SEIZMIČNE REFRAKCIJSKE RAZISKAVE LITOSFERE NA PROFILU ALP02 PROJEKTA ALP 2002
SEISMIC REFRACTION INVESTIGATIONS OF THE LITHOSPHERE ALONG ALP02 PROFILE OF THE ALP 2002 PROJECT

Vanja Kastelic[1], Andrej Gosar

Izvleček. *S projektom Alp 2002 smo raziskali stično območje večjih tektonskih enot Alp, Dinaridov in Panonskega bazena. V mreži dvanajstih globokih refrakcijskih/širokokotno refleksijskih profilov skupne dolžine 4100 km, ki so potekali prek sedmih držav, smo namestili 1055 prenosnih seizmografov in sprožili 31 močnih eksplozij. Čez območje Slovenije je potekalo 5 profilov skupne dolžine 575 km, vzdolž katerih je bilo nameščenih 127 seizmografov. Točki miniranja sta bili pri Vojniku in pri Gradinu. V članku obravnavamo rezultate raziskav na 540 km dolgem profilu Alp02, ki poteka v smeri SZ - JV prek Avstrije, Slovenije in Hrvaške. Podatke smo interpretirali z metodo presečnega časa, tomografsko inverzijo in modeliranjem s sledenjem žarkov. Rezultati potrjujejo postopen dvig Mohorovičićeve diskontinuitete iz območja Alp, kjer je na globini tudi prek 50 km do globine 35 km na območju Panonskega bazena. V vzhodni Sloveniji smo ugotovili nizkohitrostno strukturno poglobitev, ki sega do globine 21 km, medtem ko je na ostalih odsekih profila na globini največ 8 km. Na območju med strelnima točkama pri Vojniku in Ivanić Gradu (Hrvaška) je iz rezultatov modeliranja razvidna poglobitev v zgornjem delu skorje iz globine 2 na 5 km. Omenjena poglobitev je prekinjena z visokohitrostno cono nekaj km SZ od Ivanić Grada, ki verjetno ustreza strukturi Medvednice. Do sedaj zbrani podatki potrjujejo rezultate predhodnih globokih seizmičnih raziskav, dajejo pa tudi veliko novih informacij o strukturnih razmerah na tem območju.*

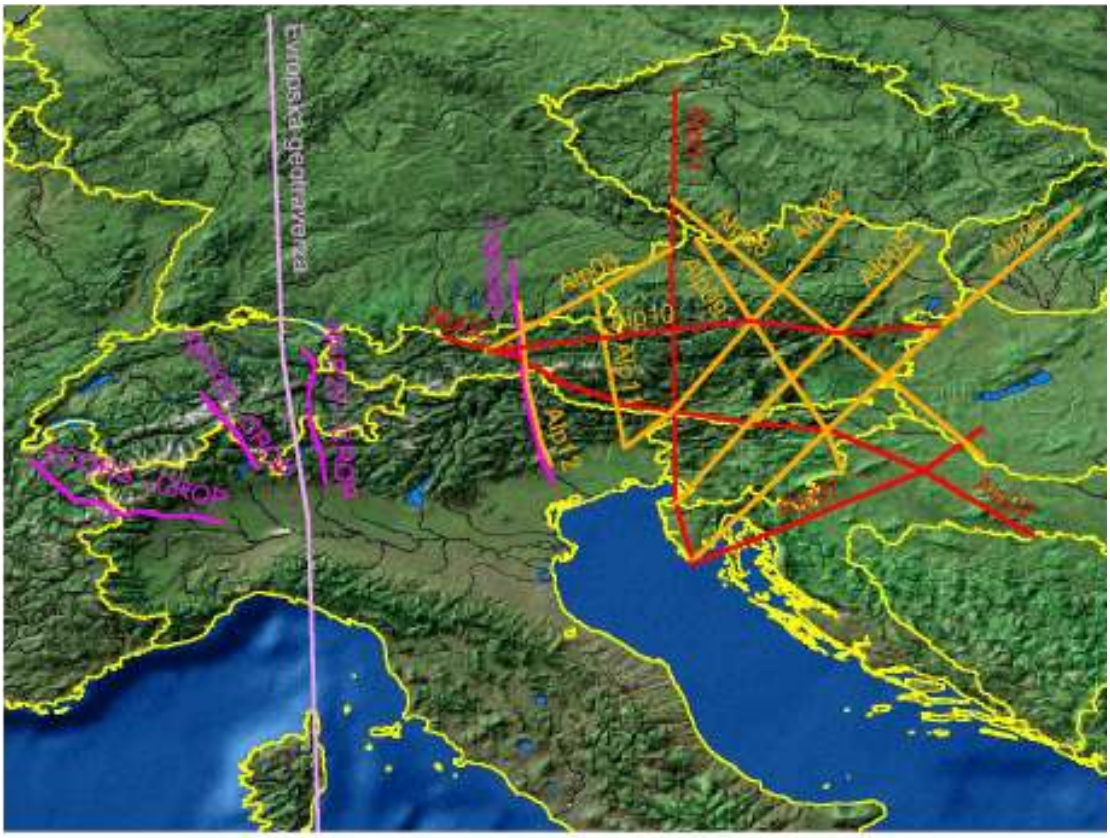
Abstract. *The contact zone between major tectonic units of the Alps, the Dinarides and the Pannonian basin was investigated in the frame of Alp 2002 project. In the network of 12 deep refraction/wide angle reflection profiles of 4100 km total length running over 7 different countries, 1055 portable seismic stations were deployed and 31 strong explosions were fired. In Slovenia, 127 seismic stations were deployed along five profiles of 575 km total length. Two explosions were fired, one in the vicinity of Vojnik and the other near Gradin. We hereby present the results of investigations along profile Alp02 (540 km long), which is running in NW-SE direction across Austria, Slovenia and Croatia. Data were elaborated and interpreted using intercept time method, tomographic inversion and raytracing modelling. The results confirm the uplift of the Mohorovičić's discontinuity from the depths above 50 km in the Alps region, to the depths around 35 km in the Pannonian basin. In eastern Slovenia, there is up to 21 km deep low velocity zone, seen in the other parts of the profile at maximum depth of 8 km. In the area between Vojnik and Ivanić Grad (Croatia) shoot points, a horizon in the upper crust lowers from 2 to 5 km in depth. This structure is interrupted by a high velocity zone NW of Ivanić Grad, that probably represents the Medvednica structure. Preliminary model along the Alp02 line gives fairly good agreement with the previous results of deep seismic investigations, but it also revealed some new structural relationships that were not known before.*

Uvod

K poznavanju strukture Alp so v veliki meri pripomogle raziskave globljih delov Zemljine skorje, predvsem globoki seizmični profili, ki so podali odgovore na vprašanja o naravi stika

[1] Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, Ljubljana

litosferskih plošč in globini do Mohorovičićeve diskontinuitete (Moho). Prvi seizmični profili (refrakcijske/širokokotno refleksijske raziskave) so bili na območju Vzhodnih Alp izmerjeni že v drugi polovici sedemdesetih let (Aric in sod., 1987; Scarascia in Cassinis, 1997). Nadalje so v drugi polovici osemdesetih let sledili nacionalni projekti refleksijskih seizmičnih raziskav na območju Zahodnih in Centralnih Alp ter refrakcijske meritve v okviru mednarodnega projekta Evropske geotraverze (slika 1). Leta 1997 in leta 2000 sta bila pod imenoma Polonaise in Celebration 2000 na območju severnega dela Srednje Evrope in Vzhodne Evrope izvedena še dva projekta refrakcijskih/širokokotnih refleksijskih meritev, v letih 1998-2000 pa je bil med Münchnom in Bellunom izmerjen refleksijski seizmični profil Transalp. Ti profili potrjujejo strukturo vrivanja Jadranske mikroplošče v Evropsko ploščo, ki se podriva proti jugu. Mohorovičićeva diskontinuiteta se pod severnim alpskim predgorjem nahaja na globini okoli 30 km, pod Južnimi Alpami pa doseže globino tudi do 65 km.



Slika 1. *Položaj globokih seizmičnih profilov prek Zahodnih in Centralnih Alp (vijolična) in profilov, izmerjenih v okviru projekta Alp 2002. Profili gostejših meritev so rdeče, redkejših meritev pa oranžne barve.*

Figure 1. *Position map of main deep crustal seismic profiles in Western and Central Alps (purple), and the profiles measured within the framework of the Alp 2002 project. High-density lines are shown in red and low-density lines in orange.*

Na območju bivše Jugoslavije je bilo v letih med 1964 in 1983 izmerjenih devet refrakcijskih/ širokokotnih refleksijskih profilov v prečnodinarski smeri, od katerih je najbolj severozahoden potekal tudi čez naše ozemlje. Skrajni točki profila sta bili Pulj (Hrvaška) in Maribor, strelni točki pa sta bili v morju pri Pulju in v Vidmu pri Velikih Laščah. Podatki, dobljeni s tem projektom, so bili uporabljeni za izdelavo karte globine do Mohorovičićeve diskontinuitete in karte debeline sedimentov (Dragašević in sod., 1990). Obe karti sta služili kot osnova pri

modeliranju podatkov projekta Alp 2002. Največja globina do Moha znaša po podatkih omenjene karte okoli 42 km. Dosežena je pod Julijskimi Alpami, in se v pasu širokem nekaj 10 km vleče v dinarski smeri proti Gorskemu Kotarju (slika 2). Najplitveje se na območju Slovenije nahaja na obrobju Panonskega bazena ob meji z Madžarsko, kjer doseže globino 28 km. Dokaj strmo se Moho iz najglobljega dela dvigne proti Tržaškem zalivu, kjer se nahaja na globini 35 km (Aljinović in sod., 1987).

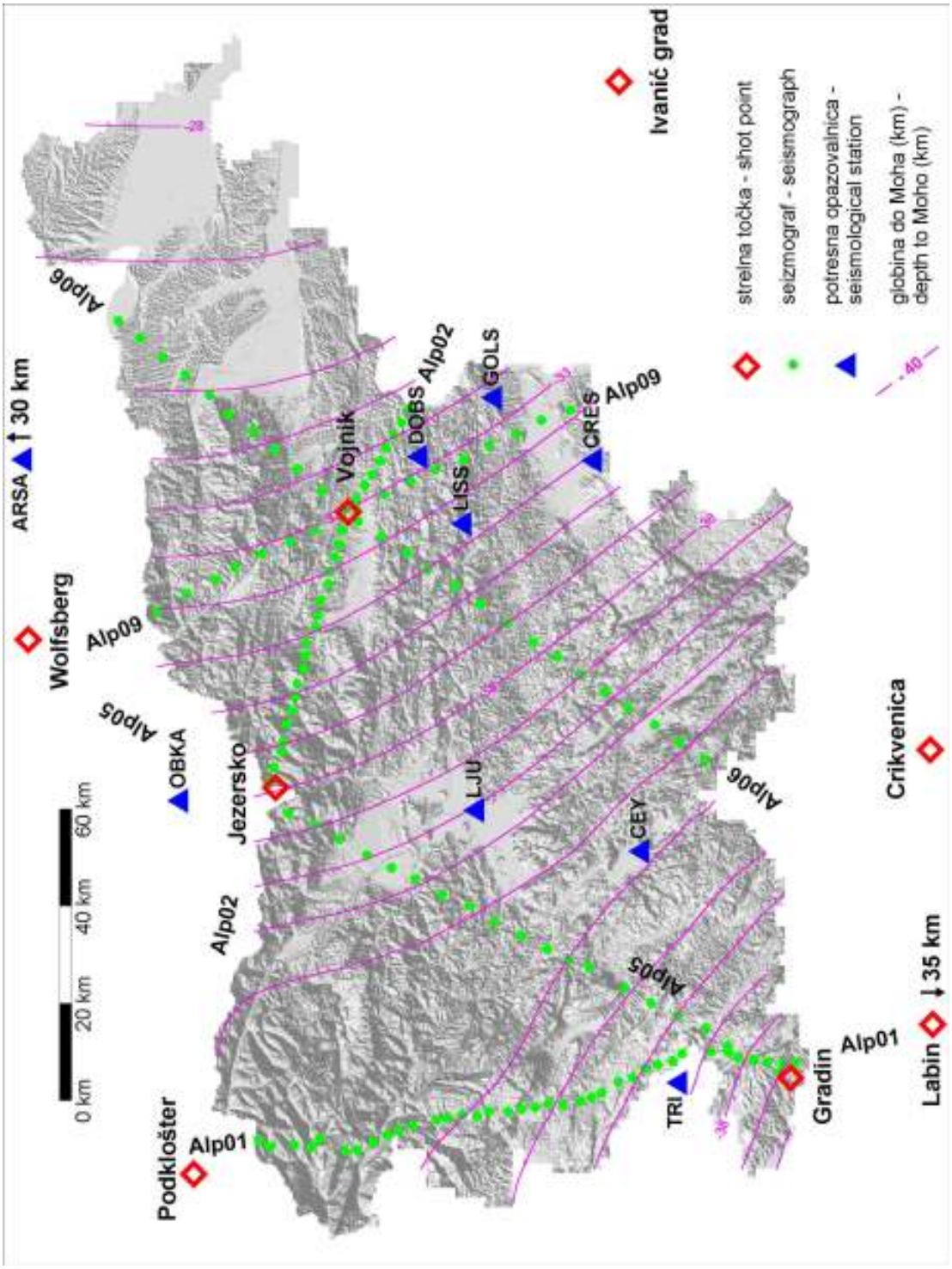
Medtem, ko so bile globoke strukture območja Vzhodne in Centralne Evrope ter delov Zahodnih Alp že dokaj dobro raziskane, pa stik med Alpami, Dinaridi in Panonskim bazenom s seizmičnimi profili še ni bil raziskan. Po prevladujočem mnenju raziskovalcev naj bi na območju Vzhodnih Alp strukturne razmere zapletla t. i. lateralna ekstruzija (bočno izrivanje) Tisa plošče. Ta je posledica vrivajoče se Jadranske plošče proti severu in prostega vzhodnega boka, ki je dovoljeval neovirano premikanje mase iz cone kolizije. Južno mejo izrivanja predstavlja Periadriatski lineament. Osvetlitev globokih struktur na tem območju bi tako pripomogla k boljšemu razumevanju dinamike procesov in razložila medsebojne odnose treh pomembnih tektonskih enot. Zato so po uspešnem zaključku meritev v sklopu projekta Celebration 2000 njegovi izvajalci podali pobudo za nov mednarodni projekt z naslovom 3D refrakcijske seizmične raziskave litosfere jugovzhodnih Alp (Alp 2002), v katerem sodeluje 11 držav (Brueckl in sod., 2003).

V okviru projekta Alp2002 smo po enoletnih pripravah v začetku julija 2002 vzdolž dvanajstih profilov na območju Avstrije, Češke, Madžarske, Hrvaške, Slovenije, Italije in Nemčije postavili 1055 seizmografov RefTek Texan, namenjenih aktivnim meritvam, vzdolž dveh profilov pa še dodatnih 70 seizmografov za pasivne meritve naravne potresne dejavnosti (slika 1). Smeri in lokacije profilov so bile izbrane upoštevajoč potek glavnih struktur, prehodnost terena ter položaj profilov predhodnih raziskav. Kot vir seizmičnega valovanja je bilo uporabljenih 31 močnih eksplozij (približno 300 kg eksploziva na strel), katerih lokacije so bile praviloma izbrane na koncih in na sečiščih posameznih profilov. Pri izbiri lokacije strelne točke je bilo potrebno upoštevati primernost geološke podlage in dovolj veliko oddaljenost od naseljenih območij. Pomembna prednost tokratnih meritev je v tem, da so vsi seizmografi zapisovali signal vseh eksplozij in ne le eksplozij na profilu, vzdolž katerega so bili postavljeni. To bo poleg klasične dvodimenzionalne (2D) omogočalo tudi tridimenzionalno (3D) analizo podatkov.

Projekt Alp 2002 v Sloveniji

Prek Slovenije je potekalo 5 od skupno 12 profilov, ki so bili v Sloveniji skupaj dolgi 575 km (slika 2). Lokacije seizmografov so bile v prvi fazi izbrane na podlagi nominalne razdalje med posameznimi točkami, upoštevajoč čim manjše odstopanje od izbrane linije profila. Na profilih Alp01 in Alp02 so bili seizmografi postavljeni na vsakih 3 km, na ostalih treh profilih pa na 6 km. V Sloveniji smo uporabili 127 seizmografov Texan. Največ, 37 seizmografov, je bilo postavljenih vzdolž profila Alp01. Sledi profil Alp02 s 27 seizmografi, Alp06 s 26 in Alp05 z 20 seizmografi, na najkrajšem profilu Alp09 pa je bilo postavljenih 17 inštrumentov. Mikrolokacije posameznih merskih točk smo izbrali na terenu v zadnjih dveh mesecih pred meritvami. Pri izboru je bilo potrebno upoštevati kriterije, ki vplivajo na kakovost seizmičnega zapisa in so v veliki meri odvisni od lokalne podlage in virov seizmičnega

nemira. Tako smo se izogibali prometnic, visokonapetostnih daljnovodov, industrijskih obratov, dreves in potokov ter rek. Da bi omogočili čim hitrejšo postavitev, je bilo potrebno upoštevati tudi dostopnost lokacije. Najtežji pogoji glede dostopnosti in prehodnosti terena so bili na območju zgornjega Posočja in na severnem delu profila Alp09.



Slika 2. *Karta lokacij seizmografov in strelnih točk na območju Slovenije in bližnje okolice s konturami globine do Mohorovičićeve diskontinuitete (Dragaševićin sod., 1990)*
Figure 2. *Map of seismograph and shoot points locations in Slovenia and nearby vicinity. Magenta lines depict Moho depths contours (Dragašević et al., 1990)*

Po določitvi mikrolokacije vsake točke na terenu, kjer smo si pomagali tudi z ročnimi GPS sprejemniki, smo točke nanesli na topografske karte, določili koordinate in izrisali skice dostopa do lokacije. Vse to je devetim dvočlanskim ekipam, ki so seizmografe postavljale, omogočalo hitro in neproblematično postavitev. Postavitev je bila opravljena v dveh dnevih. Sledili so trije dnevi meritev, ko so seizmografi registrirali signale eksplozij, ki so bile sprožene v nočnem ali zgodnjem jutranjem času, ker je takrat nivo seizmičnega nemira najmanjši. Po končanih meritvah smo seizmografe v enem dnevu zopet zbrali in podatke prenesli na računalnik. S tem je bil terenski del projekta tudi zaključen.

V Sloveniji sta bili dve strelni točki: prva na območju Vojnika v Celjski kotlini, na sečišču profilov Alp02, Alp06 in Alp09, druga pa na sečišču profilov Alp01 in Alp05 pri Gradinu v Slovenskem Primorju (slika 2). Na vsaki strelni točki je bilo potrebno predhodno izvrtati pet vrtin globine 35 m, v katere je bilo vstavljenih po 60 kg eksploziva (skupaj 300 kg).

Meritve so bile uspešne, saj so bile vse načrtovane eksplozije tudi realizirane, delež izpadlih podatkov zaradi inštrumentalnih ali drugih vzrokov pa je bil pri celotnem projektu pod 4 %. V Sloveniji sta le dva seizmografa predčasno prenehala zapisovati podatke, vse pa smo po meritvah uspeli ponovno sinhronizirati s časovnim signalom GPS sistema (Gosar, 2003). Zajeti podatki so večinoma kvalitetni. Signal je praviloma boljši pri eksplozijah, ki so bile sprožene v slabše konsolidiranih sedimentih, kot pri tistih v karbonatnih, magmatskih in masivnih metamorfnih kamninah. 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. Med strelnima točkama v Sloveniji, je bil signal eksplozije pri Vojniku boljši v primerjavi s tisto pri Gradinu in ga je bilo zato moč zaznati tudi na bolj oddaljenih sprejemnikih.

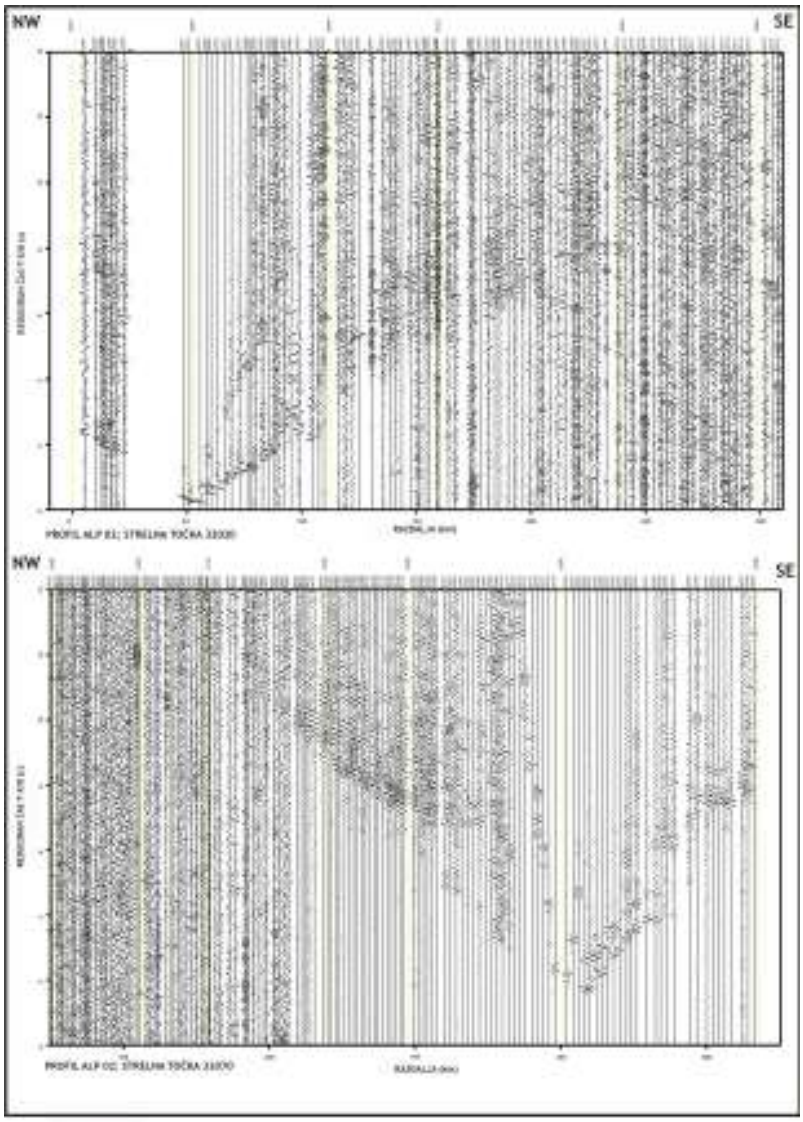
Obdelava podatkov bo dolgotrajna in po izkušnjah prejšnjih projektov bodo končni rezultati znani šele čez nekaj let. V tej fazi interpretacije podatkov smo se osredotočili na interpretacijo profila Alp02. Zanj smo se odločili zato, ker je potekal prek različnih struktur vse od Alp pa do Panonskega bazena. Ker je bilo na profilu kar 8 strelnih točk, je pokritje s signalom dobro, prav tako tudi kvaliteta podatkov, z izjemo skrajnega severo-zahodnega dela.

Interpretacija podatkov profila Alp02

Profil Alp02 je s 540 km dolžine drugi najdaljši med vsemi izmerjenimi profili v projektu Alp 2002. Profil poteka v generalni smeri SZ - JV od Tirolske prek Slovenije in Hrvaške do meje z Bosno in Hercegovino (slika 1). Začetek profila je pri Lermosu na Tirolskem, nato pa poteka mimo Innsbrucka, prečka del Visokih Tur in Ziljskih Alp, nato poteka po dolini reke Zilje in Drave in pri Pavličevem sedlu vstopi v Slovenijo. Od tam poteka mimo Solčave in Polzele do Vojnika, kjer spremeni smer rahlo proti jugu, naprej do Podčetrtka in nato po Hrvaškem prek Zagorja in Medvednice do Ivanić Grada, nato pa po Slavoniji do Slavonskega Broda. Vzdolž profila je bilo na vsake 3 km postavljenih 151 seizmografov. Strelnih točk je bilo 8 ali povprečno po ena na vsakih 67 km.

Omenili smo že razliko v kvaliteti zapisov eksplozij, ki so bile sprožene v Alpah (predvsem strelne točke 32010, 32020 in 32030) in tistih, ki so bile sprožene v manj konsolidiranih

kamninah in sedimentih (32060, 32070, 32080). Pri zadnjih je signal viden tudi do 250 km od strelne točke, medtem, ko je ta razdalja za strele iz začetka profila le 100-150 km, pri nekaterih pa celo pod 100 km (slika 3).



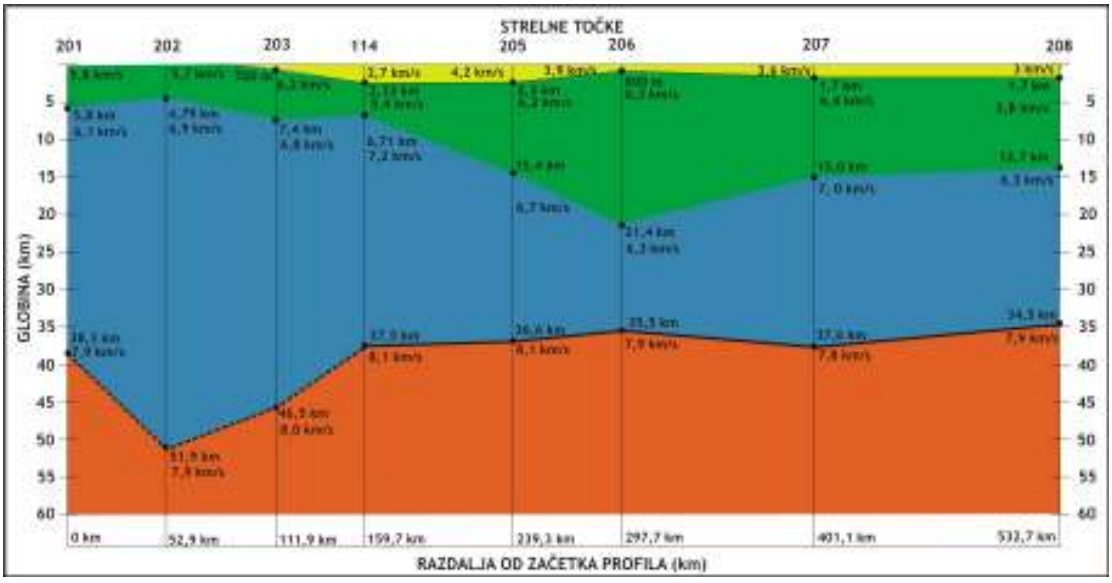
Slika 3. *Primerjava kvalitete seizmičnega zapisa na delu profila Alp02 za strela 32020 na Tirolskem in 32070 pri Ivanić Gradu*
Figure 3. *Seismic record quality comparison done for a section of Alp02 profile for shoot points 32020 in Tyrol and 32070 near Ivanić Grad*

Geofizikalna interpretacija podatkov

Podatke smo interpretirali s tremi različnimi metodami: metoda presečnega časa, tomografska inverzija in modeliranje z metodo sledenja žarkov. Vse tri metode uporabljajo podatke o časih prihodov posameznih seizmičnih faz, ki smo jih odčitali v programu ZPLOT (Zelt, 1992). Pri tem smo se najprej osredotočili predvsem na prihode refraktiranih valov na strukturah v zgornjem delu Zemljine skorje (Pg) ter na Mohorovičićevi diskontinuiteti (Pn). Kasneje pa bomo v interpretacijo vključili tudi različne reflektirane valove.

Metoda presečnega časa

Metoda temelji na izračunu debelin plasti iz podatkov o seizmični hitrosti v posamezni plasti in vrednosti presečnega časa za premico, ki na t-x diagramu poteka skozi točke prvih prihodov, ki ustrezajo refraktiranim valovom. Predhodno smo za vsakega od osmih strelov določili čase prihodov Pg in Pn faz in jih nanesli na diagram odvisnosti čas-oddaljenost od strelne točke (t-x). Prvi prihodi na seizmografih, ki so bili bližje strelni točki, ustrezajo seizmičnim valovom refraktiranim na horizontih v vrhnjem delu Zemljine skorje (Pg faza). Na določeni razdalji (razdalja prehitevanja) od strelne točke, seizmično valovanje refraktirano na Mohu, ki sicer potuje po daljši, vendar hitrejši poti, prehiti valovanje, refraktirano na horizontih v zgornjem delu skorje. Časi prvih prihodov od te točke naprej pripadajo torej valovom refraktiranim na Mohu (Pn faza). Med omenjenimi skrajnimi prihodi žarkov so lahko tudi posamezne točke, ki predstavljajo valovanje refraktirano od drugih horizontov v globljih delih Zemljine skorje. To valovanje sicer na seizmogramih običajno ne predstavlja prvih prihodov, ker ga prehiti valovanje refraktirano na Mohu.



Slika 4. *Globinski profil interpretiranih hitrostnih mej z metodo presečnega časa za profil Alp02. S črtkano linijo je označen potek Mohorovičićeve diskontinuitete pod Alpami, kjer je kvaliteta podatkov slabša (Kastelic, 2003).*

Figure 4. *Depth profile of velocity boundaries interpreted using the time intercept method. Dashed line represents the Moho discontinuity in the Alps, where the data quality is lower (Kastelic, 2003).*

Globinski profil na podlagi podatkov metode presečnega časa (slika 4) kaže globino Mohorovičićeve diskontinuitete med 34 km v Panonskem bazenu in 52 km pod Alpami. Ker je bil signal strelnih točk v Alpah šibkejši in posamezne faze slabše izražene, je tam izračun manj zanesljiv.

Pod strelnima točkama 201 in 202 ni vrhnje plasti sedimentov, kar je v Alpah tudi pričakovano (slika 4). Nadaljnje strelne točke so bile postavljene v alpskih dolinah, streli s konca profila pa so se nahajali v Panonskem bazenu. Tu vrhnja plast z nižjo hitrostjo ustreza slabše konsolidiranim sedimentom (rumena). Naslednja plast (zelena) pripada karbonatnim in magmatskim kamninam. Na SZ delu profila se omenjena plast nahaja do globine približno

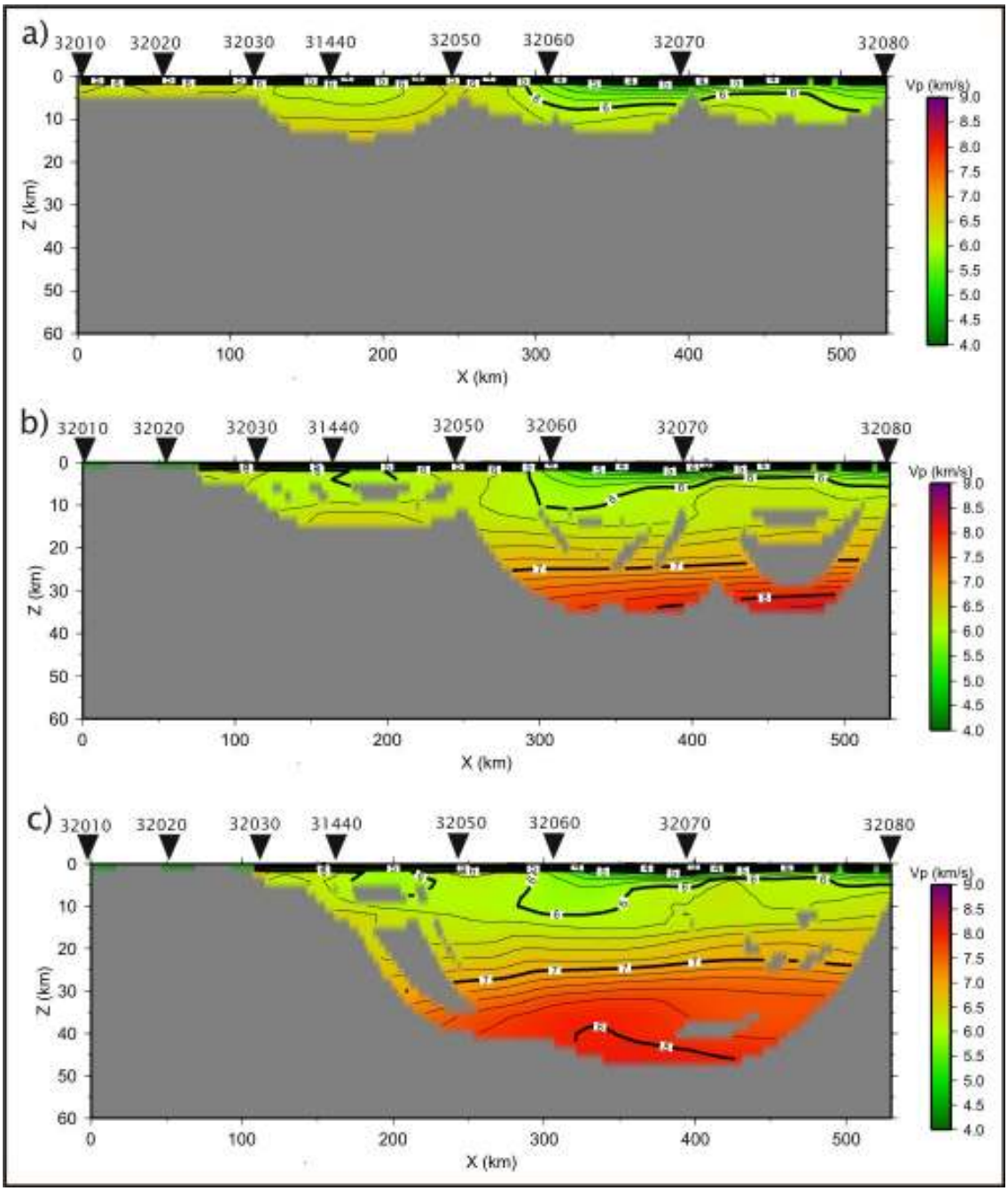
5,5-7 km. Od strelne točke pri Podkloštru se spodnja meja plasti spusti strmo iz globine 6,7 km na globino 21,4 km pod strelno točko pri Vojniku. Od te največje dosežene globine se plast karbonatov v smeri proti strelni točki pri Ivanić Gradu in naprej proti Slavonskem Brodu zopet postopoma dviga in pod lokacijo zadnje strelne točke doseže globino 13,7 km (Kastelic, 2003). Večja debelina te plasti v vzhodni Sloveniji je po vsej verjetnosti povezana s sedimentacijskimi in strukturnimi razmerami na tem območju (sedimentacija v Slovenskem bazenu, ugrezanje Celjske kotline v transpresivni zmični coni Periadriatskega lineamenta med Savskim in Labotskim prelomom). Pod plastjo karbonatnih, magmatskih in metamorfnih kamnin, ki pripada zgornjemu delu skorje, leži plast opredeljena kot spodnji del Zemljine skorje (modra barva). Glede na seizmične hitrosti (6,5-7,9 km/s) se znotraj te plasti pojavljajo metamorfne in bazične magmatske kamnine. Plast se pod strelnimi točkami v Alpah pojavlja že na globini od 5 km pa do okoli 30 km, v Panonskem bazenu pa jo zasledimo na globinah med 6,7-7 in 35 km. Z rdečo barvo je predstavljen vrhnji del plašča, ki je z Mohorovičićevo diskontinuiteto ločen od spodnjega dela Zemljine skorje. Vrednosti seizmične hitrosti se ujemajo s pričakovanimi (7,9-8,1 km/s).

Tomografska inverzija

Na osnovi podatkov o časih prvih prihodov za fazi Pg in Pn smo izvedli dvo-dimenzionalno tomografsko inverzijo s programom Iterative backprojection tomography (Hole, 1992). Rezultat je porazdelitev seizmičnih hitrosti v izbranem profilu. V začetni fazi je bil na osnovi eksperimentalnih podatkov postavljen 1D model, določeni pa so bili tudi osnovni parametri inverzije (npr. velikost celice, ki je v našem izračunu znašala 2 km). Izračun tomografske inverzije temelji na postopnem (iterativnem) popravljanju začetnega modela in sicer od površine v globino. Tako se v začetnih fazah inverzije upoštevajo podatki o časih prihodov za bližnje sprejemnike, z nadaljevanjem inverzije pa se postopno upoštevajo podatki vedno bolj oddaljenih sprejemnikov. Ker s seizmično tomografijo ne moremo ugotavljati ostrih hitrostnih diskontinuitet, dobimo zglajeno sliko strukturnih razmer. Strukture preiskanega območja so pri tomografski inverziji prikazane z obliko in potekom hitrostnih izolinij in z barvno lestvico.

Na sliki 5 so predstavljene tri iteracije tomografske inverzije za profil Alp02. Pri prvi so vidne le plitvejše strukture, pri drugih dveh pa tudi strukture v večjih globinah. Med strelnima točkama pri Vojniku (32060) in Ivanić Gradu (32070) se lepo vidi strukturna poglobitev izolinije seizmične hitrosti 6 km/s, ki približno ustreza meji sedimentnih kamnin. JV od strela 32070 se pojavlja visokohitrostna cona s seizmično hitrostjo med 6 in 7 km/s, na globini manjši od 5 km, kar je precej plitveje kot na preostalem delu profila, in lahko nakazuje intruzije magmatskih kamnin. Izolinija 8 km/s približno ustreza poteku Mohorovičićeve diskontinuitete. Med streloma pri Vojniku in Ivanić Gradu se ta, po podatkih inverzije, nahaja na globini do 40 km, medtem ko se proti strelni točki pri Slavonskem Brodu spusti na globino 45 km. To se ne ujema z do sedaj znanimi podatki, ki za to območje kažejo manjše globine Mohorovičićeve diskontinuitete. Razlog za tako odstopanje je verjetno v tem, da metoda seizmične tomografije v teh globinah ni več tako zanesljiva. Tomografska inverzija ni pojasnila strukturnih razmer pod prvimi tremi strelnimi točkami, kjer je gostota seizmičnih žarkov premajhna, do strela 32050 (Jezersko) pa je ugotovljena le struktura v plitvejših delih. Vzrok je v slabši kvaliteti podatkov zaradi večjega dušenja tistih strelnih točk, ki so bile

sprožene v karbonatnih kamninah, kar je omogočalo določanje prihodov Pg faze le na krajših razdaljah.



Slika 5. *Rezultat tomografske inverzije za profil Alp02; a) 20. iteracija, b) 40. iteracija, c) 80. iteracija. S sivo barvo so prikazana območja, ki niso bila dovolj pokrita s seizmičnimi žarki. S črnimi trikotniki in številkami so označene lokacije strelnih točk. Izolinije predstavljajo hitrosti P valov v km/s.*

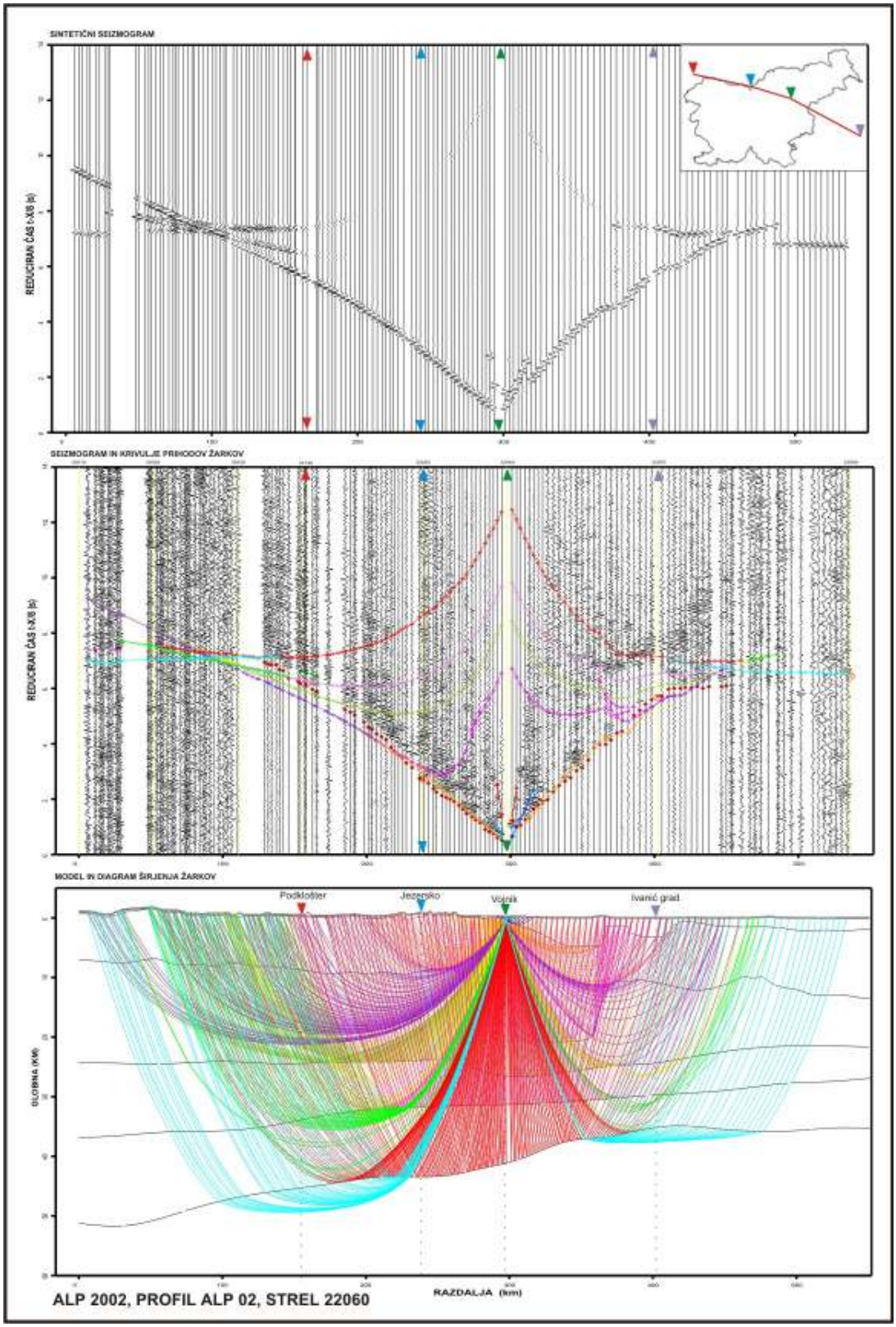
Figure 5. *Results of the tomographic inversion done for Alp02 line; a) 20. iteration, b) 40. iteration, c) 80. iteration. The areas with deficient ray coverage are shown in grey colour. Shoot point locations are shown with black triangles. The isolines represent P wave velocities in km/s.*

Modeliranje z metodo sledenja žarkov

Dvodimenzionalno seizmično modeliranje smo izvedli z računalniškim programom Seis83 (Červeny in Pšenčík, 1983; Komminaho, 1997), ki temelji na metodi sledenja žarkov. Začetni model smo postavili na osnovi podatkov prejšnjih raziskav (npr. Scarascia in Cassinis, 1997; Dragašević et al., 1990) ter podatkov tomografske inverzije. Na modelu smo definirali šest hitrostnih mej, ki ločujejo glavne strukture v Zemljini skorji (površinska plast, plast slabše konsolidiranih sedimentnih kamnin, plast masivnih sedimentnih kamnin, plast magmatskih kamnin, srednji del skorje, spodnji del skorje in vrhnji del plašča). Za vsako od plasti, ki jih omejujejo naštete meje, smo določili mejne vrednosti seizmičnih hitrosti na štirih ogliščih, ki opredeljujejo vertikalni in horizontalni hitrostni gradient v posamezni plasti. Na osnovi teh podatkov program izračuna žarke, ki se lomijo in/ali odbijejo na posamezni meji, število žarkov v vsaki skupini, pot njihovega širjenja skozi 2D profil in amplitude posameznih valov. Velika prednost nadgradnje programa Seis83 je grafični vmesnik (Komminaho, 1997) za vnos in popravljanje modela ter možnost prenosa izračunanih parametrov (žarki, časi prihodov, sintetični seizmogrami) v program ZPLOT, kjer rezultate modeliranja primerjamo z izmerjenimi podatki.

Na sliki 6 je predstavljen rezultat modeliranja za strelno točko pri Vojniku. Prikazani so sintetični seizmogram, seizmogram s krivuljo časov modeliranih prihodov in žarki skozi postavljeni model. Različne barve označujejo različne faze - poti valov skozi model. Oranžna barva odraža refraktirane žarke na bazi klastičnih sedimentov, temno modra barva pa reflektirane žarki od te meje. Vijolična barva predstavlja refrakcijo od baze sedimentnih kamnin, medtem ko so refleksi od te plasti predstavljeni z rožnato barvo. Turkizno modra barva pripada refrakciji na Mohorovičićevi diskontinuiteti, refleksi od meje med skorjo in plaščem pa so predstavljeni z rdečo barvo. Druge barve pripadajo refraktiranim in reflektiranim žarkom na ostalih hitrostnih mejah.

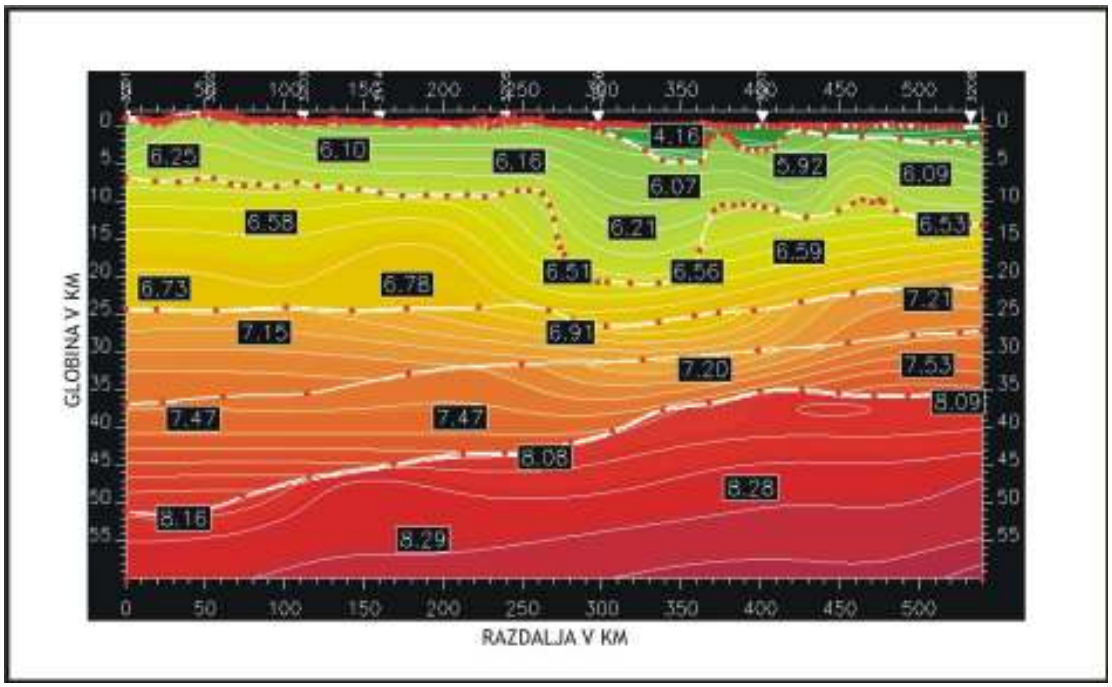
V tej fazi smo se pri modeliranju osredotočili na strukture zgornjega dela Zemljine skorje in na Mohorovičićevo diskontinuiteto, za ostale hitrostne meje pa smo podali le bolj splošen potek (slika 7). V zelo redkih primerih pripada čas prvega prihoda na seizmografu, ki je bil najbližji strelni točki, refrakciji od spodnje meje površinske plasti, oziroma na plasti nekonsolidiranih ali slabo konsolidiranih sedimentov z vrednostmi seizmične hitrosti od 2-3 km/s. Časi prvih prihodov žarkov z vrednostmi seizmične hitrosti okoli 4-4,5 km/s, ki so kot prvi prihodi opazni na seizmografih, ki so bili oddaljeni 4-60 km, se pojavljajo na delu profila JV od strelne točke 32050 ter predstavljajo spodnjo mejo plasti slabše konsolidiranih sedimentnih kamnin. Na oddaljenosti med 5 in 115 km od strelnih točk, ustrezajo časi prvih prihodov žarkom refraktiranim na bazi sedimentnih kamnin (faza Pg) na SZ delu profila, medtem ko so ti prihodi opazni kot prvi prihodi na odseku profila JVod strelne točke 3114 na oddaljenosti 10-100 km, na skrajnem JV profila pa na oddaljenosti do 80 km od strelne točke. Na oddaljenosti 100-120 km od posamezne strelne točke pripadajo, na odseku profila, ki poteka prek Alp, prvi prihodi žarkom, refraktiranim na Mohorovičićevi diskontinuiteti. Na območju Celjske kotline se opazi, da so ti prihodi bolj zgodnji in so na seizmogramih prisotni že na oddaljenosti 90 km, medtem ko so na območju Panonskega bazena vidni že na oddaljenosti okoli 75 km.



Slika 6. *Rezultati modeliranja vzdolž profila Alp02 za strelno točko 32060 (Vojnik); zgoraj: sintetični seizmogram; v sredini: seizmični zapis s časi prihodov P faz modeliranih žarkov; spodaj: diagram sledenja žarkov.*

Figure 6. *Modelling results for Alp02 line calculated for 32060 (Vojnik) shoot point; top: syntethical seismogram; middle: seismic record with time arrivals for P seismic phases of modeled rays; bottom: ray-tracing diagram.*

Geološka interpretacija



Slika 7. Model podpovršja vzdolž profila Alp02 izdelan z modeliranjem v programu Seis83. Bele črte so hitrostne izolinije, na nekaterih mestih pa so v kvadratkih podane vrednosti seizmične hitrosti (km/s).
Figure 7. Subsurface model along Alp02 line done in Seis83 modelling program. White lines represent velocity isolines. Seismic velocity values (km/s) are shown in black boxes.

V nadaljevanju podajamo geološko interpretacijo šestih plasti modela profila Alp02 (slika 7), ki je rezultat modeliranja z metodo sledenja žarkov. Vrhnja plast ustreza pretežno klastičnim sedimentom. Na območju Alp je ta plast izredno tanka in ne presega debeline 150-200 m, razen v alpskih dolinah, kjer so plasti holocenskih ledeniških in rečnih sedimentov debelejše. V samih Alpah pa gre verjetno za območje bolj preperelih karbonatnih kamnin. Omenjena plast se močno odebeli na delu profila JV od strelne točke pri Vojniku, torej na območju Celjske kotline. Ta poglobitev je verjetno povezana s sedimentacijskim bazenom. Debelina plasti na tem območju znaša do 5 km. Na območju Medvednice med streloma pri Vojniku in Ivanić Gradu se debelina plasti zmanjša na 1,5 km (Kastelic, 2003). Zmanjšanje debeline plasti sedimentov na tem delu je povezano s pojavljanjem višje hitrostne cone v večjih globinah, ki jo geološko predstavljajo magmatske intruzije ter kompleksi metamorfnih kamnin Medvednice. JV od strela 32070 se debelina plasti zopet poveča in ostane do konca profila skoraj konstantna. Naslednja plast ustreza predvsem karbonatnim kamninam, po vrednostih seizmičnih hitrosti pa so v tej plasti lahko prisotne tudi magmatske kamnine kisle sestave. Na območju Alp se ta plast pojavlja le nekaj kilometrov od površja pa vse do globine 13 km. Med streloma 32020 in 32030 je na območju Turskega okna hitrostna anomalija z vrednostmi hitrosti do 6,2 km/s. Debelina plasti je vse od začetka profila pa do strelne točke 32050 večinoma konstantna, približno pri Solčavi pa pride do velike poglobitve, ki jo omejuje strma cona. Poglobitev je široka približno 100 km in je SZ od strela 32070 zopet omejena s strmo cono. Na tem območju sega omenjena plast vse do globine 20 km, kar predstavlja poglobitev za 10 km v primerjavi z njeno povprečno globino. Vrednost seizmične hitrosti v tej coni

znašajo 6,2 km/s, kar je za take globine nizka vrednost. To nakazuje globoko cono sedimentnih kamnin, ki so bile pogreznjene ob tektonskih strukturah, ali pa so se že sedimentirale na območju, ki je bilo v prejšnjih procesih deformirano v tako stanje. JV od omenjene poglobitve se plast ponovno nahaja na povprečni globini 13 km z rahlimi dvigi na območju Medvednice in Papuka, verjetno zaradi že pri prejšnji plasti opisanih struktur.

Strukture v globljih delih skorje so nakazane le približno, vidne pa so posamezne anomalije višje hitrosti ter spremembe debelin posameznih struktur. Za bolj podrobno sliko pa bo potrebno z modeliranjem nadaljevati. Struktura Mohorovičićeve diskontinuitete kaže na dvig iz globine 51 km na območju pod Alpami na globino 35 km pod Panonskim bazenom.

Sklepi

Rezultati opravljenih analiz so pokazali, da je za dobro interpretacijo zelo pomembna kvaliteta merskih podatkov. Tako lahko podatke z dobrim razmerjem signal/šum pričakujemo le pri strelih v manj kompaktnih sedimentnih kamninah, kjer se le manjši del pri eksploziji sproščene energije porabi za drobljenje kamnine.

V celotnem profilu Alp02 se globina do Mohorovičićeve diskontinuitete postopoma dviga od približno 51 km na zahodu do približno 36 km na vzhodu. Na območju med Mozirjem in Medvednico je na dolžini 100 km vidna večja strukturna poglobitev baze sedimentov iz sicer dokaj stalne globine 8 km na 21 km. Omenjeno anomalijo lahko potrdimo z vsemi metodami določitve hitrostnih kontrastov. Med Mozirjem in Medvednico se anomalija odraža tudi v višjih plasteh, kot poglobitev plasti najnižje hitrosti, ki predstavlja pretežno klastite in karbonatne kamnine nižjih gostot. Cona se pojavi v Celjski sinklinali in poteka preko pretežno miocenskih in pliocenskih klastitov do Medvednice, kjer se podobno kot baza sedimentov dvigne praktično do površja. V območju med Medvednico in Papukom v Panonskem bazenu dosega globino okoli 2 km. Omenjena globina klastitov sovpada s podatki globokih vrtin na Hrvaškem. Anomaliji Medvednice in Psunja sta opazni le pri rezultatih modeliranja in tomografske inverzije, medtem ko je anomalija med Mozirjem in Medvednico zaradi večjega obsega vidna tudi na kontrastno šibkejšem izračunu presečnih časov.

Za natančnejšo strukturno podobo in 3D model poteka Mohorovičićeve diskontinuitete ter sestave skorje bo potrebno analizirati tudi ostale profile projekta Alp 2002. Dobljeni podatki bodo omogočili povezavo interpretacije z večjimi strukturnimi enotami.

Zahvala

Predstavljeni rezultati predstavljajo le del aktivnosti delovne skupine projekta Alp 2002 (Alp 2002 Working Group), ki jo vodi prof. Ewald Brueckl iz Tehnične univerze na Dunaju. Izvedba projekta ne bi bila mogoča brez pomoči številnih sodelavcev Urada za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje in študentov geologije in fizike, ki so opravili večino terenskega dela. Vsem prisrčna hvala. Raziskave v Sloveniji je financirala Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo.

Literatura

Aljinović, B., Prelogović, E., Skoko, D. 1987: Novi podaci o dubinskoj geološkoj građi i seizmotektonski aktivnim zonama u Jugoslaviji. Geološki vjesnik, 40, 255-263, Zagreb.

Aric, K., Gutdeutsch, R., Klinger, G., Lenhardt, W. 1987: Seismological studies in the Eastern Alps. In: Fluegel, H.W., Faupl, P. (eds): Geodynamics of the Eastern Alps, 325-333, Deuticke, Vienna.

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.

Červeny, V., Pšenčik, I. 1983: SEIS83 – numerical modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structure by the ray method. World data center, Boulder.

Dragašević, T., Andrić, B., Joksović, P. 1990: Strukturna karta Mohorovičićevog diskuntinuiteta Jugoslavije sa tumačem, 1: 500 000. Zvezni geološki zavod, 46 str., Beograd.

Gosar, A. 2003: Raziskave litosfere jugovzhodnih Alp s 3D refrakcijsko seizmiko (projekt Alp 2002) – meritve v Sloveniji. Geologija 46/1, 103-113.

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

Kastelic, V. 2003: Refrakcijske seizmične raziskave litosfere na območju jugovzhodnih Alp. Diplomsko delo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 126 str.

Komminaho, K. 1997: Software manual for programs MODEL and XRAYS – s graphic interface for SEIS program package. University of Oulu, rep. no. 20, 31 pp.

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

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