

Raziskave litosfere jugovzhodnih Alp s 3D refrakcijsko seizmiko (projekt Alp 2002) – meritve v Sloveniji

Exploration of the South-Eastern Alps lithosphere with 3D refraction seismics (project Alp 2002) – data acquisition in Slovenia

Andrej GOSAR

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

Ključne besede: refrakcijska seizmika, širokokotna refleksijska seizmika, litosfera, Zemlja skorja, Moho, Slovenija

Key words: refraction seismics, wide-angle reflection seismics, lithosphere, Earth crust, Moho, Slovenia

Kratka vsebina

Projekt Alp 2002 je s kombinirano refrakcijsko in širokokotno refleksijsko seizmično metodo raziskal območje stika jugovzhodnih Alp, Dinaridov in Panonskega bazena. V mreži dvanajstih profilov skupne dolžine 4100 km, ki potekajo prek sedmih držav, je bilo nameščenih 1055 prenosnih seizmografov, nato pa sproženih 31 močnih (300 kg) eksplozij. Prek Slovenije je bilo vzdolž petih profilov skupne dolžine 575 km postavljeno 127 seizmografov, točki miniranja pa sta bili pri Vojniku in Gradinu. Zbrani podatki bodo omogočili izdelavo tri-dimenzionalnega modela litosfere in prispevali k razumevanju tektonike in geodinamike na stiku Evropske, Jadranske in Tisa plošče.

Abstract

Using combined seismic refraction/wide-angle reflection method project Alp 2002 explored the contact zone between South-Eastern Alps, Dinarides and Pannonian basin. In a network of 12 profiles of 4100 km total length, which are spread over seven countries, 1055 portable seismographs were deployed and 31 strong (300 kg) explosions fired. In Slovenia 127 seismographs were deployed along five profiles totalling 575 km and two explosions fired near Vojnik and Gradin. The collected data will allow construction of a three-dimensional model of the lithosphere and will contribute to the understanding of the tectonics and geodynamics at the junction of European, Adriatic and Tisza plates.

Uvod

Raziskave globljih delov kontinentalne skorje in vrhnjega dela Zemljinega plašča, ki tvori skupaj s skorjo okoli 100 km debelo litosfero, so vedno bolj v središču znanstvenega zanimanja. Glavni razlogi za to so:

- teorija tektonike litosferskih plošč, ki je ključ za razumevanje številnih geoloških procesov, predvsem na območju gorskih verig, je bila utemeljena šele pred dobrimi tridesetimi leti (Cox & Hart, 1986),
- geofizikalne metode in še posebej seizmične metode raziskav so v tem času

doživele silovit razvoj, ki omogoča pridobivanje vse boljših podatkov iz velikih globin,

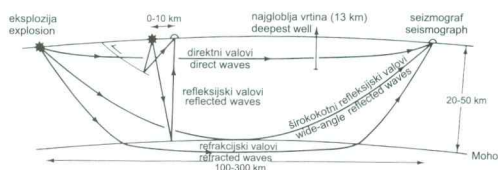
- v iskanju energetskih virov in mineralnih surovin je človeštvo pripravljeno posegati vedno globlje v Zemljino skorjo,

- podrobnejši modeli litosfere, ki opisujejo spremembe hitrosti seizmičnih valov in geodinamske procese, omogočajo natančnejše lociranje potresov in boljše predvidevanje njihovih učinkov.

Uspešnim raziskavam drugod v Evropi in predvsem v Alpah je sledil projekt Alp 2002, pri katerem smo s kombinirano refrakcijsko/širokokotno refleksijsko seizmično metodo raziskali območje jugovzhodnih Alp ter njihovega stika z Dinaridi in Panonskim bazenom, katerega velik del se nahaja tudi v Sloveniji. Po enoletnih pripravah smo eksperimentalni del projekta izvedli v začetku julija 2002. V mreži dvanajstih profilov skupne dolžine 4100 km, ki potekajo prek sedmih držav (Avstrija, Češka, Madžarska, Hrvaška, Slovenija, Italija in Nemčija), smo postavili 1055 posebnih prenosnih seizmografov (127 v Sloveniji), ki so registrirali signal 31 močnih eksplozij (dveh v Sloveniji), sproženih v globokih vrtninah. Zbrani podatki bodo omogočili izdelavo tri-dimenzionalnega modela litosfere in prispevali k razumevanju zapletene tektonike in geodinamike na stiku Evropske, Jadranske (fragment Afriške plošče) in Tisa plošče (Brueckl et al., 2003).

Seizmične metode raziskav litosfere

Naše poznavanje litosfere je dolgo temeljilo predvsem na pasivnem opazovanju seizmičnih valov naravnih potresov ter na proučevanju Zemljinega toplotnega, težnostnega, električnega in magnetnega polja (Fowler, 1990). Z najglobljimi vrtninami smo namreč do sedaj segli »le« 13 km v Zemljino skorjo. Kasneje pa so se uveljavile predvsem aktivne seizmične metode, ki uporabljajo seizmične valove povzročene z močnimi eksplozijami. Tako so bili v zadnjih treh desetletjih po svetu izvedeni številni seizmični projekti globokih raziskav litosfere, ki so prispevali mnogo dragocenih podatkov (Gosar, 1995). Pri tem so uporabljali predvsem dva načina meritve (slika 1): kombinirano refrakcijsko/širokokotno refleksijsko meto-



Sl. 1. Različne poti seizmičnih valov v Zemljini skorji (po Klemperer & Peddy, 1992)

Fig. 1. Different raypath of seismic waves in the Earth crust (after Klemperer & Peddy, 1992)

do ter refleksijsko metodo (Klemperer & Peddy, 1992).

Pri kombinirani refrakcijski/širokokotni refleksijski seizmiki (imenovani tudi globoko seizmično sondiranje) so razdalje med lokacijami, kjer generiramo seizmične valove z eksplozijami (strelne točke) in senzorji (geofoni), do nekaj sto km. Ker hitrosti seizmičnih valov praviloma naraščajo z globino, se valovi na izrazitejših hitrostnih mejah (diskontinuitetah) lomijo tako (slika 1), da potujejo v hitrejših globljih plasteh pretežno vodoravno (refrakcijski valovi) ali pa se od njih odbijejo pod topim kotom (širokokotni refleksijski valovi). Zaradi dolge poti seizmičnih valov, dobimo s temi raziskavami precej splošne podatke o litosferi. Zaradi manjšega števila potrebnih eksplozij, ki pa morajo biti močnejše, je prednost te metode v bistveno nižjih stroških kot pri refleksijski seizmiki, zato pri raziskavah še vedno prevladuje (n. pr. Mooney & Brocher, 1987).

Pri refleksijski seizmiki (slika 1) potujejo seizmični valovi skoraj navpično do hitrostnih diskontinuitet, od katerih se pod ostrim kotom odbijejo nazaj proti površini. Ker pri tem prepotujejo le kratko vodoravno razdaljo, dajejo bolj podrobne podatke o strukturi Zemljine skorje in plašča. Gre za prilagoditev klasične refleksijske metode, ki se uporablja pri naftnih raziskavah, za velik globinski doseg. Tovrstne meritve so zaradi gostejše razporeditve eksplozij, ki pa so lahko šibkejšje, in pa velikega števila senzorjev, zelo drage (n. pr. De Voogd & Keen, 1989).

Najbolj izrazita hitrostna meja je Mohorovičičeva diskontinuiteta ali Moho, ki ločuje Zemljino skorjo od plašča. Hitrost longitudinalnih valov na tej meji dokaj nenadno poraste od 6,5-7,2 km/s v spodnjem delu skorje na 7,8-8,5 km/s v zgornjem delu plašča,

hitrost transversalnih valov tu poraste od 3,7–3,8 km/s na 4,8 km/s, gostota pa od 2,9 g/cm³ na 3,3 g/cm³ (Sheriff, 1991). Moho se nahaja v globini med 25 in 40 km pod kontinenti in med 5 in 8 km pod oceanskim dnom. Pod nekaterimi gorskimi verigami (Alpe, Himalaja) pa doseže celo globine med 50 in 60 km ali več. Druga pomembna hitrostna meja je Conradova diskontinuiteta, ki ločuje zgornji, bolj kisel (granitni) del Zemljine skorje od spodnjega, bolj bazičnega (bazaltnega) dela, vendar ta meja ni povsod izražena. Hitrost longitudinalnih valov se ob Conradovi diskontinuiteti poveča iz 5,8–6,2 km/s na več kot 6,5 km/s. Na splošno danes velja, da je koncept, ki predvideva, da je Zemljina skorja sestavljena v zgornjem delu pretežno iz silicijevih in aluminijevih mineralov (sial), v spodnjem delu pa iz silicijevih in magnezijevih mineralov (sima), preveč poenostavljen (Sheriff, 1991). Tretja meja, ki je na seizmičnih podatkih pogosto vidna, je stik med sedimentnimi kamninami in magmatsko ali metamorfno podlago, če se seveda nahaja dovolj globoko, da jo z meritvami, ki so prilagojene velikim globlinam, sploh zajamemo.

Dosedanje raziskave na območju Alp in srednje Evrope

Alpe, ki so nastale s kolizijo Afriške in Evrazijske litosferske plošče, so najbolj raziskan orogen na svetu. Kljub temu je bila pred uporabo globokih seizmičnih profilov njihova struktura v globini, ki je tudi ključ za razumevanje zapletene strukture narivov in pokrovov bliže površini, še zelo slabo znana. Refleksijski seizmični profili prek zahodnih in centralnih Alp (Bernabini et al., 1992; Marchat, 1993), ki so bili izmerjeni v drugi polovici osemdesetih let v sodelovanju nacionalnih projektov ECORS (Francija), NFP-20 (Švica) in CROP (Italija) ter refrakcijske meritve v okviru mednarodnega projekta Evropske geotraverze (Blundell et al., 1992) so zato prispevali nekatere ključne podatke o značilnostih kolizije Evrazijske in fragmentirane Afriške plošče. Glavni so:

- Evrazijska plošča se proti jugu podriva pod Jadransko mikroploščo. Moho se nahaja pod severnim alpskim predgorjem na globini okoli 30 km, pod južnimi Alpami pa je že na okoli 65 km, kar predstavlja njegovo naj-

večjo globino ugotovljeno s seizmičnimi profili do sedaj.

- V skorjo Evrazijske plošče se kot klin vrvira Jadranska mikroplošča, ki je fragment Afriške plošče. Ta potuje proti severu in rotira v obratni smeri urinega kazalca. To vrivanje povzroča podvajanje Mohorovičičeve diskontinuitete, ki se pogosto opisuje kot »struktura odprtega krokodiljega žrela«.

V letih 1975–78 so na območju severovzhodne Italije in Avstrije izmerili več globokih refrakcijskih/širokokotnih refleksijskih profilov (Alp'75 je segal od Lago di Como prek celotne južne Avstrije do Madžarske), ki so dali prve podatke o globokih strukturah litosfere na območju vzhodnih Alp (Aric et al., 1987; Scarascia & Cassinis, 1997; Fruhwirth, 2001).

Na območju severnega dela srednje in vzhodne Evrope sta bila v preteklih petih letih izvedena dva večja projekta refrakcijskih/širokokotnih refleksijskih raziskav in sicer Polonaise '97 (Guterch et al., 1999) in Celebration 2000 (Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction). Slednji je obsegal mrežo desetih profilov v skupni dolžini 8900 km, ki so potekali prek osmih držav (Češka, Slovaška, Madžarska, Avstrija, Nemčija, Poljska, Rusija in Belorusija). Uporabili so kar 142 strelnih točk z naboji, velikimi med 80 kg in 15.000 kg, povprečno 300 kg ter 1100 prenosnih seizmografov (Guterch et al., 2000).

V letih 1998–2000 je bil izmerjen refleksijski seizmični profil Transalp (Transalp Working Group, 2002) med Münchnom in Bellunom, katerega prvi rezultati kažejo na podobno strukturo vrivanja Jadranske mikroplošče v Evrazijsko ploščo kot na območju centralnih Alp.

Na območju bivše Jugoslavije, je bilo v letih od 1964 do 1983 posnetih devet refrakcijskih/širokokotnih refleksijskih profilov (Skoko et al., 1987) v prečnodinarski smeri (JZ-SV). Najbolj severozahoden profil je bil dolg 230 km in je potekal med Puljem in Mariborom (Joksović & Andrić, 1983). Imel je dve strelni točki, prvo v morju pri Pulju in drugo v Vidmu pri Velikih Laščah. Moho je bil ugotovljen najplitveje na globini okoli 30 km na obeh koncih profila, najgloblje (okoli 41 km) pa pod Dinaridi (Snežnik). Ugotovljena hitrost longitudinalnih valov znaša 6,4 km/s v spodnjem delu skorje in 8,0–8,2 km/s v zgornjem delu plašča.

Največja debelina skorje (več kot 42 km) je v Sloveniji po teh raziskavah pod Dinari-di in Julijskimi Alpami (slika 3). Proti JZ se Moho dokaj strmo dviga proti Jadranskemu morju in doseže v Tržaškem zalivu globino okoli 35 km. Proti NE se sprva prav tako strmo dviga do Pohorja, kjer doseže 30 km, nato pa bolj položno, tako da je na meji z Madžarsko v globini 28 km (Aljinović et al., 1987; Ribarič, 1987; Dragašević et al., 1990).

Projekt Alp 2002

Iz pregleda raziskav na območju Alp in srednje Evrope je vidno, da je bilo območje stika Alp, Dinaridov in Panonskega bazena do sedaj praktično neraziskano z globokimi seizmičnimi profili. Po mnenju mnogih raziskovalcev pa predstavlja prav to območje trenutno največjo neznanko pri razumevanju globokih struktur Alp (Giese et al., 1992; Nicolich, 1993). Po obstoječih geoloških in geofizikalnih podatkih ima namreč kolizija Evrazijske in fragmentirane Afriške plošče na tem območju precej drugačen značaj kot v drugih delih Alp, saj prevladuje mnenje, da je povzročila lateralno ekstruzijo vmesne Tisa mikroplošče oziroma blokov Alcapa in Tisa proti vzhodu (n.pr. Vrabec, 2001 in reference tam).

Zato so po uspešnem zaključku meritev v okviru projekta Celebration 2000 njegovi izvajalci v začetku leta 2001 sprožili pobudo za nov mednarodni projekt z naslovom: 3D refrakcijske seizmične raziskave litosfere jugovzhodnih Alp (Alp 2002) v katerem sodeluje 11 držav. Projekt koordinira Inštitut za geodezijo in geofiziko Tehnične univerze na Dunaju (prof. Ewald Brueckl) v njem pa sodelujejo še Avstrijska akademija znanosti, Geofizikalni inštitut Eötvös Lorand iz Budimpešte, Univerza v Varšavi, Poljska akademija znanosti, Češka akademija znanosti, Univerza v Zagrebu, Univerza v Saskatchewanu, Univerza v Texasu iz El Pasa, Univerza v Københavnu, Urad za seizmologijo Agencije republike Slovenije za okolje in še nekatere druge organizacije.

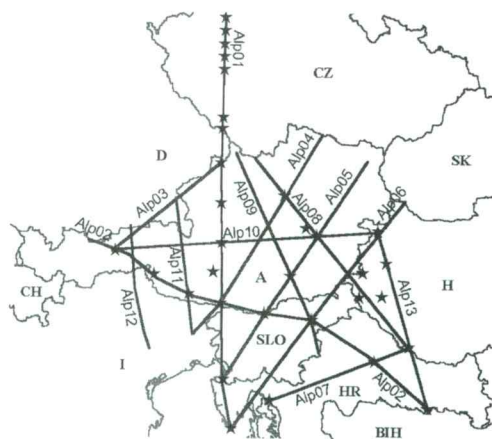
Vsaka država je krila stroške raziskav, predvsem vrtanja in miniranja, na svojem ozemlju. Stroške uporabe prenosnih seizmografov iz ZDA je pokrila Ameriška nacionalna znanstvena fundacija v okviru pro-

grama seizmičnih raziskav litosfere IRIS PASSCAL. Skupne stroške projekta pa krijejo Avstrijska akademija znanosti, Avstrijska znanstvena fundacija in Avstrijsko ministrstvo za znanost.

Seizmični profili

Projekt Alp 2002 je obsegal aktivne meritve v dvanajstih profilih (slika 2), vzdolž katerih je bilo postavljenih 1055 seizmografov RefTek Texan in pasivne meritve naravne potresne dejavnosti vzdolž profilov Alp04 in Alp12, kjer je bilo daljši čas postavljenih 70 trikomponentnih prenosnih seizmografov. Ker je profil Alp12 potekal vzdolž že izmerjenega profila Transalp, so tam potekale le pasivne meritve. V Avstriji ter na Madžarskem sta bila sočasno izmerjena še dva krajša refleksijska seizmična profila (Brueckl et al., 2003).

Lokacije seizmičnih profilov so bile izbrane glede na strukturne razmere, prehodnost terena (predvsem pri poteku prek visokih pogorij v Avstriji) in glede na položaj profilov predhodnih raziskav. Da bi omogočili integracijo podatkov s projektom Celebration, sta se profila Alp08 in Alp04 delno prekrivala s profiloma tega projekta. Štirje profili potekajo v smeri N-S, dva v smeri NW-SE, trije v smeri NE-SW in en profil v smeri W-E (slika 2). Pomembna prednost



Sl. 2. Položaj seizmičnih profilov in strelnih točk projekta Alp 2002

Fig. 2. Position map of seismic profiles and shot points of the Alp 2002 project

tega projekta glede na nekatere prehodne raziskave je v tem, da obravnava podatkov ne bo omejena le na posamezne profile (2D) ampak bo mogoča tudi 3D analiza, saj so bili vsi postavljeni seizmografi aktivni ob eksplozijah vseh strelnih točk, ne le ob tistih, ki se nahajajo na njihovem profilu. To je omogočilo, da potek posameznih profilov ni tako pomemben, saj zaradi visokih pogorij, kjer so bile meritve omejene na doline, tudi ni mogel biti povsod optimalen (n. pr. prečno na strukture).

Vzdolž štirih profilov so bili seizmometri postavljeni na 3-4 km (Alp01, Alp02, Alp07 in Alp10), na ostalih pa na 6-8 km. Najdaljši profil je Alp01, ki poteka v smeri N-S od severa Češke do Istre in je dolg 645 km. Na njem je bilo 15 strelnih točk. Sledita profil Alp02, dolžine 540 km, ki poteka v smeri NW-SE od Tirolske do Slavonskega broda in ima 8 strelnih točk, ter Alp05, dolžine 390 km, pa poteka v smeri NE-SW od Madžarsko-Slovaške meje do Slovenskega primorja in ima 4 strelne točke (slika 2).

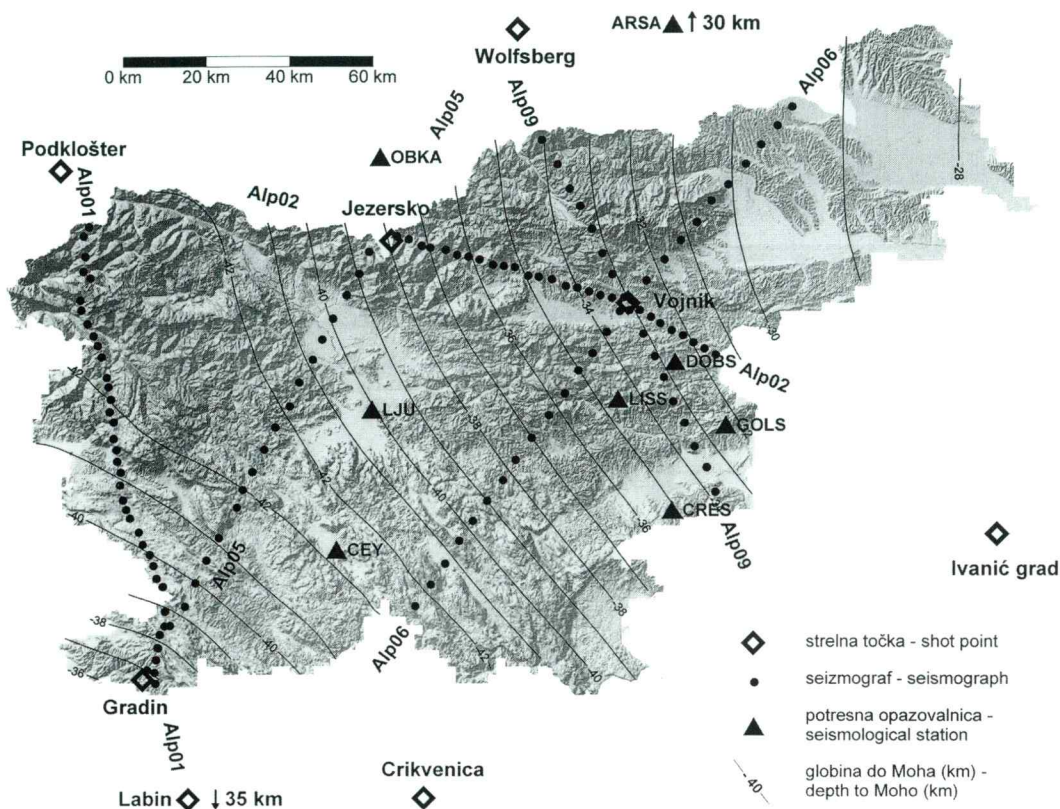
Vir seizmičnega valovanja

Vir seizmičnega valovanja so predstavljale močne eksplozije. Lokacije strelnih točk so bile pazljivo izbrane glede na potek seizmičnih profilov, geološke pogoje in zahtevo po dovolj veliki oddaljenosti od naselij. Večina strelnih točk se je nahajala na presečiščih seizmičnih profilov ter na njihovih koncih (slika 2). Pri iskanju lokacij smo izbirali predvsem nevezane klastične sedimentne kamnine, ker so karbonati, magmatске ali metamorfne kamnine bistveno manj primerni. Delež energije, ki se širi kot potresni valovi, je pri trših kamninah namreč bistveno nižji, ker se večina energije porabi za njihovo drobljenje. Za dober prenos energije je pomembno tudi, da se eksplozivni naboj nahaja pod nivojem podtalnice. Pri določanju najmanjše varne oddaljenosti strelne točke od najbližjih objektov in komunikacij je bil uporabljen avstrijski standard. Po osnovnem kriteriju tega standarda, ki ne zahteva kontrolnih meritev, je za količino 300 kg eksploziva v normalnih pogojih potrebna razdalja 905 m. Izkazalo se je, da je na območjih z ugodno geološko podlago na širšem območju Celjske kotline, zaradi goste naseljenosti, ta pogoj praktično ne-

mogoče izpolniti. Projekt vrtanja in miniranja, ki ga je izdelala pooblaščen organizacija, je zato uporabil drug kriterij istega standarda, ki pa zahteva kontrolne meritve vibracij. Ta kriterij je bil upravičen predvsem s tem, da gre za enkratno miniranje, medtem, ko standardi večinoma predvidevajo večkratno miniranje kot n.pr. v kamnolomih. Na lokaciji pri Vojniku so kontrolne meritve vibracij pri 700 m oddaljenem (najbližjem) objektu to potrdile, saj so bile izmerjene vrednosti hitrosti nihanja tal precej pod dovoljenimi. Na drugi lokaciji miniranja v Sloveniji pri Gradinu v Slovenski Istri pa so bili najbližji objekti oddaljeni več kot 1 km.

Na vsaki lokaciji smo v zadnjem mesecu pred meritvami izvrtali 5 vrtin premera 120-130 mm in globine 35 m. Vrtine so bile razporejene na krožnici s polmerom okoli 7 m v medsebojni razdalji 10 m in zacevljene s polietilensko cevjo premera 110 mm. Pri Vojniku smo prevrtali tuf in peščene gline, pri Gradinu pa fliš. Za miniranje smo uporabili vodoodporno želatinozno razstrelivo Austrogel na bazi amonijevega nitrata z detonacijsko hitrostjo okoli 5000 m/s. Celotna količina eksploziva - 300 kg - je bila razporejena na pet vrtin po 60 kg. Nekaj ur pred miniranjem smo vrtnice najprej očistili s stisnjenim zrakom, nato pa namestili eksplozivno polnjenje. Vrtine smo nato zasuli z drobnim prodrom, do površine pa sta vodili po dve detonatorski vrvi. Višina eksplozivnega stebra je bila v vsaki vrtini okoli 10 m, višina polnjenja s prodrom pa okoli 25 m. Detonacijske vrvice iz vseh vrtin so bile na površini zvezane z dvema trenutnima električnima detonatorjema v sredini minskega polja. Točen čas miniranja smo zagotovili s sprožilno napravo, povezano s prenosnim računalnikom in sprejemnikom časovnega signala, ki ga oddajajo sateliti globalnega sistema pozicioniranja (GPS). Celoten sistem so razvili na Geofiziki iz Toruna (Poljska). Poleg tega smo za registracijo točnega časa na vsaki lokaciji postavili še dva prenosna seizmografa, prvega 20 m od strelne točke, drugega pa med 300 in 600 m daleč. Pri objektu, ki je bil najbližji strelni točki smo opravili kontrolne meritve vibracij z inštrumentom Instanтел Blastmate III.

Celoten projekt je obsegal 31 strelnih točk, s povprečno velikostjo eksplozivnega naboja



Sl. 3. Položaj seizmografov vzdolž petih merskih profilov v Sloveniji, lokacije strelnih točk in stalnih potresnih opazovalnic, katerih zapis je na sliki 6 ter konture Mohorovičičeve diskontinuitete po Dragaševiću et al. (1990). Senčena podlaga je izdelana z digitalnim modelom reliefa DMR 100 (©Geodetska uprava Republike Slovenije)

Fig. 3. Position map of seismographs along five measuring profiles in Slovenia, locations of shot points and permanent seismological stations (their records are shown in Fig. 6) and contours of Mohorovičić discontinuity after Dragašević et al. (1990). Shaded relief based on digital elevation model DMR 100 (©Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

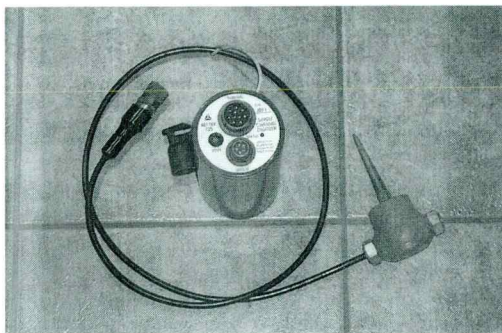
300 kg. Od tega jih je bilo 12 v Avstriji, 8 na Češkem, 5 na Madžarskem, 4 na Hrvaškem in 2 v Sloveniji (slika 2). Na Češkem so bila miniranja izvedena večinoma v kamnolomih, kar je sicer manj ugodno. Tam so lahko uporabili tudi večje nabojе, v treh primerih 2.000 kg, v dveh pa celo 10.000 kg. Na Madžarskem so imeli še sedem manjših strelnih točk z nabojem po 70 kg in v Avstriji eno z nabojem 100 kg (Brueckl et al., 2003). Miniranja so bila izvedena tekom treh noči, ko je seizmični nemir zaradi industrije in prometa najmanjši, vsako miniranje pa je bilo sproženo ob predhodno dogovorjenem času. Pri Vojniku smo miniranje opravili 3.

julija, pri Gradinu pa 5. julija, obakrat ob 1:05. Ker v nekaterih državah predpisi ne dovoljujejo miniranja ponoči (oz. ko je tema), so jih tam izvedli pozno zvečer ali zgodaj zjutraj. To je tudi glavni razlog, zakaj so meritve potekale v začetku poletja, ko je dan najdaljši.

Centralna lega Slovenije znotraj raziskovanega območja je zagotavljala dobro pokritost našega ozemlja tudi s strelnimi točkami v sosednjih državah. V Avstriji so bile najbližje strelne točke pri Podkloštru, Jezerskem in Wolfsbergu, na Hrvaškem pa pri Labinu, Crikvenici in Ivanič gradu (slika 3).

Seizmična oprema in izvedba meritev

Ključnega pomena za izvedbo tovrstnih projektov je, da mora biti na voljo dovolj veliko število prenosnih seizmografov. Pri projektu Alp 2002 smo uporabili seizmografe RefTek 125-01 (Texan), ki so jih razvili posebej za globoke seizmične raziskave, odlikuje pa jih majhna poraba električne energije, ki omogoča dolgo avtonomijo ob napajanju z navadnimi (alkalnimi) baterijami, visoko dinamično območje (24 bitni digitalizator) in natančna notranja ura (stabilnost 0,1 ppm), ki se sinhronizira s signalom GPS le pred in po meritvah (slika 4). Večino od 1055 seizmografov sta prispevala ameriški raziskovalni program IRIS PASSCAL in Univerza iz Texasa v El Pasu (835), ostale pa še Danska (150), Avstrija (30), Poljska (30) in Finska (10). Kot senzorje smo uporabljali vertikalne geofone z lastno frekvenco 4,5 Hz (slika 4). Seizmografi so bili predprogramirani za snemanje v 243 časovnih oknih dolžine po 5 minut, razporejenih tekom treh noči. Frekvenca vzorčevanja signala je bila 100 Hz.



Sl. 4. Enokanalni prenosni seizmograf RefTek Texan s 4,5 Hz geofonom (foto: A.Gosar)

Fig. 4. Single channel portable seismograph RefTek Texan with 4.5 Hz geophone (photo: A.Gosar)

V Sloveniji smo 127 seizmografov razmestili vzdolž petih profilov (slika 3) skupne dolžine 575 km (tabela 1). Nominalna razdalja med njimi je bila na profilih Alp01 in Alp02 tri km, na profilih Alp05, Alp06 ter Alp09 pa šest km.

Izbor lokacij na terenu smo opravili v dveh mesecih pred meritvami. Pri tem smo vse točke označili, določili koordinate, jih vrisali na topografske karte ter izdelali skice. Vse to je omogočalo ekipam, ki so postavljale

seizmografe, da so jih s pomočjo ročnih GPS sprejemnikov hitro našle. Glavni kriteriji za postavitev so bili poleg čim manjšega odstopanja od linije profila še: ustrezna tla, ki omogočajo izkop, obenem pa niso preveč mehka, dostopnost z vozilom v neposredno bližino, teren, ki ob močnem dežju ne bo poplavljen, oddaljenost od prometnejših cest, visokonapetostnih daljnovodov in drugih virov nemira vsaj 300 m in od drugih komunikacij vsaj 50 m, oddaljenost od posameznih dreves ter možnost varne (skrite) postavitve. V Sloveniji so bili najtežji pogoji za postavitev seizmografov zaradi goratosti na profilu Alp01 v Zgornjem Posočju in zaradi težke dostopnosti na severnem delu profila Alp09 na Pohorju.

Seizmografi so prispeli v Slovenijo tri dni pred meritvami. V dveh dneh smo jih pripravili za meritve, označili, vnesli koordinate in parametre snemanja ter zadnjo noč pred postavitvijo sinhronizirali ure. Devet dvočlanskih ekip je nato v dveh dneh namestilo seizmografe na terenu. Na vsaki lokaciji smo izkopali 40 cm globoko in 60 cm dolgo jamo v katero smo namestili geofon, ki je bil pazljivo poravnal v navpičnico in pa seizmograf v zaščitni vrečki. Geofon in seizmograf sta bila oddaljena vsaj 40 cm, s čemer smo se izognili njenemu medsebojnemu vplivanju. Pred zasutjem smo nad seizmograf položili list z informacijo o merilni napravi, projektu in kontaktni osebi, za primer, če bi ga nepoklicana oseba odkopala. Po treh nočeh, v katerih so potekale meritve, smo seizmografe v enem dnevu ponovno zbrali in jih vrnili v logistično središče, kjer smo jih še isto noč ponovno sinhronizirali s točnim časom in podatke prenesli na računalnik. Med sinhronizacijama pred postavitvijo in po končanih meritvah je moralo namreč poteči čim manj časa, da smo zmanjšali časovno napako in preprečili izpraznitev baterij.

Obdelava in interpretacija podatkov

Meritve v okviru projekta Alp 2002 projekta so bile uspešne, saj so bila vsa predvidena miniranja realizirana, delež izpadlih podatkov zaradi instrumentalnih ali drugih vzrokov pa je bil pri celotnem projektu pod 5 %. V Sloveniji nismo zabeležili okvar instrumentov, le dva seizmografa sta predčasno prenehala zapisovati podatke, vse pa

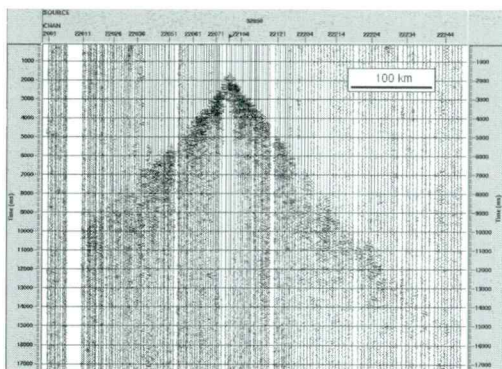
profil <i>profile</i>	smer <i>strike</i>	dolžina <i>length</i> (km)	št. seizmografov <i>no. of seismographs</i>	razdalja <i>spacing</i> (km)
Alp01	N-S	115	37	3
Alp02	E-W/NW-SE	85	27	3
Alp05	SW-NE	120	20	6
Alp06	SW-NE	155	26	6
Alp09	NNW-SSE	100	17	6
skupaj - <i>total</i>		575	127	

Tabela 1. Osnovni podatki o petih profilih projekta Alp 2002 v Sloveniji.

Table 1. Basic data about five profiles of the Alp 2002 project in Slovenia.

smo po meritvah uspeli ponovno sinhronizirati.

Podatki so večinoma dobre kvalitete, kar obeta, da bomo pri obdelavi iz njih lahko pridobili zelene podatke. Primer zapisa eksplozije pri Vojniku, kot so ga registrirali seizmografi na profilu Alp02, je na sliki 5. Ob ugodnih pogojih (nizek nivo seizmičnega nemira na lokaciji seizmografa in dober stik geofona s tlemi) je, po primerni obdelavi podatkov, signal viden tudi še na razdalji do 250 km.



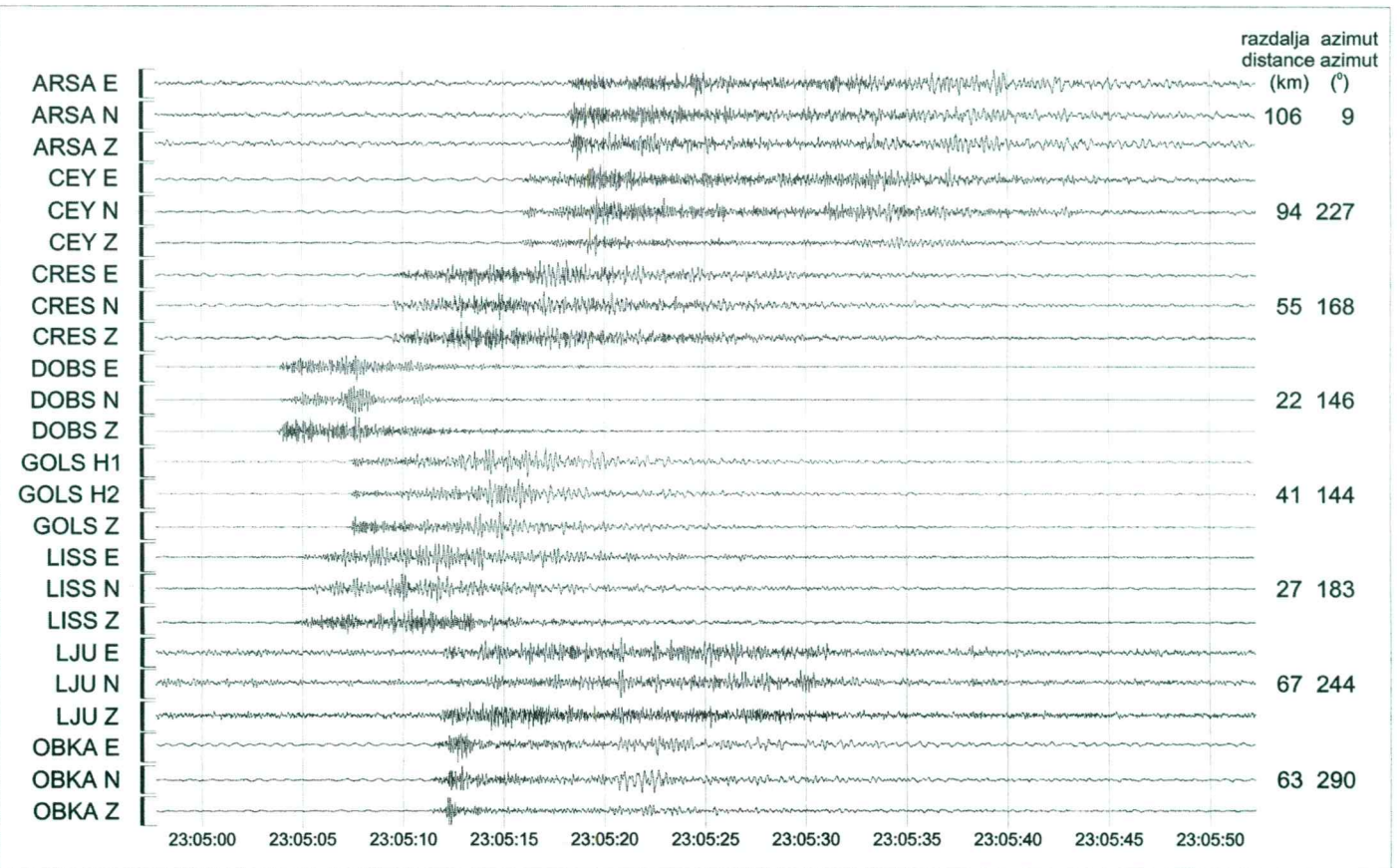
Sl. 5. Zapisi nihanja tal (seizmogram) ob eksploziji na strelni točki pri Vojniku kot ga je registriralo 145 seizmografov na profilu Alp02

Fig. 5. Data recorded on 145 seismographs along Alp02 profile for the explosion at shot point near Vojnik

Vsaka eksplozija je povzročila potres z lokalno magnitudo med 1,4 in 1,8, ki smo ga zaznali tudi z državno mrežo potresnih opazovalnic. Potres so čutili posamezni prebivalci na območju Vojnika, vendar zaradi predhodnega obveščanja (policija, center za obveščanje, lokalni radio, časopis) vznemir-

jenja ni bilo. Iz območja Gradina, ki je redkeje naseljeno, ni bilo poročil o tem, da bi prebivalci potres čutili. Zapis eksplozije pri Vojniku na šestih potresnih opazovalnicah Slovenske mreže in dveh opazovalnicah v Avstriji je na sliki 6. Razpon oddaljenosti opazovalnic je med 27 in 106 km.

Miniranja za projekt Alp 2002 smo lahko uporabili tudi za testiranje zanesljivosti avtomatskega lociranja nadžarišč potresov (Torkar et al., 2000) sistema Antelope (BRTT, 1998), ki ga uvajamo skupaj z izgradnjo nove mreže potresnih opazovalnic. V primeru eksplozije pri Vojniku, je bil zaradi dobrega kotnega pokrivanja in zadostne gostote potresnih opazovalnic rezultat zelo dober, saj je lokacija na podlagi avtomatske določitve Pg vstopov na sedmih opazovalnicah odstopala od dejanske le za 1,3 km. Natančnost lokacije na podlagi redne seizmološke analize na desetih opazovalnicah, ki upošteva tudi nekatere Sg vstop, je ostala v istem okviru (ARSO, 2002), kar kaže na to, da je hitrostni model uporabljen pri lociranju za območje vzhodne Slovenije dokaj ustrezen. V primeru eksplozije pri Gradinu, avtomatski sistem dogodka ni lociral, kar je posledica trenutno še prereditve mreže potresnih opazovalnic v jugozahodni Sloveniji. Tudi sicer je bila eksplozija pri Gradinu, na zapisih podobno oddaljenih potresnih opazovalnic kot za eksplozijo pri Vojniku, slabše izražena. Ker so bili vsi ostali parametri miniranja enaki, pripisujemo to deloma manj ugodnim tršim plastem kalkarenita in peščenjaka znotraj flišne sekvence na lokaciji miniranja, deloma pa je slabše razmerje signal/šum lahko tudi posledica večjega nemira, ker je ob času miniranja pri Gradinu pihal v zahodni Sloveniji dokaj močan veter.



Sl. 6. Zapis eksplozije na strelni točki pri Vojniku na šestih potresnih opazovalnicah v Sloveniji in dveh v Avstriji. Lokacije opazovalnic so na sliki 3

Fig. 6. Record of explosion at the shot point Vojnik on six seismological stations in Slovenia and two in Austria. Locations of seismological stations are shown in Fig. 3

Sledila bo večletna obdelava podatkov, ki bo temeljila predvsem na modeliranju z metodo sledenja žarkov (n. pr. Zelt & Smith, 1992) in na tomografski inverziji (n. pr. Hole, 1992). Veliko število uporabljenih seizmografov omogoča poleg 2D obravnavanja podatkov vzdolž posameznih merskih profilov tudi 3D analizo. Opređeljene bodo glavne hitrostne meje kot so Mohorovičičeva in Conradova diskontinuiteta ter baza sedimentov. Skupaj s podatki projekta Celebration 2000 bo nato izdelan model litosfere med Baltikom in Jadranom (Brueckl et al., 2003).

Za območje Slovenije pričakujemo, da bo analiza podatkov projekta Alp 2002 osvetlila predvsem naslednja vprašanja: kje poteka meja med Evrazijsko in Jadransko ploščo, kakšna je vloga strukturne poglobitve Mohorovičičeve diskontinuitete pod Dinaridi in južnimi Alpami, ki geodinamsko predstavlja čelo največjih deformacij (Carulli et al., 1990; Nicolich, 1993) in kakšna je debelina sedimentov. Izboljšani hitrostni model litosfere bo prispeval k natančnejšemu lociranju potresov in k zanesljivejšim ocenam potresne nevarnosti. Podatki pa bodo služili tudi za oceno perspektivnosti izkoriščanja ogljikovodikov in geotermalne energije.

Zahvala

Predstavljene meritve v Sloveniji predstavljajo le del aktivnosti celotne delovne skupine projekta Alp 2002 (Alp 2002 Working Group). Prof. Ewald Brueckl in Michael Behm iz Tehnične univerze na Dunaju sta opravila zahtevno organizacijsko in koordinacijsko delo, Galen Kaip in Tiffni Bond iz Univerze v El Pasu sta pripravila seizmografe za meritve, podjetje Krona je izvrtalo vrtine, Ivan Potočnik je izvedel miniranje, Leon Paczek iz Geofyzike Torun je zagotovil točen čas miniranja, študentka Vanja Kastelec je opravila obsežen izbor lokacij seizmografov, Geološki zavod Slovenije pa je dal na razpolago dva sodelavca z vozili. Izvedba projekta ne bi bila mogoča brez pomoči številnih sodelavcev urada za seizmologijo Agencije RS za okolje, ki so opravili večino terenskega dela. Vsem prisrčna hvala. Raziskave v Sloveniji je financirala Agencija RS za okolje.

Literatura

- ARSO 2002: Preliminarni tedenski seizmološki bilten 29.6. – 5.7.2002. – Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Ljubljana.
- Aljinović, B., Prelogović, E. & Skoko, D. 1987: Novi podatci o dubinskoj geološkoj građi i seizmotektonski aktivnim zonama u Jugoslaviji. – *Geološki vjesnik*, 40, 255–263, Zagreb.
- Aric, K., Gutdeutsch, R., Klöngler, G. & Lenhardt, W. 1987: Seismological studies in the Eastern Alps. In: Fluegel, H.W., Fausl, P. (eds.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, 325–333, Deuticke, Vienna.
- Bernabini, M., Nicolich, R. & Polino, R. 1992: Seismic Line CROP/ECORS across the Western Alps – *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 34, 227–232, Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste.
- Blundell, D., Freeman, R. & Mueller, St. (eds.) 1992: *A continent revealed, The European geotraverse*. – Cambridge University Press, 275 pp., Cambridge.
- BRTT, 1998: *Antelope realtime system, configuration and operations manual*. – Boulder Real Time Technologies, 45 pp., Boulder.
- Brueckl, E., Gosar, A., Hegedus, E., Hrubcova, P. & Sumanovac, F. 2003: Alp 2002 – seismic experiment and first results. – *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 10872, Katlenburg-Lindau.
- Carulli, G.B., Nicolich, R., Rebez, A. & Slejko, D. 1990: Seismotectonics of the Northwest External Dinarides. – *Tectonophysics*, 179, 11–25, Elsevier, Amsterdam.
- Cox, A. & Hart, R. B. 1986. *Plate tectonics – how it works*. Blackwell, 392 str., Oxford.
- De Voogd, B. & Keen, C. 1989: Deep Seismic Reflection Profiling. – In: James, D., E., *The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. – Van Nostrand Reinhold Company, 181–190, New York.
- Dragašević, T., Andrić, B. & Joksović, P. 1990: Strukturna karta Mohorovičičevog diskontinuiteta Jugoslavije sa tumačenjem, 1:500 000. – Savezni geološki zavod, 46 str., Beograd.
- Fowler, C.M.R. 1990: *The solid earth, an introduction to global geophysics*. – Cambridge University Press, 472 pp., Cambridge.
- Fruhwirt, R., Grassl, H., Millahn, K., Schmid, C., Schmölner, R. & Weber, F. 2001: Ergebnisse der tiefenreflexionsseismischen Lithosphärenforschung in Österreich. In: Hammerl, C. et al.: *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001*, ZAMG, 540–557, Wien.
- Giese, P., Roeder, D. & Scandone, P. 1992: The fragmented Adriatic microplate: Evolution of the southern Alps, the Po Plain, and the Northern Apennines. In: Blundell, D., Freeman, R., Mueller, St. (eds.), *A Continent Revealed, The European geotraverse*. – Cambridge University Press, 190–199, Cambridge.
- Gosar, A. 1995: Globoke raziskave Zemljine skorje z refleksijsko seizmiko. – *Geološki zbornik*, 10, 30–31 Ljubljana.
- Gutcher, A., Grad, M., Thybo, H., Keller, G.R. 1999: The POLONAISE working group, 1999: POLONAISE '97 – an international seismic experiment between Precambrian and Variscian Europe in Poland. – *Tectonophysics*, 314, 101–121, Amsterdam.

Guterch, A., Grad, M., Keller, G.R., Posgay, K., Vozar, J., Spičak, A., Brueckl, E., Haynal, Z., Thybo, H. & Oguz, S. 2000: CELEBRATION 2000: huge seismic experiment in central Europe. – *Geologica Carpathica*, 51, 413–414, Bratislava.

Hole, J.A. 1992: Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography. – *Journal of Geophysical Research*, 97, 6553–6562, Washington.

Joksović, P. & Andrić, B. 1983: Ispitivanje građe zemljine kore metodom dubokog seizmičkog sondiranja na profilu Pula-Maribor. – *Tipkano poročilo, Geofizika Zagreb*, 14 str., arhiv GeoZS, Ljubljana.

Klemperer, S.L. & Peddy, C. 1992: Seismic reflection profiling and the structure of the continental lithosphere. In: Brown, G., Hawkesworth, C., Wilson, C., *Understanding the Earth – a new synthesis*. – Cambridge University Press, 251–274, Cambridge.

Marchant, R. 1993: The Underground of the Western Alps. – *Memoires de Geologie*, No. 15, 137 pp., Lausanne.

Mooney, W.D. & Brocher, T.M. 1987: Coincident seismic reflection/refraction studies of the continental lithosphere: A global review. – *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 89/1, 1–6, Oxford.

Nicolich, R. 1993: Deep crustal structures and implications for earthquakes hazard. – *Europrotech Scientific Conferences*, 1–5, Udine.

Ribarič, V. 1987: On the Mohorovičić discontinuity in the region of Slovenia. – *Acta Geologica*, 17/1–2, 21–30, JAZU, Zagreb.

Scarascia, S. & Cassinis, R. 1997: Crustal structures in the central-eastern Alpine sector: a revision of available DSS data. – *Tectonophysics*, 271, 157–188, Amsterdam.

Sheriff, R.E. 1991: *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*. – Society of Exploration Geophysicists, 376 pp, Tulsa.

Skoko, D., Prelogović, E. & Aljinović, D. 1987: Geological structure of the Earth's crust above the Moho discontinuity in Yugoslavia. – *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 89/1, 379–382, Oxford.

Torkar, M., Živčić, M., Costa, G., Horn, N. & Močnik, G. 2000: Waveform exchange between Italy, Austria and Slovenia (WEBIAS) – a pilot project. – *Workshop: Beyond frontiers seismic networks in the southern Alps, Trieste*.

Transalp Working Group 2002: First deep seismic reflection images of the Eastern Alps reveal giant crustal wedges and transcrustal ramps. – *Geophysical Research Letters*, 29/10, 92–1 – 92–4, Washington.

Vrabec, M. 2001: *Strukturna analiza cone Savskega preloma med Trstenikom in Stahovico*. – *Doktorska disertacija, Naravoslovnotehniška fakulteta*, 94 pp., Ljubljana.

Zelt, C.A. & Smith, R.B. 1992: Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure. – *Geophys. J. Int.*, 108, 16–34, Oxford.