

Ottenere sezioni stack da dati di sismica a rifrazione: un tentativo di migliorare la conoscenza sulla geometria del sottosuolo

Patrizio Torrese

Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Pavia, patrizio.torrese@unipv.it

Time cross-sections generated from shallow seismic refraction data: an attempt to improve the subsoil geometry knowledge

ABSTRACT: Shallow refraction seismic survey is a very common and useful subsurface investigation method. However, traditional shallow seismic refraction processing methods show long-standing limitations due to the almost complete reliance on the first arrival signal. On the other hand, full wave form processing of data can by-pass inherent limitations and improve the imaging of the subsurface. In this sense, better results can be achieved through digital processing that has been successfully developed in reflection seismology. In particular, a time cross-section, similar to the well known reflection cross-section, can be generated through processing of reflected signals, using tools like CMP stacking that improves the signal-to-noise ratio. Other tools imply deconvolution and migration for improvement of, respectively, vertical and lateral resolution. Muting and dip filtering for deletion of coherent noise. This note presents a discussion on the feasibility of this kind of approach. Different time cross-sections from different processing tests were compared with a HR reflection seismic section used as calibration: particularly, triangular mute windows and the exclusion of the traces relative to the external shots enable the elimination of the strong ringing due to the first arrivals and this tends to be the main problem; furthermore, the external shots prove to be useful for the reconstruction of the deeper structures (with arrival times greater than 400 ms) but not as useful for the reconstruction of the superficial structures.

Keyterms: Time cross-section, Shallow seismic refraction, HR seismic reflection, Digital processing, Seismic imaging
Termini chiave: Sezione stack, Sismica a rifrazione, Sismica a riflessione HR, Processing CMP, Sezione sismica

Riassunto

La sismica a rifrazione è una metodologia d'indagine efficace e molto diffusa. Tuttavia, presenta importanti limitazioni dovute essenzialmente all'inversione dei soli primi arrivi delle onde sismiche. D'altra parte, l'interpretazione del sismogramma completo permetterebbe di migliorare la qualità della ricostruzione del sottosuolo. In tal senso, il processing digitale sviluppato in sismica a riflessione, rappresenta un valido strumento per un'elaborazione *full-waveform* dei sismogrammi. Infatti, attraverso lo *stacking* CMP dei segnali riflessi, è possibile generare una sezione a tempi doppi analoga a quella di una sismica a riflessione, aumentando, quindi, il rapporto segnale su rumore. Altri strumenti consistono nella deconvoluzione e migrazione dei segnali per il miglioramento rispettivamente della risoluzione verticale e laterale, il mute ed il filtro f-k per l'eliminazione del rumore coerente. La nota propone una discussione sulla possibilità di applicare il *processing* CMP sui sismogrammi completi relativi ad indagini di sismica a rifrazione, elaborando i segnali riflessi presenti ed ottenendo, quindi, sezioni a tempi doppi. Diverse sezioni ottenute da differenti sequenze di *processing* sperimentate, sono state confrontate con una sezione di

sismica a riflessione HR di taratura effettuata nello stesso sito: in particolare, il lavoro mostra come l'applicazione di finestre di mute triangolari e l'esclusione delle tracce relative agli scoppi esterni, permettano l'eliminazione del forte *ringing* dei primi arrivi che rappresenta la maggiore problematica affrontata; inoltre, viene evidenziato che l'elaborazione degli scoppi esterni risulti vantaggiosa per la ricostruzione delle strutture più profonde, mentre produca un peggioramento della qualità della sezione *stack* per quanto riguarda le strutture più superficiali.

Introduzione

La sismica a rifrazione è una metodologia diffusa e consolidata che permette la ricostruzione delle velocità sismiche e delle geometrie del sottosuolo. Per questo motivo è ampiamente utilizzata per finalità geotecniche (Signanini & Torrese, 2004), di microzonazione sismica (Rainone *et alii*, 2007), nell'ambito della ricerca idrica, degli studi ambientali e per la correzione statica delle indagini di sismica a riflessione. Nel corso degli anni, la ricerca si è focalizzata sull'inversione dei tempi di primo arrivo, sviluppando approcci basati sul metodo di costruzione del fronte d'onda (Aldridge and Oldenburg, 1992; Rockwell, 1967; Thornburg, 1930), sul metodo

reciproco convenzionale (Dobrin, 1976; Hagedoorn, 1959; Hagiwara and Omote, 1939; Hawkins, 1961; Nettleton, 1940), sul metodo di Hales (Hales, 1958; Sjogren, 1979; Sjogren, 1984), sul metodo reciproco generalizzato (Palmer, 1980; Palmer, 1986). Attualmente le tecniche tomografiche (Lanz *et alii*, 1998; Zhang and Toksoz, 1998) sono diffusamente utilizzate anche per l'elaborazione delle stesse indagini a rifrazione. Recenti sviluppi hanno inoltre interessato lo studio dell'ampiezza dei segnali che permetterebbe di ridurre la non-univocità e l'ambiguità di base della metodologia (Palmer, 2000c, 2001a, b), aumentare la risoluzione spaziale, fornire una misura qualitativa sull'anisotropia azimutale (Palmer, 2000b; Palmer, 2001) e sulle correzioni statiche (Palmer *et alii*, 2005; Palmer & Jones, 2005).

Tuttavia, la metodologia presenta molte limitazioni dovute alla quasi assoluta dipendenza dai tempi di primo arrivo delle onde sismiche. Infatti, gli eventi successivi sono presi in considerazione qualitativamente solo in presenza di una non chiara lettura dei primi arrivi. La potenzialità dell'analisi dell'intero sismogramma acquisito, permetterebbe di ottenere informazioni più complete, di migliorare la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo e in parte di by-passare i limiti della metodologia. Strumenti come quelli sviluppati nella tecnologia del processing CMP (Brown, 1996; Mayne, 1962; Miller *et alii*, 1998; Weimer and Davis, 1996; Yilmaz, 1988) possono essere utili per ottenere più informazioni dai dati esistenti.

L'obiettivo del lavoro è quello di sviluppare un processing digitale efficace per utilizzare i segnali riflessi presenti in un sismogramma completo. Ciò permetterebbe di ottenere una sezione *stack* a tempi doppi (analoga a quella delle prospezioni a riflessione) da indagini di sismica a rifrazione. Il riprocessamento dei dati presenti nelle banche dati relative alle indagini sismiche, fornirebbe una migliore conoscenza sulle geometrie del sottosuolo.

Problematiche metodologiche affrontate

I sismogrammi di una sismica a rifrazione vengono generalmente acquisiti con le seguenti peculiarità rispetto ad un'indagine a riflessione:

- una distanza intergeofonica generalmente variabile tra 2.5 ed i 10 m: nella maggior parte dei contesti geologici (depositi alluvionali, glaciali, depositi di frana, riporti antropici), la risoluzione spaziale ottenuta non è sufficiente ad ottenere una sezione *stack* in grado di risolvere l'eterogeneità laterale;
- un numero di scoppi variabile tra 3 e 7: la copertura ottenuta utilizzando un numero di canali generalmente pari a 24 è molto inferiore alla copertura 600% solitamente utilizzata nelle acquisizioni multicanale; tuttavia è noto che in presenza di target superficiali, anche coperture del 300% sono sufficienti ad ottenere un elevato S/N ratio (Signanini *et alii*, 2002);

- un numero di battute in *stacking* generalmente molto inferiore, data la necessità di registrare solamente i primi arrivi e non i segnali riflessi da *marker* profondi;
- utilizzo di un solo geofono per canale, data la non necessità di utilizzare *arrays*: ciò si traduce nell'assenza del filtro analogico per le onde superficiali (Stumpel *et alii*, 1984) e in maggiori problematiche di coupling geofonico;
- utilizzo di offset variabili: ciò significa variabilità alle differenti progressive degli effetti AVO dovuti alla dipendenza dell'energia riflessa in funzione dell'angolo d'incidenza, enfatizzati dalla superficialità dell'obiettivo; inoltre fenomeni di trasmutazione, presenza di onde superficiali.

Dati utilizzati e inquadramento geologico del sito sperimentale

I dati utilizzati nel lavoro sono stati acquisiti nell'ambito del progetto VEL (Valutazione Effetti Locali, Regione Toscana, 2000) istituito dalla Regione Toscana e finalizzato alla riduzione del rischio sismico. In particolare i dati utilizzati sono relativi ad una base sismica a rifrazione (Bs1) di 60 m in onde SH a 24 canali con 7 scoppi, una distanza intergeofonica pari a 2.5 m ed offset pari a 30 m per gli scoppi esterni e 1.25 m per gli altri punti sorgente. Un linea a riflessione (Ln1) HR di 117 m in onde SH (Milkereit *et al.*, 1986; Palestini *et al.*, 1988) a 12 canali (geometria *push-increase*) con una distanza intergeofonica pari ad 1 m, con *offset* pari a 3 m e copertura 600%, è stata effettuata ricoprendo la Bs1 (sovrapposizione delle sezioni indagate visibile nelle Figure 4-7; variazioni di lunghezza dovute alla presenza o assenza degli scoppi esterni). Quest'ultima è stata utilizzata per tarare e validare i risultati ottenuti con il metodo sviluppato.

Nel sito indagato affiorano depositi alluvionali terrazzati recenti costituiti da ghiaie in matrice limo-sabbiosa con ciottoli anche di notevoli dimensioni, sovrastanti argilliti e marne siltose con blocchi di calcare e livelli di brecce a prevalenti elementi calcarei e brecce poligeniche in matrice argillitica (Complesso di Casanova, Regione Toscana, 2004). E' stato scelto questo sito poiché caratterizzato da un grado di eterogeneità elevato, utile al fine valutare la potenzialità della metodologia in contesti geologici non ottimali.

Processing sviluppato e discussione

Il primo passo per ottenere una sezione *stack* da dati a rifrazione è quello di ricostruire il percorso dei raggi sismici dai punti di scoppio a ciascuno dei geofoni dello stendimento fisso (Figura 1): questa operazione è necessaria per la fase di CMP sorting in cui le tracce delle varie *shot-gather* sono raggruppate in CMP *gather*. Si osserva in Figura 1 (bande colorate sovrapposte) che per una base a 5 scoppi con geometria standard (l'*offset* degli

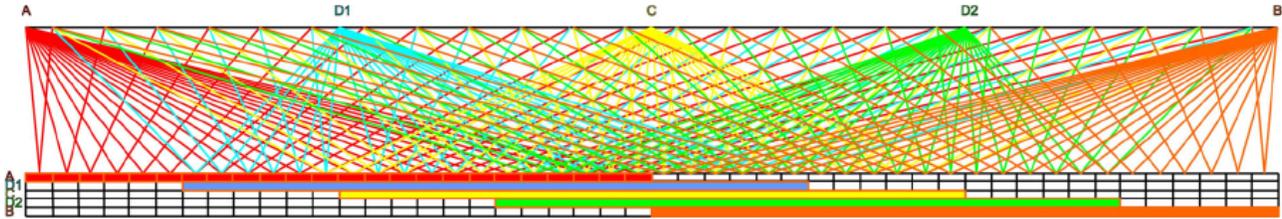


Figura 1: Percorso dei raggi e ricostruzione dei CMP per una prospezione a rifrazione con 5 punti sorgenti e 24 canali.
 Figure 1: Raypath and CMP location reconstruction for a 5 shots 24 channels refraction seismic.

scoppi esterni varia per ogni indagine) la copertura varia da un minimo di 100 % ad un massimo di 400 % contro la copertura massima del 600 % per Ln1. A differenza di quest'ultima, inoltre, la Bs1 è caratterizzata da offset variabili lungo la sezione. E' stata ricostruita quindi la *stacking chart* riportata in Figura 2.

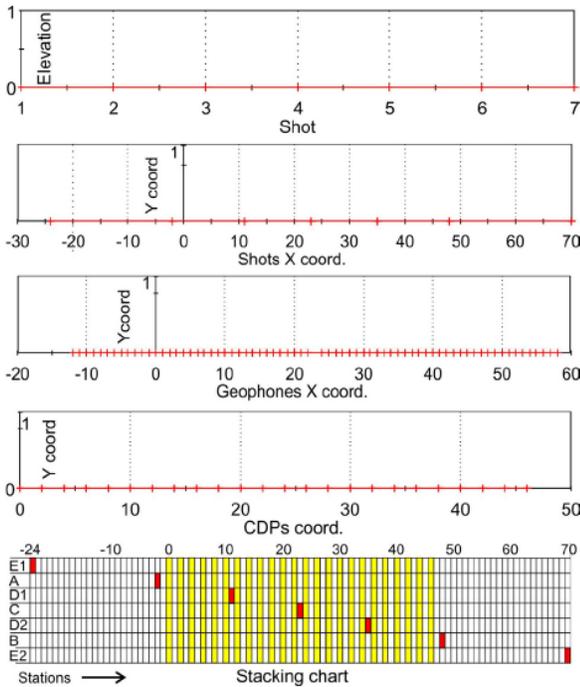


Figura 2: Geometria della base a rifrazione Bs1 (in alto) e *stacking chart* (in basso, punti di scoppio in rosso, geofoni in giallo, distanza tra le stazioni pari a 1.25 m).

Figure 2: Bs1 geometry (up) and *stacking chart* (down, shot points in red, geophones in yellow, 1.25 m station distance).

E' stata applicata alla Bs1 una sequenza di processing standard, la stessa utilizzata per la Ln1; per la correzione NMO e la fase di *stacking*, il modello di velocità adottato (Figura 3) è stato quello ricavato dall'analisi di velocità mediante CVS (*Constant Velocity Stacks*) effettuata sulla Ln1 (dotata di una maggiore risoluzione laterale rispetto alla Bs1); anche i valori dei parametri relativi al recupero di ampiezza, filtraggio in frequenza, deconvoluzione e migrazione sono stati ricavati dall'analisi della Ln1 la cui sequenza di processing utilizzata è mostrata in Tabella 2.

Ciò è stato finalizzato sia ad ottenere una sezione direttamente confrontabile con Ln1, sia a valutare, a parità di altre condizioni, l'effetto, sulle sezioni finali, dei diversi test di processing effettuati sulla Bs1 (Tabella 1): differenti variazioni sono state, infatti, apportate al *processing standard*, per trovare le soluzioni più adeguate per un'ottimizzazione dei risultati. Sebbene ogni indagine di sismica a rifrazione contenga delle particolarità spettrali diverse, funzione, soprattutto del contesto geologico, alcune caratteristiche sono riscontrabili in generale. Lo studio si è focalizzato su questi aspetti, nel tentativo di eliminare i principali disturbi dovuti a procedimenti di acquisizione non ottimali per la produzione di una sezione *stack* leggibile.

Tabella 1: Test di processing effettuati, base BS1.
 Table 1: Bs1 Processing tests.

.Test	
1	Utilizzo di tutti gli scoppi e dell'intero sismogramma
2	Utilizzo di tutti gli scoppi e delle sole tracce con offset sinistro (fig. 5)
3	Utilizzo di tutti gli scoppi e delle sole tracce con offset destro (fig. 5)
4	Utilizzo di 5 scoppi (E1 e E2 esclusi)
5	Applicazione di un mute triangolare per la parte superiore del sismogramma
6	Applicazione di un mute triangolare sinistro utilizzando le sole tracce con offset sinistro
7	Applicazione di un mute triangolare destro utilizzando le sole tracce con offset destro
8	Applicazione di un mute triangolare utilizzando 5 scoppi (E1 e E2 esclusi)
9	Applicazione di un mute triangolare solo sugli scoppi E1 e E2
10	Applicazione di un filtro FK su ogni shot gather eliminando le velocità relative ai primi arrivi

L'utilizzo di tutti gli scoppi e dell'intero sismogramma (tranne ovviamente i primi arrivi su cui è stato applicato un mute classico, test 1), non permette il raggiungimento di risultati soddisfacenti. Si osserva in Figura 4, infatti, che i riflettori presenti in Ln1 non hanno corrispondenza con quelli in Bs1. Ciò è dovuto a:

- la presenza di un forte *ringing* dei primi arrivi (segnali dalla tipica forma ad x) che coprono i segnali riflessi meno energetici in prossimità di ogni punto di scoppio (ovali rossi in Figura 4);
- la somma di segnali iperbolici prodotti da CMP diversamente "illuminati" da scoppi sia sinistri che destri; ciò fa sì, che le onde riflesse non vadano in coerenza in fase di *stacking* (frecche rosse in Figura 4);

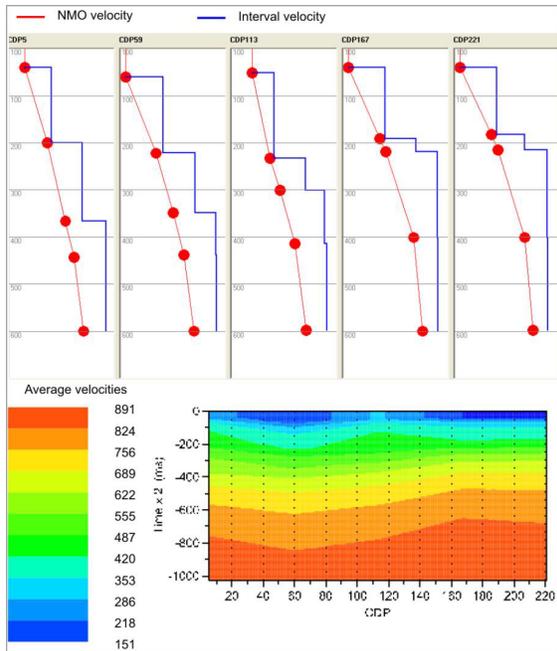


Figura 3: Modello di velocità utilizzato nel *processing* della linea Ln1 e della base Bs1.

Figure 3: Velocity model used in both Ln1 and Bs1 processing.

- la somma di segnali iperbolici caratterizzati da offset molto variabili: in particolare i segnali riflessi prodotti

dagli scoppi esterni E1 e E2 presentano uno *shifting* temporale molto differente da quello degli altri scoppi, causando una bassa coerenza dei segnali (freccie rosse in Figura 4).

Tabella 2: Sequenza di *processing* utilizzata per la linea Ln1. La deconvoluzione *spike* è stata effettuata *post-stack* poiché, non conoscendo le caratteristiche spettrali dell'*input wavelet* (energizzazione sismica mediante massa battente) si è preferito valutare la *performance* del processo direttamente sulla sezione *stack*.

Table 2: Ln1 processing sequence.

1. Geometry	10. F Filter
2. Mute	11. Spike Decon
3. Gain	12. F Filter
4. F Filter	13. Predictive Decon
5. Sort	14. Migration
6. Static correction	15. Gain
7. Velocity analysis	16. Editing
8. NMO	17. Depth Conversion
9. Stack	18. Editing

Si osserva in Figura 5, in cui sono state utilizzate esclusivamente le tracce con *offset* sinistro e destro (rispettivamente nel test 2 e 3), che il problema dei suddetti segnali ad *x* (forte *ringing* dei primi arrivi) deriva dal fatto di avere geofoni da entrambi i lati degli scoppi. La separazione delle tracce tende infatti a separare i *trend* sinistri nel test 2 e destri nel test 3 (freccie in Figura 5).

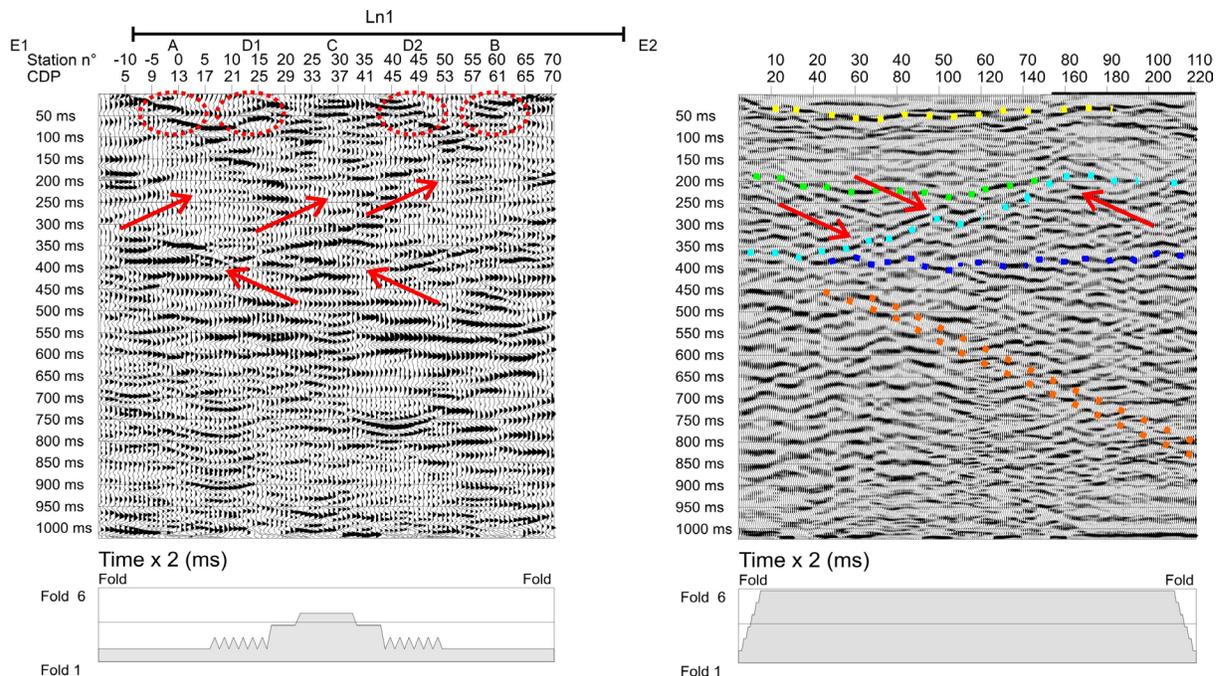


Figura 4: Test 1: confronto tra le sezioni Bs1 (a sinistra) e Ln1 (a destra). *Line-drawing* sulla sezione Ln1, relativo ai principali riflettori: *marker* principali nei depositi alluvionali in giallo e verde; *top* del “Complesso di Casanova” e probabile canale d’erosione (a sinistra) in azzurro; altri riflettori del “Complesso di Casanova” in blu, riflettore profondo inclinato in arancione.

Figure 4: Test 1: comparison between Bs1 (left) and Ln1 (right). In Ln1, *line-drawing* on main reflectors: main markers in alluvial deposits in yellow and green lines; top of “Casanova Complex” and erosional channel (left) in light blue; other reflectors of “Casanova Complex” in dark blue; deep dipping reflector in orange lines.

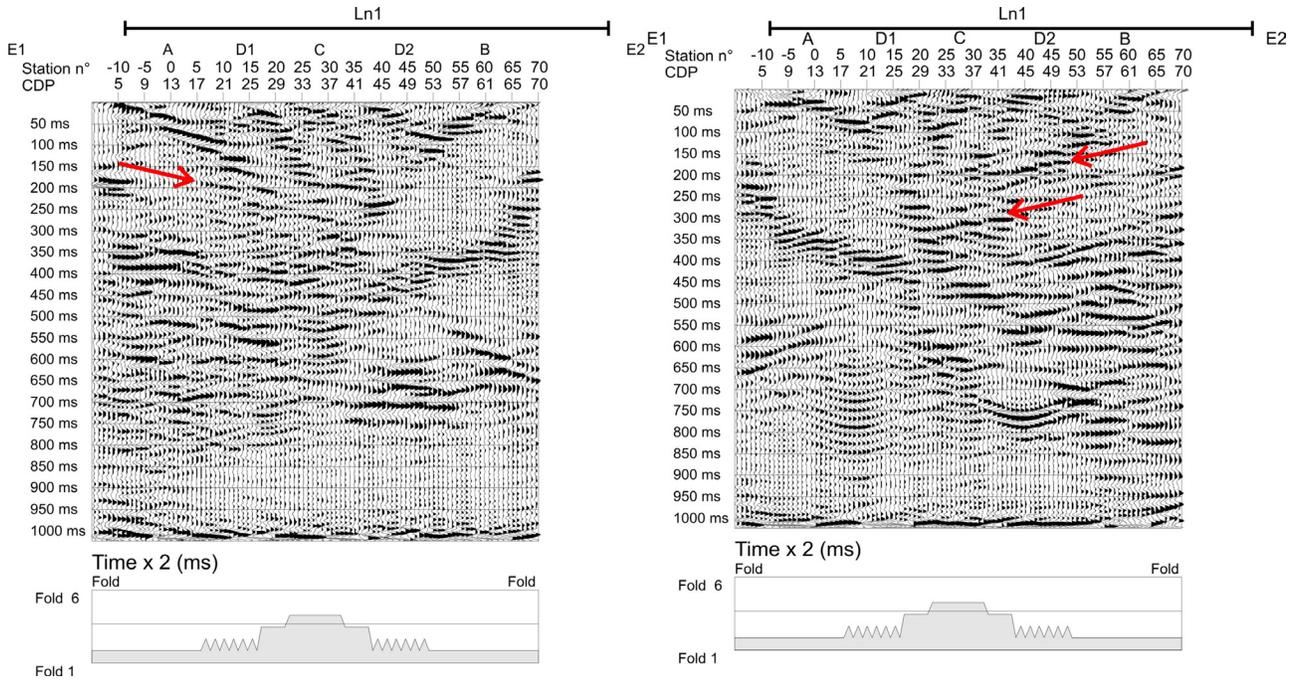


Figura 5: Test 2 (a sinistra) e test 3 (a destra).
 Figure 5: Test 2 (left) and test 3 (right).

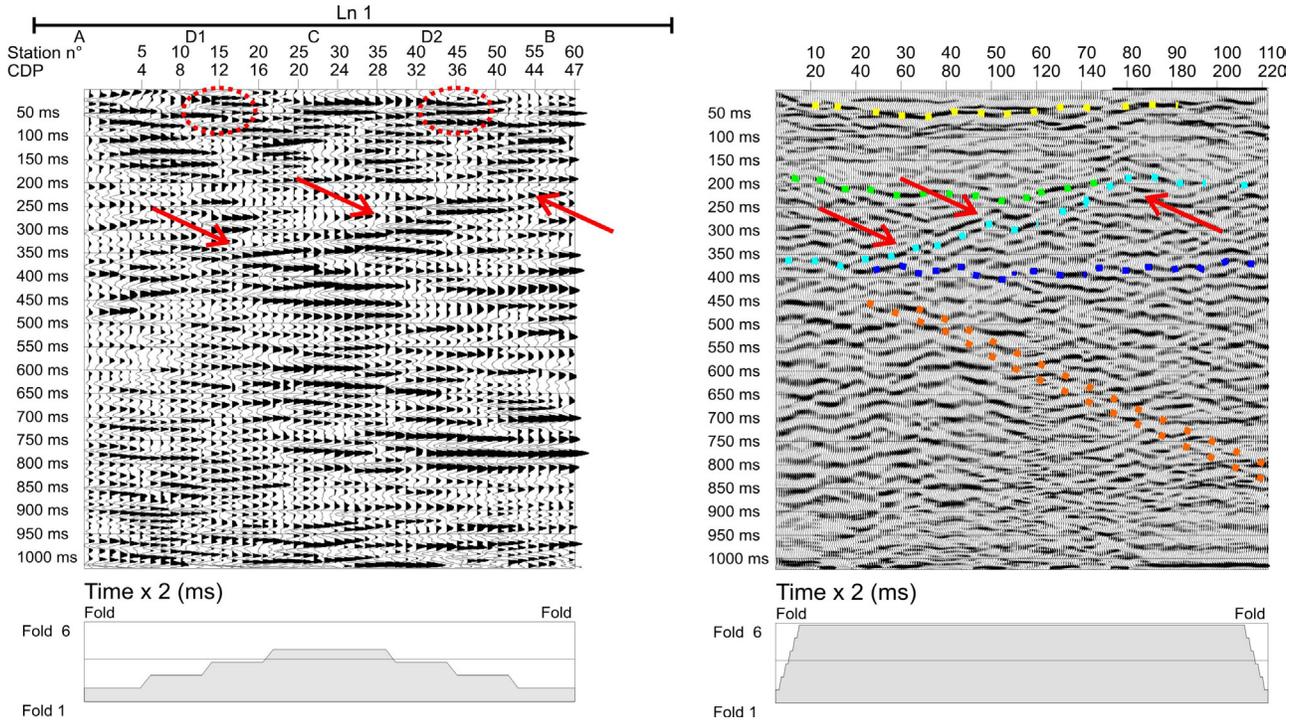


Figura 6: Test 8: confronto tra le sezioni Bs1 (a sinistra) e Ln1 (a destra). *Line-drawing* sulla sezione Ln1, relativo ai principali riflettori: marker principali nei depositi alluvionali in giallo e verde; top del “Complesso di Casanova” e probabile canale d’erosione (a sinistra) in azzurro; altri riflettori del “Complesso di Casanova” in blu, riflettore profondo inclinato in arancione.
 Figure 6: Test 8: comparison between Bs1 (left) and Ln1 (right). In Ln1, line-drawing on main reflectors: main markers in alluvial deposits in yellow and green lines; top of “Casanova Complex” and erosional channel (left) in light blue; other reflectors of “Casanova Complex” in dark blue; deep dipping reflector in orange lines.

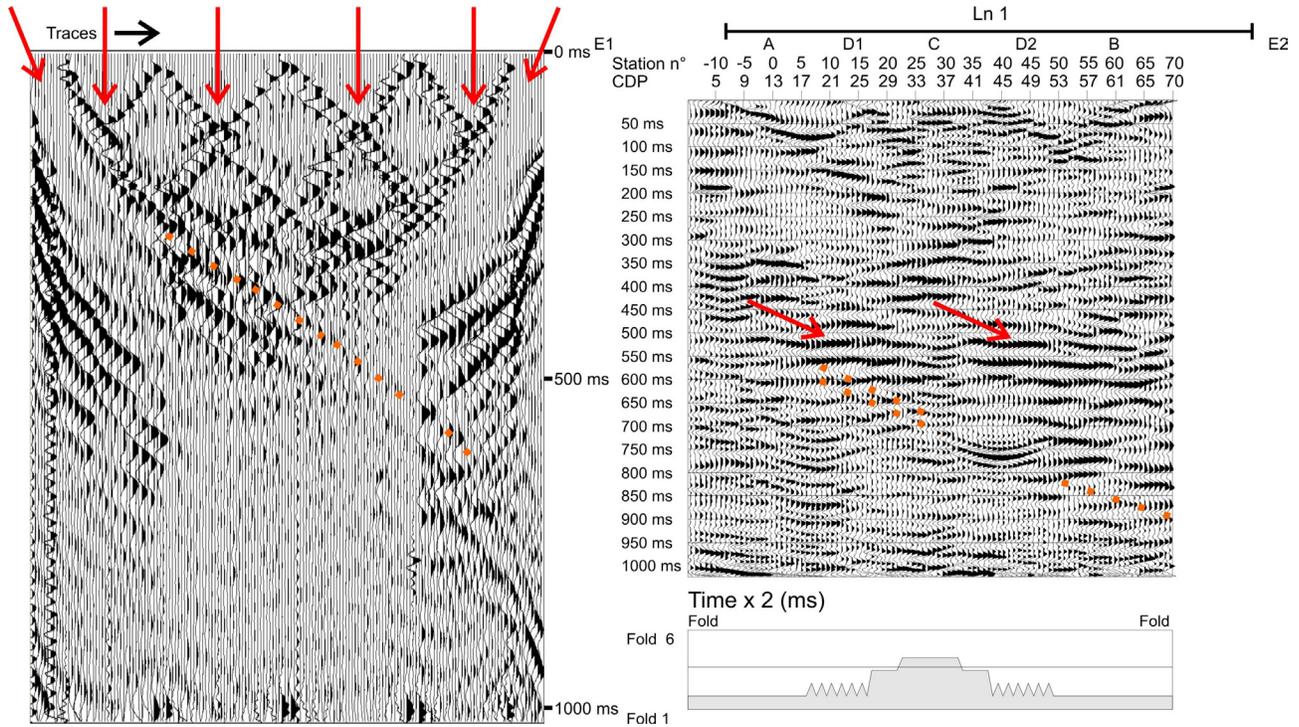


Figura 7: Sezione Bs1 con CDP gather a 7 scoppi (a sinistra); test 5 (a destra).
 Figure 7: Bs1 CDP sorted section with 7 shots (left); test 5 (right).

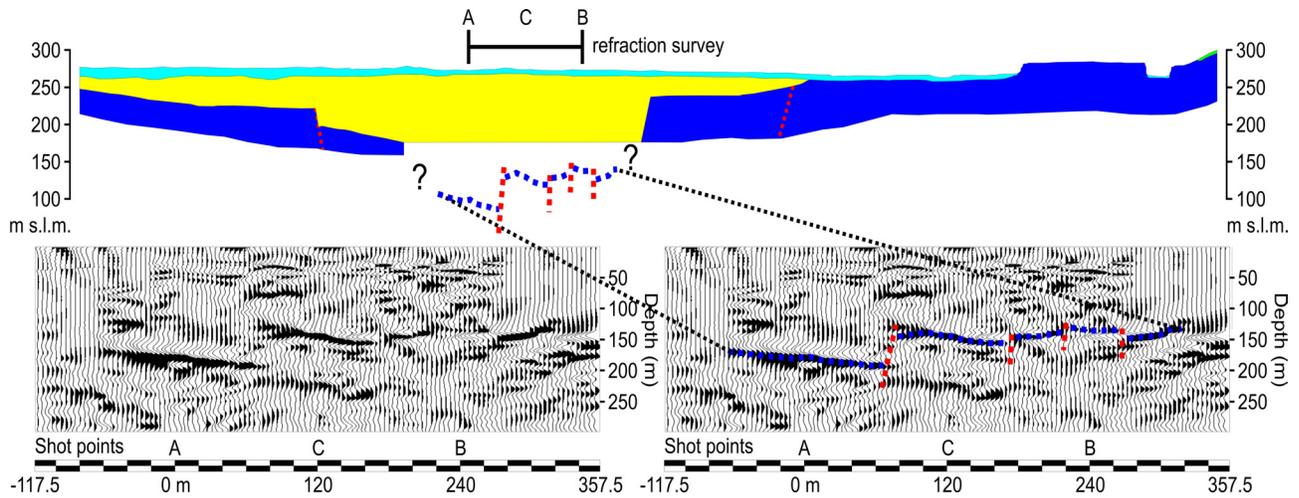


Figura 8: Sezione stack e relativo line drawing (in basso), sezione litostrografica dell'area (in alto); è stato possibile ricostruire la geometria del substrato profondo utilizzando i dati di una sismica a rifrazione (AB) che, mediante inversione classica, non avrebbe raggiunto una profondità d'investigazione così elevata; in azzurro riporto e depositi alluvionali (all.1, all.2, arg), in giallo depositi alluvionali (arg-cg), in blu arenarie del "Macigno" (mg), in rosso faglie, (Regione Toscana, 2004).
 Figure 8: Stack and interpreted section (down), lithostratigraphic section (up); the deep bedrock geometry was reconstructed using a refraction survey (AB) through the proposed method; the conventional inversion would not be able to reach the target depth; filling material and alluvial deposits in light blue area (all.1, all.2, arg), alluvial deposits (arg-cg) in yellow area, sandstones of "Macigno" formation (mg) in blue area, faults in red lines, (Regione Toscana, 2004).

Questo problema è stato by-passato applicando una finestra triangolare di mute (freccie rosse in Figura 7) su ogni shot gather; questa operazione ha inoltre permesso

di aumentare la coerenza dello stacking andando a sommare segnali più profondi all'aumentare dell'offset. In Figura 6 (test 8) si può osservare l'eliminazione del

ringing (ovali rossi) che copriva la geometria dei riflettori più superficiali; inoltre l'applicazione del mute triangolare e l'utilizzo di soli 5 scoppi (gli scoppi E1 e E2 sono stati esclusi) ha aumentato la coerenza e risoluzione dei riflettori (freccie rosse).

Le finestre di mute utilizzate sono visibili in Figura 7 in cui è riportata la sezione ottenuta mediante sorting CMP a 7 scoppi. È interessante notare la presenza di un segnale molto energetico e profondo (linee arancioni). Questo può essere riconducibile al riflettore molto inclinato presente in Ln1 (linee arancioni in Figura 6). L'utilizzo degli scoppi esterni, se da una parte peggiora la coerenza della sezione nei primi 400 ms circa, permette la ricostruzione delle strutture profonde: infatti, si osserva nel test 5 riportato in Figura 7, che oltre al riflettore ad elevata pendenza menzionato precedentemente (linee arancioni; segnale interrotto da artificio di migrazione nell'intorno della stazione 40) anche gli altri segnali profondi risultano più coerenti; in particolare il riflettore presente a circa 520 ms di tempi doppi (freccie rosse in Figura 7) che in Ln1 (Figura 4) si segue solo in alcuni tratti della sezione (stazioni 3-50, 81-94) ed appare discontinuo, assume coerenza e continuità in Figura 7; ciò può essere spiegato considerando che in presenza di variazioni laterali di velocità e, quindi, di iperboli di riflessione mal definite, l'utilizzo del mute triangolare e il conseguente aumento di segnali profondi in stacking, all'aumentare dell'offset, produce degli effetti migliorativi. Pertanto, i riflettori più profondi (fino alla profondità in cui il rapporto S/N è sufficientemente elevato) assumono una coerenza maggiore.

L'utilizzo del filtro FK (test 10), è risultato molto efficace nell'eliminazione del forte ringing dei primi arrivi, ma ha prodotto un eccessivo "sbiancamento" di alcune parti della sezione.

Esempio di applicazione della metodologia

In Figura 8 è mostrata un'applicazione della metodologia proposta, utilizzando i sismogrammi di una base a rifrazione di 240 m a 24 canali e 7 scoppi (esterni a 235 m dagli estremi). Nonostante la lunghezza dello stendimento, l'indagine non aveva permesso di raggiungere il substrato profondo, mediante inversione classica. La sezione stack prodotta, permette, invece, di individuare un riflettore dislocato da importanti discontinuità, ascrivibile alle arenarie della formazione del "Macigno", quindi, di completare la sezione litostratigrafica dell'area in studio, ricostruendo la geometria del substrato profondo. È da sottolineare che questi risultati soddisfacenti sono stati raggiunti nonostante l'elevata eterogeneità del sottosuolo e la bassa risoluzione spaziale dell'indagine (distanza intergeofonica di 10 m).

Conclusioni

Sono stati mostrati i risultati relativi allo studio sulla possibilità di ottenere sezioni stack da dati di sismica a rifrazione. Le sezioni risultanti da diversi test di processing sono state confrontate con una sezione di un'indagine sismica a riflessione HR effettuata nello stesso sito. Sebbene i dati processati siano stati acquisiti in un contesto caratterizzato da depositi geologici con un elevato grado di eterogeneità, la sezione stack ottenuta permette, seppur con basso dettaglio, di ricostruire la struttura del sottosuolo.

Varie sequenze di processing sono state testate: in particolare l'utilizzo di finestre triangolari di mute e l'esclusione delle tracce relative agli scoppi esterni permettono di eliminare il forte ringing dovuto ai primi arrivi, principale problema riscontrato. Gli scoppi esterni possono essere utili per la ricostruzione delle strutture profonde (per tempi maggiori di circa 400 ms), ma non per quelle superficiali.

È stata mostrata, inoltre, un'applicazione del metodo proposto, utilizzando i sismogrammi relativi ad un'indagine a rifrazione condotta in un contesto geologico caratterizzato da una complessità inferiore: nonostante l'elevata spaziatura tra i geofoni, la sezione finale è risultata facilmente leggibile ed interpretabile.

Un tale approccio può essere utile per migliorare la conoscenza sulla geometria del sottosuolo e per individuare eventuali strati nascosti che la sismica a rifrazione classica non è in grado di identificare. Se coadiuvato da altre tecniche, come ad esempio il metodo RCS (Miller et al., 1998; Palmer, 2001b) e soprattutto in presenza di taratura, l'incertezza sull'interpretazione dei riflettori nella sezione finale può essere ridotta.

Studi successivi verranno effettuati per valutare il grado d'informazione ottenibile al variare del contesto geologico. Inoltre particolare importanza verrà data alle variazioni d'ampiezza dei segnali riflessi al variare dell'offset (AVO, Aki and Richards, 2002; Zoeppritz, 1919), particolarmente importante per le prospezioni sismiche ad alta risoluzione ed alla presenza di eventuali segnali trasmutati.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare il Dr. Arch. Maurizio Ferrini, dirigente responsabile del Servizio Sismico della Regione Toscana per aver permesso la pubblicazione dello studio, il Prof. P. Signanini P. per i preziosi consigli, il Dr. Geol. R. Madonna per la collaborazione durante la fase di acquisizione dati, il Dr. P. Mantanera per la collaborazione durante la fase di elaborazione dati.

Bibliografia

- Aki K. & Richards P.G., 2002, *Quantitative Seismology*, 2nd Edition, University Science Books.
- Aldridge D.F. & Oldenburg D.W., 1992, Refractor imaging using an automated wavefront reconstruction method, *Geophysics* 57, 378-385.
- Brown A.R., 1996, *Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data*, 4th edn. AAPG Memoir No. 26.
- Dobrin M.B., 1976, *Introduction to Geophysical Prospecting*, 3rd edn. McGraw-Hill Book Co.
- Hagedoorn J.G., 1959, The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections, *Geophysical Prospecting* 7, 158±182.
- Hagiwara T. & Omote S., 1939, Land creep at Mt Tyausa-Yama (Determination of slip plane by seismic prospecting), *Tokyo University Earthquake Research Institute Bulletin*, 17, 118-137.
- Hales F.W., 1958, An accurate graphical method for interpreting seismic refraction lines, *Geophysical Prospecting* 6, 285-294.
- Hawkins L.V., 1961, The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations, *Geophysics* 26, 806±819.
- Lanz E., Maurer H. & Green A.G., 1998, Refraction tomography over a buried waste disposal site, *Geophysics* 63, 1414-1433.
- Mayne W.H., 1962, Common-reflection-point horizontal data-stacking techniques, *Geophysics* 27, 927-938.
- Miller K.C., Harder S.H., Adams D.C. & O'Donnell T., 1998, Integrating high-resolution refraction data into near-surface seismic reflection data processing and interpretation, *Geophysics* 63, 1339±1347.
- Milkereit, B., Stumpel, H. & Rabbel, W., 1986, Shear waves reflection profiling for near surface lignite exploration. *Geophys. Prospect.*, 34, 45-67.
- Nettleton L.L., 1940, *Geophysical Prospecting for Oil*, McGraw-Hill Book Co.
- Palestini R., Signanini P. & Tombolini F., 1988, Esempio di prospezione sismica a riflessione con onde di taglio, *Acts of VII Convention of Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida* vol. I, 313-323.
- Palmer D., 1980, *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Palmer D., 1986., *Refraction Seismics: The Lateral Resolution of Structure and Seismic Velocity*. Geophysical Press.
- Palmer D., 2000b, The measurement of weak anisotropy with the generalized reciprocal method, *Geophysics* 65, 1583-1591.
- Palmer D., 2000c, Can amplitudes resolve ambiguities in refraction inversion? *Exploration Geophysics* 31, 304±309.
- Palmer D., 2001a, Imaging refractors with the convolution section, *Geophysics* 66, 1582-1589.
- Palmer D., 2001b, Resolving refractor ambiguities with amplitudes, *Geophysics* 66, 1590-1593.
- Palmer D., 2001, Measurement of Rock Fabric In Shallow Refraction Seismology, *Exploration Geophysics* 32, 307 – 314.
- Palmer D., Nikrouz R., Spyrou A., 2005, Statics corrections for shallow seismic refraction data, *Exploration Geophysics* 36, 7–17, *Butsuri-Tansa* (Vol. 58, No.1), *Mulli-Tansa* (Vol. 8, No.1)
- Palmer D. & Jones L., 2005, A simple approach to refraction statics with the Generalized Reciprocal Method and the Refraction Convolution Section, *Exploration Geophysics* (2005) 36, 18–25, *Butsuri-Tansa* (Vol. 58, No.1), *Mulli-Tansa* (Vol. 8, No.1).
- Rainone M.L., Signanini P., Pizzica F., Madonna R., Torrese P., D'Intinosante V., Ferrini M., 2007, Applicabilità delle tecniche di sismica a rifrazione in onde SH per la valutazione della risposta sismica locale, *Atti del XII Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia*, Pisa, 10-14 Giugno.
- Regione Toscana, Direzione Generale delle Politiche territoriali e Ambientali, U.O.C. Rischio sismico, 2000, Valutazioni degli effetti locali, Programma VEL – Istruzioni tecniche per le indagini geologico-tecniche, le indagini geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici, “Progetto Terremoto” in Garfagnana e Lunigiana, atto di programmazione negoziata tra regione Toscana e Dipartimento della Protezione Civile, Firenze.
- Regione Toscana, Direzione Generale delle Politiche territoriali e Ambientali - Servizio Geologico, 2004, *Carta Geologica della Toscana*, scala 1:250000.
- Rockwell D.W., 1967, A general wavefront method, *Seismic Refraction Prospecting* (ed. A.W. Musgrave), pp. 363-415, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Signanini P., Rainone M.L. & Torrese P., 2002, Un'applicazione della metodologia sismica a riflessione ad alta risoluzione con onde di taglio per l'investigazione di una discarica R.S.U., *Atti del 21° Convegno Nazionale G.N.G.T.S.*, Roma, 19-21 Novembre, 403.
- Signanini P. & Torrese P., 2004, Application of high resolution shear wave seismic methods to a geotechnical problem. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63, 4, 329-336.
- Sjogren B., 1979, Refractor velocity determination: cause and nature of some errors. *Geophysical Prospecting* 27, 507-538.
- Sjogren B., 1984, *Shallow Refraction Seismics*, Chapman & Hall.
- Stumpel H., Kahler S. & Meissner R., 1984, The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments, *Geophysical Prospecting* 32, 662-675.
- Thornburg H.R., 1930, Wavefront diagrams in seismic interpretation, *AAPG Bulletin* 14, 185-200.
- Weimer P. & Davis T.L., 1996, *Applications of 3D Seismic Data to Exploration and Production*, *Geophysical Developments Series* No. 5, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Yilmaz O., 1988, *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Zhang J. & Toksoz M.N., 1998, Nonlinear refraction travelttime tomography, *Geophysics* 63, 1726-1737.
- Zoeppritz K., 1919, *Erdbebenwellen VIII B, Uber Reflexion and durchgang seismischer wellen duch un stetigkeits flachen*, *Gottinger Nachr.* 1, pp. 66-84.