

**NUOVA INTERPRETAZIONE DI DATI DI SISMICA A RIFRAZIONE PROFONDA
NEGLI APPENNINI SETTENTRIONALI**

INDICE

RIASSUNTO	pag. 551
ABSTRACT	” 551
INTRODUZIONE	” 551
CAMPAGNA SISMICA TOSCANA 1978 E TIRRENO 1974: DIGITALIZZAZIONE, ANALISI SPETTRALE E METODI DI IN- TERPRETAZIONE	” 552
L'ESPERIMENTO 1978	” 554
<i>Linea 1</i>	” 554
<i>Linea 2</i>	” 554
<i>Linea 3</i>	” 555
<i>Linea 4</i>	” 557
<i>Fan A</i>	” 559
L'ESPERIMENTO 1974: SETTORE TIRRE- NICO	” 559
CONCLUSIONI	” 561
BIBLIOGRAFIA	” 564

RIASSUNTO

Nel contesto degli studi per l'acquisizione del profilo NVR CROP 03 attraverso la penisola italiana dal Tirreno all'Adriatico, è presentato in questo lavoro il risultato del ri-processamento in forma digitale delle campagne DSS 1978 e 1974 nel Tirreno settentrionale e negli Appennini settentrionali, con una nuova interpretazione dell'assetto crostale dell'area.

Un raddoppio crostale, implicante la crosta inferiore ed il mantello, identificato nel sottosuolo della zona compresa tra la Val di Chiana e la Val Tiberina viene controllato anche longitudinalmente. I profili trasversali (linea 3 e 4) mostrano inoltre come la strutturazione crostale si mantenga piuttosto uniforme lungo tutta l'area interessata dagli esperimenti.

La Moho nella Toscana Marittima mostra un'alta riflettività: le supposte evidenze di uno *slab* europeo al di sotto di quest'area a circa 60 Km di profondità vengono qui interpretate come effetto di una multipla PmP, mentre viene fatta l'ipotesi, di un piano analogo ma più superficiale (30-40 Km) fortemente immergente ad est modellato subito ad occidente dell'Isola d'Elba.

ABSTRACT

In the context of the studies for the acquisition of the NVR CROP 03 profile across the Italian peninsula from southern Tuscany to the Adriatic Sea, a reappraisal in digital form of the DSS 1978 and 1974 campaigns in the Northern Tyrrhenian and in the Northern Apennines, with a new interpretation of the crustal structure, is presented in this paper.

A crustal doubling, affecting lower crust and mantle, identified under the area between the Val di Chiana and the Tiber Valley, is longitudinally constrained. The transversal profiles, (Lines 3 and 4) show quite a uniform crustal structure throughout the entire area investigated by the experiments.

(*)Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico - CNR, Milano.

In southern Tuscany, the Moho shows a high reflectivity: the supposed evidence of a European slab 60 Km deep under this area is here explained as the effect of a PmP multiple. On the other hand, a similar plane is hypothesized here, much shallower (30-40 Km) and dipping to the East, modelled near the western coast of Elba Island.

PAROLE CHIAVE: Sismica a rifrazione, Geofisica, Tirreno Settentrionale, Appennini Settentrionali.

KEY WORDS: Refraction seismic, Geophysics, Northern Tyrrhenian, Northern Apennines.

INTRODUZIONE

Vi sono molte evidenze nei dati geofisici e geologici acquisiti dai progetti EGT, CROP-ECORS e NFP 20 (FREEMAN *et alii*, 1990) che l'origine della catena alpina meridionale è il risultato del retroscorrimento neogenico di scaglie di crosta Adriatica, basamento e copertura in connessione con un cuneo litosferico Adriatico che sovrascorse sulla litosfera europea. La stretta correlazione in tempo esistente tra i bacini di avanfosca formati sulla placca Adriatica e quelli impostati sulla placca europea indicano che il sud-alpino ed il nord-alpino sono settori di un unico sistema e dividono una comune evoluzione neogenica. L'evoluzione degli Appennini Settentrionali è stata però marcata da eventi peculiari: la deriva del blocco Sardo-Corso durante l'Oligocene superiore seguita da una sua rotazione nel Miocene inferiore, la nascita del bacino Tirrenico nel Tortoniano, nonché l'impostazione nell'area toscana di un flusso di calore di entità anormalmente elevata e di un vulcanismo di non univoca determinazione. Un punto di importanza fondamentale è inoltre la coesistenza dal Tortoniano ad oggi di aree in distensione nelle zone interne e in compressione/sedimentazione nella zona esterna della catena, associate ad una migrazione spazio/temporale delle stesse da ovest verso est (ELTER *et alii*, 1975; LAVECCHIA & STOPPA, 1989), nonché la migrazione verso est del magmatismo della Provincia Tosco Laziale (BARBERI *et alii*, 1971; CIVETTA *et alii*, 1978).

Le principali questioni ancora aperte in questo settore del Mediterraneo occidentale sono: i) la supposta presenza di uno *slab* europeo inattivo tra l'isola d'Elba e la costa Tirrenica, dall'interpretazione originale (Fig. 2) dei dati della campagna DSS 1974; ii) la natura del mantello anomalo a 20-25 km nel settore Toscano; iii) il significato del salto nella profondità della Moho tra i settori Toscano e Adriatico, in corrispondenza dell'isolinea a 0 mgal dell'anomalia di Bouguer.

Un'accurata digitalizzazione dei dati sismici delle campagne 1974 (linea 3) e 1978 è stata eseguita allo scopo di migliorare la qualità dei dati (DE FRANCO *et alii*,

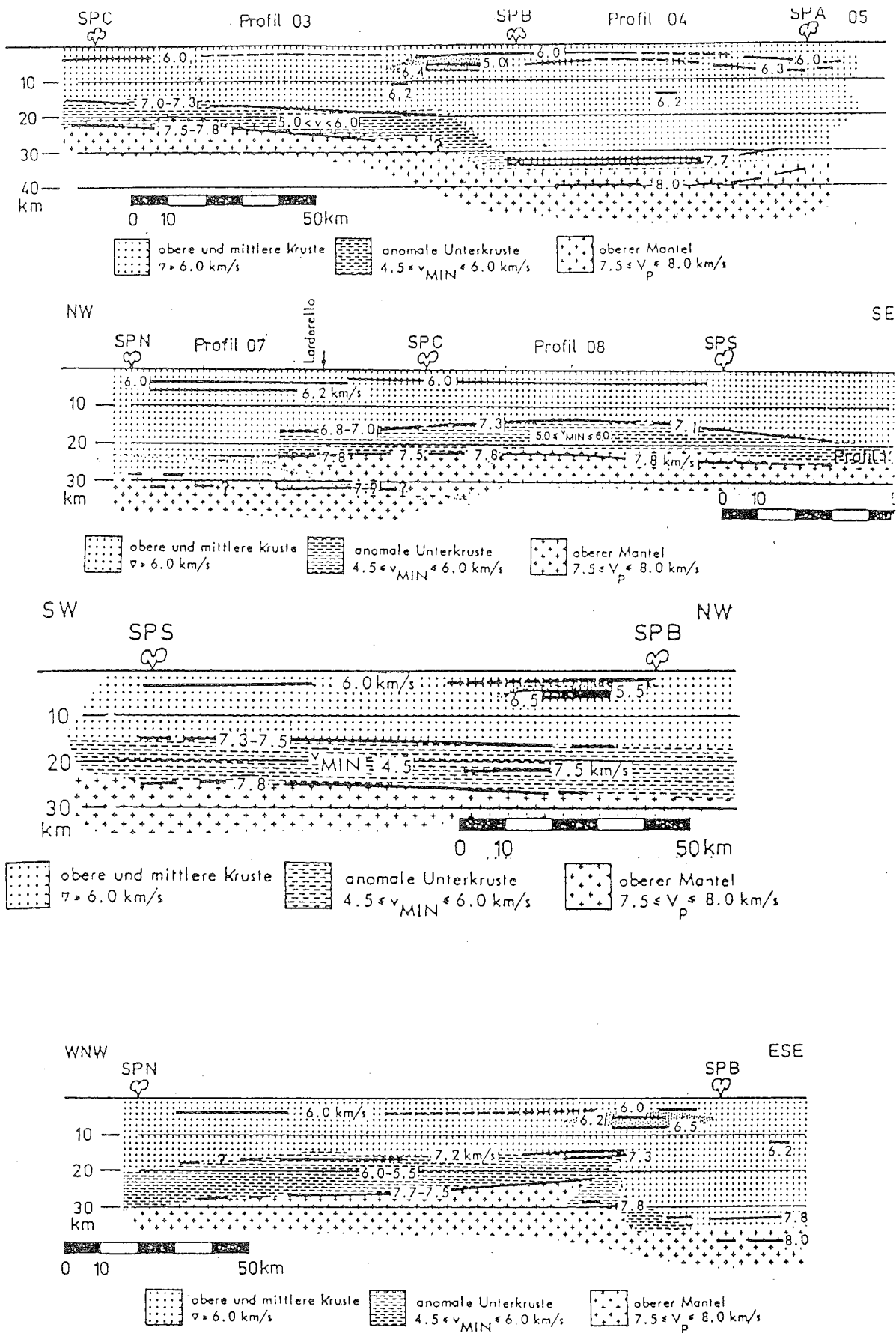
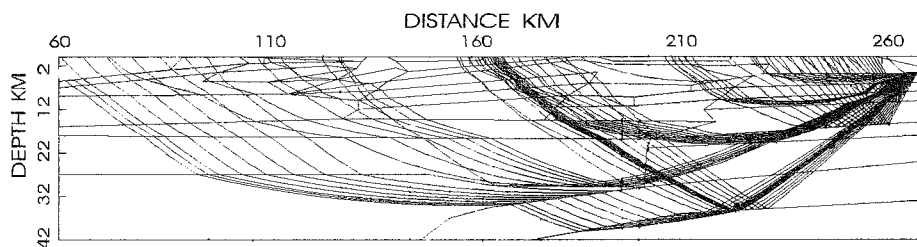
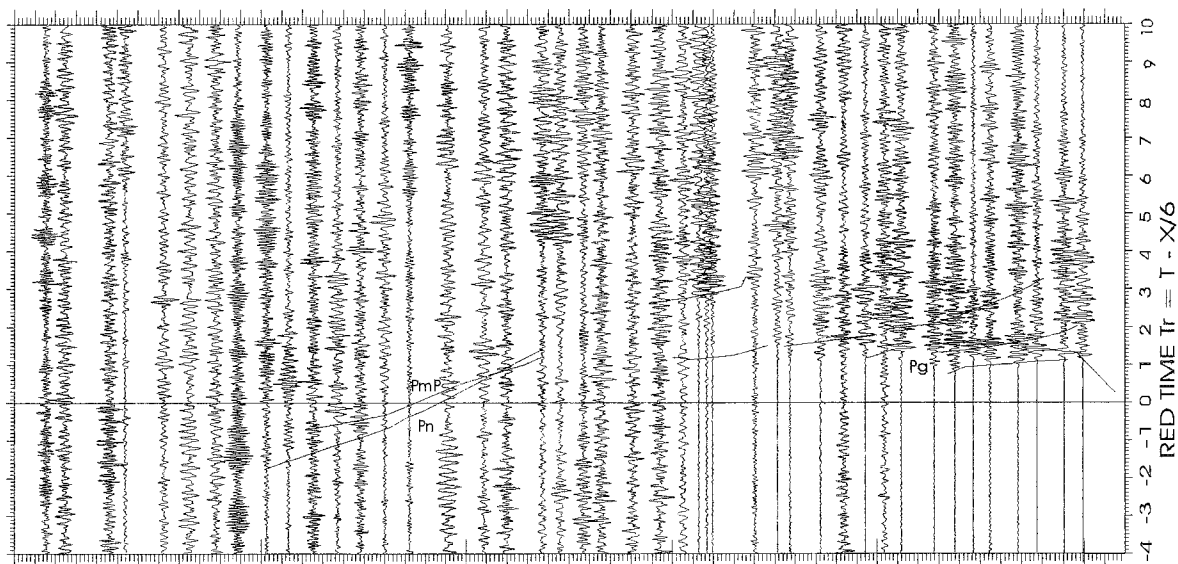


Fig. 2 - Risultati dell'interpretazione originale basata sui dati analogici (WIGGER, 1984). Dall'alto: linea 1,2,3,4.

LINE 1 sp A vs West



LINE 1 shot points A, B, C

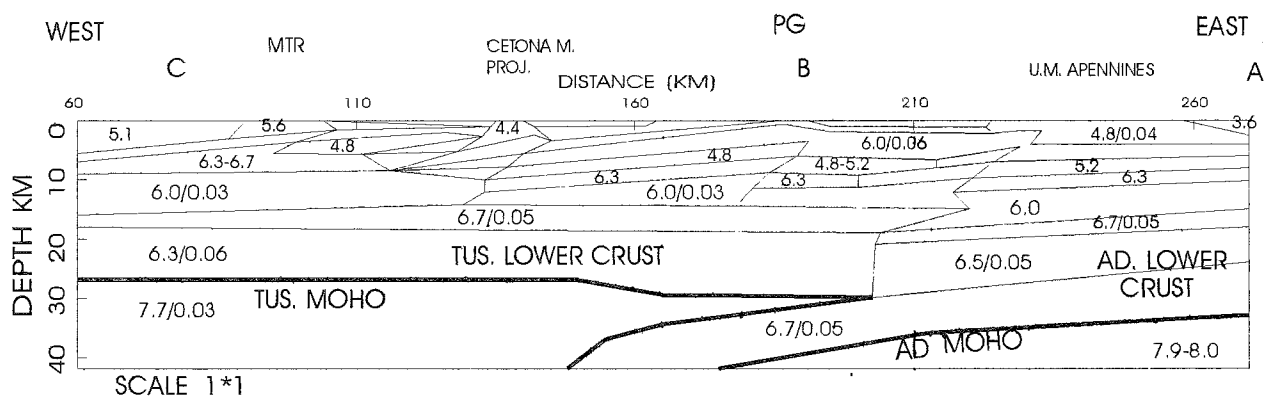


Fig. 3 - In alto: ray tracing e comparazione tra arrivi calcolati e dati sperimentali relativi al punto di scoppio A della linea 1. In basso: modello sismico finale. In grassetto gli orizzonti riferiti alle discontinuità crosta-mantello. Velocità in Km/s, gradienti in Km/s/Km.

tazione originale di questa linea (GIESE *et alii*, 1981; WIGGER *et alii*, 1984) arrivi ritardati dal punto di scoppio N erano stati interpretati come fasi PmP riflesse da una Moho profonda circa 30 Km, modellandone quindi un brusco ribassamento a partire dal limite settentrionale del campo di Larderello. Poiché tale informazione non sembra convalidata dalla linea 1 interessante, e dato che questi arrivi sembrano piuttosto paralleli alla fase PmP proveniente dalla Moho a 23 Km, si preferisce qui interpretarle come multiple generate a livelli intercostali al di sotto del campo di Larderel-

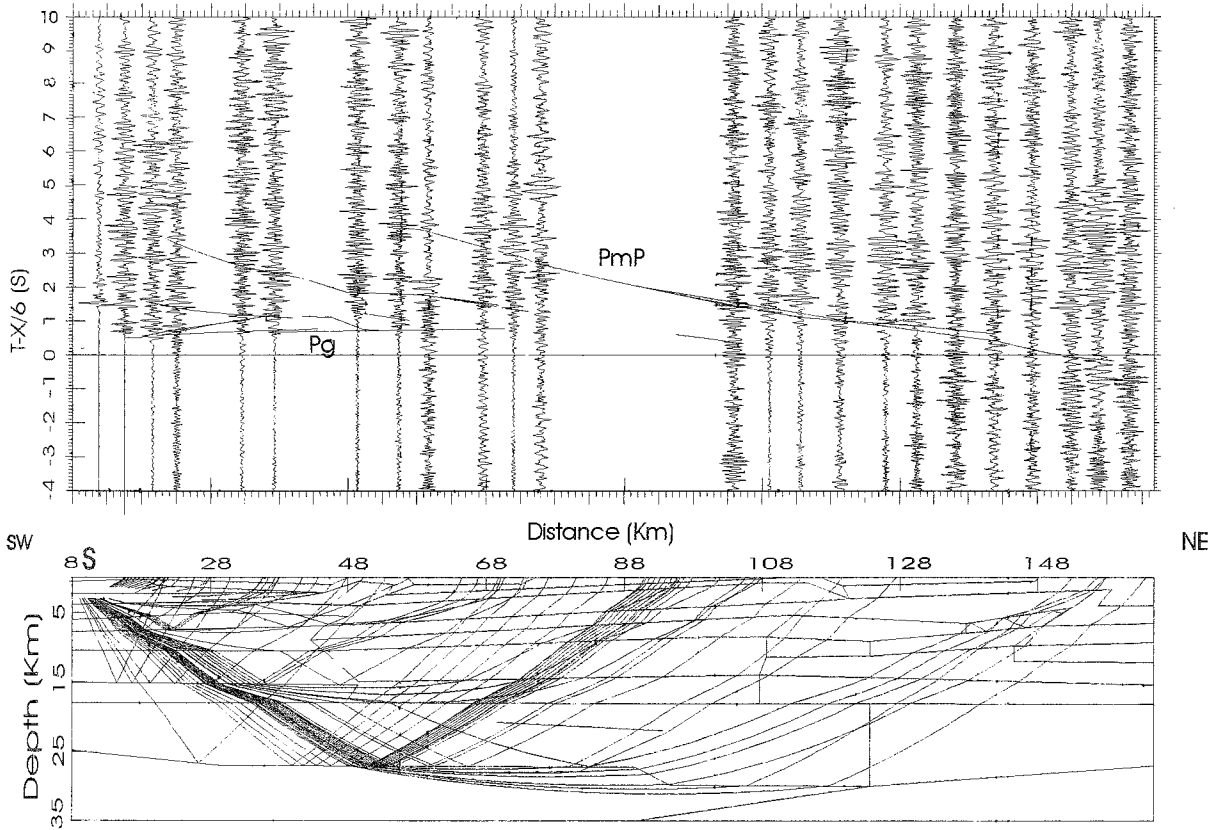
lo, dove anche in altri lavori sono documentate forti fasi riflesse (BATINI *et alii*, 1983).

La crosta inferiore ed il mantello superiore lungo questa linea presentano quindi una struttura semplice ed abbastanza omogenea lateralmente.

Linea 3

Questa linea attraversa in direzione SW-NE la regione vulcanica dei Monti Vulsini, i bacini neogenici di Radicofani e Chiani passando per la prosecuzione meridionale della dorsale del M. Cetona, a nord del

Line 3 s.p. S vs. NE



LINE 3 s.p. B, S

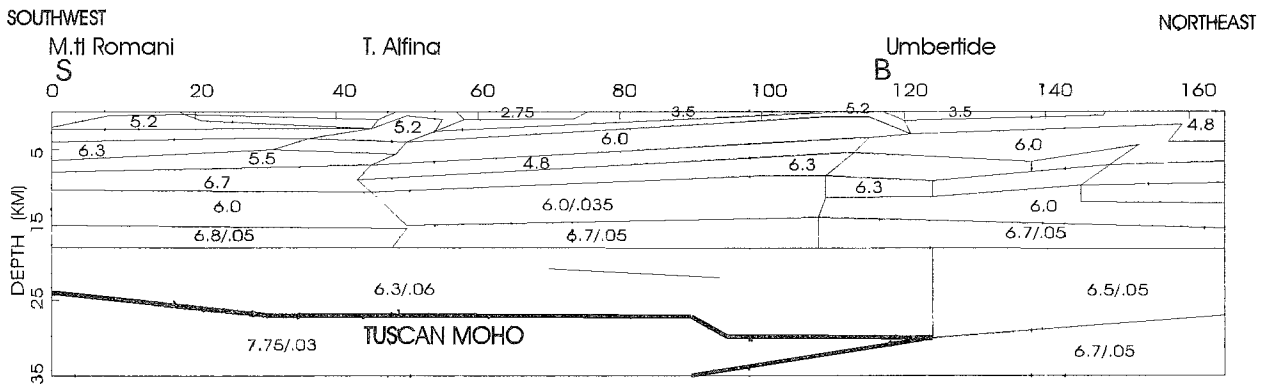


Fig. 5 - In alto: ray tracing e comparazione tra arrivi calcolati e dati sperimentali relativi al punto di scoppio S della linea 3. In basso: modello sismico finale.

Non sono ipotizzati in questo modello le forti inversioni di velocità, fino a 4.5 Km/s, nella crosta inferiore, presenti nell'interpretazione originaria (GIESE *et alii*, 1981) nonostante le fasi correlate appaiano praticamente le stesse. A parte la diversa definizione, i due modelli appaiono infatti simili nei tratti fondamentali e la differente scelta nella profondità della Moho deriva quindi sostanzialmente dalla diversa modellizzazione della crosta inferiore.

Linea 4

La linea attraversa in direzione NE-SW le porzioni settentrionali dei graben neogenici di Volterra, Siena

e Val di Chiana fino a raggiungere la Valle del Tevere (Fig. 6). Questa linea è molto più povera di vincoli per la crosta superiore rispetto alle precedenti, eccetto la parte meridionale del tracciato. A nord sono comunque disponibili perforazioni e linee a riflessione che rendono possibile, dal punto di scoppio N fino al limite orientale degli affioramenti del graben della Val d'Elisa, la ricostruzione del tetto del subsatrato dei bacini (GHELARDONI *et alii*, 1969; COSTANTINI *et alii*, 1988). Sono documentati in particolare forti elisioni di serie, con le formazioni anidritiche e filladiche a diretto contatto con i depositi neogenici.

Sono visibili nella parte superiore del modello le

di mantello toscano già identificato dalla linea 1. Anche nell'interpretazione originale era stata modellata in quest'area un ribassamento della Moho verso est, dell'ordine di 8-10 Km.

Fan A

Durante il lavoro di inventario e riorganizzazione dei dati analogici sono stati trovati nastri e fogli di campagna relativi alla registrazione di un profilo a ventaglio da parte di 31 stazioni del gruppo di acquisizione tedesco: 27 di esse sono risultate utili per essere utilizzate e sono state perciò digitalizzate. I dati di questo *fan* sono quindi da considerarsi del tutto inediti, poiché non vi è traccia della loro utilizzazione nel lavoro originale.

Le stazioni, posizionate lungo la traccia del profilo 2 hanno registrato il primo dei due scoppi nel punto A. Lo specchio del *fan* risulta quindi una linea orientata NNO-SSE di 78 Km, tra Arezzo e la terminazione settentrionale dei Monti Martani passando per la sponda orientale del Lago Trasimeno. Nell'interpretazione bisogna tenere conto che la geometria di acquisizione non è circolare, essendo la porzione settentrionale più lontana dal punto di scoppio rispetto a quella meridionale.

In figura 7 sono riportate una sezione *film* ridotto ad 8 Km/s per mettere in evidenza la fase Pn, nonché una sezione corretta di Normal Moveout (NMO) con una velocità pari a 6.2 Km/s. Si può vedere come il rapporto segnale-rumore non sia dei migliori, ma l'intersezione con la linea 1 consente di tracciare una correlazione relativa alla fase Pn, che sembra indicare un approfondimento della Moho Adriatica verso sud.

Nella sezione corretta di NMO si può riconoscere la fase PmP relativa alla Moho Toscana, inclinata anch'essa verso sud passando da 9 s. *Two Way Time* (28 Km di profondità con la vel. di correzione sopraddetta) fino a 11.2 s. TWT (35 Km). Tale correlazione sembra perdersi verso il limite meridionale dello specchio mentre ne sembra evidente un'altra, più profonda, tra 13 e 15 s. TWT forse appartenente alla Moho adriatica, viste le profondità di 40-47 Km.

L'analisi di questo *Fan* sembra quindi confermare la presenza di una sovrapposizione crostale nella zona del Lago Trasimeno ed aggiunge l'informazione di un approfondimento delle due Moho verso sud, viste lungo una direttrice NNW-SSE. Un'ipotesi alternativa è che tale immagine sia conseguenza di una geometria concava di approfondimento della Moho adriatica, per cui anche se l'immersione di tale superficie rimane verso ovest lo specchio del *fan* si posiziona su porzioni progressivamente più profonde verso sud.

L'ESPERIMENTO 1974: SETTORE TIRRENICO

Vengono qui illustrati i risultati dell'interpretazione relativa ai 20 scoppi tra la Corsica e l'Isola d'Elba: I dati hanno fornito sezioni *film* di ottima qualità, con arrivi a grande ampiezza fino a oltre 200 Km di distanza. Come esempio, in figura 8 è riportata la sezione *film* relativa agli scoppi 303-347, in posizione coincidente.

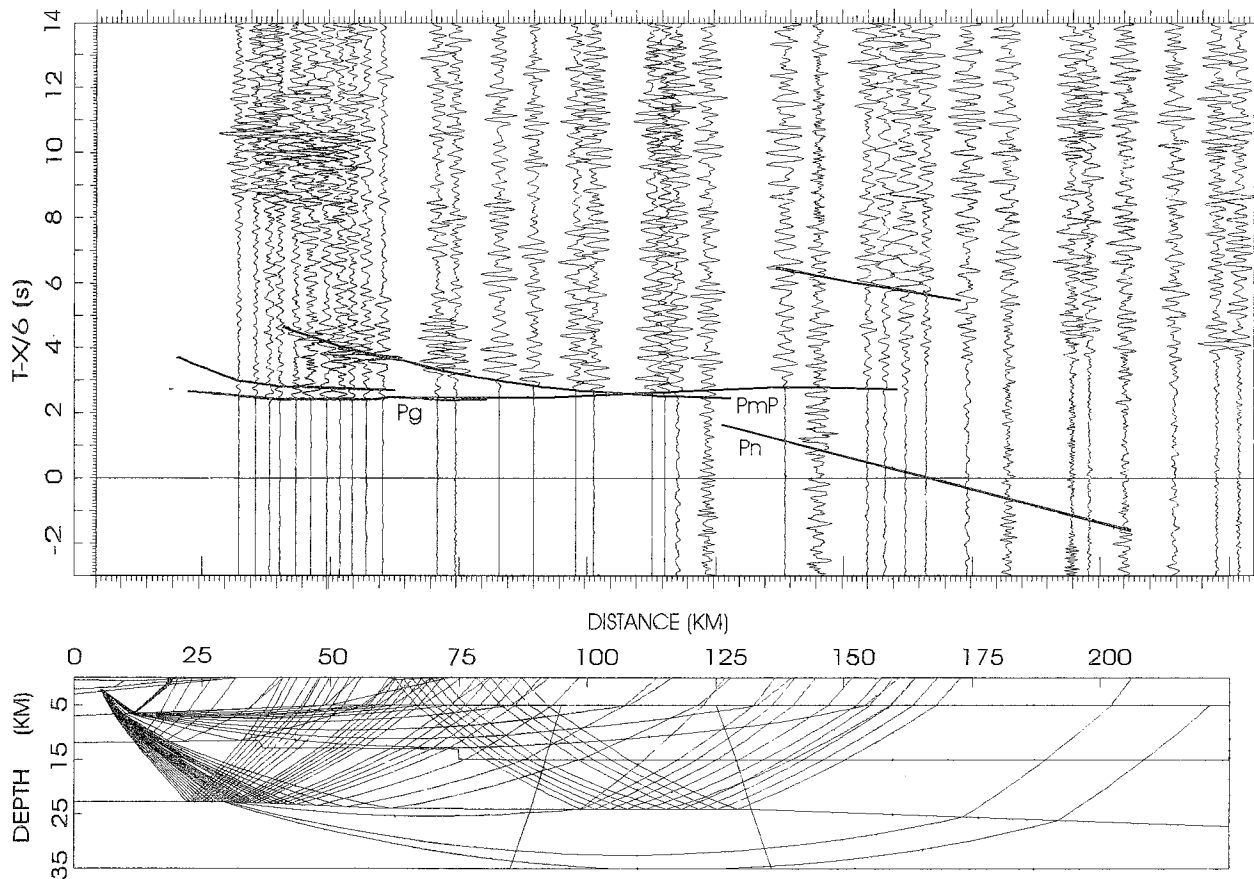
Tutte le sezioni *film* mostrano fasi Pg molto chiare ed energetiche: i primi arrivi sulle stazioni dell'Elba si allineano secondo una fase rifratta in un'unità con velocità media di 5.8 Km/s. Si può stimare, anche in

base ai vincoli disponibili (BARTOLE *et alii*, 1991) una velocità media al di sopra di questo rifrattore pari a 3.8 - 4 Km/s per cui, considerando velocità a tempi intercetti la profondità di questo rifrattore è stimata in circa 7 Km.

La seconda fase più chiaramente correlabile è quella relativa ad arrivi a forte ampiezza disposti lungo un'iperbole di riflessione ben visibile a distanze tra 60 e 140 Km con punto critico intorno ai 70 Km. La fase rifratta coniugata, di ampiezza molto debole, definisce una velocità di 7.7 Km/s identificando quindi quest'orizzonte come discontinuità crosta-mantello. Il controllo cinematico ne definisce la profondità a circa 23 Km sotto l'Isola d'Elba, con andamento leggermente immergente verso est. In corrispondenza delle stazioni di registrazione nell'area del campo geotermico di Larderello la dromocrona di riflessione subisce un disturbo ed un certo ritardo in tempi, da mettere quasi sicuramente in connessione con la situazione termica dell'area. Le anomalie di velocità qui rilevate, come riportato per la linea 2-78 intersecante, sono state introdotte nel modello cinematico. Come si può vedere in figura 9b che riporta una trasformazione in NMO di un gran numero di registrazioni, la Moho in quest'area presenta un'estrema riflettività.

Un'altra fase a grande ampiezza riguarda arrivi ritardati chiaramente visibili a distanze tra 140 e 180 Km: per distanze superiori la correlazione perde di evidenza. Nell'interpretazione originale (MORELLI *et alii*, 1977) veniva esclusa la possibilità che si trattasse di una multipla delle riflessioni primaria PmP causa l'estensione più limitata della fase in oggetto, che veniva invece interpretata come riflessione primaria da un'orizzonte immergente ad est posto a circa 60 Km di profondità, più o meno al di sotto della costa Toscana. In realtà proprio la presenza della costa, diminuendo il forte coefficiente di riflessione del fondale marino, può spiegare perché questa dromocrona appaia più corta della primaria, come si può vedere in figura 8a. I tentativi di modellizzare questa fase come nell'interpretazione originale costringono ad accettare l'ipotesi di un mantello toscano di spessore molto ridotto, e l'interposizione di almeno 30 Km di spessore di materiale con velocità non superiore a 6.6 Km/s, con tutti i problemi di ordine isostatico che ciò comporta. Per queste ragioni si preferisce qui accettare l'ipotesi, più semplice, della multipla PmP. I risultati dell'esperimento EGT (European Geotraverse, EGGER, 1992) che si avvaleva anch'essa di scoppi in mare e registrazioni in terra, mostrano come in esperimenti di questo tipo la presenza di fasi multiple a grande ampiezza siano un fenomeno estremamente frequente, ed esteso sia a fasi intracrostali che riflesse e rifratte dal mantello.

Una spiegazione analoga può essere data per le fasi a grande ampiezza sugli 8 secondi in tempi ridotti nelle registrazioni dell'Isola d'Elba: l'ipotesi alternativa (Fig. 9a) è che si tratti di riflessioni primarie da un orizzonte fortemente immergente ad est a circa 35 Km di profondità sulla verticale degli scoppi, una ventina di Km ad ovest della costa occidentale dell'Elba. Una posizione più chiara su questo problema potrà essere presa fra breve, quando tutti i dati relativi a questo esperimento saranno processati ed interpretati. Anche i primi arrivi ben evidenti nelle sezioni *film* ad *offset* maggiori di 150 Km costituiscono un dato molto singolare, presentando una velocità apparente di 6 Km/s ma essendo difficilmente attribuibili a fasi intercrostali o



LINE 3-74 s.p. 303-347

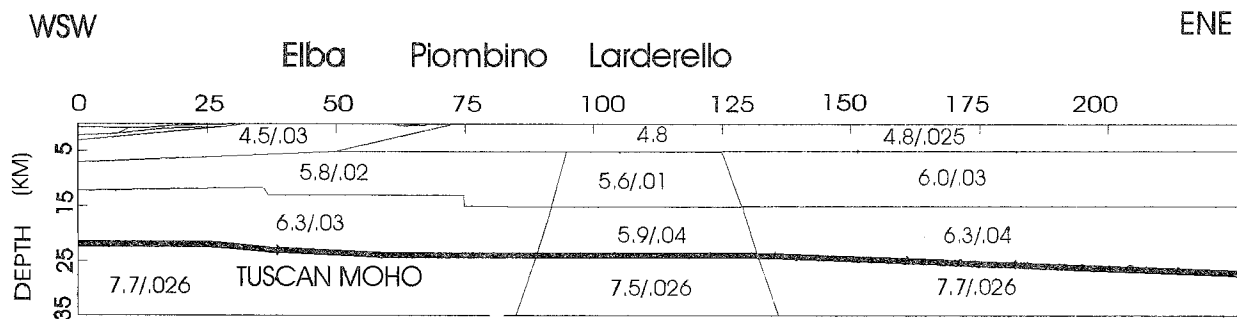


Fig. 8 - In alto: ray tracing e comparazione tra arrivi calcolati e dati sperimentali relativi ai punti di scoppio coincidenti 303-347 della linea 3 dell'esperimento 1974. La fase ritardata a circa 6 sec. in tempi ridotti è modellata come multipla semplice della fase PmP. in basso: modello sismico finale.

riflessioni PmP data la distanza in oggetto. L'interpretazione delle registrazioni degli scoppi ad ovest della Corsica, interessando profondità maggiori, contribuirà alla conoscenza delle geometrie litosferiche di quest'area.

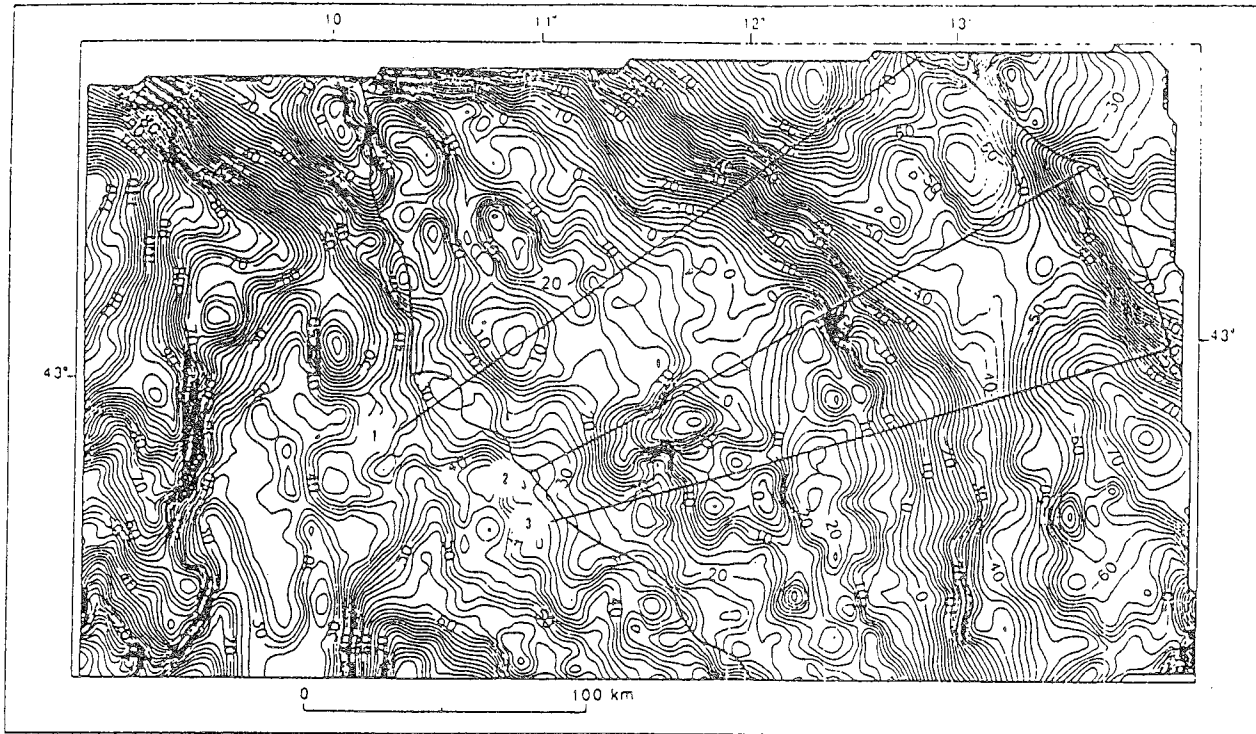
I risultati fin qui ottenuti sulla struttura crostale di quest'area sono in buon accordo con quelli dell'esperimento EGT, sia per la distribuzione delle velocità che per la profondità delle interfacce.

CONCLUSIONI

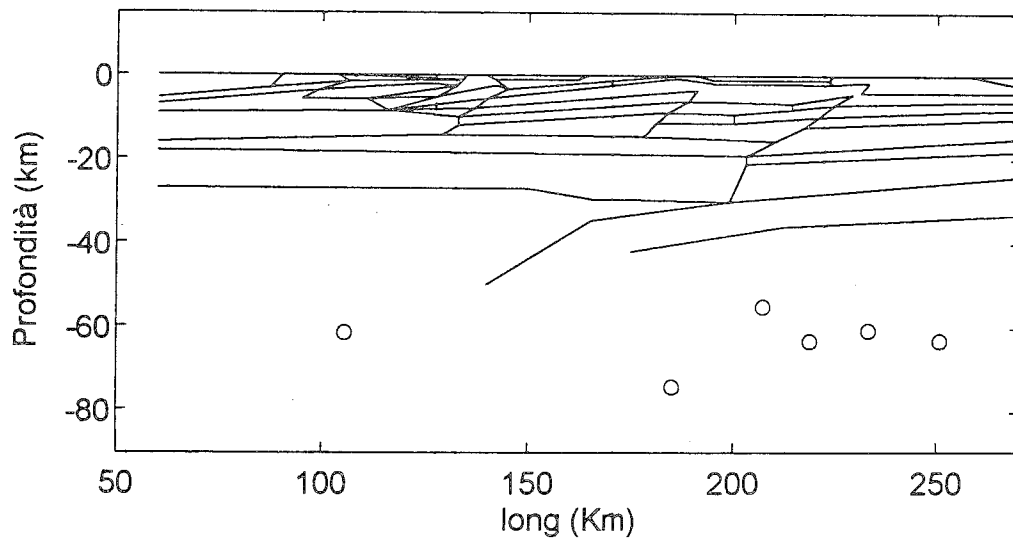
Con questo lavoro si è ottenuta una ricostruzione delle distribuzioni delle velocità nel settore crostale

compreso tra la Toscana marittima e le Marche esterne, e l'identificazione di nuovi elementi strutturali legati alla evoluzione geodinamica dell'area interessata dall'esperimento.

Si è visto come la crosta dei settori toscano e umbro-marchigiano mostra una sequenza stratigrafica caratterizzata da alternanze di livelli ad alta e bassa velocità: le differenze tra i due settori riguardano essenzialmente il minor spessore della crosta inferiore, la minor velocità sismica del mantello toscano e la presenza in questo settore di velocità più elevate a livelli più superficiali. Il raddoppio crostale, implicante la crosta inferiore ed il mantello, identificato nella zona compresa tra la Val di Chiana e la Val Tiberina (PONZIANI et alii, 1994) è controllato anche longitudinalmente,



Ipocentri tra Lat.42.6-43.6



DISTANCE (km)

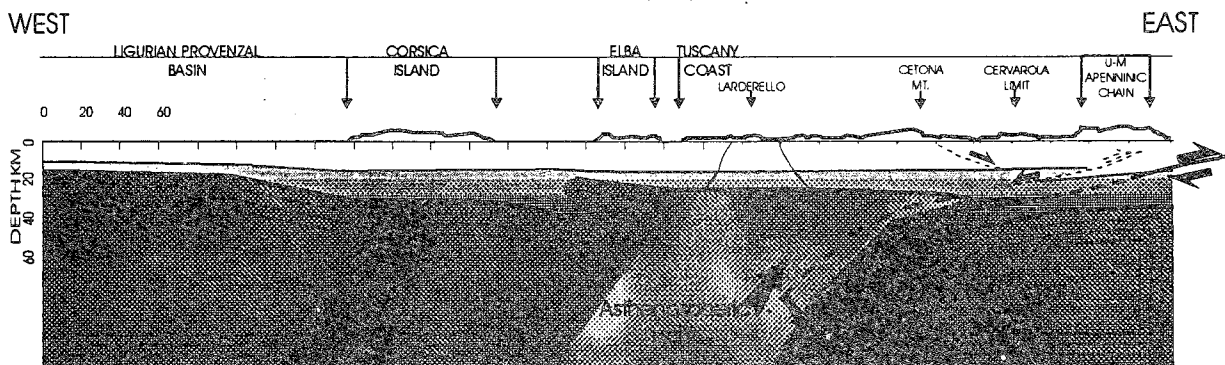


Fig. 10 - In alto: anomalie di Bouguer in Italia Centrale (Carta Agip S.p.A & Serv. Geol. D'Italia). Equidistanza: 2 mgal. Al centro: localizzazione dei terremoti profondi più energetici nell'area interessata dall'esperimento 1978. Da: AMATO *et alii*, 1991. In basso: schema della modellizzazione finale ipotizzata.

- ELTER P., GIGLIA G., TONGIORGI M. & TREVISAN L. (1975) - *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to Present) evolution of north Apennines*. Boll. Geof. Teor. Appl., 17, 3-18.
- FOLEY J.E., TOKSOZ M.N. & BATINI F. (1990) - *Three - dimensional inversion of teleseismic travel times for velocity structure in the Larderello geothermal field, Italy*. Geothermal Resour. Co. Transaction, 14, II, 1413-1419.
- FREEMAN R., GIESE P. & MUELLER ST. (1990) - *The european geotransverse: integrative studies. Results from the Fifth Earth Science Study Centre*. Rauschholzhausen, Germany 26 March-7 April, 1990. European Science Foundation, pp. 404.
- GHELARDONI R., GIANNINI E. & NARDI R. (1968) - *Ricostruzione paleogeografica dei bacini neogenici e quaternari nella bassa Valle dell'Arno sulla base dei sondaggi e dei rilievi sismici*. Mem. Soc. Geol. It., 7, 91-106.
- GIESE P., WIGGER P., MORELLI C. & NICOLICHI R. (1981) - *Seismische studien zur bestimmung der krustenstruktur in bereich der geothermischen anomalie der Toscana*. CEE report EG contract 486-78-1, 487-78-1, Berlin, pp. 108.
- HOLBROOK W.S., MCONEY W.D. & CHRISTENSEN N.I. (1992) - *The seismic velocity structure of the deep continental crust*. In: Fountain, D.M., Arculus R., Kay R.W. Continental lower crust, Elsevier.
- LAVECCHIA G., & STOPPA F. (1989) - *Il rifting tirrenico: delaminazione della litosfera continentale e magmatogenesi*. Boll. Soc. Geol. It., 108, 219-235.
- LETZ H., REICHERT C. & WIGGER P. (1977) - *Results of two seismic refraction lines in the Northern Apennines, lines 1 and 3*. Boll. Geof. Teor. Appl., 75-76, 225-232.
- PONZIANI F., DE FRANCO R., MINELLI G., BIELLA G., FEDERICO C. & PIALI G. (1994) - *Caratteristiche della crosta dell'Appennino settentrionale in base alla revisione dei profili N-C-S e C-B-A della campagna DSS 1978*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale 1994/1, 151-162.
- PONZIANI F., DE FRANCO R., MINELLI G., BIELLA G., FEDERICO C. & PIALI G. (1995) - *Crustal shortening and duplication of the Moho in the Northern Apennines: a view from seismic refraction data*. Tectonophysics, accettato per la stampa.
- REHAULT, J.P., BOILLOT G. & MOUSSAT E. (1985) - *The western Mediterranean Basin. Geological evolution of the Mediterranean Basin*. Ed. D.J. Stanley, F.C. Wezel, Springer Verlag, pp. 589.
- SELVAGGI G. & AMATO A. (1992) - *Subcrustal earthquakes in the Northern Apennines (Italy): evidence for a still active subduction?* Geophysical research letters, 19-21, 2127-2130.
- SERRI G., INNOCENTI F., MANETTI P., TONARINI S. & FERRARA G. (1991) - *Il magmatismo neogenico-quaternario dell'area toscano-laziale-umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino Settentrionale*. In: G. Pialli, M. Barchi e M. Menichetti (Editori), Studi preliminari all'acquisizione del profilo CROP 03 Punta Ala-Gabicce. Studi Geol. Camerti, 1991/1, 429-463.
- WIGGER P. (1984) - *Die krustenstruktur des Northapennines und angrenzender gebiete mit besonderer berucksichtigung der geothermische abhandlungen*. Reihe B/Heft 9, pp. 87.