

UDK 550.34.05(497.12)=963

Geofizikalne raziskave med Gameljnam in Dolskim za ugotavljanje debeline prodnega zasipa

Bojan Uran in Milan Živanović
Geološki zavod Ljubljana, Parmova 37, 61000 Ljubljana

Kratka vsebina

Z refrakcijsko seizmiko in geoelektričnim sondiranjem smo raziskali ozemlje ob Savi med Gameljnam in Dolskim, da bi za potrebe projektiranja hidrocentral na Savi ugotovili debelino prodnega zasipa. Ugotovili smo, da je njegova debelina na večjem delu med 50 in 80 metri. Le med Brinjem in Dolskim je globina manjša in znaša okrog 10 metrov. Dobljeni podatki so dopolnili geološko sliko področja.

Uvod

V letu 1987 smo izvedli geofizikalne raziskave za potrebe projektiranja hidrocentral na Savi med Gameljnam in Dolskim.

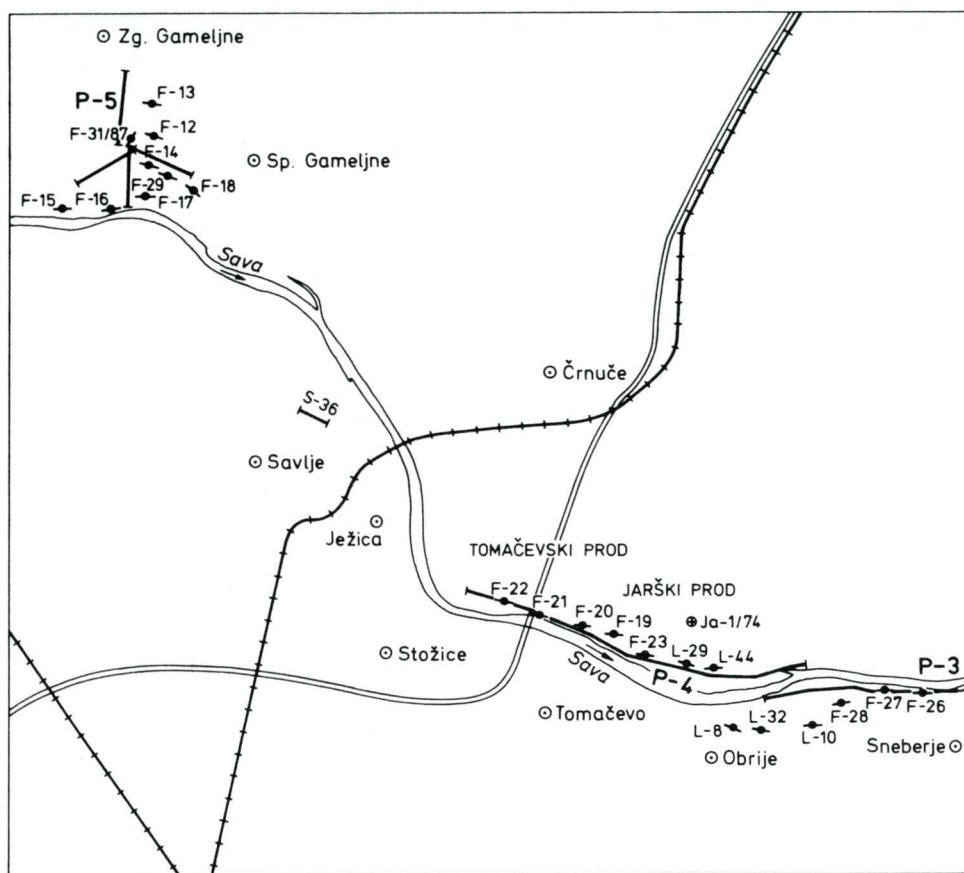
Namen geofizikalnih raziskav je bil določiti debelino prodnega zasipa. Pri raziskavah smo uporabili metodo geoelektričnega sondiranja navidezne specifične upornosti in metodo refrakcijske seizmike.

Žlebnik (1979) je obdelal inženirskogeološke in hidrogeološke probleme v zvezi s projektiranjem in gradnjo hidroenergetskih stopenj na Savi. Njegova študija je bila osnova za naše raziskave.

Med Gameljnam in Dolskim naj bi bil prodni zasip v zgornjem delu iz rahlo odloženega proda, v spodnjem delu pa iz zbitega proda z vložki konglomerata. Kameninska podlaga prodnega zasipa naj bi bili karbonski glinasti skrilavci z vmesnimi plastmi kremenovega peščenjaka. Zaradi konglomerata v prodnem zasipu imamo pri refrakcijski seizmiki klasični primer hitrostnega obrata, pri geoelektriki pa problem ekvivalence.

Blizu raziskovanega področja so bile geofizikalne raziskave v preteklosti že opravljene. Izvrtanih je bilo tudi nekaj vrtin, v glavnem za preskrbo s pitno vodo, a jih večina ni segla v podlago. Dokumentacija o raziskavah je shranjena v arhivu Geološkega zavoda Ljubljana.

Prejšnje raziskave so bile v glavnem neuspešne. Na Jarškem Produ so z refrakcijsko seizmiko določili le globino konglomerata, ki so ga zaradi visokih hitrosti interpretirali kot kameninsko podlago. Vrtina na Jarškem Produ je pokazala, da so bile z geoelektričnimi sondami določene globine za okrog 30 % prevelike.

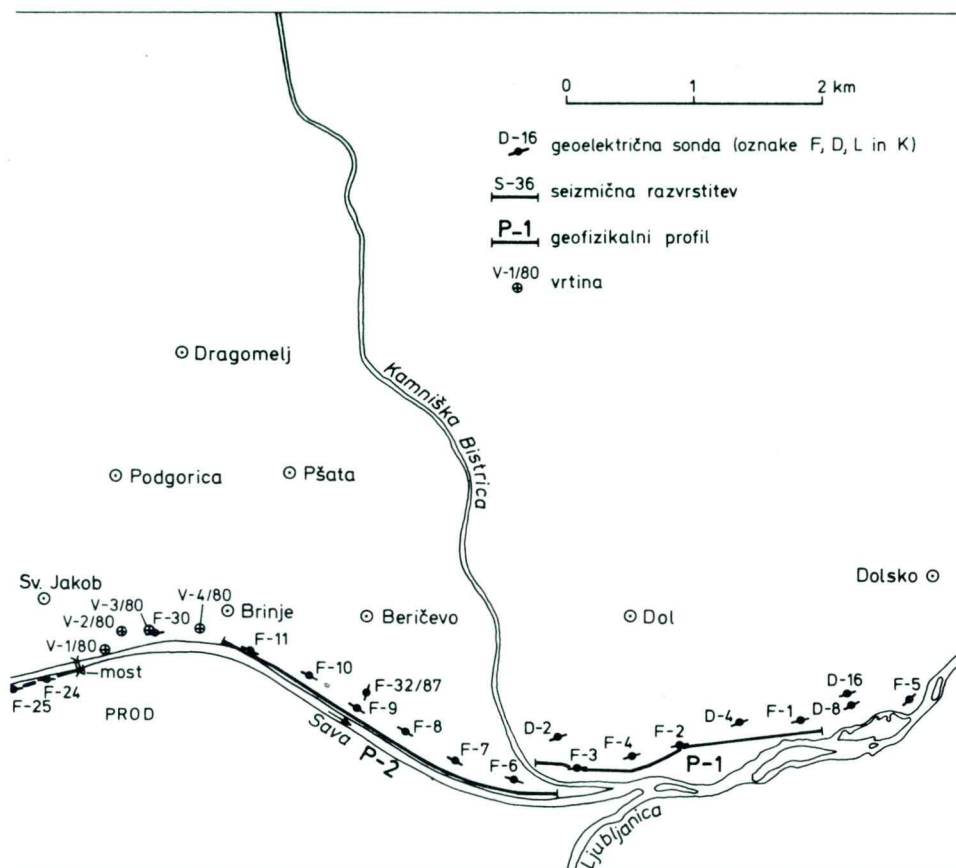


Terenska dela

Na področju med Gameljnama in Dolskim smo naredili 12 kilometrov refrakcijskih razvrstitev geofonov, in sicer po poteh v neposredni bližini Save. Situacija raziskav je prikazana na sl. 1.

Pogoj za uspešnost meritev je njihova priprava, zato smo na podlagi predhodnih raziskav izbrali za posamezne plasti tipične hitrosti ter izračunali optimalne razmake med geofoni in s tem dolžine njihovih razvrstitev. Med strelnimi točkami in geofoni smo določili potrebne razdalje, pri katerih zaznamo signale iz podlage pred signali iz prodnega zasipa. To je pogoj, da lahko določimo hitrosti v podlagi in izračunamo globine. Rezultate meritev smo sproti preverjali s tako dobljeno predstavo o širjenju valov med strelno točko in geofoni. Pri nejasnostih smo povečali oddaljenost strelnih točk in število zunanjih strel, dokler nismo bili prepričani, da so prvi prihodi seizmičnih valov na seizmogramu res prihodi iz podlage.

Razvrstitve od Dola pri Ljubljani proti sotočju Kamniške Bistrice in Save (zaporedne številke od 1 do 18) so bile narejene z medgeofonsko razdaljo 5 m. Seizmične



Sl. 1. Situacija geofizikalnih raziskav

valove smo vzbujali z udarci kladiva po kovinski ploščici. Običajno smo imeli sedem vzbujevalnih mest na razvrstitev 24 geofonov (na sredini in na obeh koncih razvrstitve ter zunanje strele, oddaljene za polovico in za celotno dolžino razvrstitve od koncev razvrstitve). Tako smo dobili dovolj natančne podatke o hitrostih v zgornjih plasteh, ki jih potrebujemo za izračun globine do podlage. Hkrati smo dobili podatke o hitrosti v podlagi, ki z njimi lahko ločimo posamezne tektonske bloke.

Razvrstitve z zaporednimi številskami od 20 do 40 so z medgeofonsko razdaljo 15 m, od 41 do 45 pa na 20 m. Seizmične valove smo vzbujali z razstrelivom. Strelne točke so bile razvrščene podobno kot pri krajših razvrstitvah, pri čemer smo včasih povečali število in oddaljenost zunanjih strelav tudi na 500 do 600 m, tako da je bila razdalja do najbolj oddaljenega geofona okrog 1000 m. Tako smo na področjih, kjer so vložki konglomerata blizu podlage, dobili prave podatke za hitrosti v podlagi.

Meritve smo izvedli s štirindvajsetkanalnim digitalnim mikroprocesorsko nadzorovanim seizmografom ABEM-Terraloc.

Pri geoelektričnih meritvah smo uporabljali geoelektrično sondiranje po metodi navidezne specifične upornosti (po Schlumbergerjevi metodi). Izmerili smo 32 sond

s polovičnimi medelektrodnimi razmaki AB/2 od 140 do 970 m. Dodatno je bilo reinterpreteriranih še 10 sond iz let 1977, 1983 in 1986.

Pri manjših medelektrodnih razdaljah smo kot izvor energije uporabljali anodne baterije, pri večjih pa generator Honda z močjo 2 kW in usmernik. Merili smo s kompenzacijskim voltmetrom domače izdelave in z avtomatskim merilnikom upornosti Syscal-R z vgrajenim mikroprocesorjem.

Interpretacija

Refrakcijska seizmika temelji na domnevi, da so plasti homogene in izotropne ter da hitrosti z globino naraščajo. Menjavanje plasti z višjo in nižjo hitrostjo v prodnem zasipu predstavlja klasični primer hitrostnega obrata, ki je ena največjih težav pri interpretaciji podatkov refrakcijske seizmike. Poleg tega se lahko zgodi, da so plasti pretanke, da bi jih glede na razlike v hitrostih lahko zaznali, kar v literaturi označujejo z imenom skrita plast.

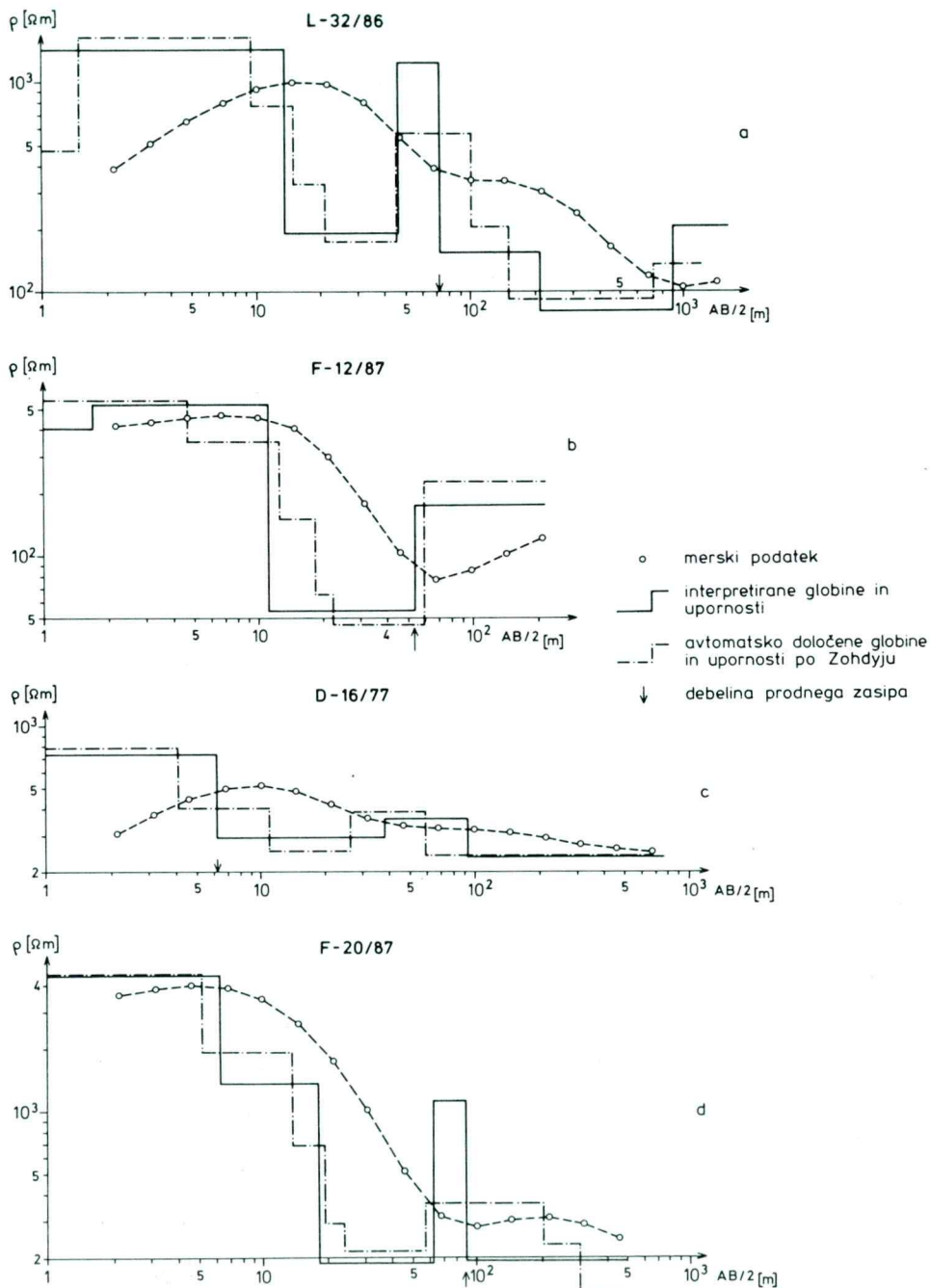
Za interpretacijo smo uporabljali generalizirano recipročno metodo (Palmer, 1980). Pri njej je poudarek na razdalji med geofoni, imenovani XY. Žarki pri streljanju na enem in na drugem koncu razvrstitve izhajajo pri pravilno izbrani razdalji XY iz iste točke na refraktorju. Optimalno razdaljo XY določimo z analizo hitrosti. Ko jo poznamo, lahko sledimo obliki refraktorja in izračunamo povprečne hitrosti plasti nad njim. Povprečne hitrosti omogočajo izračun globin tudi v skritih plasteh in ob hitrostnem obratu.

Razdaljo XY lahko izračunamo tudi iz debelin in hitrosti plasti. Ujemanje izračunane in izmerjene razdalje pomeni, da je interpretacija točna.

Geoelektrične sonde smo interpretirali tako, da smo primerjali terenske krivulje s teoretično izračunanimi modelnimi krivuljami (Orellana & Mooney; 1966, van Dam & Meulenkaamp, 1975) pa tudi z metodo pomožnih točk. Tako dobljene podatke za debeline in upornosti plasti smo z računalniškim modeliranjem uskladili z merjeno krivuljo; tako so se kar najboljše ujemale merske in izračunane krivulje. Preizkusili smo tudi vse možne kombinacije upornosti in debelin, ki bi zaradi načela ekvivalence lahko dale enako krivuljo, ter izbrali optimalno rešitev.

Naredili smo tudi avtomatsko interpretacijo z računalniškim programom po Zohdyju (1975). Program sprva določi toliko plasti z različnimi upornostmi, kolikor je merskih točk. Plasti, ki imajo podobne upornosti, združi v eno plast. Na sl. 2 so prikazane geoelektrične sonde z vrisanimi debelinami in upornostmi plasti, dobljenimi z avtomatskim in ročnim modeliranjem. Pri preprosti geološki sestavi, kot je recimo v Gameljnah, so debeline prodnega zasipa, izračunane z avtomatskim modeliranjem, dovolj natančne (sl. 2b). Če so v prodnem zasipu vložki konglomerata, je ujemanje slabše ali pa so dobljene globine povsem napačne. Na sondi iz Obrij (sl. 2a) se ujemajo le globine površinske plasti do konglomerata, medtem ko je globina do podlage, dobljena z avtomatskim modeliranjem, prevelika. Podobno velja za sondo iz Jarškega Proda (sl. 2d). Tudi pri manjših globinah avtomatsko modeliranje ni dovolj natančno, ker združi računalnik preveč plasti v eno samo (sl. 2c).

Računalniški program ne upošteva dodatnih omejitev, ki jih lahko vključi izkušen interpretator. Geoelektrično sondiranje temelji na podmeni, da imamo homogen in izotropen polprostor, kjer se upornosti spreminjajo le z globino. Plasti morajo biti dovolj debele, da jih lahko ločimo. Če je plast tanka, ima pa recimo visoko upornost, je njen vpliv na mersko krivuljo enak vplivu debelejšje plasti z nižjo upornostjo, kar



Sl. 2. Primeri geoelektričnih sond z interpretacijo

označujemo z načelom ekvivalence. Pri vložkih konglomerata imamo opravka s tem načelom. Konglomerat se nahaja v večjih globinah, zato ga na merski krivulji ne moremo zaznati, ker se z večanjem medelektrodnih razdalj in s tem globinskega dosega manjša globinska ločljivost.

S kombinirano uporabo geoelektričnih in seizmičnih metod lahko v veliki meri odpravimo mnogoličnost interpretacije geoelektričnih sond in seizmičnih razvrstitev. S seizmiko dobljeni podatek, da je na profilu plast konglomerata, predstavlja dodatni pogoj, ki ga mora upoštevati interpretator. Po drugi strani pa razlika v določitvi globin opozarja, da imamo pri seizmiki opravka s skritimi plastmi in s hitrostnim obratom. Če tega ne upoštevamo, so izračunane globine premajhne. Ujemanje rezultatov, dobljenih z različnima metodama, pomeni, da je interpretacija točna, saj je zadoščala vsem dodatnim pogojem obeh metod.

Rezultati

Geoelektrične in seizmične raziskave temeljijo na različnih fizikalnih lastnostih kamnin. Ujemanje rezultatov je tem boljše, čim ostrejšje so spremembe v električnih in elastičnih lastnostih med prodnim zasipom in podlago.

Rezultati refrakcijskih seizmičnih raziskav in geoelektričnega sondiranja z metodo navidezne specifične upornosti se na celotnem raziskovanem področju ujemajo v okviru natančnosti metod. Na sl. 3 so prikazani zvezni relief podlage, dobljen z refrakcijsko seizmiko, in točkovni podatki geoelektričnega sondiranja. Iz primerjave teh podatkov si lahko ustvarimo sliko o natančnosti geofizikalnih raziskav. Geoelektrične sonde, ki so bile manj kot 50 m oddaljene od seizmičnega profila, so označene s polno črto, bolj oddaljene pa s prekinjeno.

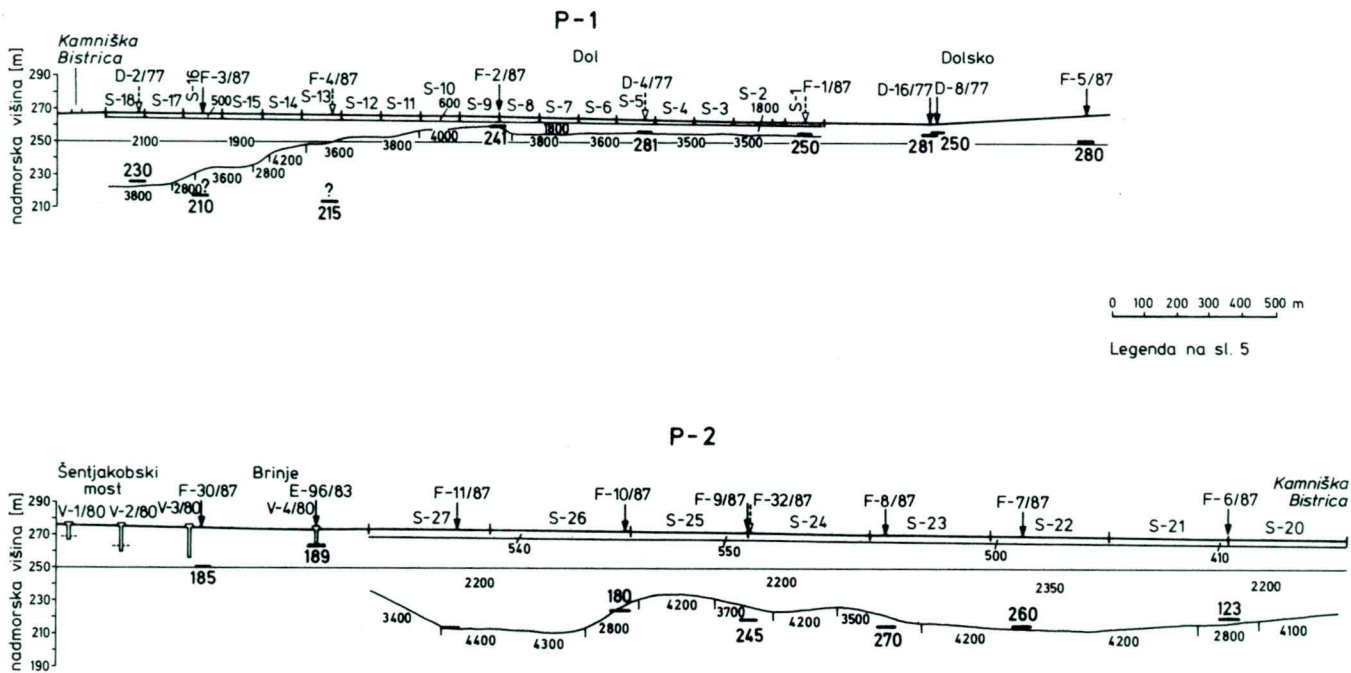
Na celotni dolžini profila je opaziti v glavnem tri plasti, ki se po hitrostih longitudinalnih valov med seboj razlikujejo.

Prva je površinska plast nad gladino podtalnice. Hitrosti longitudinalnih valov so od 400 do 1200 m/s. Nižje hitrosti so značilne za melj in suhi prod, višje pa za glino in zaglinjeni prod. Debelina prve plasti je 4 do 5 m.

Drugo plast predstavlja prodni zasip pod gladino podtalnice. Hitrosti v njem so med 1600 m/s do 3300 m/s. Hitrosti med 1600 in 2000 m/s so značilne za zaglinjeni prod in za menjavanje proda, peska in melja. Hitrosti v vložkih konglomerata so med 2300 in 3300 m/s. Različne hitrosti so posledice različnih debelin in stopnje vezanosti konglomerata. Debelina druge plasti je zelo različna in se giblje od nekaj metrov pri Dolu do čez 70 m v Sneberjah in Jarškem Produ. Glede na to, da imajo tektonsko zgneteni in prepereli glinasti skrilavci in peščenjaki hitrosti okrog 3500 m/s, je potrebna velika pazljivost, da vložkov konglomerata v prodnem zasipu ne interpretiramo kot podlago.

Karbonska podlaga predstavlja tretjo plast s hitrostmi od 3500 do 4700 m/s. Različne hitrosti so posledice različne sestave, preperelosti in tektonske zgnetenosti. Nepreperel in tektonsko neprizadet kremenov peščenjak ima verjetno najvišje hitrosti. V skrilavcu, kjer so zaradi preperevanja nastali debelejši vložki gline, so hitrosti nižje. Globina do podlage je nekaj manj kot 10 m pri Dolu do 80 m v Sneberjah.

Vrednosti električnih upornosti v prodnem zasipu so odvisne od kameninske sestave. Naravno vlažen in suh prod imata upornosti od 1000 do 5000 Ω m. Glina s prodom in peskom ima upornosti med 20 in 100 Ω m. Skrilavci in peščenjaki imajo upornosti od 140 do 280 Ω m.



Sl. 3. Geofizikalna profila P-1 in P-2

Pri interpretaciji geoelektričnih sond smo imeli težave zaradi heterogenosti prodnega zasipa, v bližini Kamniške Bistrice pa tudi zaradi majhnih razlik v upornostih prodnega zasipa in podlage.

Profil med Kamniško Bistrico in Dolom

Debelina prodnega zasipa se na profilu P-1 med Kamniško Bistrico in Dolom (sl. 3) najbolj spreminja. Na razvrstitvi S-18 pri Kamniški Bistrici znaša globina 45 m. Do razvrstitve S-13 se na razdalji okrog 500 m globina postopoma zmanjša na komaj 10 m.

Nizvodno od S-9 so hitrosti v podlagi le med 3500 in 3600 m/s. Razlika v hitrostih je verjetno povezana z različno sestavo podlage in različno stopnjo preperelosti. Tektonski vplivi na hitrost so verjetnejši na razvrstitvah S-17, S-15 in S-13. Na teh mestih so hitrosti le okrog 2800 m/s.

V bližini Kamniške Bistrice že nastopajo vložki konglomerata, zaradi česar so hitrosti v prodnem zasipu čez 2000 m/s. Na preostalem delu profila konglomerata verjetno ni. Na to kažejo hitrosti med 1800 in 1900 m/s.

Geoelektrična slika tega dela profila je podobna. Prodni zasip ima zvišane upornosti, iz česar sklepamo, da je sestavljen v glavnem iz prodnih in prodno peščenih sedimentov. Podlaga ima razmeroma izenačene upornosti, kar kaže na enakomerno kameninsko sestavo.

Med Kamniško Bistrico in Dolom je ujemanje seizmičnih in geoelektričnih rezultatov na plitvem delu pri Dolu in na globljem delu pri Kamniški Bistrici na približno meter natančno. Razlika v določitvi globine se pojavi pri sondi F-4, kjer je po seizmiki postopen prehod z globine 10 m na 40 m. Po geoelektriki je ta skok na krajši razdalji še večji. Glede na to, da je geoelektrična sonda precej oddaljena od seizmičnega profila, je možno, da je to posledica tektonike. Zdrobljene cone v skrilavcu so zaglinjene, tako da se upornost podlage bistveno ne razlikuje od upornosti prodnega zasipa, sestavljenega iz zaglinjenega proda. Globina na sondi F-4 je najverjetneje povezana s spremembo upornosti v podlagi. Z gostejšo mrežo sond in seizmičnih razvrstitev bi bilo možno to nejasnost odpraviti.

Profil med Brinjem in Kamniško Bistrico

Največje odstopanje od geoloških predvidevanj je na profilu P-2 od Brinja proti Kamniški Bistrici (sl. 3). Na tem delu so bile pričakovane globine do podlage okrog 10 m. Izkazalo se je, da so precej večje, in sicer med 40 in 60 m.

Značilnosti površinskih plasti so podobne kot pri prejšnjem profilu. Površinska plast nad podtalnico je bolj peščena, na kar kažejo hitrosti okrog 500 m/s in upornosti okrog 1000 Ω m. Globina do podtalnice je med 4 in 5 m.

Prodni zasip pod gladino podtalnice predstavlja drugo plast. Hitrosti čez 2200 m/s so posledica vložkov konglomerata v njej. Tudi električne upornosti so zaradi tega povišane in znašajo okrog 800 Ω m.

Karbonska podlaga je v globinah med 40 in 60 m. Opazna je grudasta zgradba s hitrostmi čez 4000 m/s in pod 4000 m/s. Nižje hitrosti so verjetno posledica tektonike in različne stopnje preperelosti ali pa tudi različne geološke sestave plasti, za kar pa zazdaj nimamo dokazov. Na tem profilu je najlepše vidno ujemanje med

hitrostmi seizmičnih valov in upornostjo vzdolž profila. Razlike v fizikalnih lastnostih podlage so povezane z različno sestavo in tektonskimi vplivi. Nižje vrednosti so povezane z nižjimi hitrostmi in obratno. Globine se ujemajo na 3 do 4 m. Dvig pri razvrstitvi S-25 zaradi preredkih geoelektričnih sond ni toliko opazen.

Profil med Šentjakobskim mostom in Brinjem

Na področju med Brinjem in Šentjakobskim mostom je bilo v preteklosti izvrtanih nekaj vrtin, ki so navrtale podlago že na globini okrog 10 m. Zato pri Brinju na zahtevo investitorjev nismo delali geofizikalnih raziskav, razen etalonske geoelektrične sonde na vrtini V-4/80 za preizkus točnosti geoelektričnih meritev in interpretacije. S sondo in z vrtino določeni globini se ujemata na okrog 3 % (sl. 3).

Profil med Obrijem in Šentjakobskim mostom

Z raziskavami smo pričeli pri Šentjakobskem mostu na desnem bregu Save.

Globine do podlage so na profilu P-3 med 65 in 80 m (sl. 4). Hitrosti v njej so med 4200 in 4600 m/s, kar kaže na nepreperelo in tektonsko nepoškodovano hribino. Na nekaterih mestih, predvsem ob grudah različnih globin, je opaziti hitrosti okrog 2800 m/s. Z geoelektričnimi sondami smo dobili podobno sliko.

Na področju med Obrijem in Šentjakobskim mostom se s seizmiko in geoelektriko ugotovljene globine do podlage ujemajo na okrog 5 m. Opazno je, da geoelektrika kot potencialna metoda ni tako občutljiva na hitre spremembe v podlagi, zato je slika bolj zglajena. Z gostejšo mrežo geoelektričnih sond v različnih smereh bi lahko to pomanjkljivost odpravili. V bližini Šentjakobskega mosta potekata daljnovod in plinovod, ki vplivata na geoelektrične meritve, kar je lahko vzrok za nekaj večje odstopanje globin.

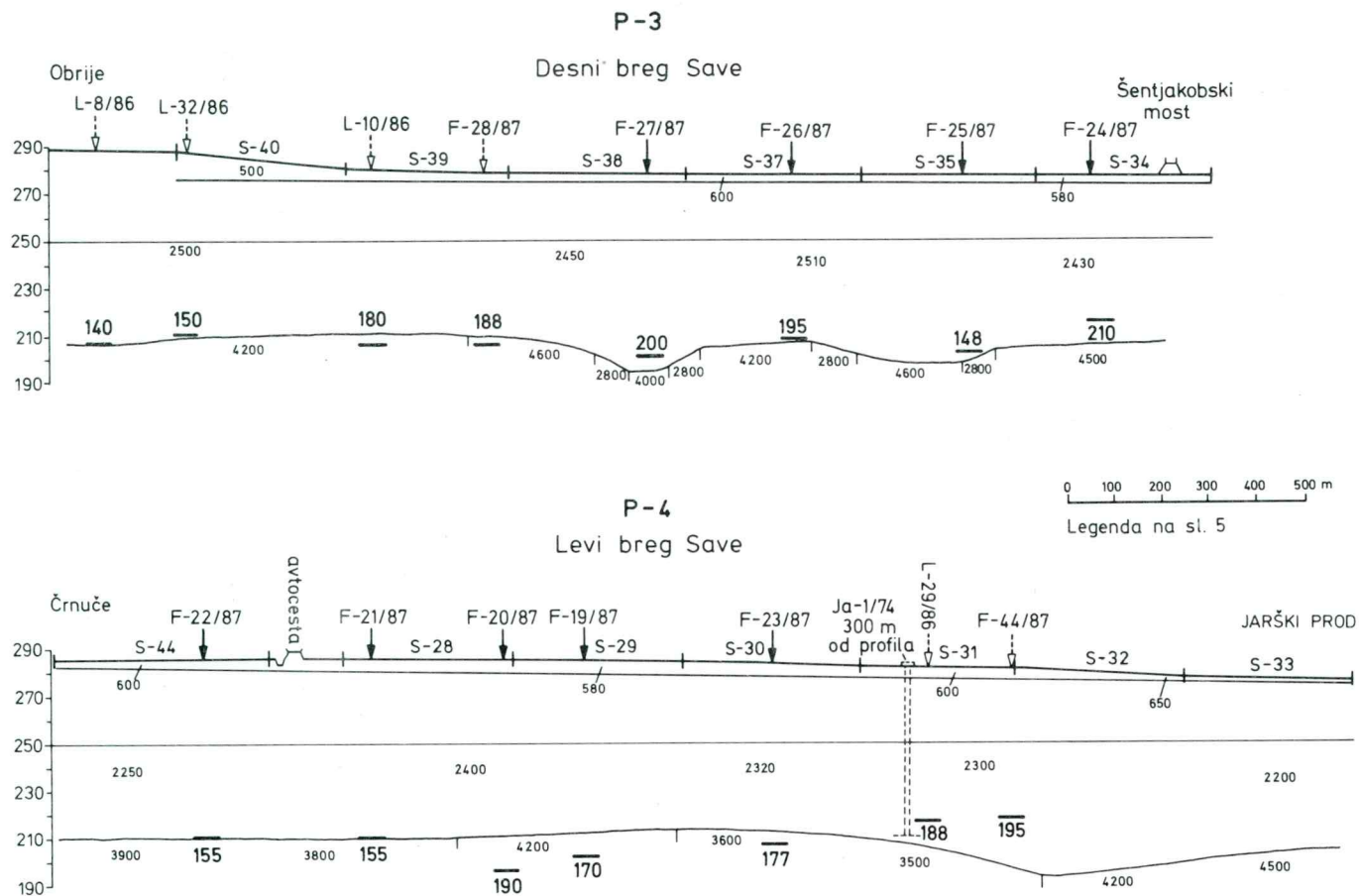
Profil med Črnučami in Jarškim Prodom

Seizmični profil P-4 od Črnuč proti Jarškemu Produ leži na levem bregu Save (sl. 4). Globine do neprepustne podlage so med 70 in 80 m.

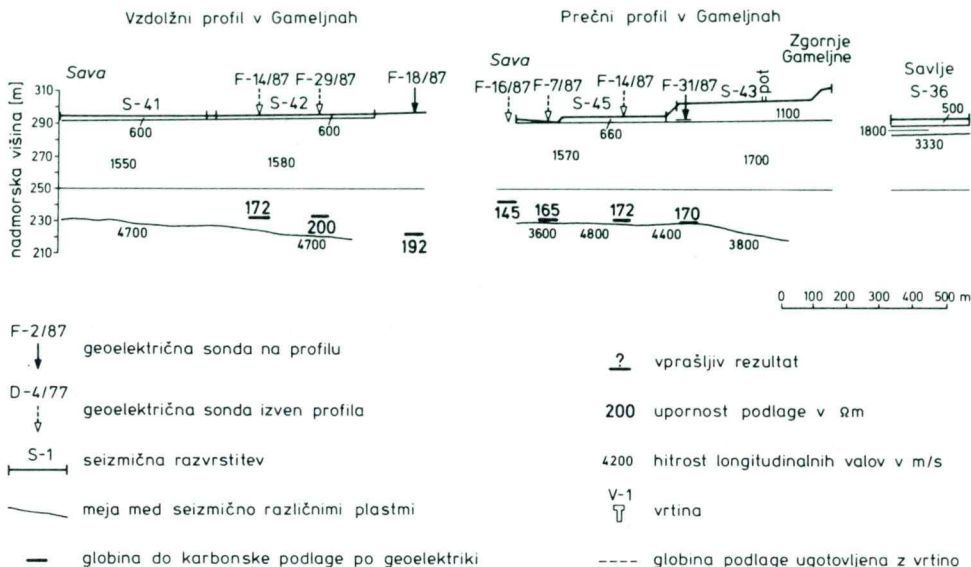
Na tem področju je največ vložkov konglomerata. Hitrosti v prodnem zasipu so med 2200 in 2400 m/s. Upornosti so zaradi konglomerata na tem delu okrog 1100 Ω m.

Hitrosti v podlagi so med 3500 in 4500 m/s, kar kaže na razliko v sestavi in stanju, v kakršnem je podlaga. Razlike so opazne tudi v upornostih, vendar so manjše.

Kjer nastopajo vložki konglomerata, kot na primer na Jarškem Produ, se seizmični in geoelektrični rezultati ujemajo nekoliko slabše. Začetni del profila proti Črnučam, razvrstitvi S-44 in S-28, se ujema na meter natančno. Pri sondah F-20, F-19, F-29 in F-44 so odstopanja med 10 in 15 m, kar je posledica vložkov konglomerata, ki se pojavlja v različnih globinah in različno debelih plasteh. Poleg tega kaže, da je tu konglomerat močnejše vezan kot na preostalem področju. Pri seizmiki predstavljajo vložki konglomerata hitrostni obrat, pri geoelektriki pa jih je zaradi načela ekvivalence tankih plasti z visokimi upornostmi prav tako težko določiti. Na tem področju so že pri prejšnjih raziskavah ugotavljali, da so globine, dobljene z geoelektričnim sondiranjem, prevelike. To v nekaj manjši meri velja tudi danes,



P-5



Sl. 5. Geofizikalni profil P-5

čeprav je bilo pri interpretaciji veliko pozornosti posvečeno prav temu problemu. Z računalniškim modeliranjem smo poskušali preveriti možne različice interpretacije in izbrati najboljšo.

Suhi prod, ki se v tem profilu pojavlja ponekod kar na površini, močno vpliva na tokovnice pri geoelektričnih meritvah. Vplive zaradi nehomogene površinske plasti je včasih težko ločiti od globljih vplivov. Odstopanje pri sondi F-44 je tudi posledica dejstva, da je ta sonda zadnja na profilu, kar onemogoča primerjavo z drugimi in je zato manj natančna.

Profili v Gameljnah

Profili P-5 v Gameljnah (sl. 5) so bili za interpretacijo najlažji, saj v prodnem zasipu ni bilo opaznih vložkov konglomerata. Pod površinsko plastjo s hitrostjo okrog 600 m/s je najverjetneje plast zaglinjenega proda s hitrostmi okrog 1550 m/s. Tudi električne upornosti so zelo nizke, le od 20 do 100 Ωm .

Na vzdolžnem profilu je podlaga zelo kompaktna, s hitrostmi longitudinalnih valov kar 4700 m/s. Na prečnem profilu sta poleg visoke hitrosti opazna še dva bloka s hitrostmi okrog 3700 m/s. Globina do podlage je med 65 in 75 m.

Primerjavo rezultatov na vzdolžnem profilu v Gameljnah nekoliko ovira dejstvo, da seizmični in geoelektrični profil nista povsod na istem mestu. Kjer potekata v bližini, je ujemanje na okrog meter natančno.

Sklep

Geofizikalne raziskave za potrebe projektiranja hidrocentral na Savi med Garmeljnami in Dolskim so dopolnile dosedanje geološko poznavanje raziskovanega področja. Ugotovili smo, da so globine na večjem delu profila med 50 in 80 m, kar je več, kot smo pričakovali na podlagi prejšnjih raziskav in redkih vrtin. Plitvejši deli z globino okrog 10 m so le pri Brinju in v bližini Dolskega.

Pri meritvah smo imeli nekaj težav zaradi vložkov konglomerata v prodnem zasipu. Z uporabo računalniško podprtih metod za interpretacijo smo poskušali te težave v čimvečji meri odpraviti. Z dodatnimi podatki za hitrosti seizmičnih valov in električnih upornosti tako v prodnem zasipu kot v podlagi bo mogoče še natančneje določiti globine. Te podatke lahko dobimo z merjenji v vrtinah ali na vzorcih iz vrtin. Z vrtinami na raziskovanem področju bo možna kontrola rezultatov in reinterpretacija z dodatnimi parametri.

Ponovno pa se je pokazala vrednost kombinirane uporabe seizmičnih in geoelektričnih metod za predhodne raziskave možnih pregradnih mest hidroelektrarn kot tudi pri drugih inženirskogeoloških in hidrogeoloških problemih.

Literatura

- Dam, J. C. van & Meulenkaamp, I. 1975, Standard graphs for resistivity prospecting. EAEG, Hague.
- Orellana, E. & Mooney, H. M. 1966, Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Interciencia, Madrid.
- Palmer, D. 1980, The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. SEG, Tulsa.
- Zohdy, A. A. R. 1975, Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar Zarrouk function, Geological Survey Bulletin 1313-F, Washington.
- Žlebnik, L. 1979, Osnovna geološka slika k načrtovanju in h gradnji verige hidroelektrarn na Savi v Sloveniji. Geologija 22, 341–362, Ljubljana.