multiple reflekske. S svojimi lastnostmi si georadar utira pot v različne geološke raziskave in dejavnosti, kar so pokazale tudi naše raziskave.

Georadar – high resolution geophysical electromagnetic device

Introduction

Georadar (GRR Ground-penetrating radar) is a geophysical high resolution electromagnetic device. The beginnings of development reach into the early 1980's. There are three measurement systems on the market. The Canadian system Pulse EKKO is suitable for work in difficult field conditions and rough relief. The measurement antennas must be manually displaced during measuring. In the georadar system GSSI-SIR (Geophysical Survey System Inc. – Subsurface Interface Radar) antennas are fixed to a cart that is drawn by car. The type GSSI-SIR is suitable for work on even surfaces, as meadows, highway construction sites and urban streets. The third system is adapted for measurement in boreholes. It is called RAMAC, and it was developed jointly by two Swedish manufacturers, the Swedish Geological Company and ABEM AB.

With georadar principally compact rock are measured. The resolution varies in the range of a few decimeters, and the depth reach in general from 10 to 30m with a 100MHz transmitting antenna. In dry loose rocks the device is indispensable in cases where other low cost geophysical methods are not successful, as in scree and dry gravel deposits. In general it can be used in ornamental stone quarries for assessment of stone quality and reserves, and in bauxite deposits for searching bauxite nests and detecting the position of barren footwall. It was tested in ore mines for determination of geologic boundaries, detection of fissures, for search of orebodies (Piccolo, 1991), and in collieries for determination of fissures and trituration state of coal, and of tectonic planes (Coon et al., 1981). In hydrogeology the ground water level and hydrogeologic-lithologic properties of rocks are detected (Beres & Haenni, 1991), and in karstology fissures and caves. It is much used in archeology for detection of ruins covered by soil and of artefacts (Vaughan, 1986). In environmental assessment it is used for detecting of hidden disposal sites and pits, for measuring the thickness of snow in avalanches and for measuring the changed chemical state of groundwaters. It is valuable in tunnel construction, in road construction for determination of weathering cover thickness and geotechnical estimation of compactness and degree of fracturing of rocks (Cook, 1975). In towns it is used for locating of lost underground water supply and electric installations. Known are cases of determinations of permafrost and ice thickness, of measuring of thicknesses of lake sediments through the frozen ice of the lake. Georadar can be used also for fundamental geology studies, as in microreflection and lithostratigraphic measurements of recent sediments, or in locating the stratigraphic contacts (Davis & Annan, 1989).

The task of georadar in general is to distinguish geophysical anomalies, i.e. sites and surfaces with changed physical properties (Fischer & McMechan, 1992). The anomaly can be produced by any object that is the target of investigation (tube, covered wall, underground working, fissure, changed compactness, lithological alteration). Georadar is faced by similar difficulties as other geophysical methods. The results of measurements can namely indicate a number of possible sources, therefore in interpreting experience and good knowledge of measuring technique are needed. Measurements are hampered by underground electric cables, water supply tubes and various underground installations that are not the object of investigations (Greenhouse et al., 1993), and by steel support in mines. Advantages of the georadar recording technique are simple field equipment, possibility of measurement in circum-

stances where other geophysical methods fail, direct access to results of measurements. This method is non-destructive and environment friendly. A disadvantage is its price that is still rather high. Depth range is limited, and penetration into depth is obstructed especially by the presence of moisture and clay.

In Slovenia the method was first used in 1991 for examination of landslides and scree in surroundings of the kaolin mine Črna near Kamnik. Later a number of measurements was performed for a variety of purposes. Here a few characteristic cases of georadar application are assembled with the aim of presenting the practical side of the method. The work was ordered by various customers. In the karst territory the investigations were done in the frame of a research project of the Ministry of Science and Technology "Geophysical methods for problem solving in karst".

Georadar Equipment and Basics of the Method

Georadar consists of the following basic parts: transmitting antenna, receiving antenna, control unit for time steering of antennas and display unit, for example a portable PC with appropriate computer program. Measurement is steered by computer program that permits also real time quality control of the measurements. For processing data program packages are used that are bought together with the instrument. The program software is the most abundant for the GSSI georadar instrument. With purchased additional modules for processing also program packages for reflection seismics can be used.

The method is based on the penetration of the so-called high frequency (radio) electromagnetic (EM) waves of 10 to 1000MHz that are sent in short time lags – impulses – with the transmitting antenna or transmitter into the rock. There they travel to the anomaly from which a part of waves is reflected, so that they return. The reflected part of waves is received with the receiving antenna or receiver which is situated at a distance of a few decimeters to several meters from the transmitter. The measuring parameter is the travel time of the EM wave from the transmitting antenna to anomaly and back to the receiving antenna. The term is the two way travel time, similarly as in reflection seismics. The received waves are amplified and reformed in the control unit, and then verified on the screen of the display unit. Data are saved on hard disk for later processing. The way of obtaining and processing data, as well as the final display of data is similar to that in seismic methods. The difference resides in the source, physical nature and frequency of waves, and also in the measurement depth range and resolution of data. Whereas in the seismic methods the frequency ranges from several Hz to several hundred Hz, with georadar this range is from several MHz to 1000MHz. The usual time unit in seismics is millisecond (ms), and in georadar the nanosecond (ns). Figure 1 shows the way of measuring data with the usual georadar technique.

The propagation of waves is dependent upon electric properties of the rock, the starting frequency and the intensity of waves. The most important factors that describe propagation are the velocity and the attenuation of waves. Both velocity and attenuation depend upon the dielectric constant and resistance of rocks. In table 1 are shown values of the dielectric constant ϵ , electric conductance σ (mS/m), velocity v (m/ns) and attenuation α (dB/m) for the most common rocks. The values correspond to the 100MHz transmitting antenna.

In this paper special attention is being devoted to description of wave intensity,

attenuation, quality of the radar system, amplitude of the signal, resolution and the depth range of the georadar. On fig. 2 the depth ranges of georadar systems of varying quality in dependence of attenuation are shown, and on fig. 3 the dependence of resolution of the instrument upon their frequency of the transmitting antenna.

Modes of measurements

Described are the following measuring modes: reflection profiling (fig. 4), CMP (Common Mid Point), WARR (Wide Angle Reflection and Refraction), and geotomography. Lately also multichannel radar data acquisition is used (Fischer & Mc-Mechan, 1992).

Examples of Application

Follow practic examples of use of georadar in quarries, hydrogeology, geotechnics, speleology and stratigraphic mapping. All presented measurements were performed according to the method of reflection profiling with the georadar device Pulse EKKO IV and a 100MHz transmitting antenna. Varying in individual measurements was only the recording step.

The Hotavlje quarry

In the quarry in Hotavlje the ornamental stone called commercially the Hotavlje marble is produced. Limestone is in places fractured which lowers the recovery. With the georadar limestone was categorized with respect to its degree of fracturing and its quality. The established relations are shown on radargram in fig. 5. The presented results are especially effective in color. In this way the reserves of exploitable stone can be estimated with reduction of drilling. Measurements were performed in to the stope front of the quarry about 1 meter above the floor. In a similar way in geotechnics the degree of rock fracturing is established.

The calcite quarry at Stahovica

In the quarry of the Calcite Mine Stahovica at Stahovica near Kamnik the exploitable calcite is overlain by a thick cover of slope talus. The calcite mineral body forms the near-surface part of the rather thick Triassic limestone. The aim of investigations was to assess the thickness of the talus rubble and to calculate the amount of barren cover above the mineral deposit. The radargram on fig. 6 shows the talus rubble and its lithologic contact with calcite. The dry talus material passes into alluvial gravel of the Kamniška Bistrica creek in its lower part. Talus and gravel differ in the type of their radar traces to the degree that they can be distinguished. Measurements were performed close to the producing quarry on the surface of the very unstable and rolling scree material. Owing to the very coarse grain size of the rubble the contact electrode-rock was in places rather bad. For the depth conversion of the time depth the wave velocity of 0.12m/ns was assumed. With respect to the chosen velocity and frequency of waves which was according to spectral analysis 80MHz

the lowest possible vertical resolution was 0.6m, and the average depth range 25m. The interpreted scree thickness was 2–9m. In the lower part of the scree the rubble thickness was about 5m, and the interpreted thickness of the torrent deposit amounted to additional 4m. The calcite base of the rubble is relatively compact. It is damaged only a few meters just below the contact with scree which is the best observable between points 20 and 75 (fractured calcite in the upper 6 meters). Indicated are also vertical anomalies (higher damage of the base), for instance between the radar recording points 5–10, 20–24, 47–49 and 109–115. The fractured zone between points 109 and 115 supposedly indicates the contact between calcite and limestone. Similar measurements can be made for road construction purposes for investigating landslides, screes, talus material and the like.

Golobja jama cave near Divača

In the bedded foraminiferal limestone with miliolida ($^2\text{Pc}_2$), in the middle of the future highway Ljubljana–Triest, in the section Razdrto–Čebulovica near Divača the Golobja jama cave occurs. Its position is shown in fig. 10. On the surface the entrance is visible, but its continuation in the depth is not known. Before the road construction the dimensions of the cave had to be assessed and its roof determined in order to avoid later collapse. Measurements are presented in fig. 7a, and interpretation on fig. 7b. The radar source was directed down into the limestone rock. The signal crossed the cave roof, passed the air in the cave and entered the collapsed material on the cave floor; then it died down in the underlying limestone. With such lithology on the floor of the cave a worse contrast was expected as in the roof, and a large decay of reflected waves in the floor, which also happened. In depth transformation of radar-gram the assumed velocity of radar waves in the limestone was 0.12m/ns, and in the air 0.3m/ns. The interval between traces is 1m, and the calculated possible resolution in limestone 0.4m.

The Golobja jama cave lies below the stony vault 2 to 5m thick. It is about 25m deep, as measured from the surface. It continues in the direction 150 degrees towards southeast. Determination of the upper limit of the roof is clear, questionable is the limit of the floor owing to the unclear passage through rubble and collapsed material on the floor. It is estimated that the floor collapse fills about a quarter of the cave. The described case is interesting for construction engineers as well as for karstologists and karst hydrogeologists.

Highway section Razdrto–Čebulovica

The future highway passes at Razdrto through flysch beds (E) and enters at Senožeče/Dolenja vas the Kozina and Danian grey and black limestones (K, Pc, Pleničar et al., 1970). In the field near Dolenja vas it passes across Cretaceous Senonian and Turonian grey and dark grey limestones (K_2) of the Triest–Komen plateau. Across the grey Danian limestone (K, Pc) the trace passes into Paleocene beds (Pc) that are not determined stratigraphically in more detail. In the slope of the Čebulovica hill the Paleocene beds are subdivided into the middle part of Liburnian beds (Kozina limestone – $^1\text{Pc}_2$) and in the upper part of Liburnian beds (foraminiferal limestone with miliolida – $^2\text{Pc}_2$, Buser, 1973). Farther towards Divača the highway trace passes

on limestone with alveolinas and nummulites (Pc, E), and grey Turonian (K₃) and white Senonian (K₂) rudist limestones. The Geophysical department of the Institute for geology, geotechnics and geophysics of the Geological Survey Ljubljana in 1989 executed the continuous geophysical mapping of the projected highway trace, not on all its extent, unfortunately. Measurements were performed with a 10 meter step and with the Schlumberger disposition of electrodes AB/2 = 10 and 20m. Summary data with disposition AB/2 = 20m are shown in figure 8. Based on the analysis of these measurements the site for georadar test recording was selected in the section at the foot of the Čebulovica hill. There, according to the Basic geological map 1:100000, sheets Gorica and Postojna, the contact of the middle part of Liburnian beds (Kozina limestone with snails (Pc₂) and the upper part of Liburnian beds, the foraminiferal limestone with miliolida, are developed. The Kozina limestone is a dense layered limestone of dark grey color with thin black intercalations of marl with macrofauna. In places it contains coal. The limestone with miliolida is a layered grainy limestone of grey and darker grey color. Lithologically they differ especially in layering and contents of organic matter.

The purpose of measurements was to verify the georadar method for application in detailed stratigraphic mapping – for detecting lithologic contacts, and as a geophysical method that might be optimal for geotechnical survey in karst terrains.

The 215m of the georadar profile are shown on fig. 9, and its position and geological sketch-map on fig. 10. The mentioned lithologic boundary is visible to the depth of about 20m. The boundary coincides with a jump of apparent electric resistivity in the part of limestone with foraminifers miliolids where resistivity values exceed 5000 Ohm-m. The profile was oriented NE-SW and passed, as seen from radargram, entirely in carbonate rock. Degree of fracturing of the limestone varies, being especially high at the described boundary. The measured geoelectric maximum between measuring points 468 and 471 does not represent a karstic cave filled with loam, but only relatively more fractured limestone. The geologic – lithologic and stratigraphic boundary passes over measuring point 140 (survey point of highway trace 473) and dips at an apparent angle of 13.7 degrees towards southwest. The dips of beds measured at surface are here 17–22 degrees towards west-southwest. The limestone has no surficial cover, which is also well visible on the georadar recording.

Literatura

- Beres, M. & Haeni, F. P. 1991: Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. – *Ground Water* 29, 3, 1991, 375–386, Dublin.
- Buser, S. 1968: Osnovna geološka karta, list Gorica 1:100000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Buser, S. 1973: Tolmač za list Gorica, 50 pp. – Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Buser, S., Grad, K. & Pleničar, M. 1967: Osnovna geološka karta, list Postojna 1:100000, Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Cook, J. C. 1975: Radar transparencies of mine and tunnel rocks. – *Geophysics* 40, 5, 865–885, Tulsa.
- Coon, J. B., Fowler, J. C. & Shafers, C. J. 1981: Experimental uses of short pulse radar in coal seams. – *Geophysics* 46, 8, 1163–1168, Tulsa.
- Davis, J. L. & Annan, A. P. 1989: Ground-Penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. – *Geophysical Prospecting* 37, 531–551, Oxford.
- Fisher, E. & McMechan, G. A. 1992: Example of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating profiles. – *Geophysics* 57, 4, 577–586, Tulsa.
- Fisher, E., McMechan, G. A. & Annan, A. P. 1992: Acquisition and processing of wide aperture ground-penetrating radar data. – *Geophysics* 57, 3, 495–504, Tulsa.

Greenhouse, J., Brewster, M., Scheider, G., Redman, D. & Annan, P. 1993: Geophysics and solvents. The border experiments. – The Leading Edge, 261–267, Tulsa.

Piccolo, M. 1991: Development and improving of georadar system as a geophysical method for mining exploration. 53rd E.A.E.G. Meeting and Technical exhibition. Technical programme and abstracts of papers, DO 44, Florence.

Pleničar, M., Buser, S. & Grad, K. 1970: Tolmač za list Postojna, 62 pp. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Vaughan, C. J. 1986: Ground penetrating radar surveys used in archeological investigations. – Geophysics 51, 3, 595–604, Tulsa.