

Strukturni model predterciarne podlage Krške kotline

Structural model of the pre-Tertiary basement in the Krško basin

Andrej GOSAR¹, Marko KOMAC² & Marijan POLJAK²

¹Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, 1000 Ljubljana,
andrej.gosar@gov.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana

Ključne besede: Krška kotlina, strukturni model, predterciarna podlaga

Key words: Krško basin, structural model, pre-Tertiary basement

Kratka vsebina

Na podlagi refleksijskih seizmičnih profilov izmerjenih v zadnjih desetih letih v okviru raziskav za oceno potresne nevarnosti na lokaciji jedrske elektrarne Krško smo z upoštevanjem geoloških in gravimetričnih podatkov ter globokih vrtin izdelali dva strukturna modela predterciarne podlage v vzhodnem delu Krške kotline. Prvi temelji na ročnem izrisu izolinij enake globine do podlage, drugi pa na interpolacijski metodi krožno zasnovane funkcije. V vzhodnem delu Krške kadunje sta dve izraziti depresiji. Zahodna – Raška depresija je manjša in globoka okoli 1600 m, vzhodna – Globoška pa večja in globoka okoli 2050 m. Med njima je prag pri Drnovem, kjer globina do predterciarne podlage doseže 1000 m od površine. Tri-razsežnostni model bo uporabljen pri nadaljnjih študijah kot je na primer seizmološko modeliranje vpliva oblike sedimentnega bazena na nihanje tal ob potresu.

Abstract

Based on seismic reflection profiles recorded in the last ten years in the frame of the investigations for assessment of earthquake hazard at the location of the Krško nuclear power plant, and taking into account relevant geological and gravimetric data as well as results of deep boreholes, two structural model of the pre-Tertiary basement in the Eastern part of the Krško basin were constructed. In the first model the depth contours of the pre-Tertiary basement were drawn by hand, and in the second model the radial based function interpolation method was applied. In the Eastern part of the Krško basin two depressions were distinguished. The Western one – Raka depression is smaller and shallower (max. depth of 1600 m), meanwhile the Eastern one – Globoko depression is larger and deeper (max. depth of 2050 m). In-between is a saddle at Drnovo where the pre-Tertiary basement lies at the depth of approx. 1000 m. Three-dimensional model will be used in further studies as is seismological modelling of the influence of the shape of the sedimentary basin on the seismic ground motion in case of an earthquake.

UVOD

Krška kotlina predstavlja eno geološko najbolj raziskanih območij v Sloveniji. Posebej obsežne interdisciplinarne raziskave so bile izvedene za oceno potresne nevarnosti na lokaciji jedrske elektrarne Krško (NEK), ki so vključevale tudi seizmično refleksijsko

snemanje vzhodnega dela kotline vzdolž šestih profilov skupne dolžine prek 50 kilometrov. (Persoglia, ed., 2000). Te raziskave so pomembno prispevale k razumevanju strukturno-tektonske zgradbe ozemlja. Rezultati refleksijskih seizmičnih raziskav pa so bili do sedaj predstavljeni predvsem v obliki prečnih in vzdolžnih profilov. Za na-

daljnje študije, kot je na primer seizmološko modeliranje vpliva sedimentnega bazena na nihanje tal ob potresu na izbrani lokaciji, pa potrebujemo tri-razsežnostni model glavnih seizmičnih horizontov. Zato smo na podlagi teh podatkov izdelali strukturni model podlage terciarnih sedimentov v raziskanem vzhodnem delu Krške kotline. Pri tem smo uporabili tudi vse podatke globokih vrtin.

Kvantitativni model predterciarne podlage Krške kotline je bil izdelan najprej v okviru vrednotenja prostora za odlaganje nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (Urbanč et al., 2003), v tem prispevku pa smo ta izhodiščni model dopolnili ter opravili dodatne analize vseh komplementarnih podatkov.

SPLOŠNA GEOLOŠKA ZGRADBA

Terciarni sedimenti, ki zapolnjujejo Krško kotlino, pripadajo molasi zahodnega roba Panonskega bazena. Sestavljeni so iz heterogene karbonatno-klastične skladovnice stratigrafskega razpona ottangij – pontij. Izdajajo na robovih kotline, kjer ležijo na različnih litostratigrafskih členih paleozojske in mezozojske starosti. Terciarna skladovnica je v osrednjem delu kotline prevrtna z globokimi vrtnami, ki so dosegle predterciarno podlago (tabela 1). Najbolj podrobno je obdelana vrtina DRN-1/89 (Kranjc et al., 1990). Debelina terciarnih sedimentov je po geoloških podatkih ocenjena na okoli 1000 m (Šikić et al., 1979) ali celo več (Pleničar et al., 1976), v vrtini DRN-1/89 pa znaša debelina terciarnih sedimentov, skupaj s kvartarnimi, nekaj manj kot 1000 metrov.

Terciarne plasti prekrivajo v osrednjem delu Krške kotline pliokvartarni in kvartarni sedimenti. Večina slednjih pripada fosilnemu in recentnemu nanosu reke Save ter lateralno tudi jezerskim sedimentom (Verbič, et al., 2000). Debelina pliokvartarnih sedimentov znaša v povprečju 50 metrov, na območju Globokega severno ob Brežic pa doseže do 200 metrov (Poljak et al., 1995). Debelina posameznih kvartarnih litostratigrafskih členov znaša v povprečju 10 metrov.

Robovi Krške kotline, natančneje Krško hribovje, Orlica in Gorjanci, so zgrajeni iz različnih karbonatno-klastičnih litostrati-

grafskih členov zgornje paleozojske in mezozojske starosti. Mezozojski sedimenti v razponu srednji trias – zgornja kreda pripadajo deloma Jadransko – Dinarski karbonatni platformi Zunanjih Dinaridov, deloma pa globljemorskemu razvoju Notranjih Dinaridov.

V strukturnem smislu je Krška kotlina sinklinala, v katero so vključene terciarne in kvartarne plasti, slednje so manj intenzivno nagubane kot terciarne. Sinklinalna zgradba kvartarnih sedimentov je bila ugotovljena v novjšem času s pomočjo geološkega kartiranja (Poljak et al., 1995) ter geofizikalnih raziskav (Gosar et al., 1994; Gosar & Živanović, 1995). To je ovrglo interpretacijo Krške kotline kot tektonske udorine, v katero so odloženi kvartarni sedimenti, ki se je pojavljala v številnih člankih od Rakovca (1956) do Osnovne geološke karte 1:100.000 (Pleničar & Premru, 1977). Sinklinalno zgradbo terciarnih sedimentov sta ugotovila že Pleničar & Premru (1977) in sta jo imenovala Krška sinklinala, kakor tudi Šikić et al. (1979), ki pa so jo imenovali sinklinala Brezina – Veliko Trgovišče.

Poleg gubanja so na tem območju tudi deformacije prelamljanja. Na splošno jih lahko razdelimo v dve osnovni skupini. V prvo uvrščamo t.i. Dinarske strukture paleogenske starosti, ki jih poleg gub sestavljajo tudi longitudinalni prelomi in narivi v smeri NW-SE ter transverzalni prelomi v smeri SW-NE. Te strukture, posebej še prelomi, so prisotne v kamninah predterciarne podlage, vendar se kot reaktivirane pojavljajo tudi v terciarnih sedimentih. Drugo skupino predstavljajo t.i. Južnoalpske strukture neogenske starosti. Te se poleg gub sestoje iz longitudinalnih narivov in prelomov v splošni smeri E-W ter transverzalnih prelomov v smeri N-S. Ta sklop strukturnih deformacij je zajel terciarno skladovnico, kakor tudi njeno podlago, v kateri so se v glavnem reaktivirale obstoječe starejše strukture.

Globinsko strukturno zgradbo Krške kotline v grobem nakazujejo gravimetrični podatki (Urh, 1955; Starčević et al., 1989). Ti kažejo tri izrazite depresije in sicer pri Šentjerneju, Kostanjevici oziroma Raki ter severno od Brežic, točneje na območju Globokega. Navedene depresije so bile deloma potrjene z refleksijskim seizmičnim profiliranjem v letu 1959 (Kalođer, 1984) ter geo-

električnim profiliranjem v letu 1993 (Brezigar et al., 1993). Severni del depresije pri Globokem je bil raziskan z vrtnami v okviru raziskav za premog (Poljak et al., 1985; Markič, 1999; Markič & Rokavec, 2002), vendar samo do podlage premogonosnih pontijskih sedimentov. Seizmične refleksijske raziskave v letih 1999-2000 pa so prvič razkrile zgradbo dveh depresij vzhodnega dela Krške kotline, tako v kvalitativnem kot tudi v kvantitativnem smislu.

PODATKI UPORABLJENI ZA IZDELAVO MODELA

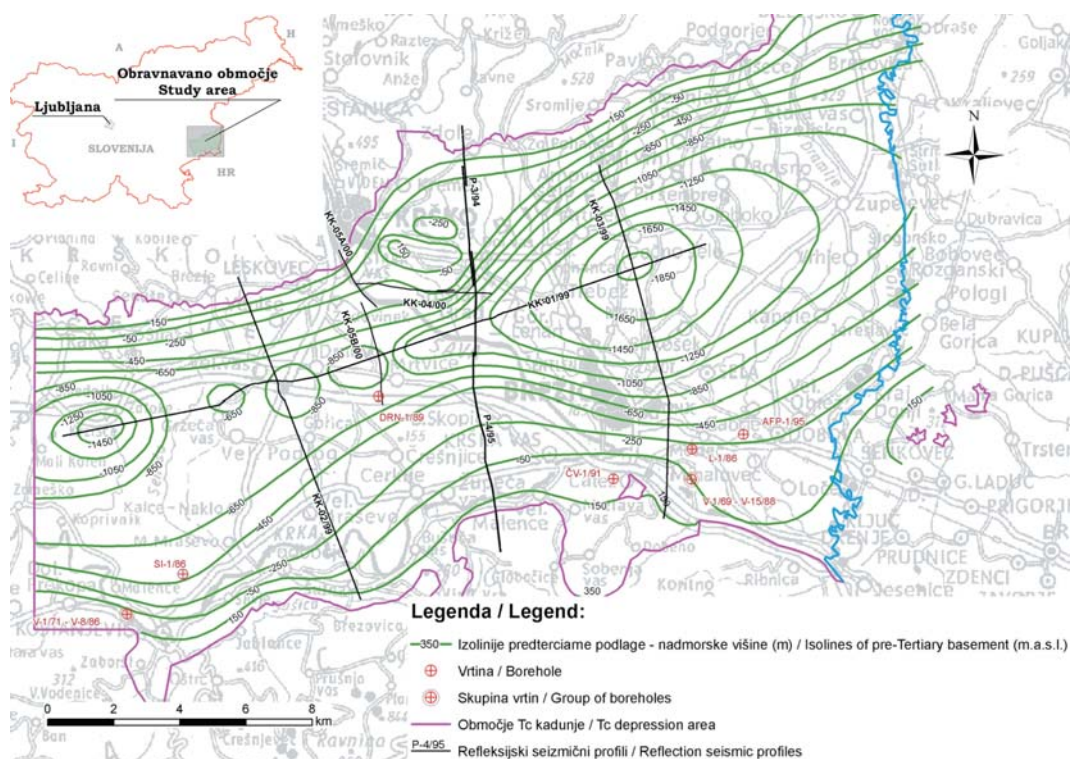
Refleksijska seizmika

V Krški kotlini so bile v preteklosti opravljene številne geofizikalne raziskave v različne namene: za nafto in plin, izkoriščanje geotermične energije, podzemno skladišče-

nje plina in za oceno potresne nevarnosti na lokaciji NEK. Pri raziskavah strukture predterciarne podlage pa sta prevladovali refleksijska seizmika in gravimetrija. Slika 1 prikazuje območje predterciarne podlage Krške kotline z lokacijami globokih vrtn in refleksijskih seizmičnih profilov.

Analogno refleksijsko profiliranje leta 1959

V okviru raziskav za nafto in plin so v letu 1959 izmerili štiri analogne profile z enkratnim prekrivanjem v skupni dolžini 36,5 km, tri v prečni in enega v vzdolžni smeri glede na os glavne sinklinale. Leta 1984 so podatke na Geofiziki Zagreb ponovno obdelali (Kaloper, 1984). V primerjavi z modernimi digitalnimi profili so ti podatki precej slabše kvalitete. Vseeno pa je na njih predterciarna podlaga bazena v glavnem vi-



Slika 1. Območje predterciarne podlage Krške kotline z lokacijami globokih vrtn in refleksijskih seizmičnih profilov. Linije predstavljajo ročni izris izolinij.

Figure 1. Area of pre-Tertiary basement of Krško basin with deep boreholes and reflection seismic profiles. Lines represent manual contoured isolines.

dna, medtem ko v plitvejših delih prevladuje šum. Ker potekajo prečni profili le po ravnem osrednjem delu kotline in ne segajo do pobočij Gorjancev in Orlice, na podlagi teh profilov ni bilo mogoče sklepati o nastanku Krške kotline in morebitnem obstoju robnih prelomov. Profile smo reinterpreterali (Gosar, 1996) z uporabo novih strukturnih in hitrostnih podatkov po izmeri prvega digitalnega seizmičnega profila z večkratnim prekrivanjem v letih 1994/95. Zaradi slabše kvalitete teh podatkov, jih pri izrisu strukturne karte predterciarne podlage nismo neposredno upoštevali. Le tam, kjer smo bili pri izrisu poteka izolini na podlagi novejših podatkov v dvomu, smo se naslonili tudi nanje.

Refleksijski profil posnet v letih 1994/95

V okviru prve faze študije za ponovno oceno potresne nevarnosti na lokaciji NEK (Gosar et al., 1994; Gosar & Živanović, 1995) smo v letih 1994/95 izmerili 13 km dolg profil (P-3/94 in P-4/95) prek vzhodnega dela Krške kotline (2 km vzhodno od NEK) z 12-kratnim prekrivanjem podatkov. Čeprav omejena finančna sredstva niso dopuščala vrtnja strelnih vrtin, ki bi segale do nivoja podtalnice, je ta prvi seizmični profil, ki je segal prek celotne kotline, prispeval pomembne nove podatke o njeni sinklinalni zgradbi in pokazal, da na njenem obrobju ni prelomov, ob katerih bi se osrednji del pogreznil (Gosar, 1998; Poljak & Gosar, 2001), kar je bila prevladujoča domneva pred tem.

Refleksijsko profiliranje v letih 1999/2000

Raziskave za oceno potresne nevarnosti NEK so se nadaljevale v okviru mednarodnega projekta *Geophysical research in the surroundings of the Krško NPP*, ki ga je financiral program PHARE Evropske unije (Persoglia, ed., 2000). Obsegale so tri regionalne profile (dva prečna in enega vzdolžnega; Slika 1) v skupni dolžini 41 km, ki so bili posneti z uporabo eksploziva, ki je bil vstavljen v 5-10 m globoke strelne vrtine in 18-kratnim prekrivanjem podatkov. Dodatno smo v bližini NEK izmerili še tri profile v dolžini 10 km z uporabo pospešene uteži (Hydrapulse). Na profilih smo interpreterali šest refleksijskih horizontov. Najbolj jasne odzive smo dobili od predterciarne podlage

in od zgornje meje badenijskega apnenca (Acciano et al., 2003).

Sprememba refleksijskih časov v globino

Zaradi različnega načina seizmičnega snemanja in različne kvalitete podatkov smo morali pri obravnavanju podatkov naštetih projektov uporabiti različen pristop za pretvorbo refleksijskih dvojnih časov potovanja seizmičnih valov v globino. Ker analogno snemanje z enkratnim prekrivanjem ne omogoča hitrostne analize, smo lahko časovne horizonte, interpretirane na profilih iz leta 1959, pretvorili v globino šele po dokončanju prve vrtine (DRN-1/89) v osrednjem delu kotline, ki je dosegla predterciarno podlago pri Drnovem (Kranjc et al., 1990) in po izmeri prvega digitalnega profila (P-3/94 in P-4/95). Pri tem smo za vse profile uporabili enotno hitrostno funkcijo. Ker je primerjava z vrtino AFP-1/95 pri Dobovi, ki leži v bližini profila 83/59 pokazala, da je razlika v globini manjša od 10 %, je Gosar (1996) menil, da je ta hitrostna funkcija dovolj reprezentativna. V vrtini DRN-1/89 so bile sicer opravljene meritve seizmične hitrosti, vendar so podatki zelo slabi in se iz njih izračunana hitrostna funkcija razlikuje od analize hitrosti iz seizmičnih podatkov na globini 1000 m že za okoli 18 %. Zato smo se odločili, da teh meritev ne upoštevamo. Pri refleksijskih profilih projekta PHARE je 18-kratno prekrivanje podatkov in njihova visoka kvaliteta omogočala zelo natančno hitrostno analizo, ki smo jo zato tudi uporabili za pretvorbo v globinske profile. Ker pa so bočne spremembe hitrosti v istih globinah relativno majhne, menimo, da so kljub različni kvaliteti seizmičnih profilov iz različnih obdobj, globinski podatki dovolj dobri za izdelavo 3D modela predterciarne podlage. Redukcijski nivo (datum plane) vseh seizmičnih raziskav je bil na 150 m nadmorske višine, kar zelo malo odstopa od povprečne višine površja v ravninskem delu Krške kotline. Vse globine v modelu pa so podane glede na nadmorsko višino 0 m.

Gravimetrični podatki

Pri izdelavi 3D modela oz. izrisu kontur predterciarne podlage smo pri interpolaciji podatkov med refleksijskimi profili upora-

bili obstoječe gravimetrične karte, ki jasno odražajo relief gostejše karbonatne in flišne podlage pod manj gostimi neogenskimi sedimenti. To je pokazalo tudi dvodimenzionalno gravimetrično modeliranje vzdolž prečnih refleksijskih profilov (Gosar, 2001).

Gravimetrična izmera za nafto in plin (Urh, 1955) je obsegala 751 točk na površini 258 km² (slika 2), kar da povprečno gostoto 3 točke/km². Meritve so bile navezane na bazno točko pri Brežicah in reducirane na nadmorsko višino 100 m. Bouguerjeve anomalije so izračunali z gostoto 2,0 g/cm³. Njihov razpon je med +11 in +32 mGal. Karta Bougurejevih anomalij (slika 2) jasno odraža sinklinalno obliko predterciarne podlage z osjo v smeri ESE-WNW. Pri Drnovem je prag, ki loči zahodno in vzhodno depresijo, kjer so dosežene najnižje vrednosti Bouguerjevih anomalij +11 mGal.

V okviru raziskav za oceno možnosti za podzemno skladiščenje plina v vodonosnikih so izvedli podrobnejše gravimetrične raziskave osrednjega dela Krške kotline (Starčević et al., 1989). Na 150 km² velikem območju so izmerili 1162 točk, kar je dalo povprečno gostoto 13,5 točk/km² v osrednjem in 7,7 točk/km² v robnem delu merjenega območja. Bouguerjeve anomalije so izračunali z gostoto 2,5 g/cm³. Primerjava obeh gravimetričnih kart kaže dobro ujemanje. Ker pa le starejša karta (Urh, 1955) obsega celotno Krško kotlino (Slika 2), smo pri izdelavi 3D modela predterciarne podlage uporabili predvsem slednjo.

Površinski in globinski geološki podatki

Terciarni sedimenti izdanjajo izpod kvarternih na severnem in južnem robu Krške

kotline. Najnižji terciarni stratigrafski člen na obravnavanem območju je otnangijski prod in pesek ter glina s premogom. Ta izdanja na večjem delu Krškega hribovja in Gorjancev in je odložen na različne mezozojske in paleozojske kamnine. Višji terciarni stratigrafski člen je badenijski biokalkarenit, najpogostejše zastopan z litotamnijskim apnencem. Ta je odložen na bazalni konglomerat, prav tako na različne mezozojske in paleozojske kamnine. Navzgor sledijo sarmatijski, panonijski in pontijski sedimenti, vendar so samo panonijski laporji odloženi neposredno na predterciarno podlago in sicer pri Pišecah na južnem pobočju Orlice. Stik terciarnih in predterciarnih kamnin je na površini večinoma odkrit in dobro viden. V modelu smo ga opredelili kot izdanjaajočo linijo z natančno določeno nadmorsko višino. Ta linija razen v nekaj izjemah dokaj enakomerno zapira Krško kotlino. Med Orlico in Krškim hribovjem (Sremič) prehajajo terciarne kamnine iz Krške v severno ležečo Senovško sinklinalo. Podoben primer je na območju Bizeljskega, kjer prehajajo terciarne kamnine iz Krške kotline v manjšo sinklinalo, ki leži v zgornjem delu potoka Dramlja. V obeh primerih predstavljajo terciarne kamnine sekundarni sinklinali, ki pa ležita skoraj pravokotno na glavno Krško sinklinalo. Proti vzhodu prehajajo terciarni sedimenti v prostrani terciarni bazen Hrvaškega Zagorja, tako da predstavlja mejna reka Sotla v modelu le umetno mejo Krške kadunje. Referenčna točka za vzhodni zaključek modela Krške kotline je izdanek predterciarne podlage na območju Marija Gorice vzhodno od Sotle. Zahodna meja modela na liniji Raka – Kostanjevica pa je pogojena z dosegom refleksijskih seizmičnih profilov.

Tabela 1. Osnovni podatki o globokih vrtinah v Krški kotlini izvrtanih do predterciarne podlage. Viri: 1 (Kranjc et al., 1990), 2 (Božović, 1995), 3 (Verbovšek et al., 1986), 4 (Petauer, 1992).

Table 1. Basic data on deep boreholes in the Krško basin drilled to the pre-Tertiary basement. Sources: 1 (Kranjc et al., 1990), 2 (Božović, 1995), 3 (Verbovšek et al., 1986), 4 (Petauer, 1992).

Vrtina Borehole	X (m)	Y (m)	Višina ustja vrtine Elevation at the surface (m)	Višina dna vrtine Elevation at the bottom (m)	Vir Source
DRN-1/89	5085 650	5539 600	150	- 1.102	1
AFP-1/95	5084 560	5550 455	150	- 550	2
L-1/86	5084 060	5549 010	143	- 561	3
SI-1/86	5080 260	5533 600	154	- 646	3
ČV-1/91	5083 215	5546 607	193	- 307	4

Poleg površinskih podatkov smo za izdelavo modela uporabili tudi podatke globokih vrtin, ki so dosegle podlago terciarnih sedimentov. Njihovi osnovni podatki so podani v tabeli 1. Poleg teh petih so bile v južnem delu Krške kotline izvrtane še nekatere in sicer vrtnice V-1 do V-15 na območju Čateških Toplic ter vrtnice V-1 do V-8 pri Kostanjevici, ki so prav tako dosegle podlago terciarnih sedimentov in so bile uporabljene pri izdelavi strukturnega modela.

METODOLOGIJA IZDELAVE STRUKTURNEGA MODELA

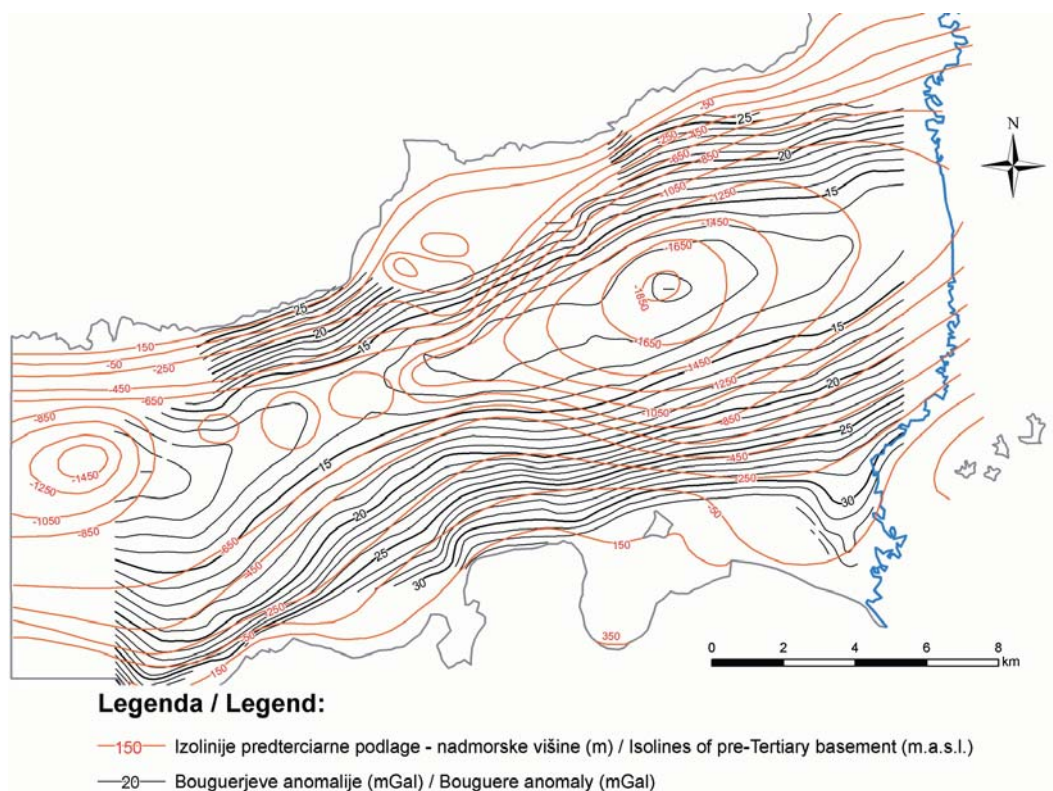
Ročni izris izolinij

Izhodišče za izdelavo modela so bili refleksijski seizmični profili KK-1/99, KK-2/99, KK-3/90, KK-4/00, KK-5A/00 in KK-5B/00 (Persoglia, ed., 2000) kakor tudi profila

P-3/94 in P-4/95 (Gosar, 1998). Pozicije profilov so prikazane na sliki 1. Za izdelavo predstavljenega modela smo odčitali absolutne nadmorske višine stika terciarnih sedimentov z njihovo podlago. Vrednosti smo povezali z linijami istih vrednosti in torej predstavljajo stratoizohipse tega stika.

Pri ročnem izrisu izolinij smo upoštevali še globoke vrtnice in poznavanje strukturno-geološke zgradbe terena pridobljeno s terenskim geološkim kartiranjem (Poljak et al., 1995) (Slika 2). Slednje smo uporabili predvsem za rekonstrukcijo nagubane strukture na območju hriba Libne pri Krškem.

Pri izdelavi strukturnega modela nismo upoštevali prelomov na stiku terciarnih sedimentov z njihovo podlago. Ti so sicer ugotovljeni na nekaterih profilih, vendar znašajo vertikalni zmiki ob njih v povprečju nekaj deset metrov, kar je zanemarljivo pri ločljivosti modela, ki jo je bilo mogoče doseči v danem merilu.



Slika 2. Strukturna karta predterciarne podlage po ročnem izrisu izolinij in gravimetrična karta po Urhu (1955).

Figure 2. Structural map of pre-Tertiary basement using manual contouring of isolines and gravity map after Urh (1955).

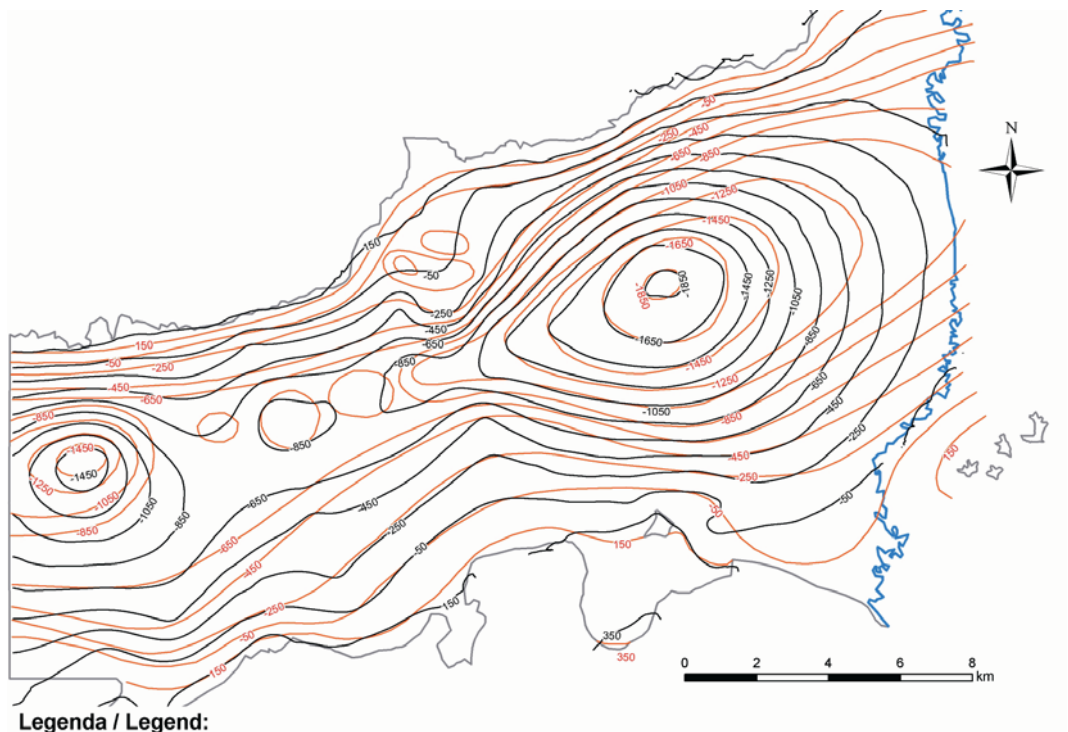
Računalniška obdelava podatkov

V geologiji se za izdelavo dve- in tri-razsežnostnih modelov uporabljajo različne metode prostorskih interpolacij. Pri izdelavi modela predterciarne podlage smo uporabili več metod dve- in tri-razsežnostnega modeliranja, krigiranje, inverzna obtežitev z oddaljenostjo (IDW), metoda naravnih sosedov in metoda krožno zasnovane funkcije (ang. *Radial Based Function*). Za najbolj uporabno se je izkazala slednja. Uporabnost različnih metod in njihovih omejitev v geologiji so že pokazali nekateri avtorji (Gold, 1994; Sambridge et al., 1995a; Sambridge et al., 1995b; Moresi et al., 2001).

Model predterciarne podlage Krške kotline je bil tako izdelan po metodi krožno zasnovane funkcije (RBF), ki se deli na več podmetod, odvisno od tipa interpolacijske enačbe. Glavna značilnost metode je, da interpolirana površina poteka skozi vse mer-

jene točke. Metoda RBF je vrsta nevronske mreže. Metoda je primerna za izračun zglatenih površin iz večjega števila točkovnih podatkov in se največkrat uporablja pri izračunu površin, katerih spremembe so zvezne ali brez večjih skokov (npr. nadmorske višine). Veliko omejitev predstavljajo podatki, katerih vrednosti se močno spreminjajo na kratkih razdaljah in podatki, ki so podvrženi napakam ali pa so vrednosti negotove (ESRI, 2004). Tako kot pri drugih prostorsko zasnovanih metodah, se tudi pri metodi RBF interpolirane vrednosti spreminjajo z oddaljenostjo od merjene točke. Vrednost vsake krožno zasnovane funkcije (Φ) na interpoliranem mestu (izračunani točki x,y) določajo oddaljenosti od vseh merjenih točk. Interpolirano vrednost (V_i) dobimo s povprečno vrednostjo zmnožka funkcije (Φ_i) in njene uteži (w_i).

$$V_i = (1/n) \times (w_1 \times \Phi_1 + w_2 \times \Phi_2 + w_3 \times \Phi_3 + \dots w_n \times \Phi_n)$$



Slika 3. Strukturna karta predterciarne podlage po interpolaciji z metodo RBF (ang. *Radial Based Function*) in ročnem izrisu izolinij.

Figure 3. Structural map of pre-Tertiary basement using RBF (*Radial Based Function*) interpolation method and manual contouring of isolines.

Uteži $w_i - w_n$ so določene tako, da je interpolirana vrednost na merjeni točki enaka znani vrednosti, kar pomeni N število enačb z N neznankami in enolično rešljivost problema.

Pri vsaki metodi interpolacije se pojavljajo lokalna odstopanja ali nepravilni prehodi in nezveznosti v interpoliranih podatkih, predvsem na območjih, kjer je podatkov premalo. Taka lokalna odstopanja je možno vsaj delno odpraviti z glajenjem. Pri glajenju modela predterciarne podlage Krške kotline je bil uporabljen prostorski filter povprečenja z velikostjo 20 celic oz. 500 metrov. Tako so bile odpravljene lokalne nepravilnosti, splošna oblika podlage kadunje pa se zaradi tega ni spremenila.

INTERPRETACIJA

Interpretacija računalniškega modela

Za najboljši model preterciarne podlage Krške kotline se je izkazal model, dobljen z multikvadratno funkcijo (metoda RBF), usmerjenostjo osi v smeri 68° (to je smer raztezanja Krške kadunje in s tem tudi merjenih točk) in z vključitvijo 8 sosednjih merjenih točk (Slika 3 in Slika 4). Pred glajenjem so bile v modelu lokalno vidne manjše napake, ki pa so bile odpravljene s povprečenjem oz. glajenjem. Izboljšanje modela z glajenjem je bilo opazno predvsem v vzhodnem delu daljše osi kadunje. Oblike kadunje so za razliko od ročnega izrisa izolinij nekoliko bolj oglate, predvsem v predelu sedla med depresijama na severovzhodu in jugozahodu kadunje. V SW depresiji je le-ta pri računalniškem modelu zamaknjena bolj proti jugu kot je bila pri ročnem izrisu. Ker smo v izračun modelov vključili vse obstoječe podatke, njihovo testiranje ni bilo možno izvesti drugače kot zgolj vizualno.

Najgloblji del kadunje leži približno 1880 metrov pod gladino morja v NE depresiji, v SW depresiji pa okoli 1640 metrov pod gladino morja. Prostornina obravnavanega dela terciarne kadunje Krške kotline znaša približno 210 km^3 . Problemi računalniške interpolacije se pokažejo na robovih kadunje, kjer na nekaterih manjših območjih izračunane globine segajo nad površje, izjemoma tudi 140 metrov.

Nov, izpopolnjen model je dal zaradi uporabe druge interpolacijske metode drugačne rezultate kot model, ki je bil izdelan v okviru

vrednotenja prostora za odlaganje nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (Urbanec et al., 2003). Novejša metoda je dala bolj zvezno in bolj zaobljeno obliko kadunje, ki je bližje stanju, ki ga kažejo tudi podatki refleksijske seizmike. Njena oblika na vzhodu se pravilneje nadaljuje na Hrvaško, medtem ko je prejšnji model nerealno izklinjal proti državni meji.

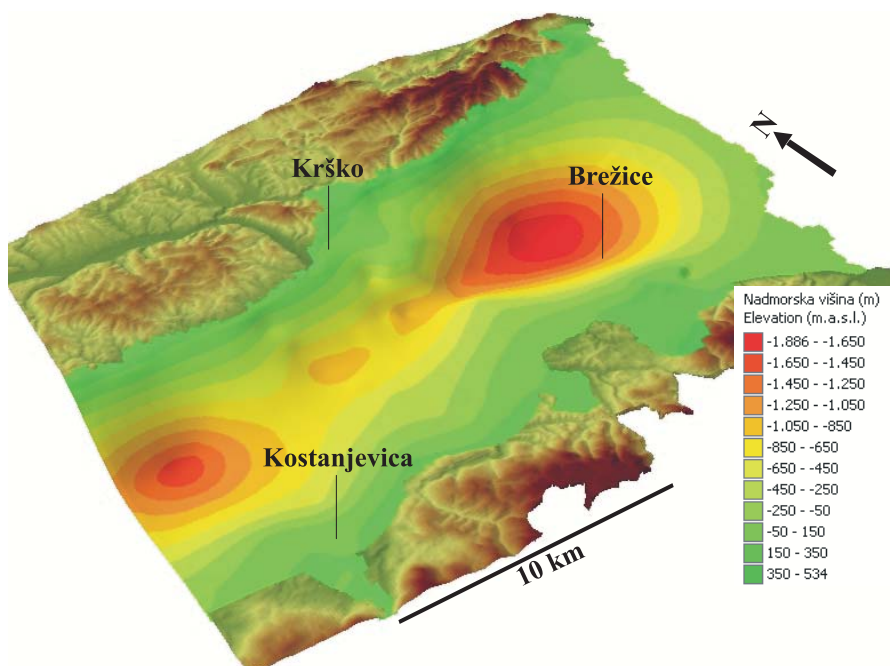
Geološka interpretacija

Iz modela je vidno, da se predterciarna podlaga Krške kotline oz. kadunje, dokaj enakomerno spušča od svojega severnega oziroma južnega roba, kjer izdaja na površino proti osrednjemu delu. Povprečen naklon proti osrednjemu delu je 20° , kar se sklada s povprečnim vpadom plasti terciarnih sedimentov v severnem in južnem krilu Krške sinklinale (Poljak et al., 1995). To kaže na post-sedimentacijski, točneje post-terciarni nastanek strukture.

Na severnem robu kadunje pri Krškem sta manjši antiforma in sinforma. Prva ustreza t.i. Libenski antiklinali, druga pa Črnomlaški sinklinali, ki sta bili ugotovljeni tudi s terenskim kartiranjem (Poljak, 1996) in geoelektričnim profiliranjem (Živanović et al., 1998).

V osrednjem delu kadunje sta dve izraziti poglobitvi oz. depresiji. Prva je v zahodnem delu pri vasi Raka in jo lahko imenujemo Raška, druga pa pri vasi Globoko in jo lahko imenujemo Globoška. Med obema depresijama je prag pri Drnovem, kjer je podlaga diferencirana v nekaj manjših antiform in sinform, globina do predterciarne podlage pa je okoli 1000 m od površine. Nobena od omenjenih depresij se ne odraža na površju. Globinska zgradba Globoške depresije je bila delno ugotovljena pri raziskavah tamkajšnjih premogov (Poljak et al., 1985; Markič 1999; Markič & Rokavec, 2002). Šele refleksijske seizmične raziskave (Persoglia, ed., 2000) pa so podale natančnejšo strukturno zgradbo obeh depresij.

Raška depresija ima dokaj okroglo obliko z izrazito poglobljenim osrednjim delom, kjer debelina terciarnih (in kvartarnih) sedimentov znaša cca. 1600 metrov. Globoška depresija je nekoliko razpotegnjena v splošni smeri E-W, vendar je globlja, saj debelina terciarnih in kvartarnih sedimentov dosega tukaj 2050 metrov.



Slika 4. Tri-razsežnostni model predterciarne podlage, interpoliran z metodo RBF. Legenda označuje le nadmorske višine modela predterciarne podlage. (Vir digitalnega modela višin obrobja: GURS, 2000).

Figure 4. Three-dimensional model of pre-Tertiary basement, interpolated with RBF method. The legend explains only the elevations for the pre-Tertiary basement model. (Source of DEM of the surrounding area: GURS, 2000).

Na refleksijskih seizmičnih profilih (Persoglia, ed., 2000) so vidni prelomi, ki so prisotni tako v mezozojski podlagi kakor tudi v terciarni skladovnici, vendar je skok ob njih relativno majhen in znaša v povprečju nekaj deset metrov. Zato ne vplivajo bistveno na obliko Raške ali Globoške depresije, kakor tudi ne na splošno obliko celotne Krške kadunje.

Krška kadunja predstavlja sinklinalo neogenske, točneje post-pontijske starosti, ki je nastala v kompresijskem napetostnem polju z osjo σ_1 usmerjeno v generalni smeri N-S. Glede nastanka depresij v jedru sinklinale pa zaenkrat ni enoznačnega odgovora. Možno je, da le-ti predstavljata kompresijski strukturi, ki sta nastali v neogenu iz starejših paleogenskih Dinarskih sinklin. Po drugi strani je tudi možno, da imata obe tenzijski značaj in sta nastali v istem napetostnem polju in v istem času kot glavna Krška sinklinala vendar kot posledica ekstenzije v smeri osi σ_3 . Možna je tudi kombinacija obeh mehanizmov.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se Upravi RS za jedrsko varnost, kot naročniku in uporabniku seizmičnih raziskav izvedenih v okviru PHARE programa za dovoljenje, da podatke uporabimo pri izdelavi strukturnega modela Krške kotline.

LITERATURA - REFERENCES

- Acciano, A., Gosar, A., Millahn, K., Nicholich, R., Poljak, M., Rossi, G. & Zgur, F. 2003: Regional and high resolution seismic reflection investigations in the Krško basin (SE Slovenia). Ann. Univ. Sci. Budapest. - Sec. Geol., 35, 116-117. Budapest.
- Božović, M. 1995: Poročilo o vrtini AFP-1/95. Interno poročilo, 10. str., Podjetje za vrtnalno in geotehnična dela.
- Brezigar, A., Tomšič, B., Stopar, R. & Živanović, M. 1993: Pregled in reinterpretacija geofizikalnih raziskav v okolici NE Krško. Interno poročilo, 32 str., Geološki zavod Ljubljana.
- ESRI 2004: ArcMap, Version 9.0 - Help System. Environmental System Research Inst., Redlands.

Gold, C. M. 1994: An object-based method for modelling geological surfaces containing linear data.- In Proceedings: Annual Meeting of the Int. Association for Mathematical Geology, p.141-146, Mont Tremblant. (http://www.voronoi.com/pdfs/1990-1994/An_object-based_method_for.pdf, 2003).

Gold, C. M. & Dakowicz, M. 2002: Terrain Modelling Based on Contours and Slopes, In: Richardson, D. & Van Oosterom, P. (Eds.) Advances in Spatial Data Handling. Proceedings, 10th International Symposium on Spatial Data Handling, Springer. (http://www.voronoi.com/pdfs/2000-2003/Terrain_Modelling_Based_on_Contours_and_Slopes.pdf, 2003).

Gosar, A., Živanović, M., Tomšič, B. & Poljak, M. 1994: Neotektonske raziskave na območju JE Krško, Geofizikalne raziskave na Krškem polju. Interno poročilo, 79 str. Geološki zavod Ljubljana.

Gosar, A. & Živanović, M. 1995: Neotektonske raziskave na območju JE Krško; Geofizikalne raziskave na Krškem polju. Interno poročilo, 63 str., Geološki zavod Ljubljana.

Gosar, A. 1996: Seizmična refleksijska metoda v strukturnih raziskavah za oceno potresne nevarnosti v Krški kotlini. Doktorska disertacija, 288 str., Univ. v Ljubljani, NTF.

Gosar, A. 1998: Seismic-reflection surveys of the Krško basin structure: Implications for earthquake hazard at the Krško nuclear power plant, SE Slovenia. - Journal of Applied Geophysics, 39, 131-153.

Gosar, A. 2001: Two-dimensional gravity modeling along seismic reflection profiles in the Krško basin. - RMZ-Materials and Geoenvironment, 48/3, 473-497.

GURS 2000: Digitalni model višin - InSAR 25 in InSAR 1. Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.

Kaloper, D. 1984: Krško polje-Brežice, analogna obrada. Interno poročilo, 9 str., Geofizika Zagreb.

Kranjc, S., Božović, M. & Matoz, T. 1990: Končno poročilo o geoloških raziskavah na Krškem polju za potrebe podzemnega skladiščenja plina, vrtna DRN-1/89. Interno poročilo, 19 str., IGGG.

Markič, M. 1999: Geološka zgradba premošča Globoko. Interno poročilo, 26 str., Geološki zavod Slovenije.

Markič, M. & Rokavec, D. 2002: Geološka zgradba, nekovinske mineralne surovine in lignit okolice Globokega (Krška kotlina). RMZ - Materials and Geoenvironment, 49/2, 229-266.

Moresi, L., Mühlhaus, H. & Dufour, F. 2001: An overview of numerical methods for Earth simulations.- AGU Chapman Conference on Exploration Geodynamics: Practical Applications of Global Dynamic Models, Western Australia. (<http://www.ned.dem.csiro.au/research/solidmech/Geodynamics/Chapman/AbstractsReceived/Abstracts-A-Z.html>, 2003).

Persoglia, S. (ed.) 2000: Geophysical research in the surroundings of the Krško NPP. Final report. European Commission, 68 pp.

Petauer, D. 1992: Hidrogeološke raziskave vodnih virov v občini Brežice. Geološki zavod Ljubljana.

Pleničar, M., Premru, U. & Herak, M.

1976: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Novo mesto. Zvezni geološki zavod, Beograd.

Pleničar, M., Premru, U. 1977: Osnovna geološka karta SFRJ Tolmač za list Novo mesto L 33-77. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. 61 str., Zvezni geološki zavod, Beograd.

Poljak, M., Znidaršič, M., Demšar, M. & Cajhen, J. 1985: Raziskave premošča Globoko. Izdelava strukturno-geološke karte v merilu 1:10.000. Interno poročilo, 23 str., Geološki zavod Ljubljana.

Poljak, M., Dozet, S., Stojanovič, B., Rižnar, I. & Demšar, M. 1995: Geološke raziskave Krške kotline in njenega obrobja v letih 1994-1995. Interno poročilo, 76 str., Geološki zavod Ljubljana.

Poljak, M. 1996: Poročilo o detaljnem geološkem kartiranju Libne pri Krškem in okolice. Interno poročilo, 5 delov, Geološki zavod Ljubljana.

Poljak, M. & Gosar, A. 2001: Strukturna zgradba Krške kotline po podatkih geofizikalnih raziskav v letih 1994-2000. - Geološki zbornik, 16, 79-82.

Rakovec, I. 1956: Pregled tektonske zgradbe Slovenije. 1. Jug. geol. kongr., 73-83, Ljubljana.

Sambridge, M. S., Braun, J. & McQueen, H. 1995a: Geophysical parametrization and interpolation of irregular data using natural neighbours. - Geophysical Journal International, 122, 837-857.

Sambridge, M. S., Gudmundsson, O., Braun J. & McQueen, H. 1995b: Regionalisation and Interpolation. Seismology - Annual Report 1995. Australian National University, RSES - Earth Physics, Canberra. (<http://rses.anu.edu.au/seismology/ar95/f95.html>, 2003).

Starčević, M., Stopar, R. & Rihtar, B. 1989: Poročilo o gravimetričnih raziskavah na področju Krškega polja v letu 1989. Interno poročilo, 8 str., Geološki zavod Ljubljana.

Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A. 1978: Osnovna geološka SRRJ 1:100.000, list Zagreb. Zvezni geološki zavod, Beograd.

Šikić, K., Barch, O. & Šimunić, A. 1979: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tolmač za list Zagreb. Zvezni geološki zavod, Beograd.

Urbanec, J., Šinigoj, J., Brenčič, M., Poljak, M., Budkovič, T., Komac, M., Kumelj, Š., Hribernik, K., Bizjak, M., Marinko, M. & Otrin, J. 2003: Vrednotenje prostora znotraj izhodiščnih območij - Podrobnejše ovrednotenje primernosti geoloških naravnih danosti za odlaganje NSRAO na območjih objektov povezanih z jedrsko tehnologijo. Projektna naloga, 112 str., Geološki zavod Slovenije.

Urh, I. 1955: Poročilo o detaljni gravimetrični izmeri na Krškem polju, 1953-1954. Interno poročilo, 7 str., Geološki zavod Ljubljana.

Verbič, T., Rižnar, I., Poljak, M., Demšar, M. & Toman, M. 2000: Quaternary sediments of the Krško basin. 2. hrv. geol. kongr., Zbr. radova, 451-457, Zagreb.

Verbovšek, R., Ločniškar, A. & Nosan, A. 1986: Raziskave termalne vode na Čateškem polju. Geološki zavod Ljubljana.

Živanović, M., Stopar, R., Gazzano, G. & Poljak, M. 1998: Geofizikalne in geološke raziskave na treh ostankih srednjepleistocenskega zaspisa pri Stari vasi. Interno poročilo, 23 str., Geološki zavod Ljubljana.