Università di Trieste
LAUREA MAGISTRALE IN GEOSCIENZE
Curriculum Geofisico
Curriculum Geologico Ambientale

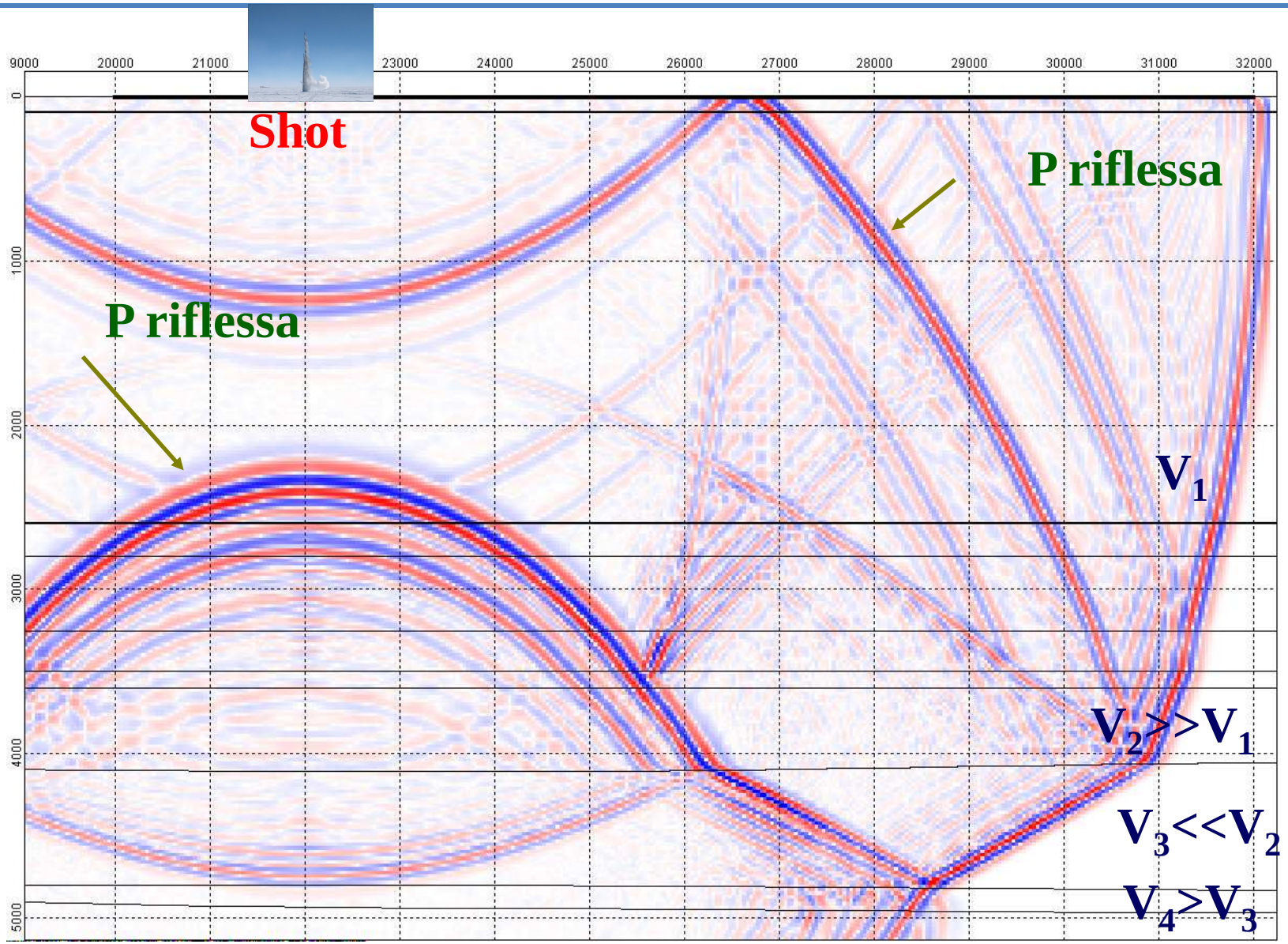
Anno accademico 2016 – 2017

Geologia Marina

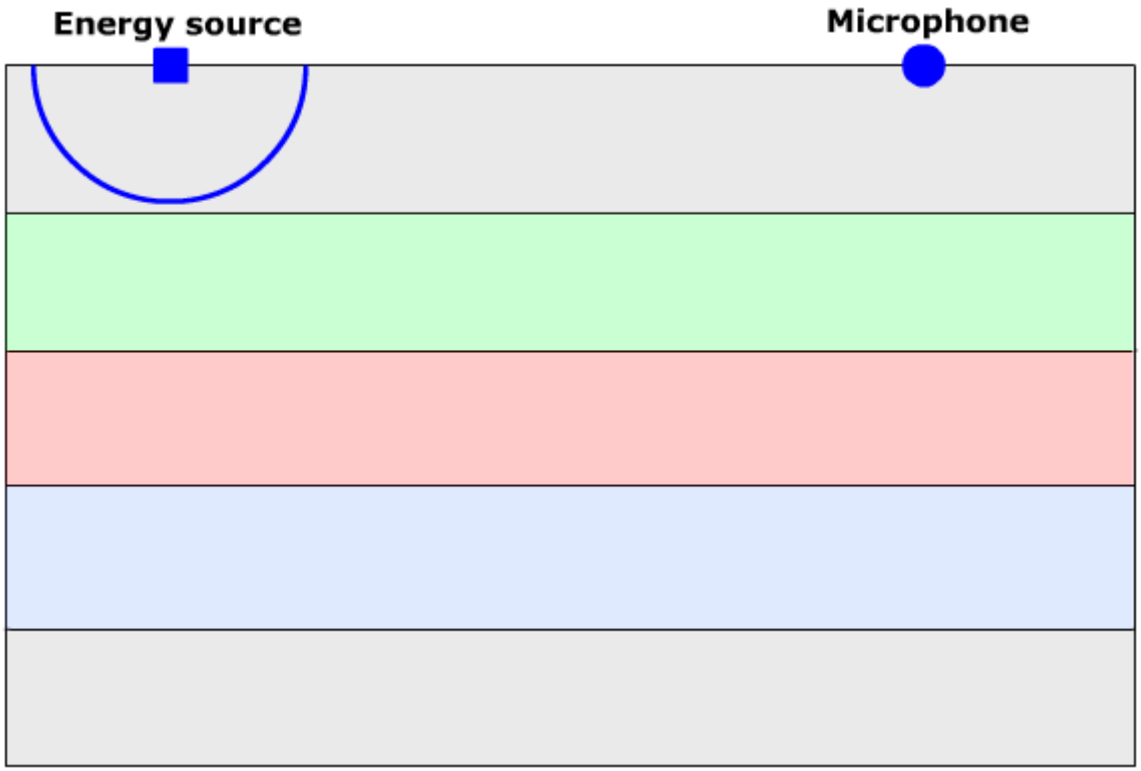
Modulo 2.2 Metodi indiretti: Rilievi acustici e sismica a riflessione

Docente
Riccardo Geletti

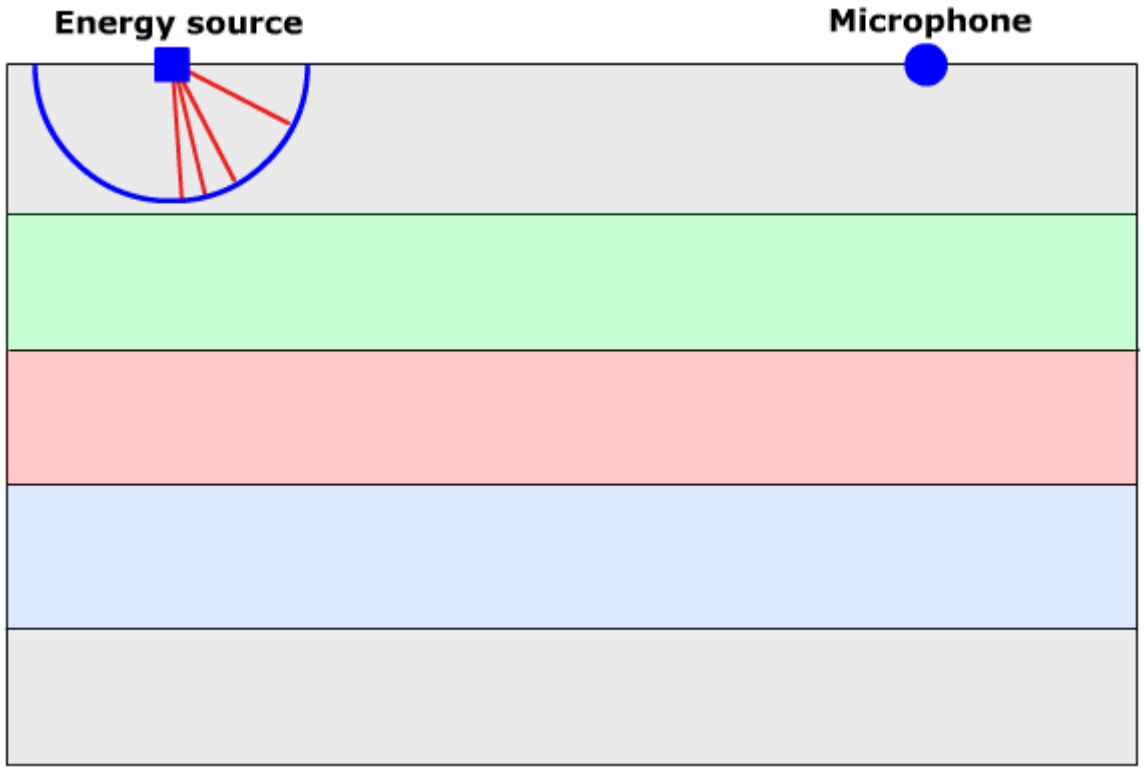
SISMICA A RIFLESSIONE
(SISMICA ATTIVA)

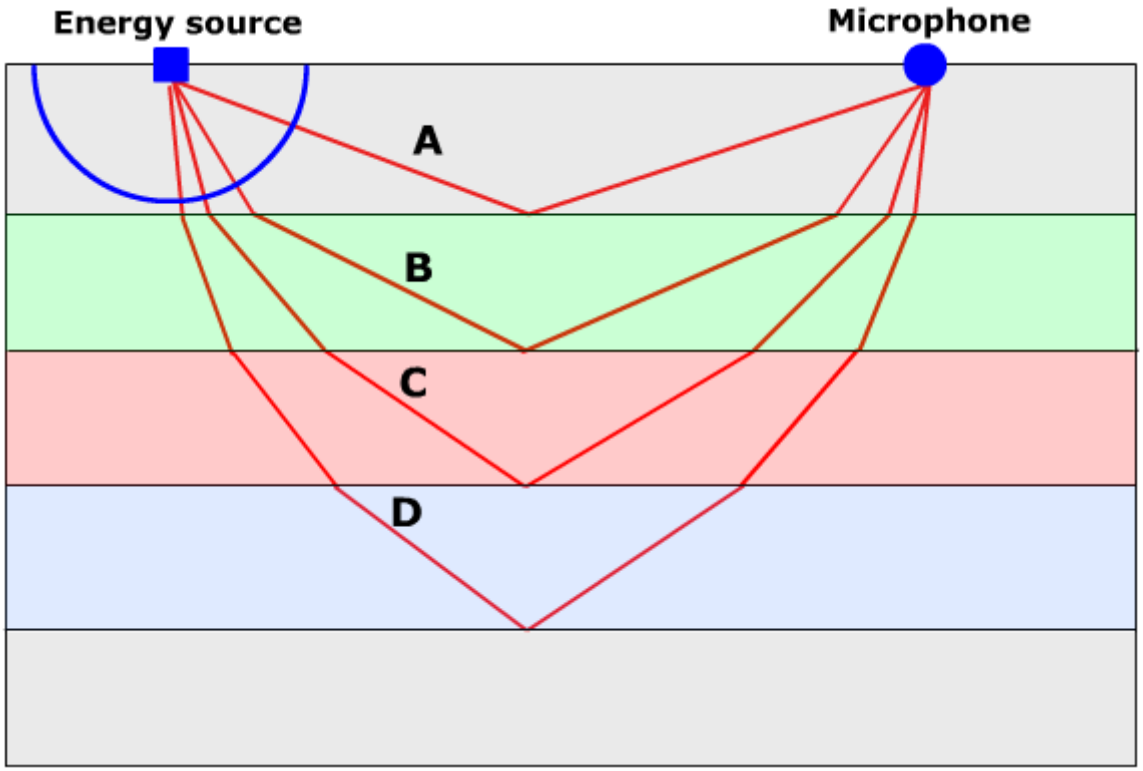


Esempio di simulazione di percorso di un fronte d'onda acustica provocato da un unico scoppio in un mezzo stratificato avente differenti velocità di propagazione; si noti la complessità del campo d'onda risultante.

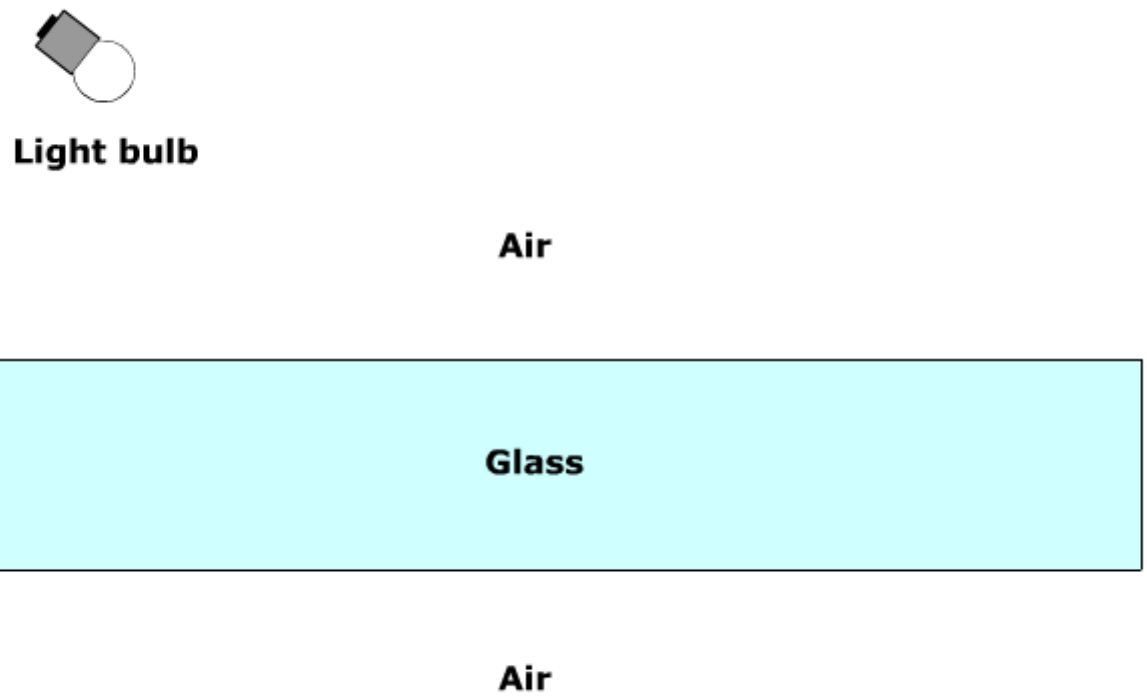


La propagazione dell'onda acustica in un mezzo stratificato si può schematizzare attraverso la rappresentazione dei raggi d'onda come nelle immagini seguenti.


Energy source
Microphone

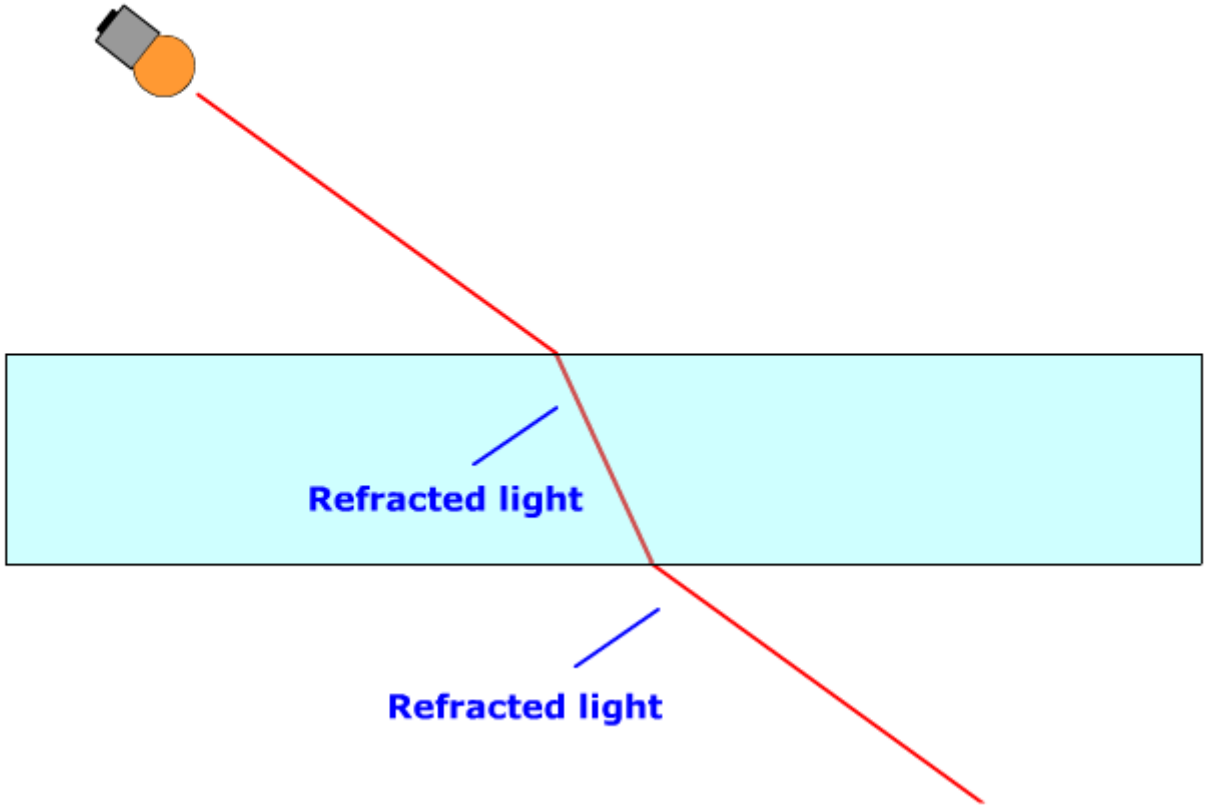

Energy source
Microphone
A
B
C
D

Refraction and reflection of waves

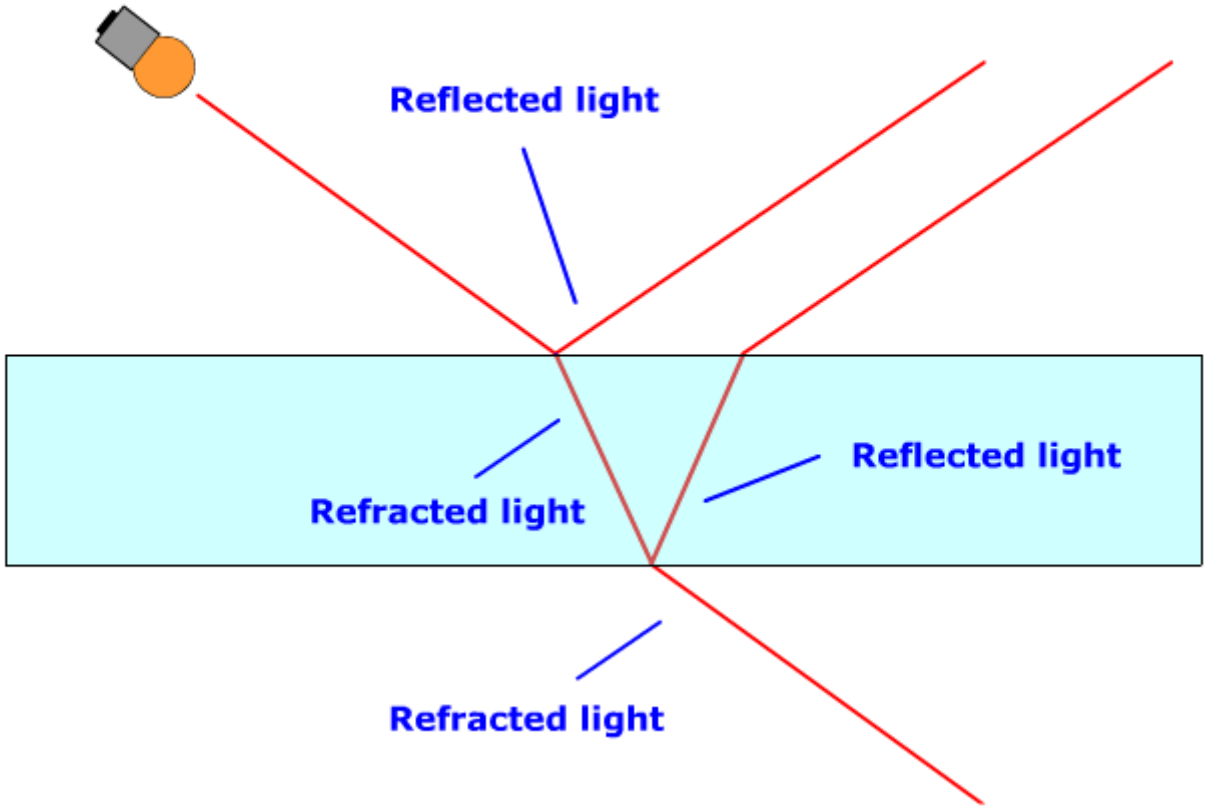


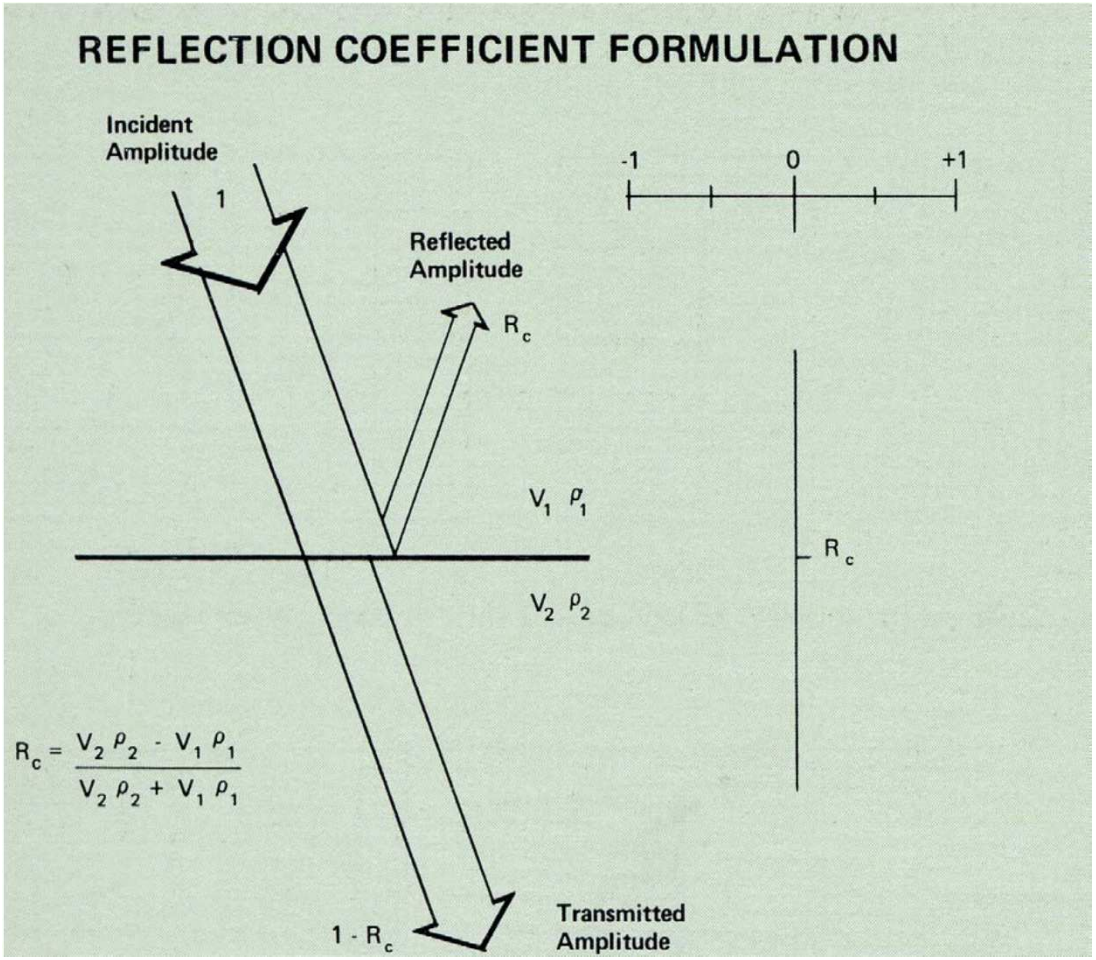
Come si può visualizzare il fenomeno della rifrazione/riflessione? L'esempio più conosciuto è quello del percorso del raggio luminoso attraverso un vetro come riportato di seguito.

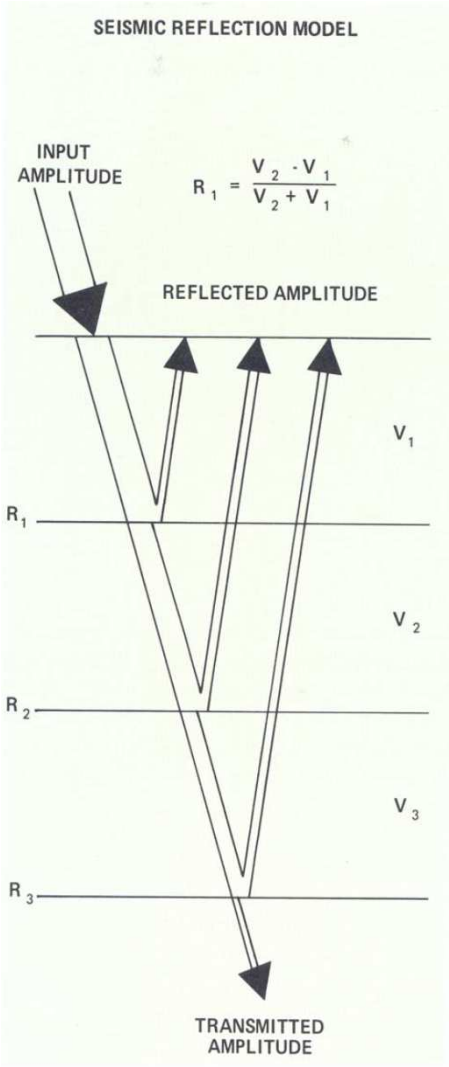
Refraction and reflection of waves



Refraction and reflection of waves

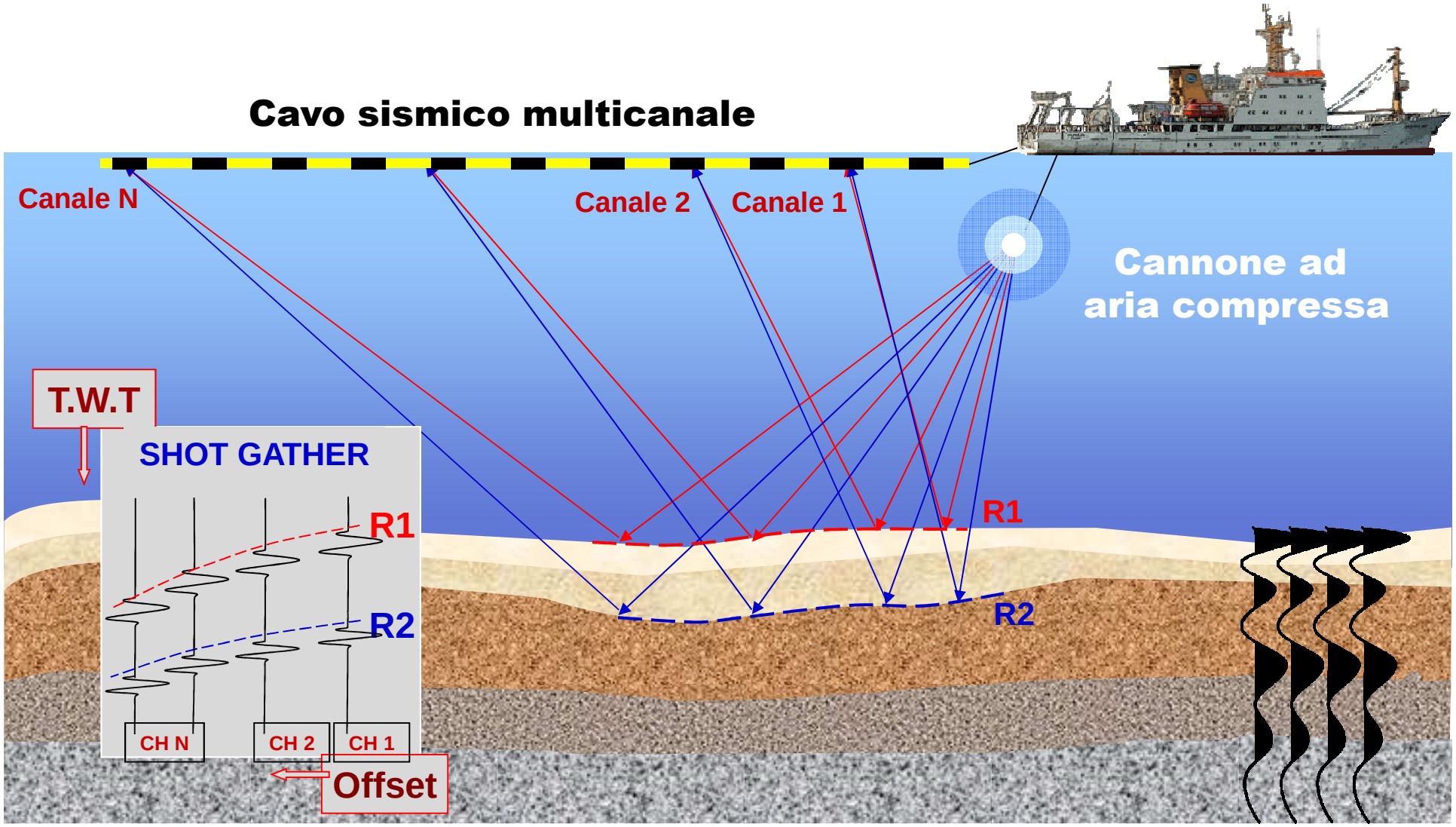






Nella sismica a riflessione si utilizzano le LEGGI dell'Ottica geometrica:

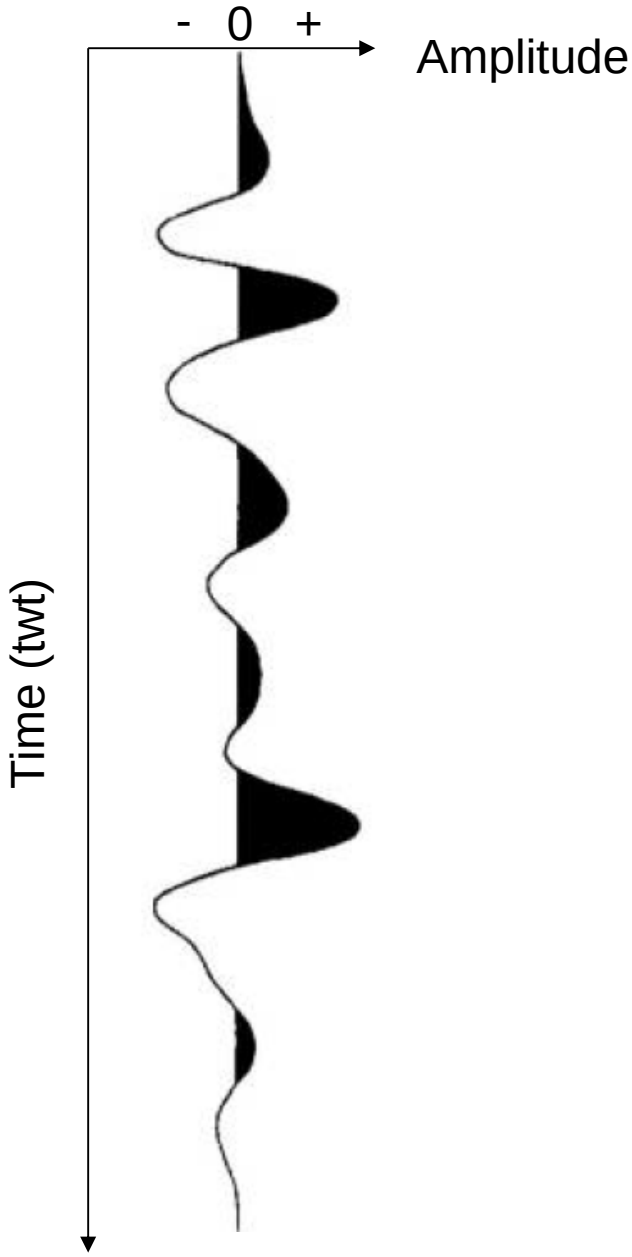
1. Angolo di riflessione = angolo di incidenza
2. Raggio d'onda incidente e riflesso Complanari
3. Ampiezza del raggio d'onda riflesso dipendente da Rc (coefficiente di riflessione)



Sistema di acquisizione sismica marina multicanale

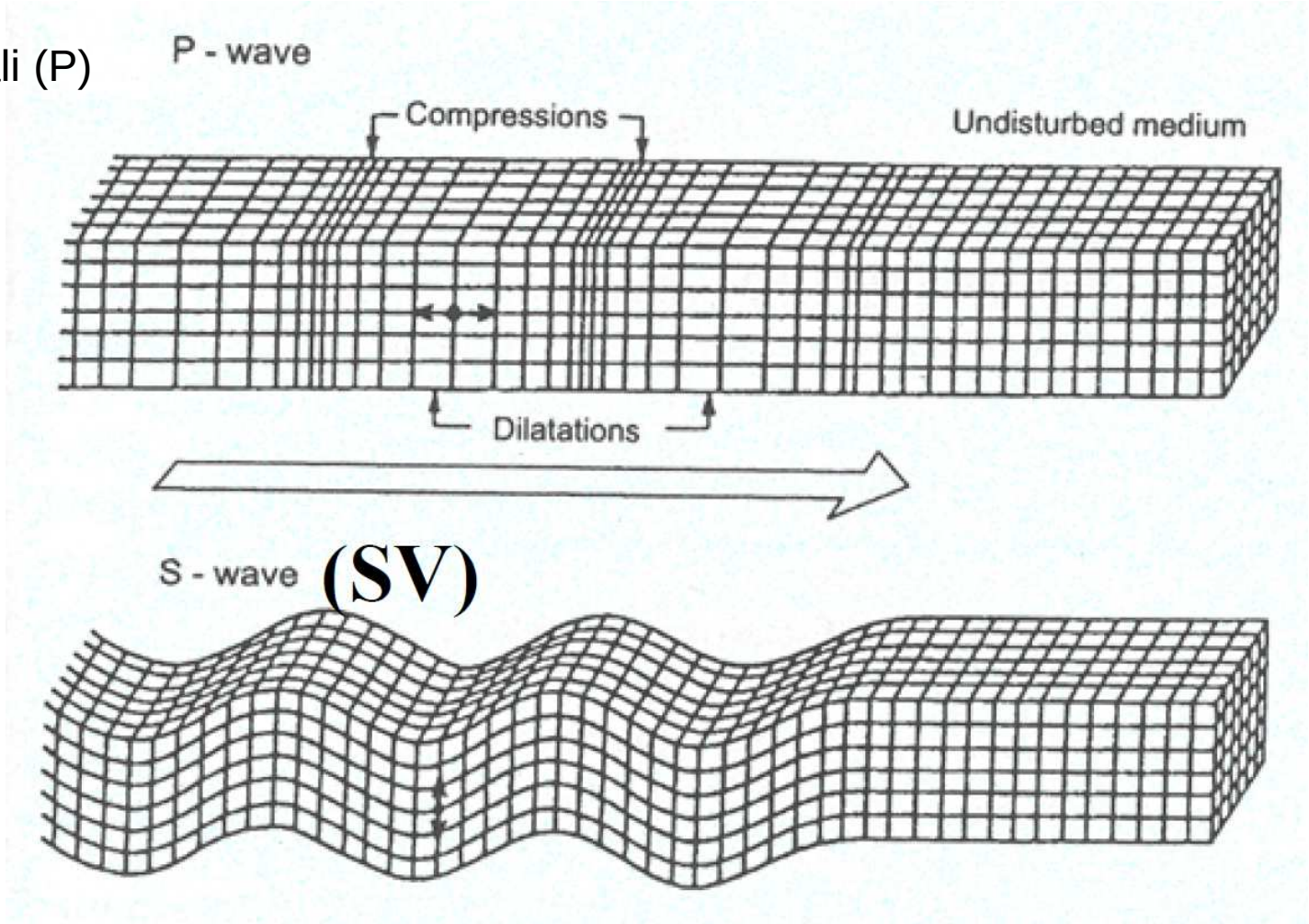
Nell'immagine precedente viene schematizzato il sistema di indagine sismica marino.
Per studiare la geologia in mare si usa il metodo della sismica a riflessione multicanale. Si utilizza una sorgente di onde acustiche che genera un fronte d'onda che si propaga attraverso la colonna d'acqua e penetra nel sottosuolo. Ad ogni interfaccia di sedimenti e/o rocce con caratteristiche petro-fisiche diverse, una parte dell'onda viene riflessa e la parte restante continua a propagarsi nel sottosuolo, venendo a sua volta parzialmente riflessa all'interfaccia successiva. La onde riflesse ritornano in superficie e vengono ricevute da sensori che si trovano all'interno del cavo sismico (lungo da centinaia di metri a qualche chilometro) trainato dalla nave e galleggiante qualche metro al di sotto la superficie dell'acqua. Questi segnali vengono registrati ed elaborati ottenendo una immagine del sottosuolo pari ad una sezione lunga diversi chilometri e con diversi chilometri di profondità di indagine.

Rappresentazione di un sismogrammma: in generale la parte annerita è la fase positiva dell'onda; il tempo registrato è quello doppio di percorso dell'onda riflessa e viene indicato con il termine twt (two way travel time)

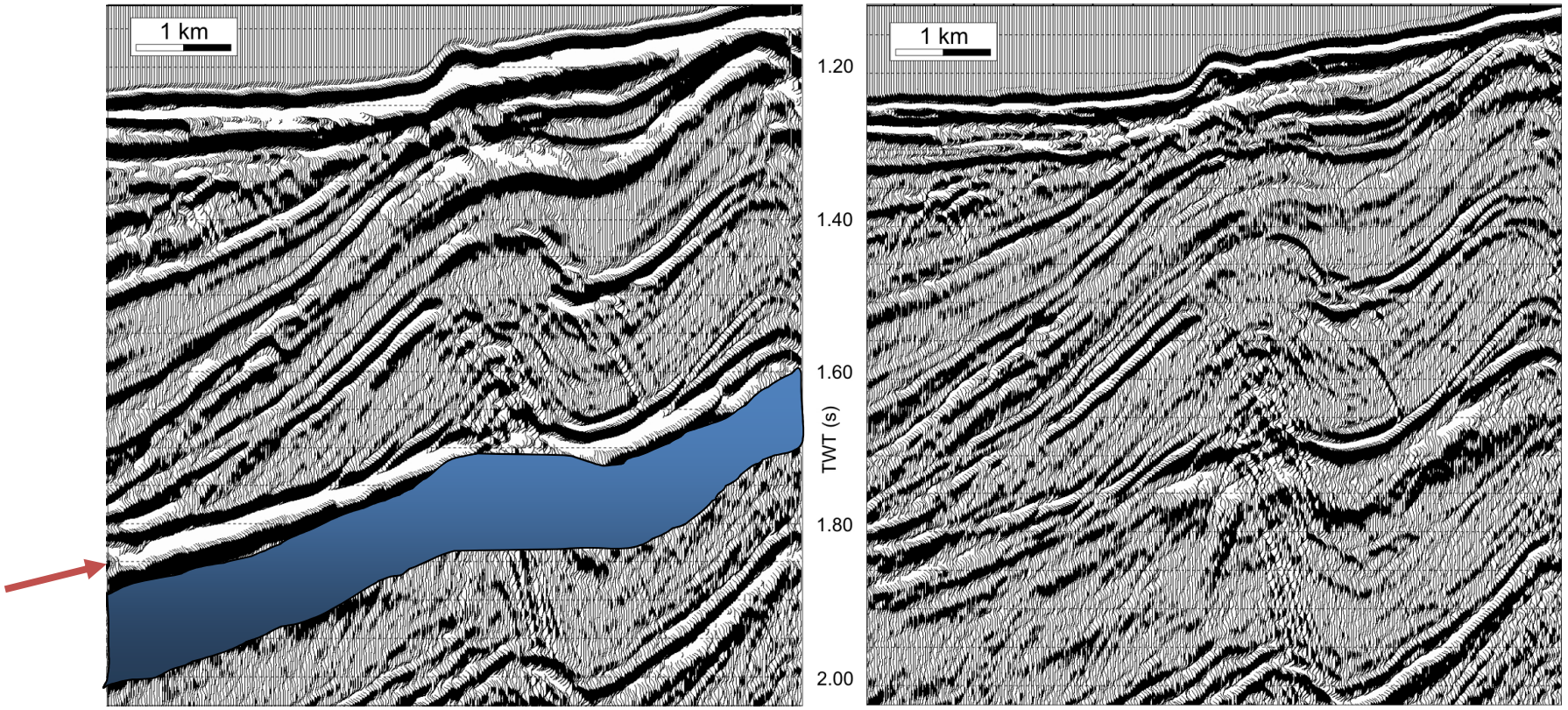


Onde sismiche:

- Compressionali (P)
- di Taglio (S)



Nella sismica a riflessione marina classica si acquisiscono solo le onde compressionali (a meno di utilizzare particolari tecnologie che pongono i sensori direttamente sul fondo marino o di utilizzare le tecniche di elaborazione Amplitude Versus Offset – AVO), in quanto le onde di taglio non si propagano nei liquidi



Esempio di profilo sismico marino con presenza di gas nei sedimenti: a sinistra sezione onde «P» e a destra quella a onde «S convertite» ottenuta mediante metodi AVO (Amplitude Versus Offset). Si noti nel profilo a destra la quasi assenza del riflettore a polarità invertita che definisce il limite gas idrato (sopra)/gas libero (sotto).

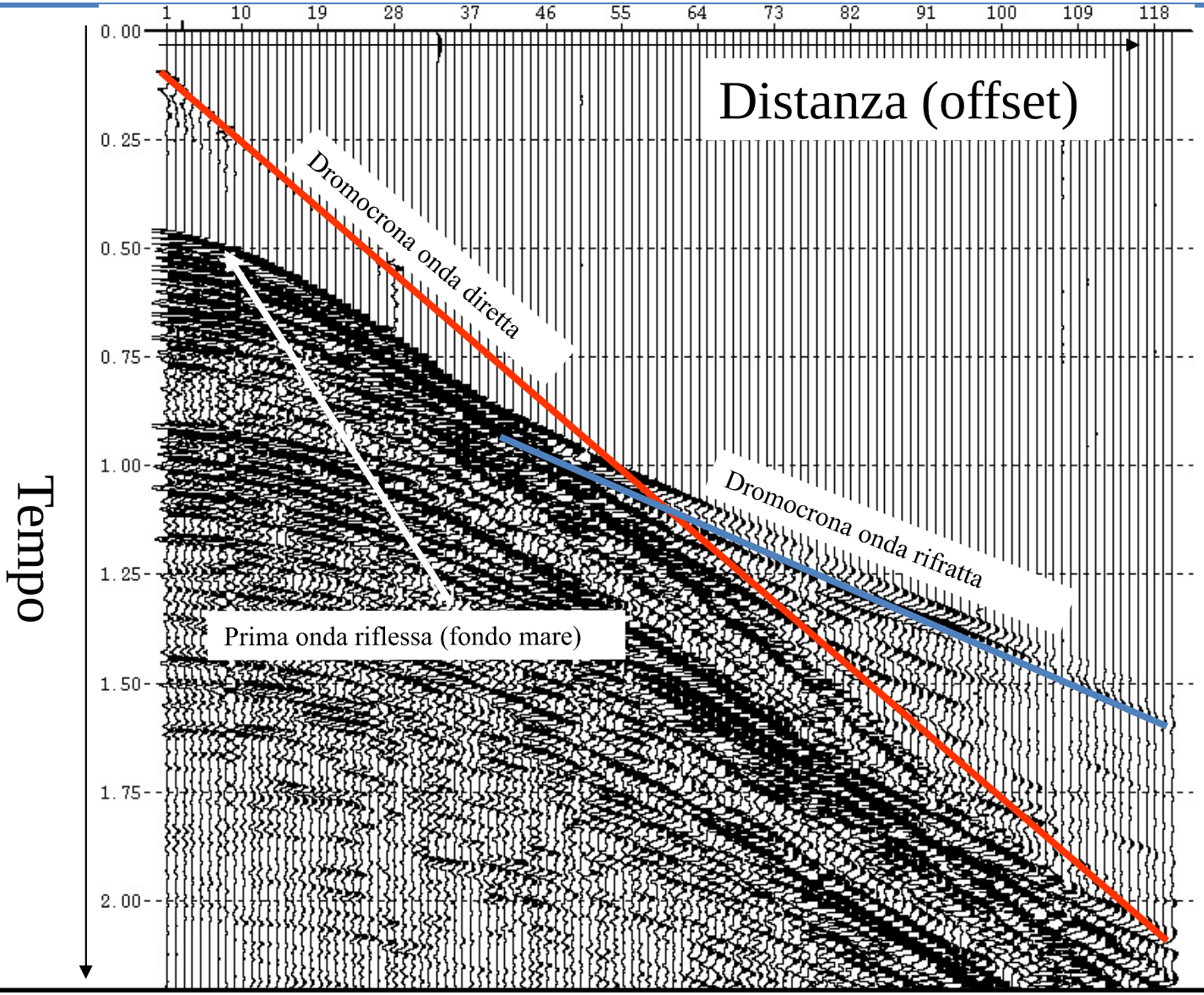
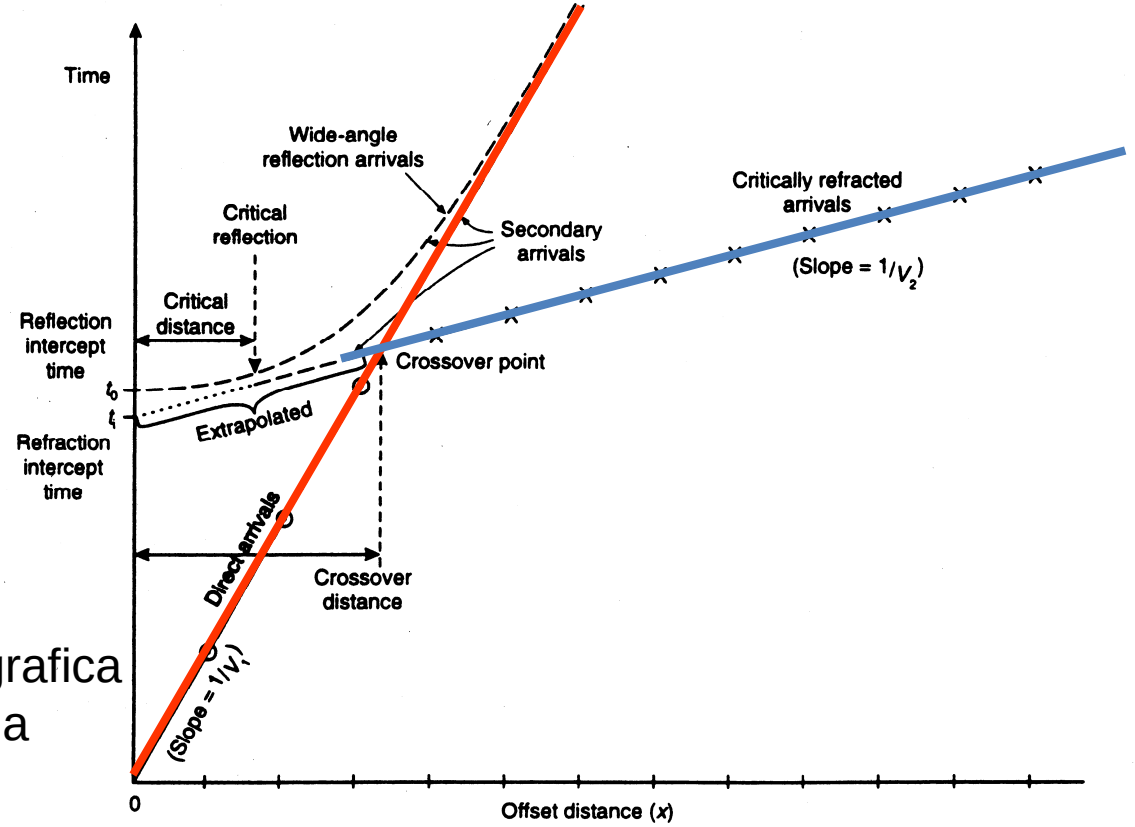
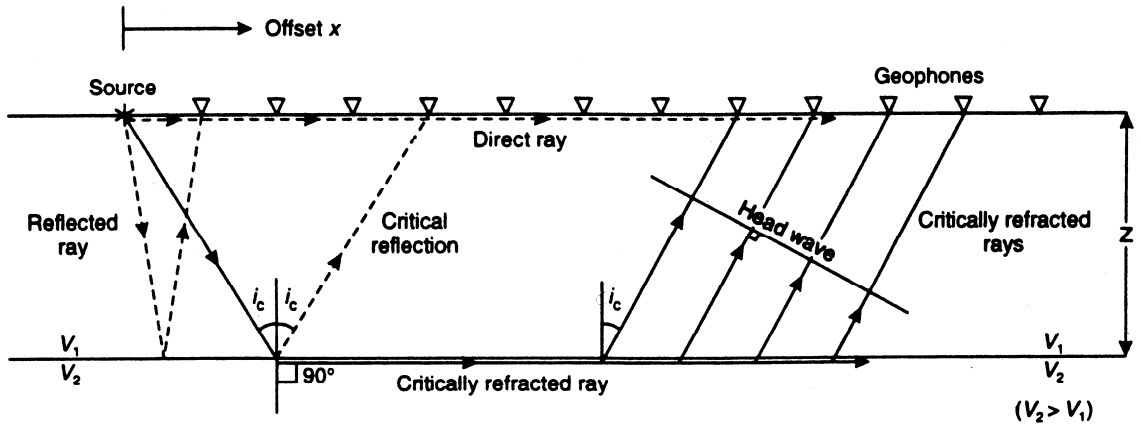


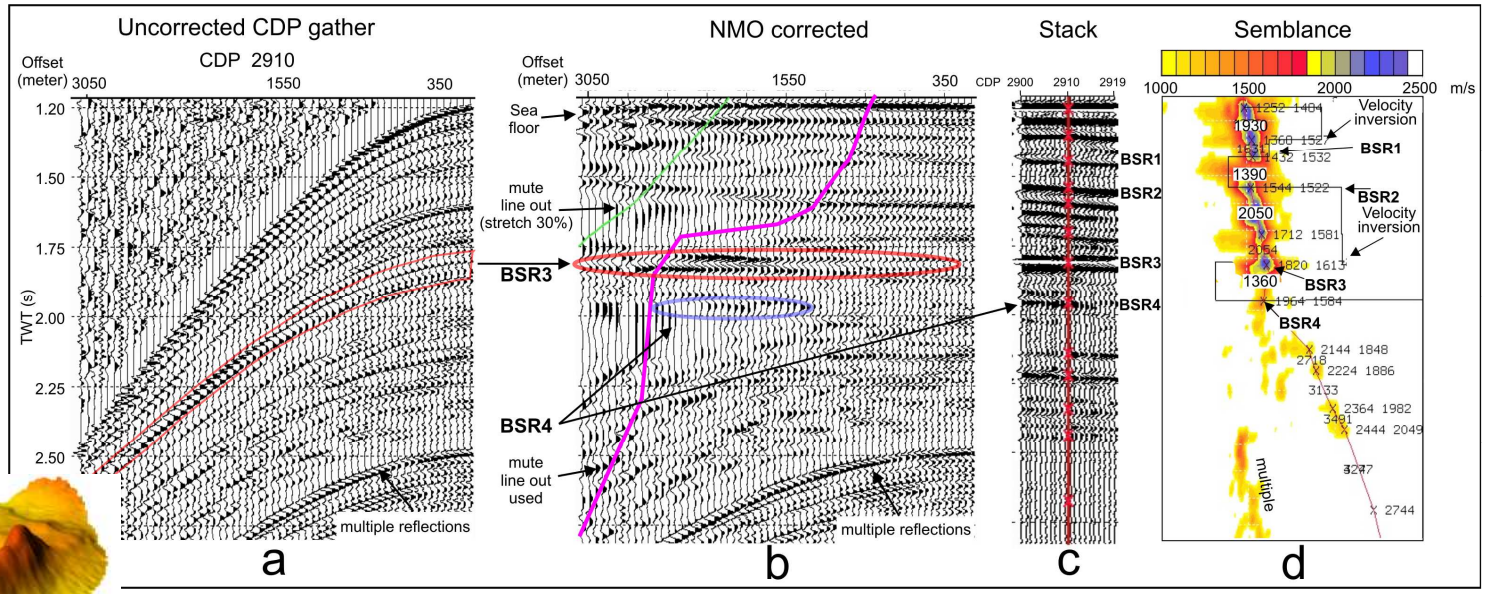
Immagine di una registrazione di uno scoppio: ogni traccia corrisponde alla registrazione di un singolo canale del cavo sismico (streamer). I segmenti rossi e blu indicano rispettivamente l'allineamento delle onde dirette e rifratte, come schematizzato nella figura seguente.

Rappresentazione grafica delle dromocrone (da Reynolds, 1997)

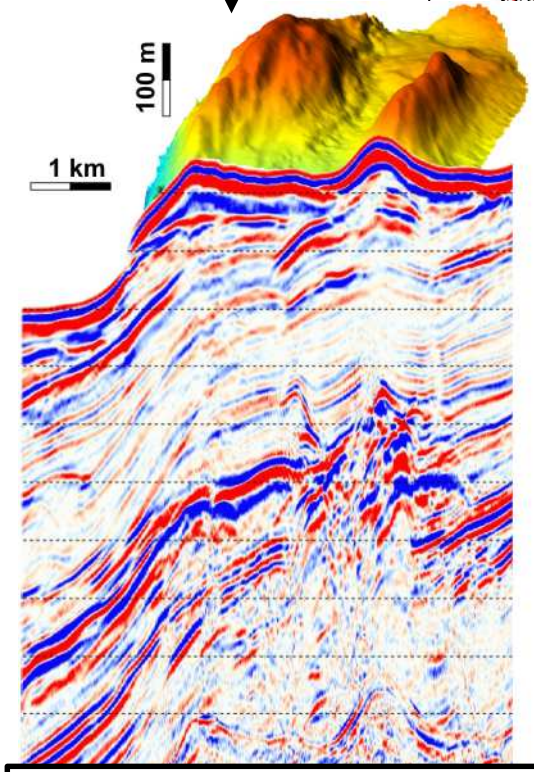




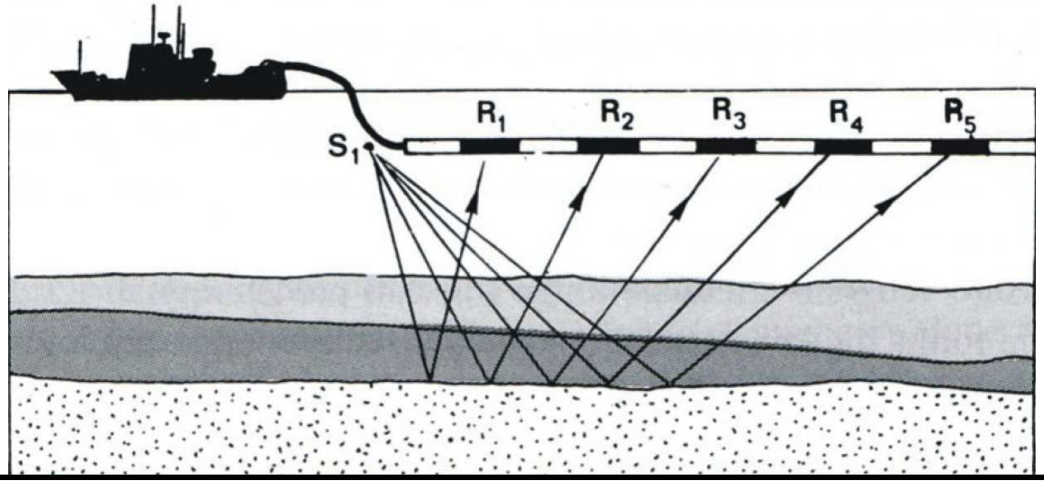
Dato iniziale



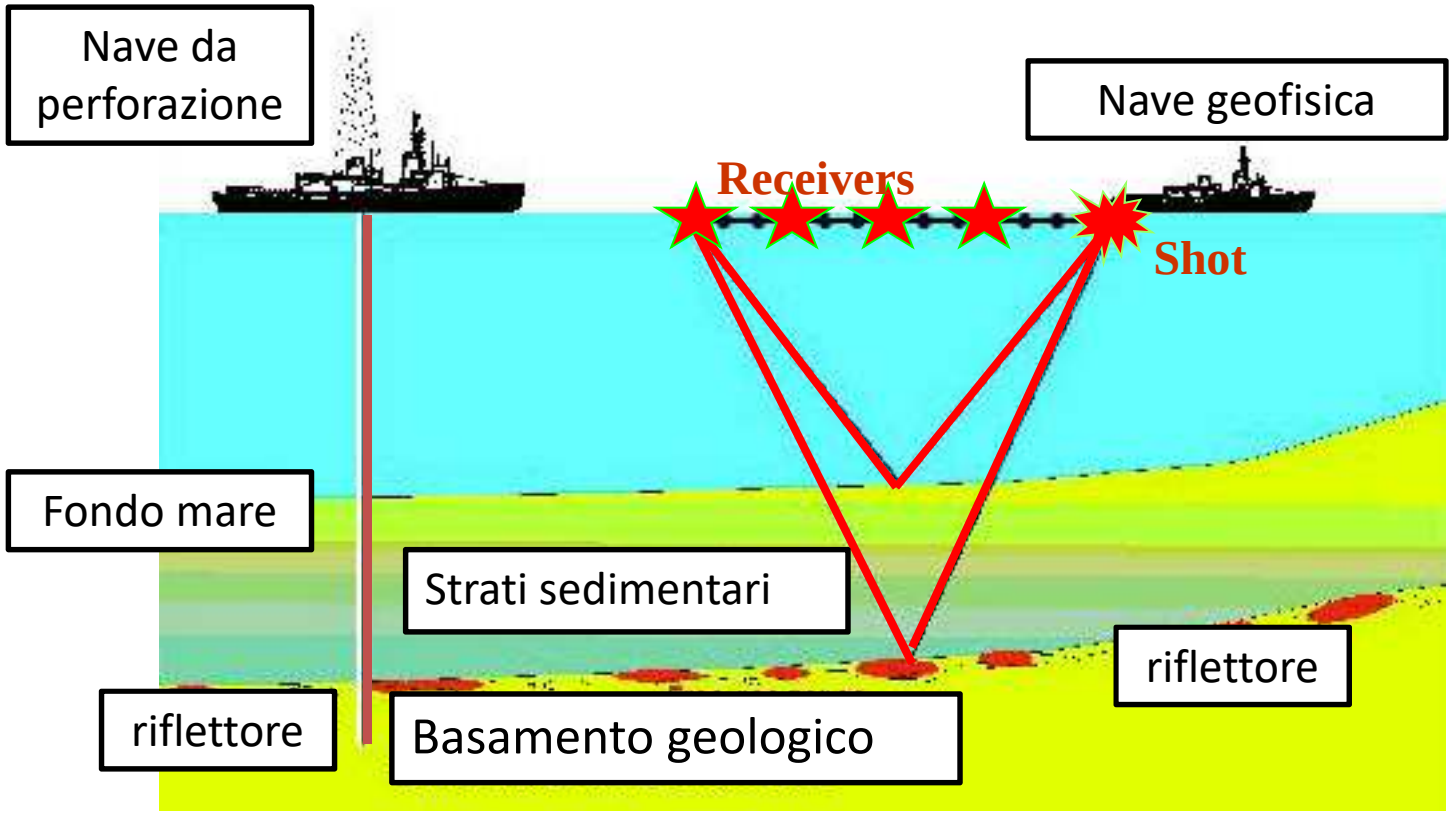
Prodotto finale



SISMICA A RIFLESSIONE MULTICANALE

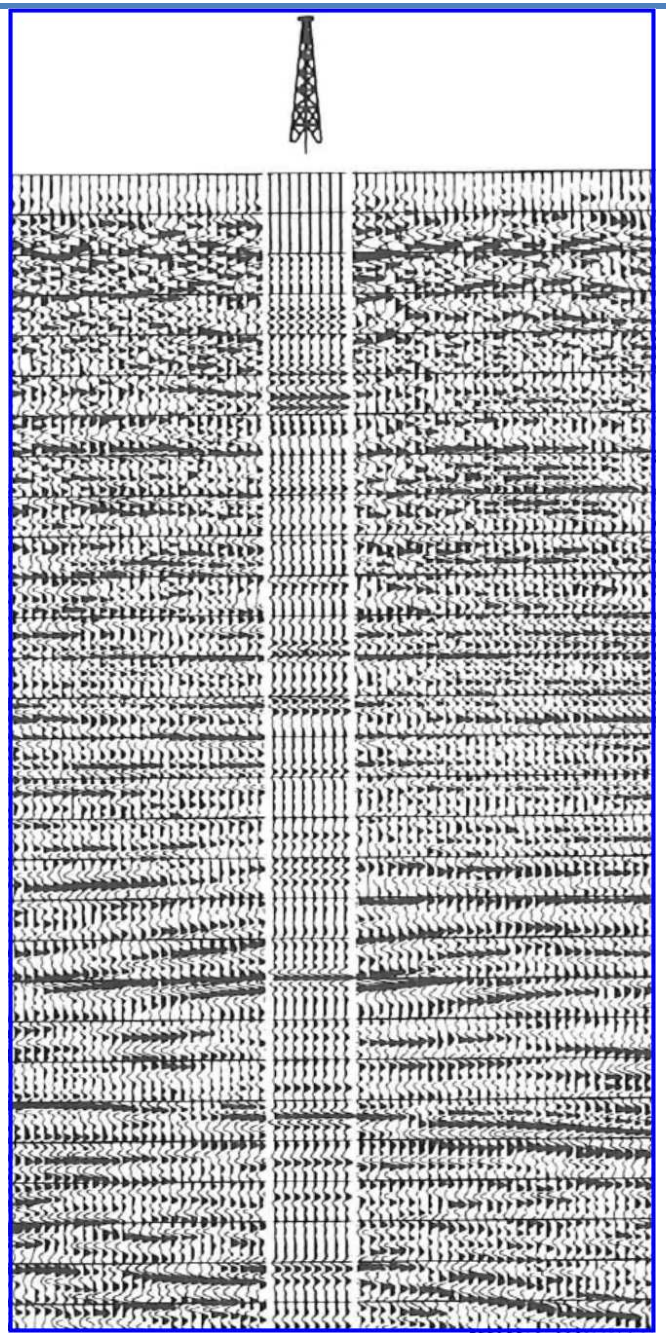


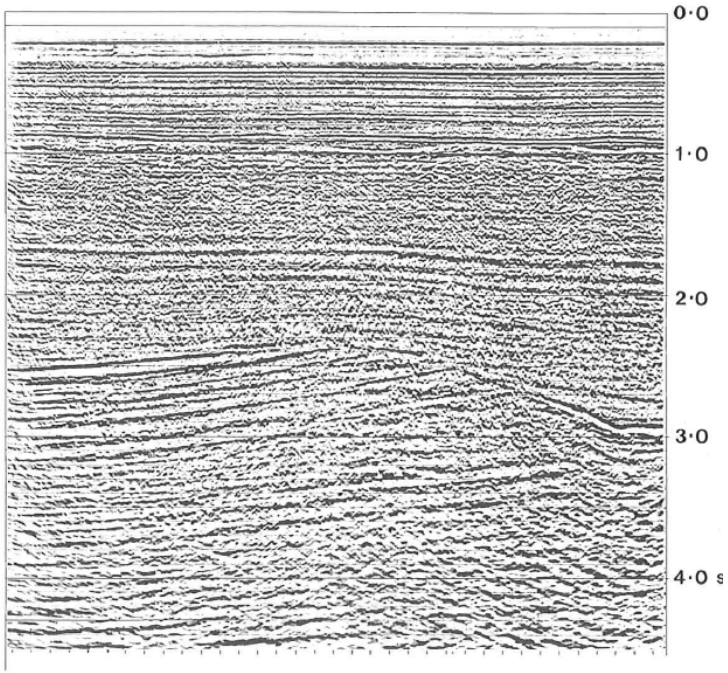
Alcuni dei passaggi di elaborazione del dato sismico multicanale fino all'immagine finale da interpretare



Per caratterizzare il dato geofisico è possibile correlare la sezione sismica con il dato diretto di pozzo acquisito con una nave apposita (si vedano le immagini successive). La correlazione tra geologia e sismica viene eseguita tramite un sondaggio acustico (sonic log) lungo il pozzo stesso. Il sonic log è un sismogramma ad altissima risoluzione che viene opportunamente elaborato per confrontarlo con il profilo sismico passante per quel stesso pozzo.

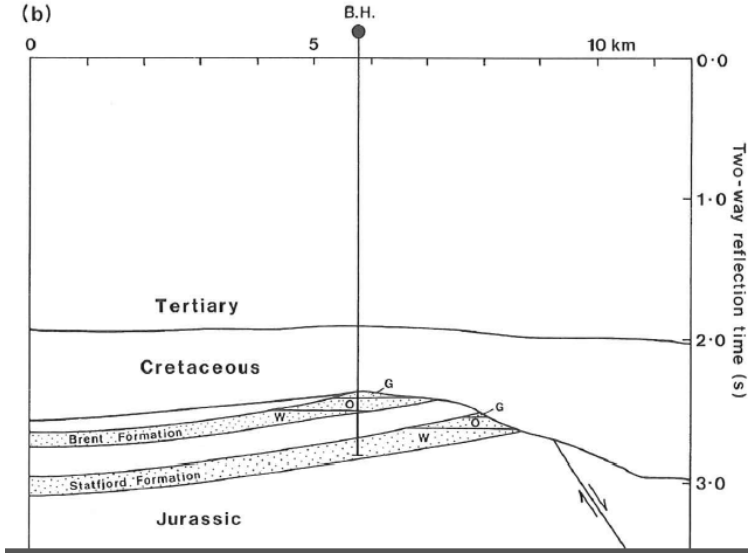
Esempio di correlazione tra il profilo sismico e il dato ottenuto dalla registrazione del sonic log. Il sismogramma di quest'ultimo viene replicato più volte per avere una migliore visibilità delle varie interfacce acustiche (vedasi Marine Geophysics pp. 275-277 per maggiori dettagli)



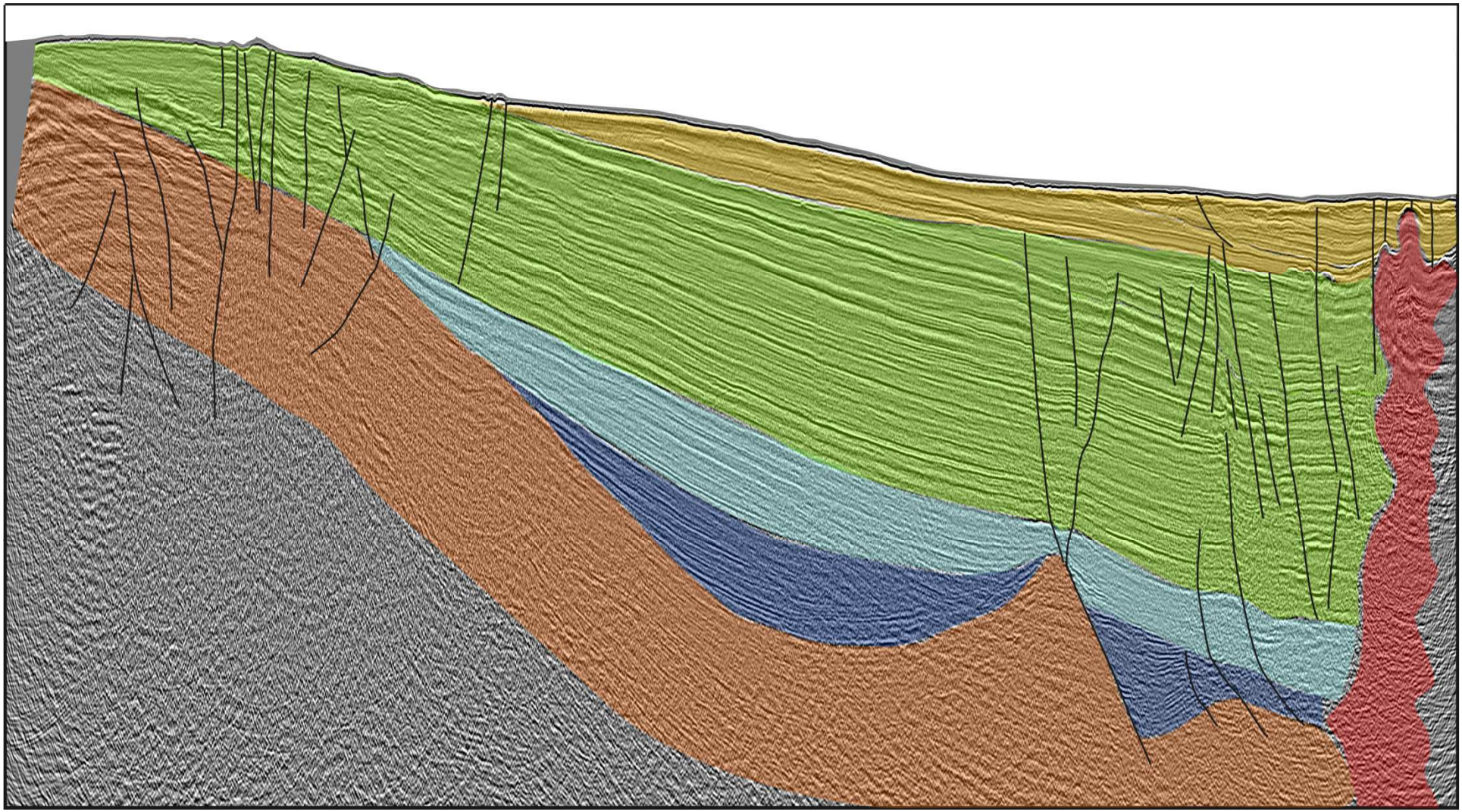


Sezione sismica

Il dato del sonic log è correlato direttamente a quello geologico campionato dalla medesima perforazione. Da ciò si può dare quindi un significato litologico ai singoli riflettori del profilo sismico passante per il pozzo. In altri termini il sonic log fa da tramite tra la sezione sismica e il dato geologico campionato.
A fianco un esempio di profilo sismico e la corrispondente sezione interpretata in base ai dati di pozzo.



Sezione interpretata



Nave da perforazione in acque profonde JOIDES RESOLUTION

Nave geofisica da ricerca sismica OGS EXPLORA

Per ottenere la sezione sismica dal dato grezzo sono necessarie molte operazioni di elaborazione da applicare in una sequenza ben definita, chiamata “processing flow”

Esempio di *flow-chart* per l'elaborazione sismica multicanale.

Le fasi principali nell'elaborazione sismica multicanale sono:

1) Sorting (riorganizzazione delle tracce da shot a CDP o punto di riflessione comune);

2) Gaining (applicazione di un guadagno d'ampiezza per controbilanciare l'effetto dell'attenuazione dell'onda nel suo percorso);

3) Analisi di velocità per poter correggere l'effetto del differente tempo di arrivo delle riflessioni nel CDP (punto 4);

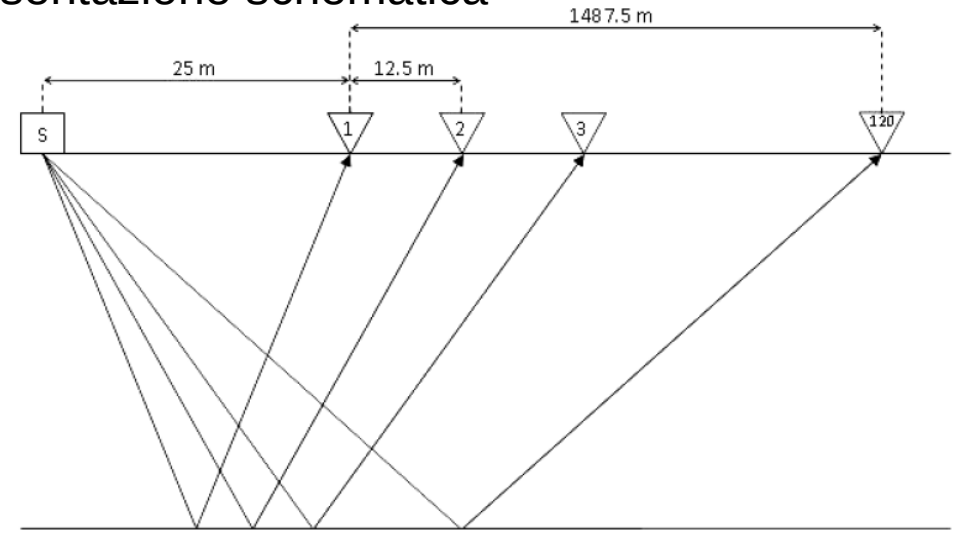
4) Correzione di NMO (riporto delle tracce a offset 0);

5) Stack (somma delle tracce per lo stesso CDP);

6) Migrazione

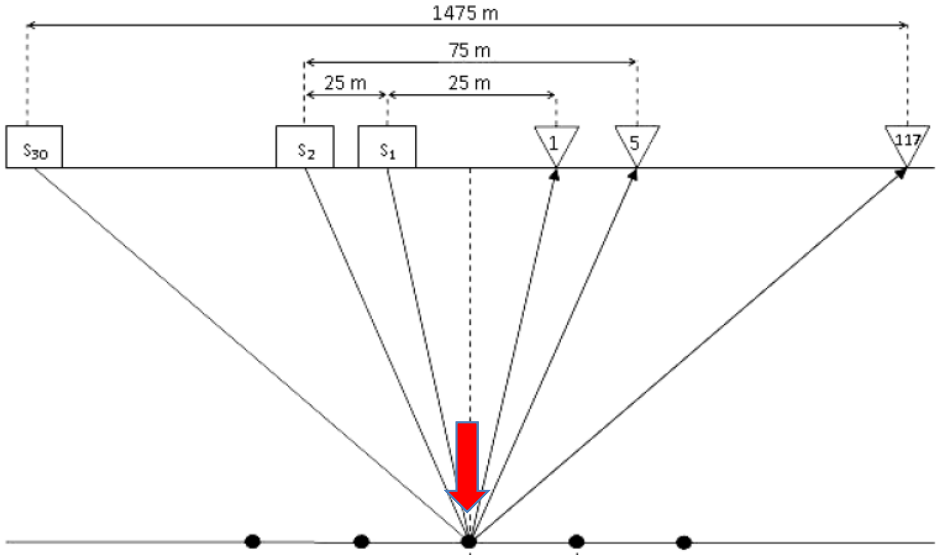
Esempio di rappresentazione schematica delle geometrie di:

Shot gather



e

CDP gather



Punto di riflessione comune (CDP)

Schema di copertura (fold) 6 per un CDP acquisito da un sistema a 12 canali che si muove progressivamente verso destra di uno (S1, S2 …. S6) (da Kearey, Brooks and Hill, 2002).

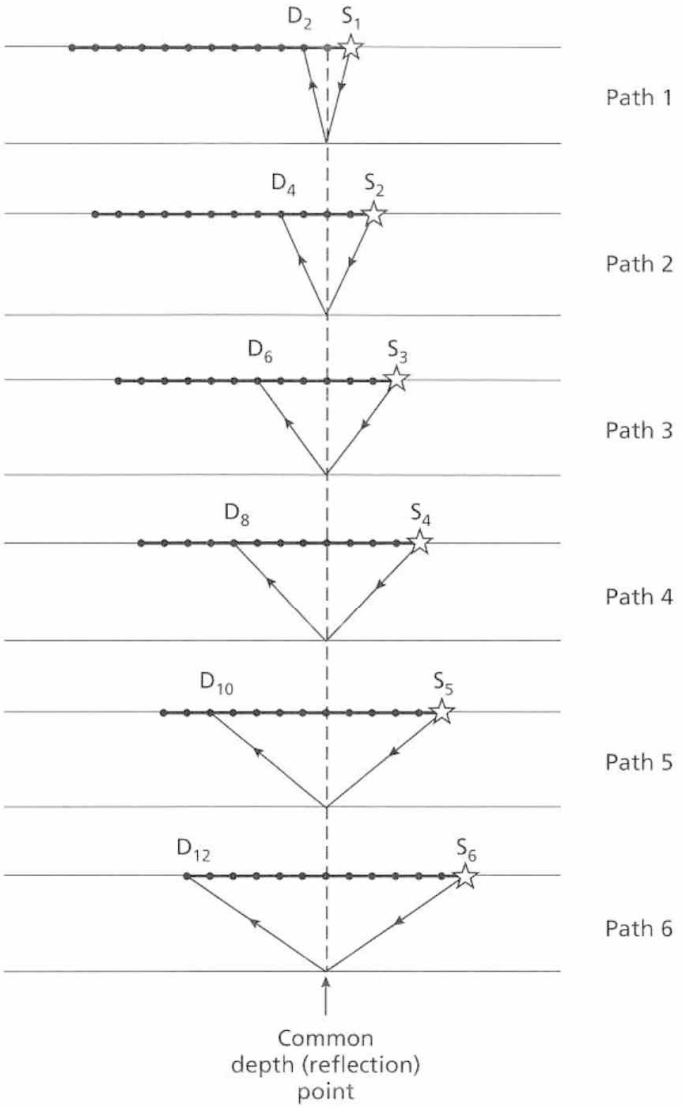


Fig. 4.14 A field procedure for obtaining six-fold CDP coverage with a single-ended 12-channel detector spread moved progressively along the survey line.

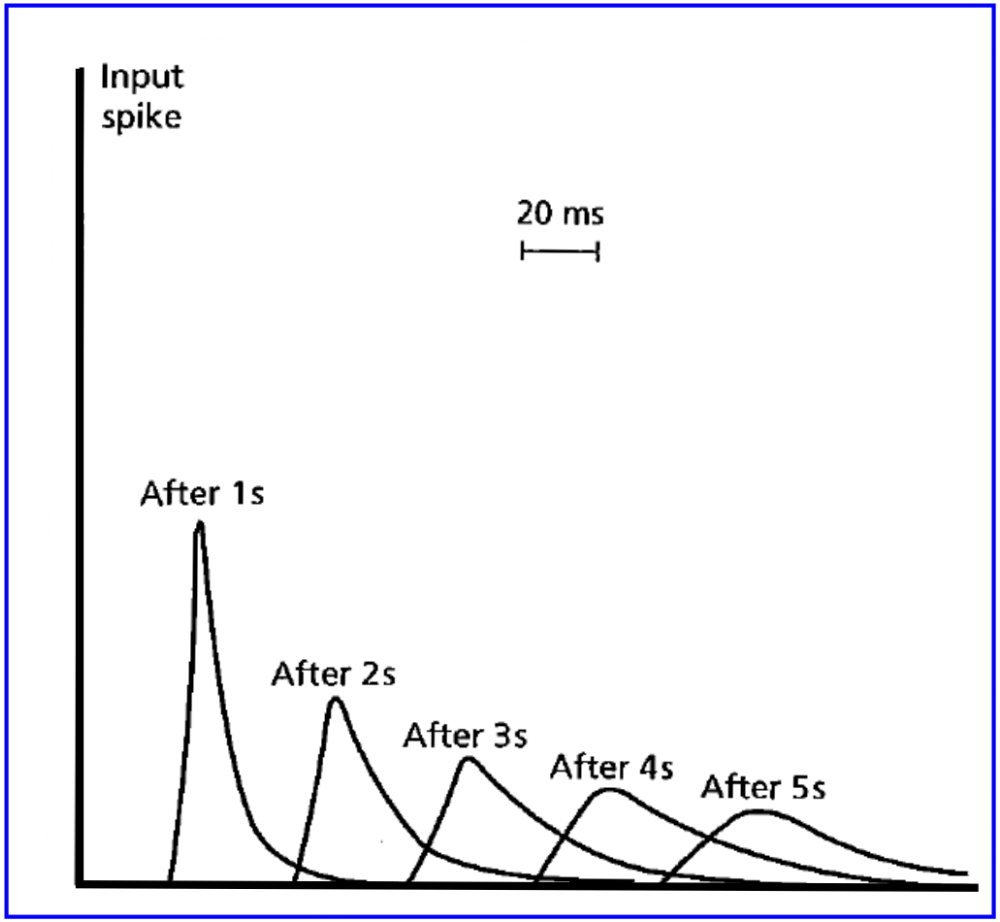
Nella procedura di “gaining” si vuole correggere l’attenuazione d’ampiezza dell’ondina sismica dovuta all’effetto della divergenza sferica e all’assorbimento del terreno.

Assorbimento

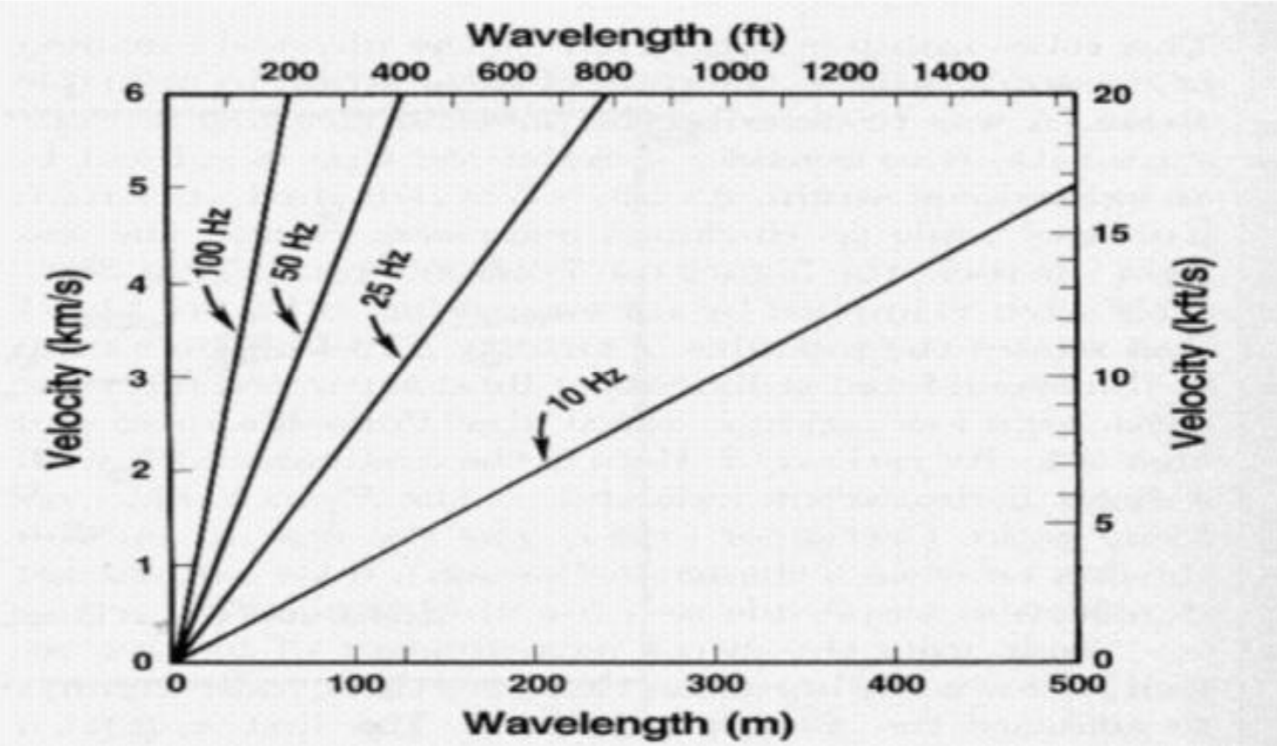
L’effetto dell’assorbimento produce un progressivo allungamento dell’impulso sismico.

A lato viene raffigurata la progressiva variazione di forma di un impulso tipo *spike* durante la sua propagazione attraverso il terreno a causa dell’effetto dell’assorbimento.

(da Anstey, 1977)



Risoluzione Verticale



La velocità è un parametro che dipende dalle caratteristiche del mezzo, quindi non potremo agire su di essa ai fini della risoluzione. Il parametro fondamentale diventa allora la frequenza. Quando immettiamo dell'energia nel terreno, questa è caratterizzata da un certo range di frequenze. Nel terreno attraversato l'energia tende a distribuirsi in una banda di frequenze centrata sulla frequenza dominante. La frequenza dominante dipende da :

- Proprietà fisiche del sottosuolo
- Frequenza immessa nel terreno
- Parametri di registrazione
- Processing del segnale acquisito

Potremo agire sugli ultimi tre elementi per migliorare la risoluzione.

Table 11-1. Threshold for vertical resolution.

$$\lambda/4 = v/4f$$

v (m/s)	f (Hz)	$\lambda/4$ (m)
2000	50	10
3000	40	18
4000	30	33
5000	20	62

Risoluzione Orizzontale

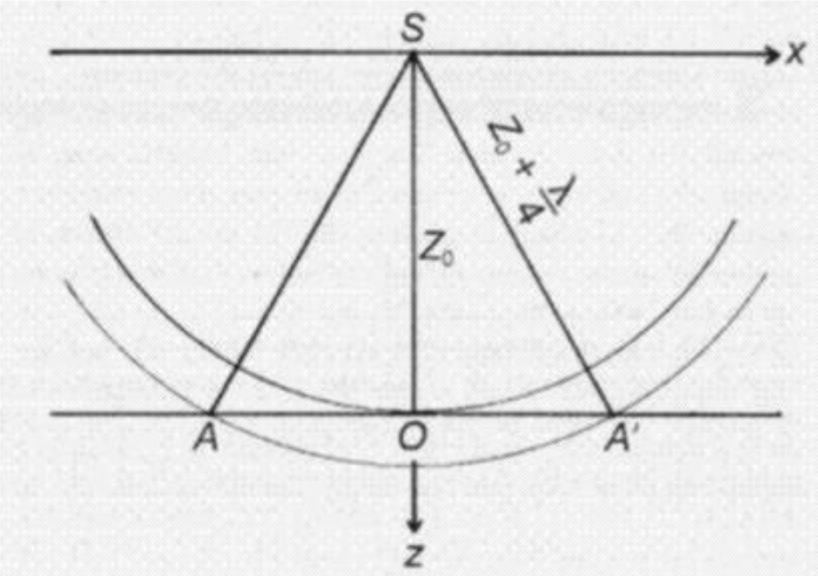


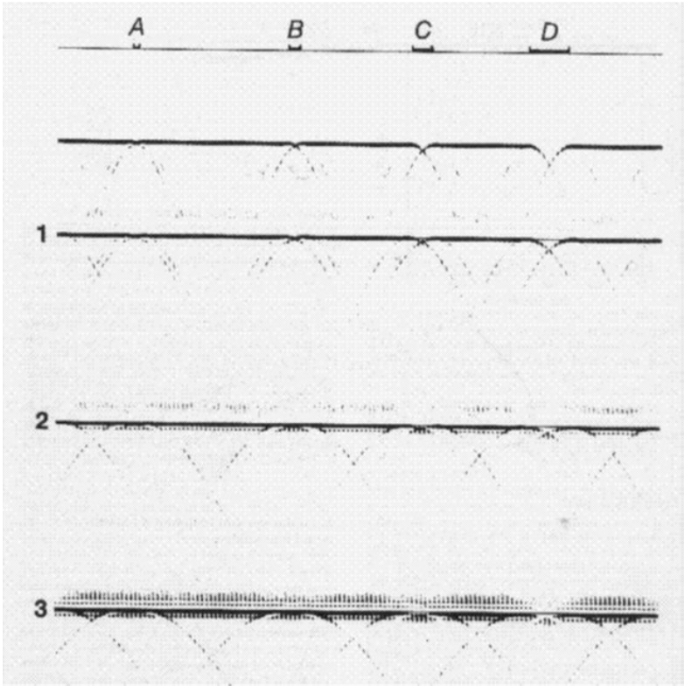
Table 11-2. Threshold for lateral resolution (first Fresnel zone).

$$r = (v/2)\sqrt{t_0/f}$$

t_0 (s)	v (m/s)	f (Hz)	r (m)
1	2000	50	141
2	3000	40	335
3	4000	30	632
4	5000	20	1118

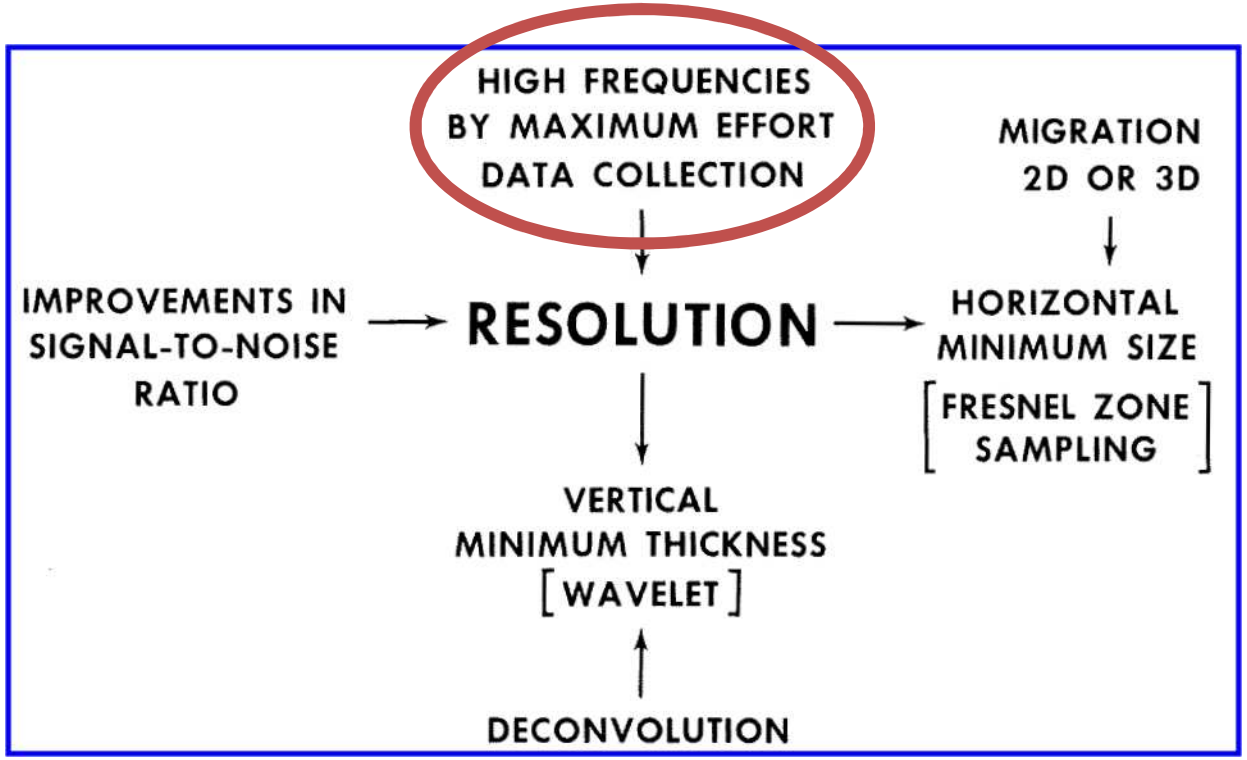
$$r = \frac{v}{2}\sqrt{\frac{t_0}{f}}. \qquad (11-2b)$$

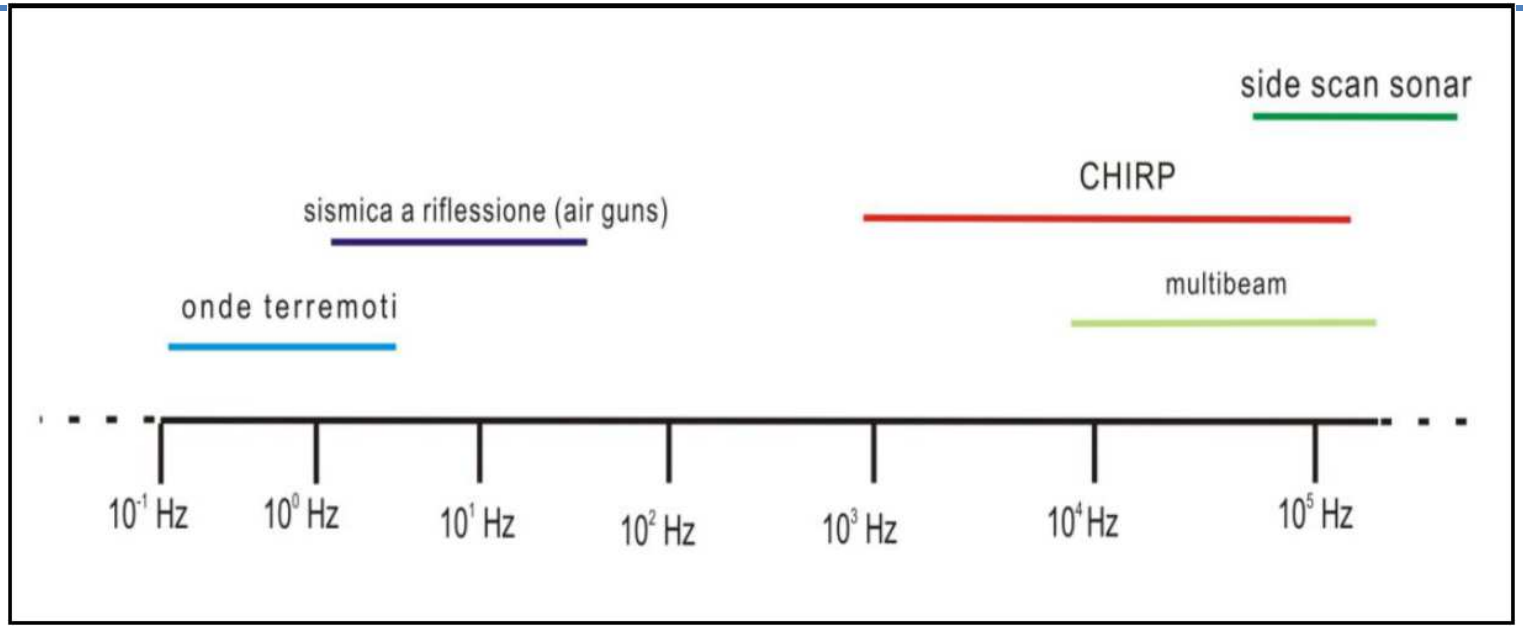
È definita come la distanza laterale minima tra due elementi riflettenti, necessaria per poterli distinguere individualmente all'interno di un profilo sismico. La risoluzione laterale è determinata dal raggio della *Zona di Fresnel*, l'area compresa fra il fronte d'onda tangente alla superficie di discontinuità e il successivo fronte d"onda a distanza λ/4

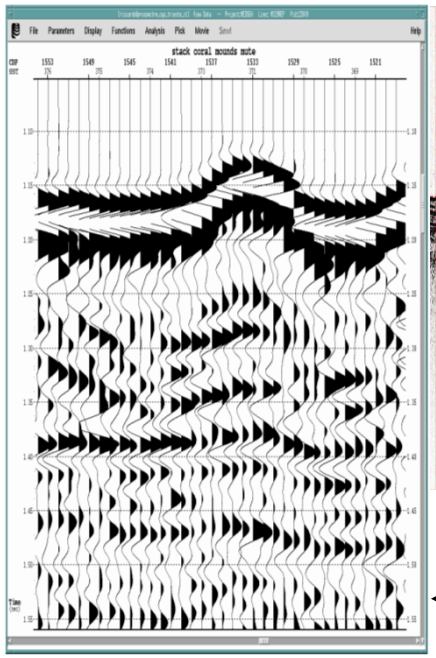


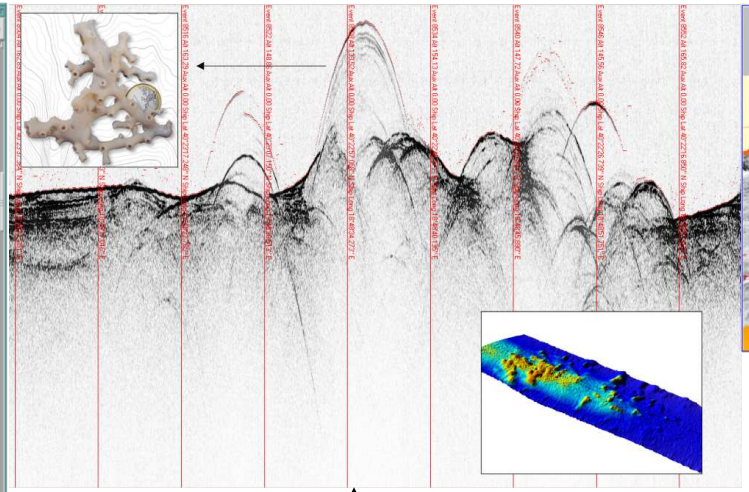
Effetto della profondità (0.5, 1, 2, 3 sec 2wt) dei riflettori sulla risoluzione laterale: A, B, C, D segmenti di diversa lunghezza relativi ad assenza di riflessione: il livello del rumore e la presenza delle diffrazioni sono elementi importanti (Yilmaz, 1999)

Si può agire sulla risoluzione in acquisizione …….



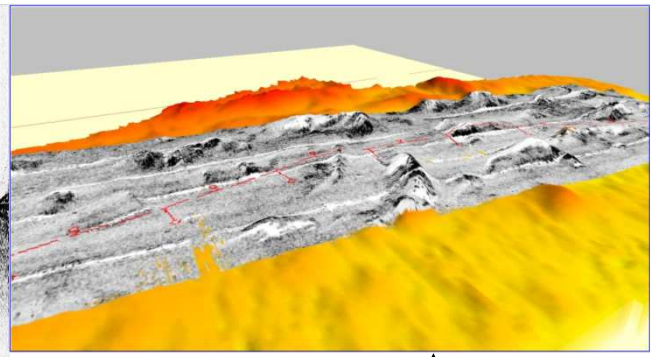




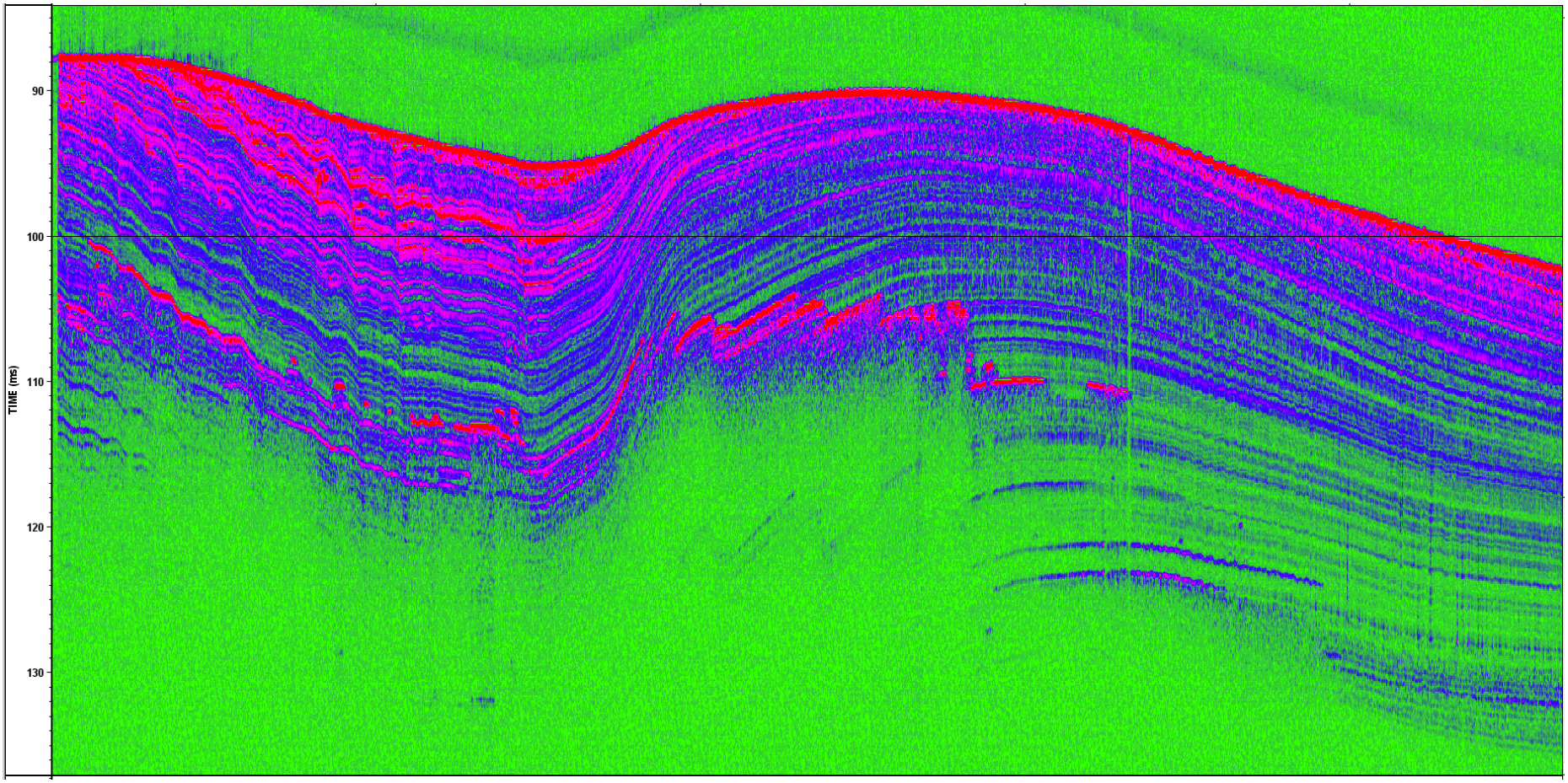


Profilo CHIRP

Profilo sismico a bassa risoluzione

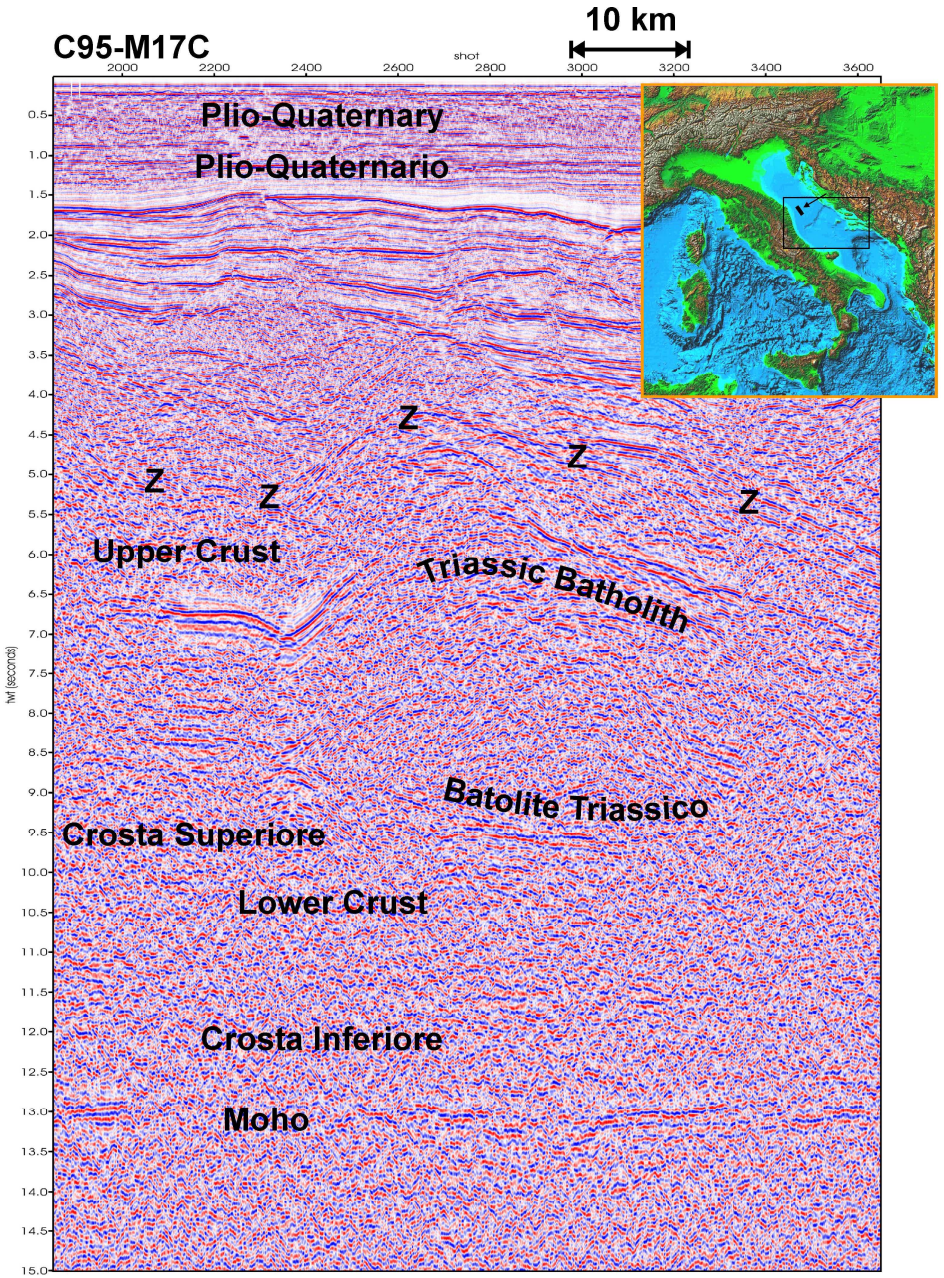


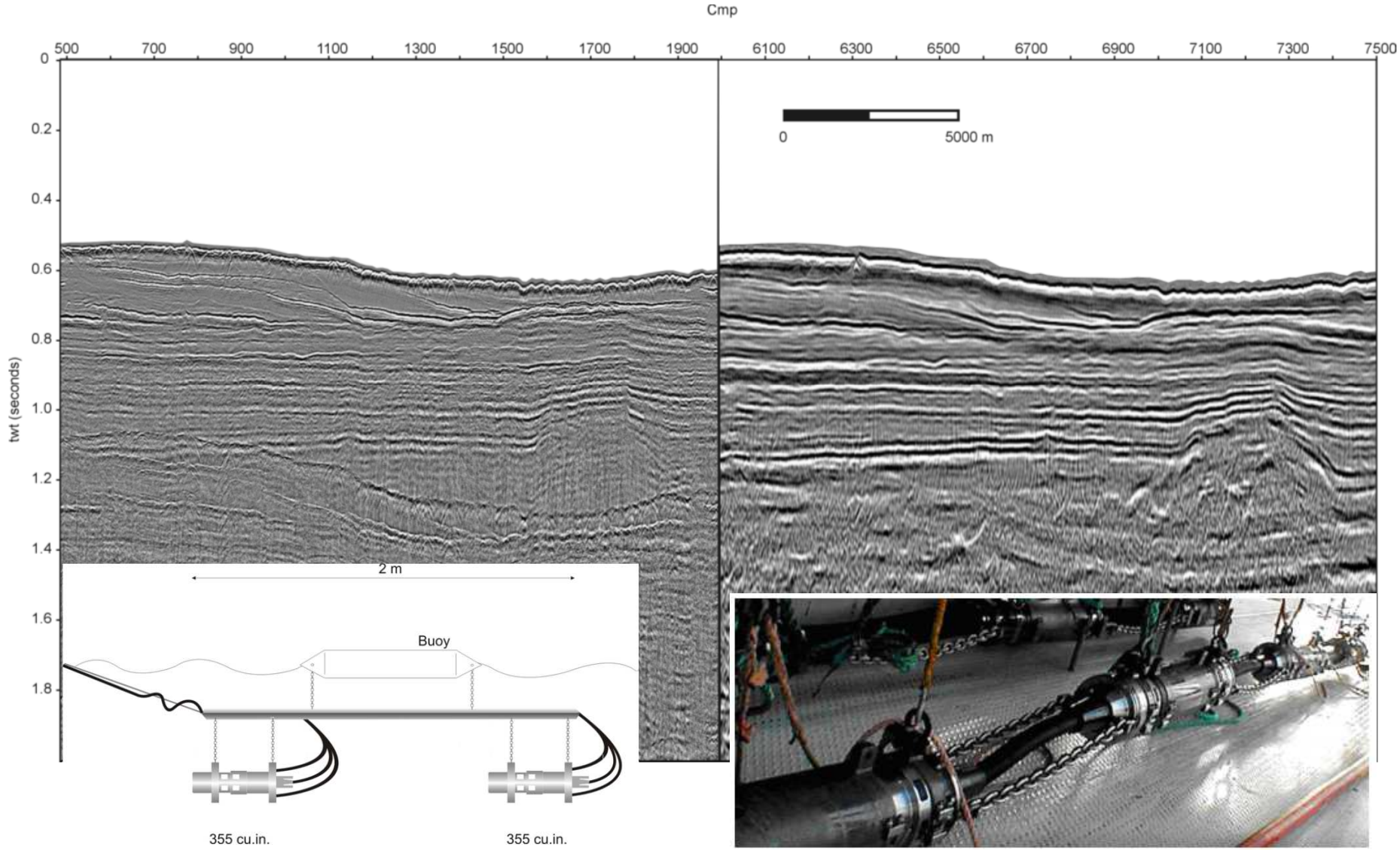
Strisciata side scan sonar su multibeam



Esempio di sezione CHIRP dove si possono osservare la presenza di faglie, pieghe e gas nei sedimenti degli strati più superficiali fino ad una profondità 15/20 metri

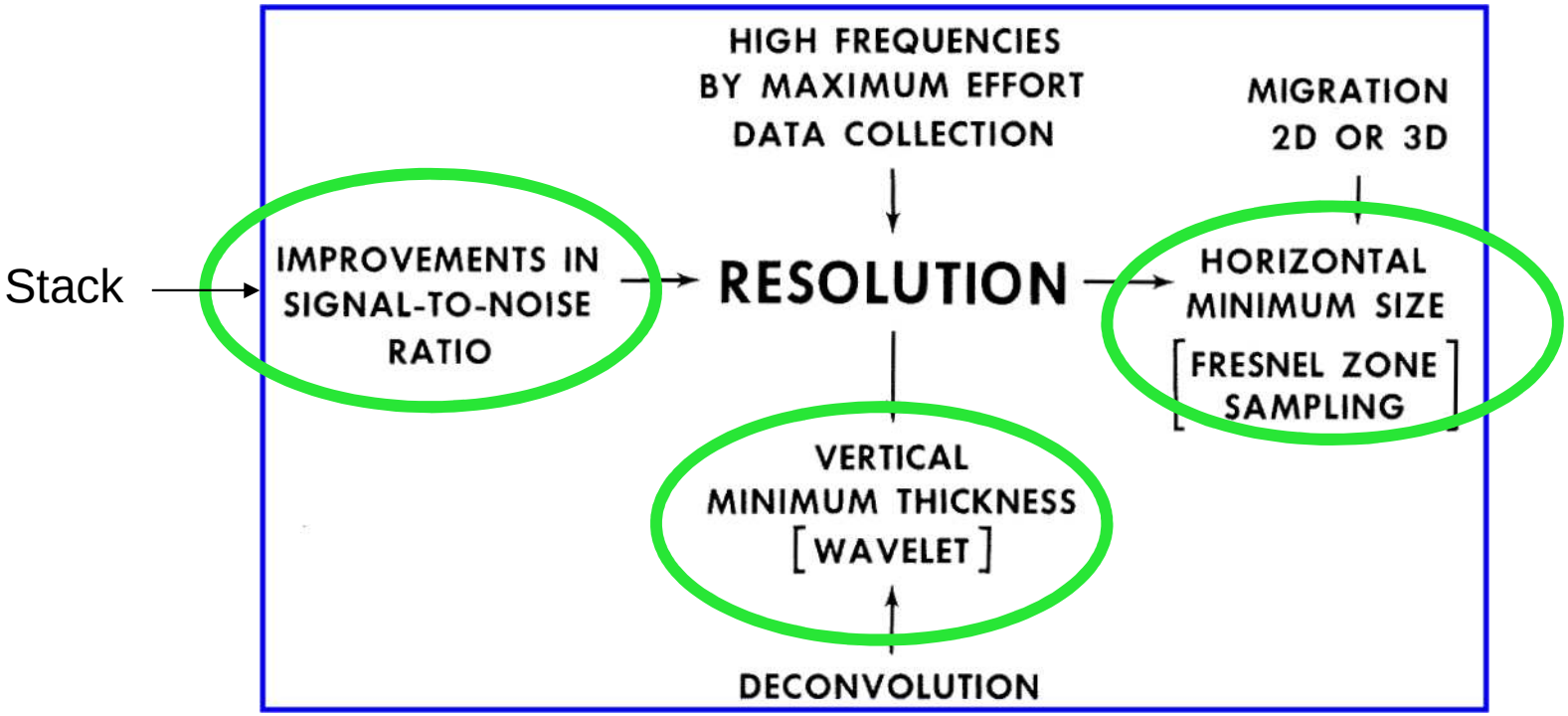
Esempio di profilo sismico crostale in cui si possono osservare alcuni evidenti orizzonti riflettenti tra i quali la base del Plio-Quaternario (ad una profondità di c. 1,5/2 km) e la Moho ad una profondità di c. 30 km (13 s). Il segnale relativo a quest'ultima ha una risoluzione verticale dell'ordine del centinaio di metri.

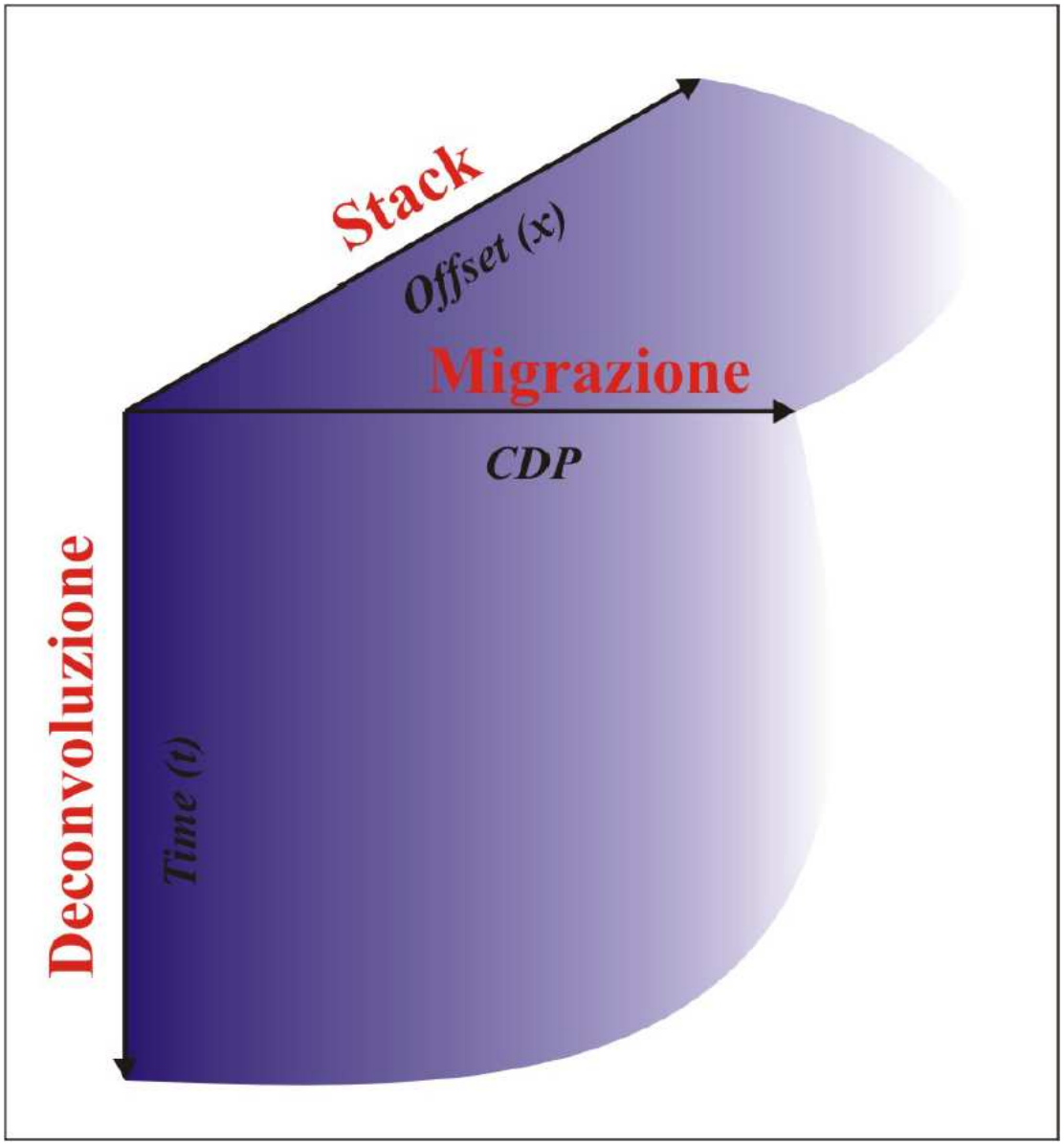




Differenti sorgenti di una stessa linea: 2 GI gun sulle sinistra per sismica a media risoluzione e un array di 18 air gun a destra per indagine crostale

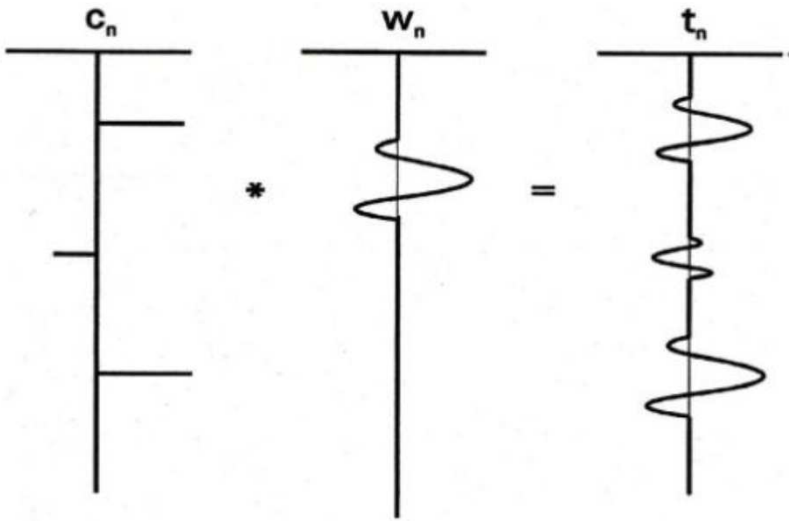
Inoltre si può agire sulla risoluzione in fase di elaborazione …….

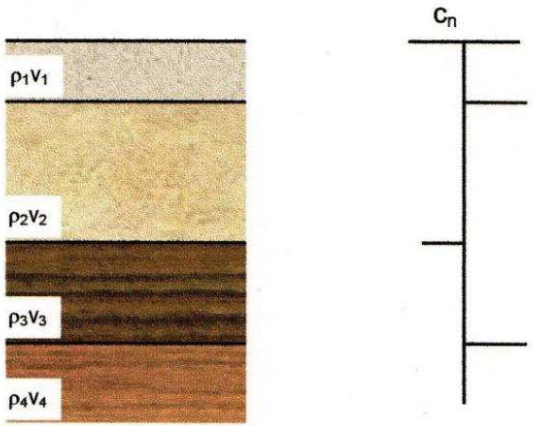




Cubo 3D delle fasi principali di processing sismico (Yilmaz, 2001)

Rappresentazione schematica del modello convolutivo





Rappresentazione della sequenza di coefficienti di riflessione (a destra) che descrive la colonna stratigrafica reale (a sinistra)

Deconvoluzione

La funzione primaria della deconvoluzione è di operare inversamente al modello sopra esposto e cioé quello di comprimere l'ondina nel sismogramma registrato ed attenuare le multiple, cioè quelle componenti periodiche presenti nella traccia sismica che non portano informazioni sulla struttura da esaminare. In questo modo possiamo aumentare la risoluzione temporale e produrre una rappresentazione corretta della superficie di riflessione. Il processo normalmente è applicato prima dello stack ma è possibile applicarlo anche ai dati stacked.

Risoluzione verticale

Esempio di effetto della deconvoluzione sulla definizione dei dati sismici. La deconvoluzione “restringe” l’ondina come mostrato in figura (dato sintetico)

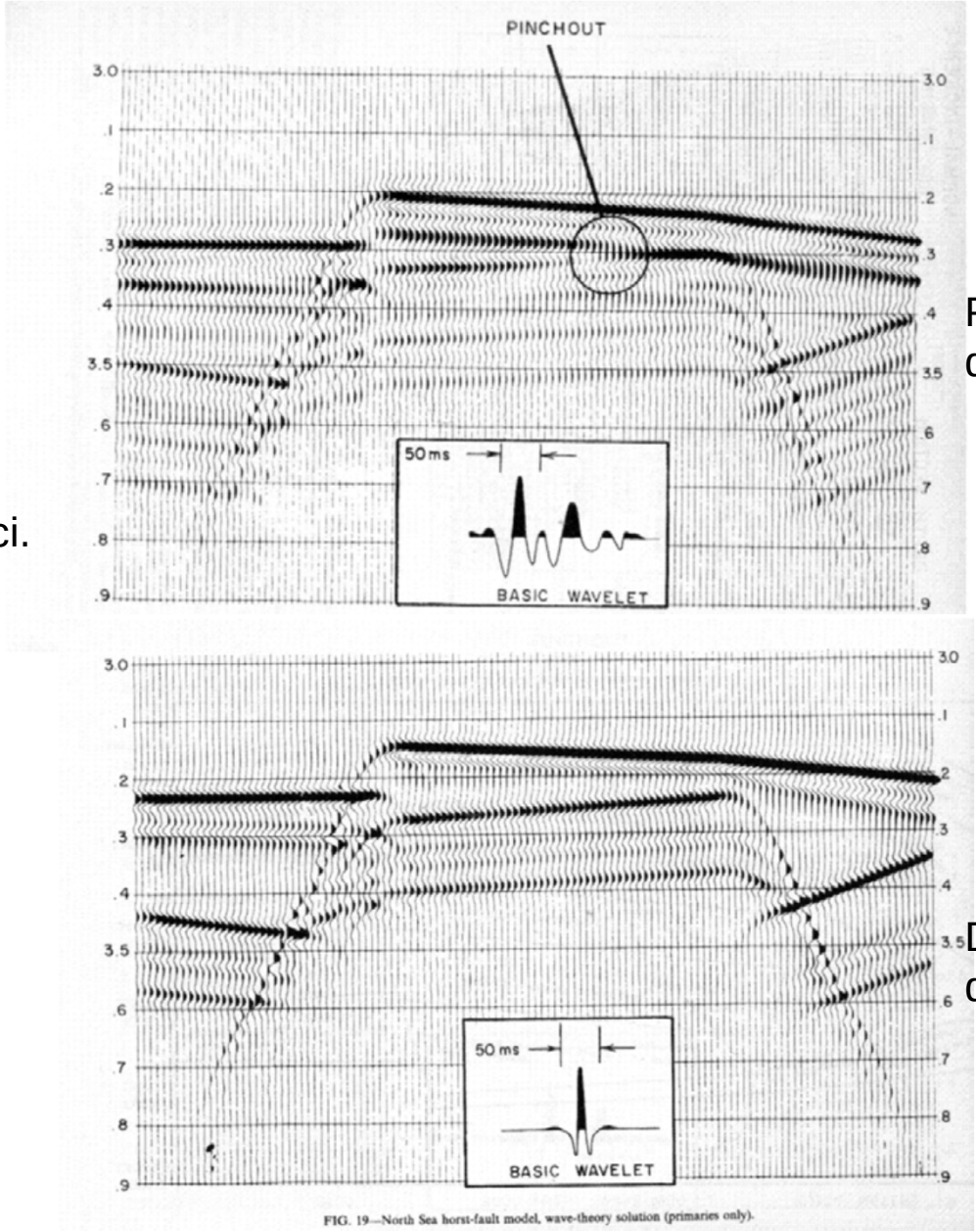


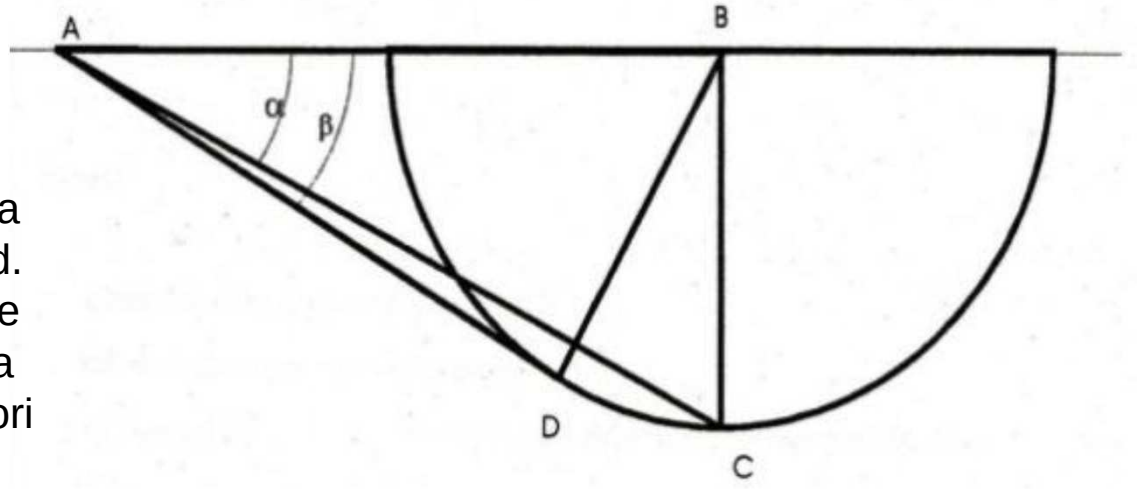
FIG. 19—North Sea horst-fault model, wave-theory solution (primaries only).

Prima della deconvoluzione

Dopo il processo deconvolutivo

Risoluzione orizzontale

La migrazione viene applicata comunemente ai dati stacked. È un processo che collassa le iperboli di diffrazione e riporta alla giusta inclinazione riflettori inclinati.



1. L'nclinazione dei riflettori nella sezione geologica è maggiore rispetto alla sezione stack (zero-offset/tempo). La migrazione, recuperando la corretta posizione spaziale degli eventi sismici, aumenta l'inclinazione dei riflettori

2. Le dimensioni lineari di un riflettore nella sezione stack (zero-offset) sono maggiori rispetto alla sezione migrata. La migrazione riduce le dimensioni lineari dei riflettori

In alto: modello strutturale di superfici riflettenti e relativa risposta sismica sintetizzata dagli allineamenti degli eventi riflessi.
In basso: esempio di interfaccia riflettente a sinclinale e sotto, risposta sismica tipica a «bow-tie».

(Da Kearey, Brooks and Hill, 2002).

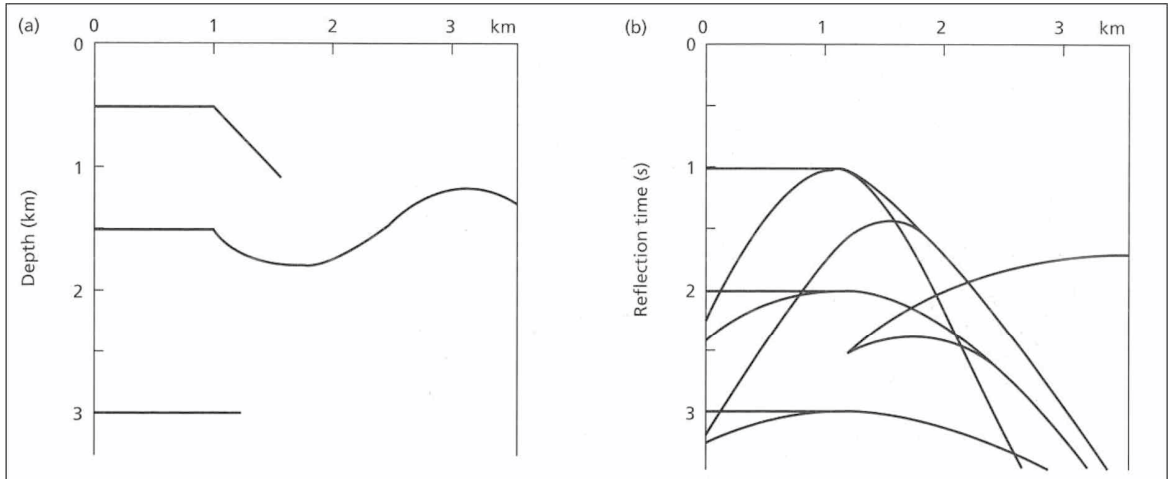


Fig. 4.27 (a) A structural model of the subsurface and (b) the resultant reflection events that would be observed in a non-migrated seismic section, containing numerous diffraction events. (After Sheriff 1978.)

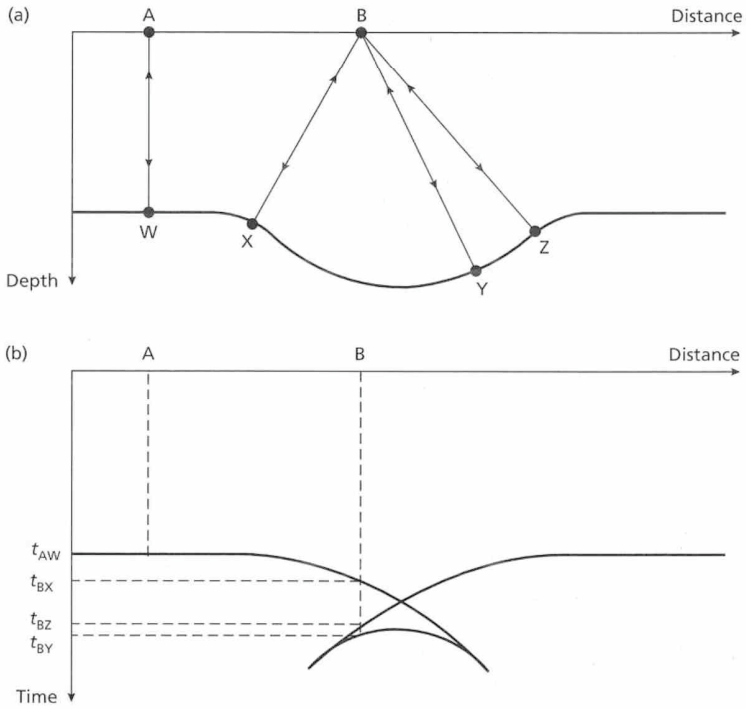
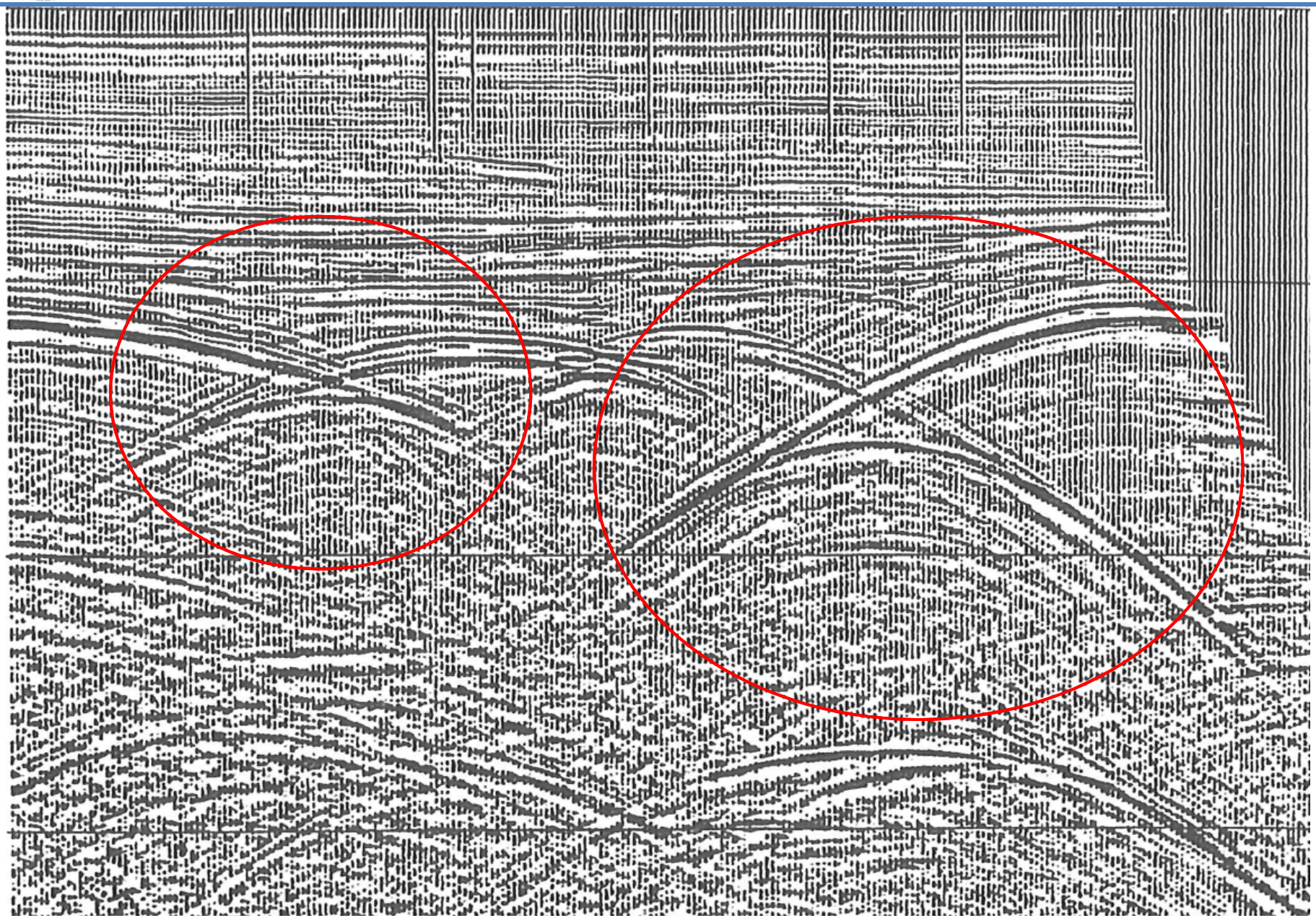
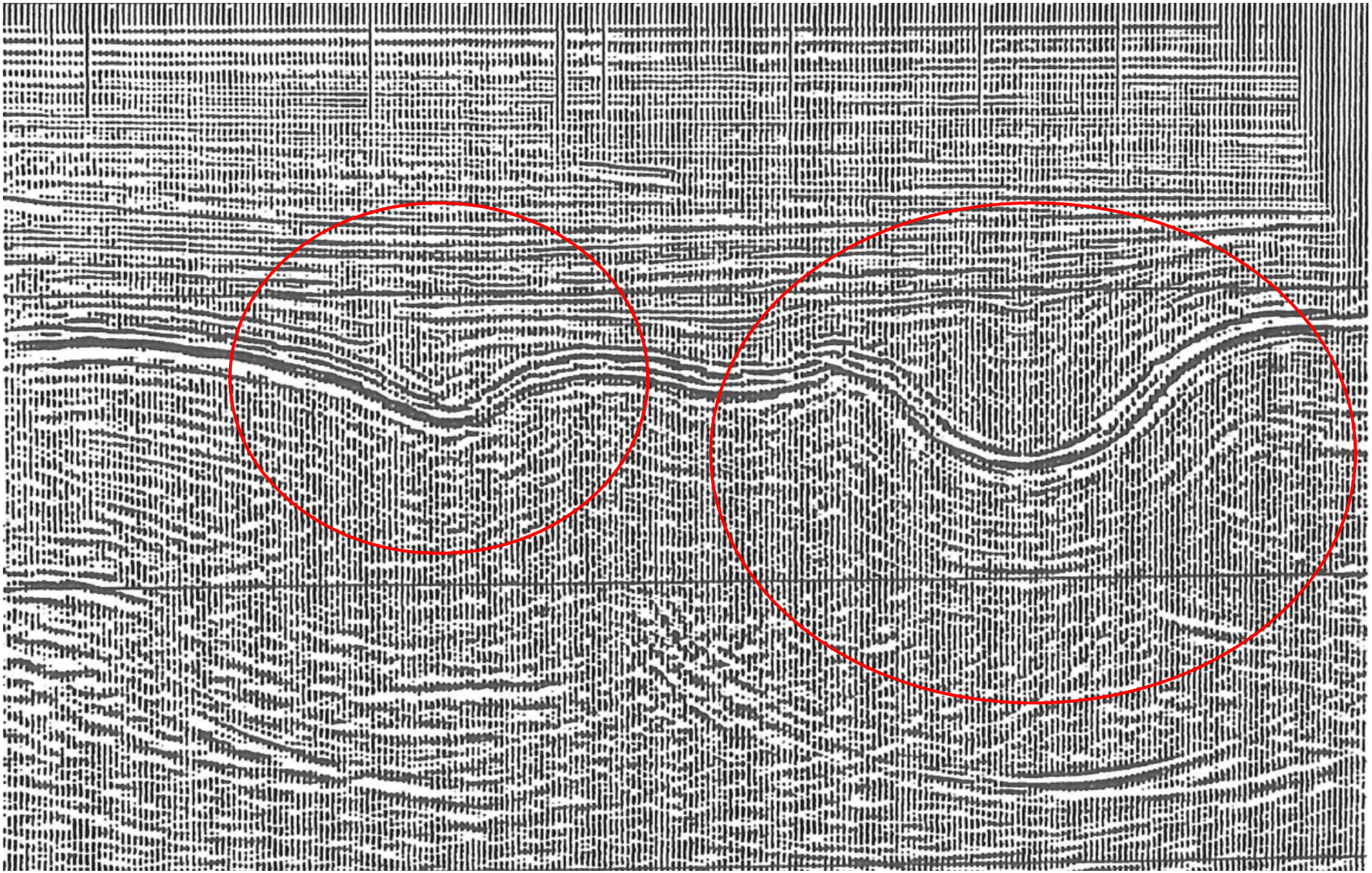


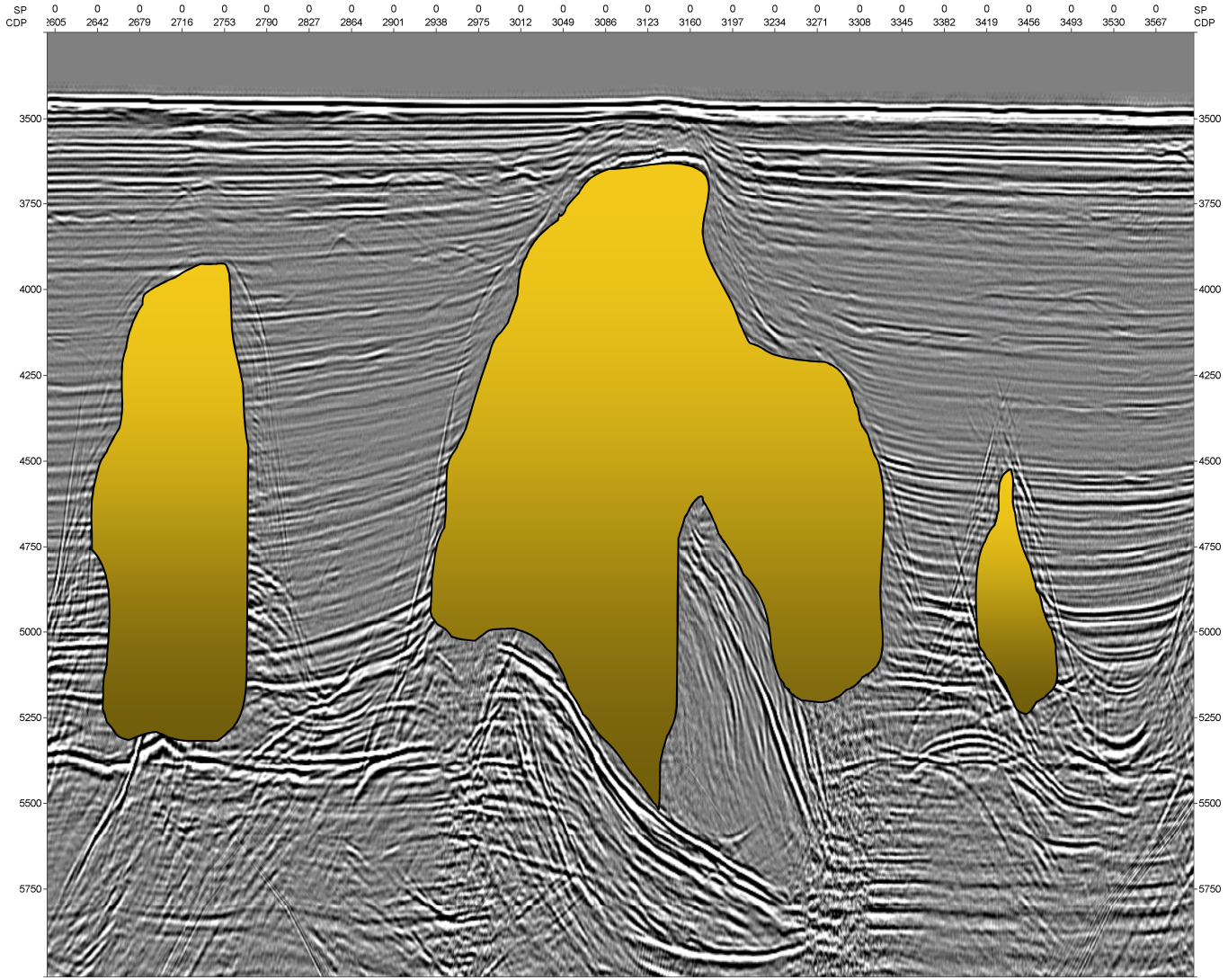
Fig. 4.28 (a) A sharp synclinal feature in a reflecting interface, and (b) the resultant 'bow-tie' shape of the reflection event on the non-migrated seismic section.



Sezione STACK in cui si nota la presenza di numerose iperboli di diffrazione «bow-tie» ..... (segue)



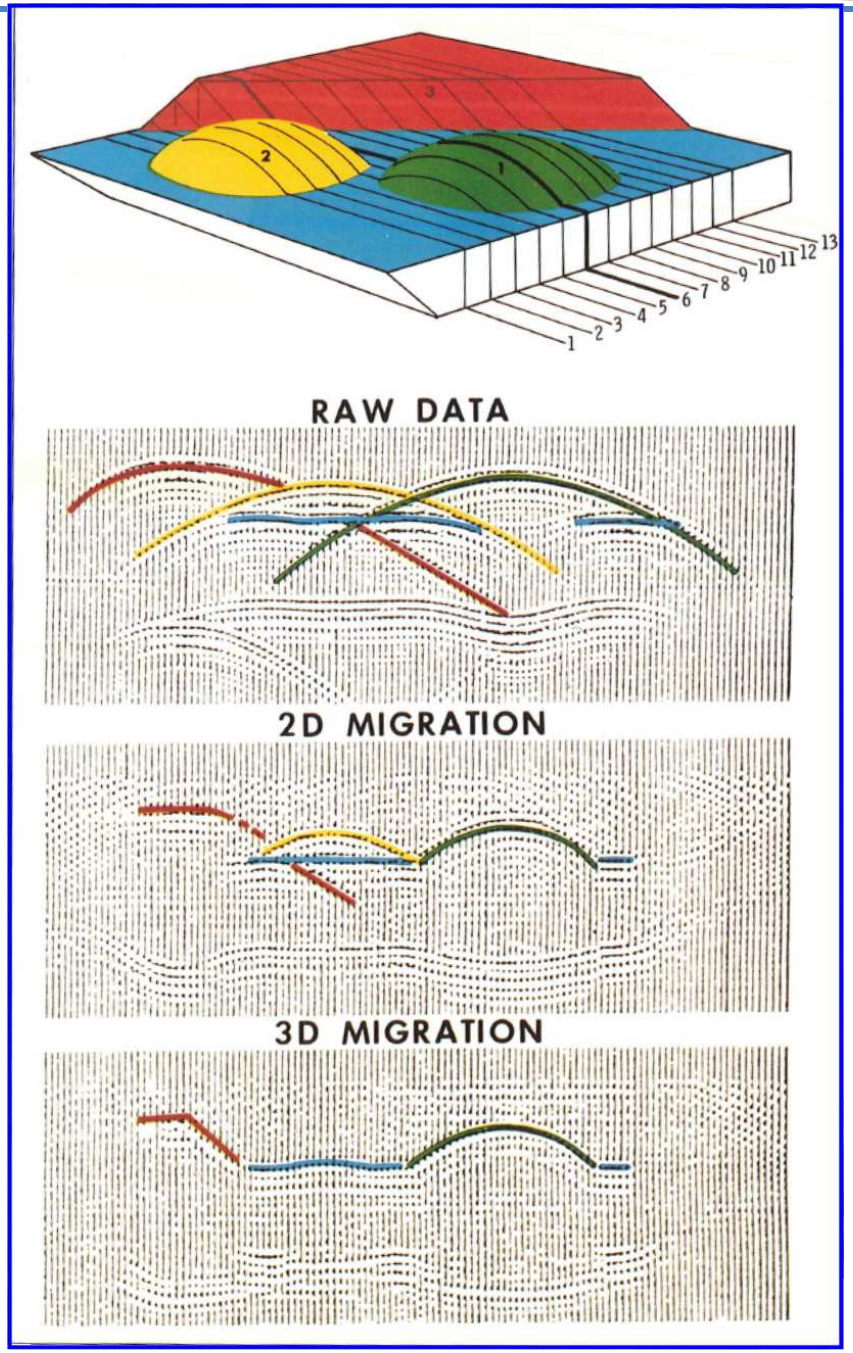
..... dopo la procedura di migrazione sulla stessa sezione si osservino come le diffrazioni siano state collassate, mettendo in luce le reali geometrie del sottosuolo con alcuni canali sepolti



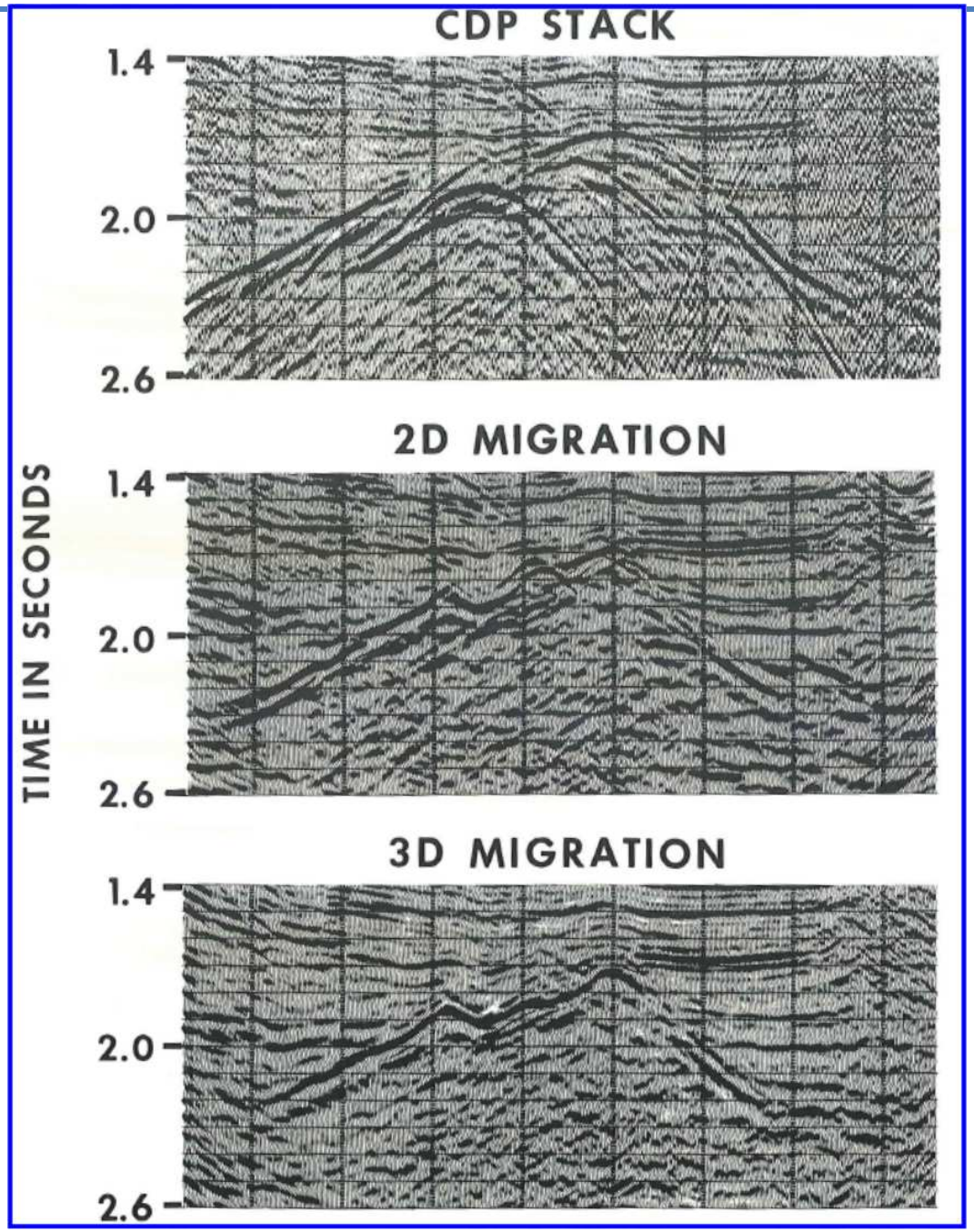
Esempio di profilo sismico migrato in 2D con presenza di domi salini, alcuni dei quali sono laterali al piano della sezione.

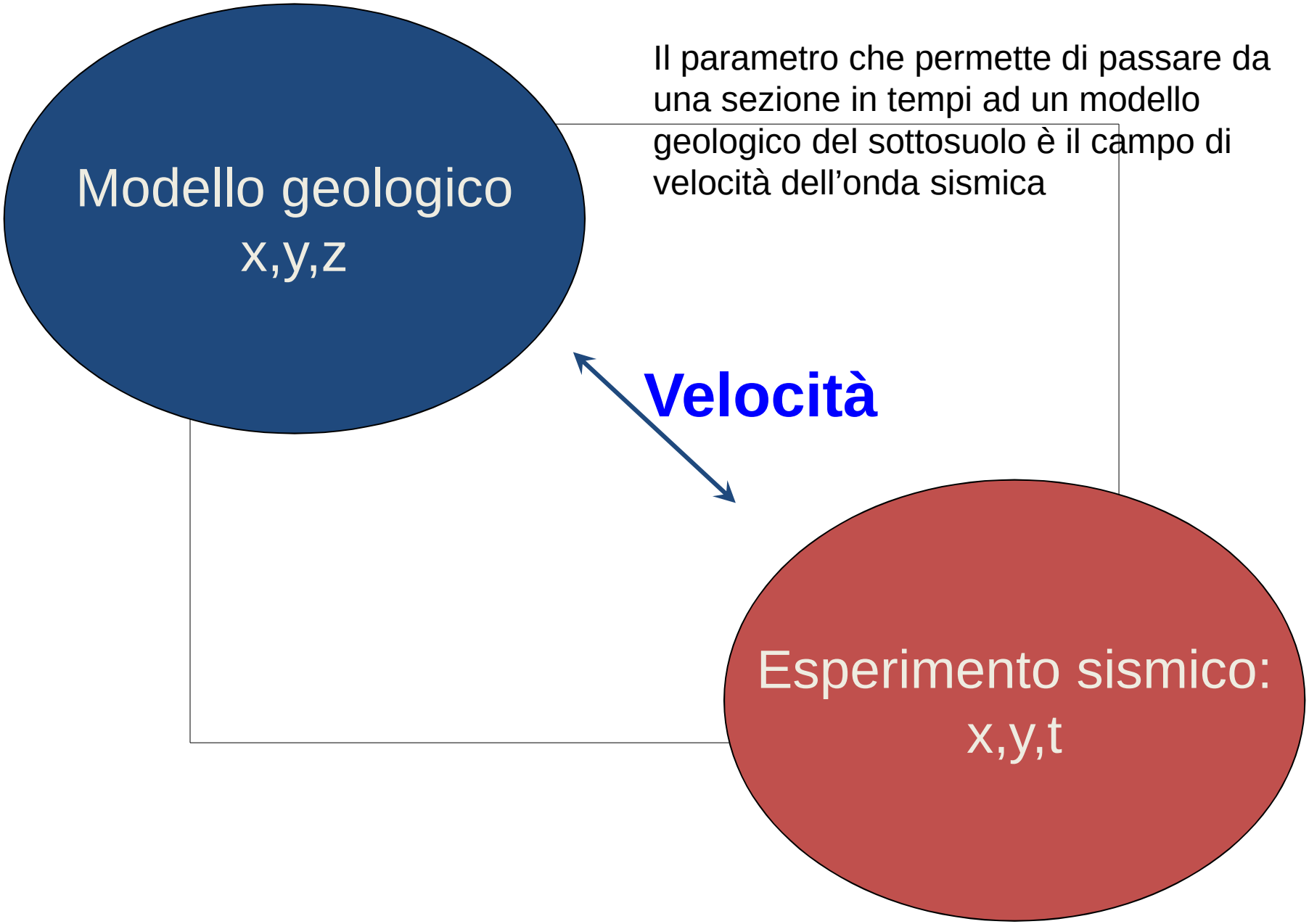
Migrazione 2D e 3D

A lato viene riportato un esempio di modello geologico 3D con due anticlinali (oggetto verde e giallo) e una faglia diretta (oggetti rosso e blu).
La linea sismica 6 (raw data) mostra l'effetto di una migrazione fatta in 2D e, tenendo conto anche degli altri profili sismici, 3D (da French, 1974). Si noti come l'anticlinale gialla, fuori dalla verticale del profilo 6 non venga illuminata nella migrazione 3D, mentre lo è in quella 2D. Infatti nella migrazione 2D gli oggetti laterali non vengono discriminati e rientrano erroneamente nell'immagine sismica.
(da Brown, 1986)



Esempio di migrazione 2D e 3D su dati sismici reali (Brown, 1986)





Il parametro che permette di passare da una sezione in tempi ad un modello geologico del sottosuolo è il campo di velocità dell'onda sismica

Conversione in profondità

La sezione *stack* restituisce un'immagine del sottosuolo in cui la scala verticale è data in tempi doppi (*two-way times*).

Essa rappresenta infatti il tempo totale impiegato dall'onda sismica per raggiungere una generica superficie di discontinuità e riemergere poi in superficie dopo la riflessione.

Per convertire la sezione-tempi in sezione-profondità si rende necessario l'utilizzo di un campo di velocità che può essere ricavato da quello derivante dalle analisi di velocità (velocità di stack) sulla stessa sezione sismica multicanale

Velocità di stack: essa è definita come il valore di velocità che produce la massima ampiezza dell'evento riflesso nello stack delle tracce per ogni CDP. Nella figura a fianco è il valore di V2.

Sotto: CDP gather a sinistra e «spettro di velocità» a destra, il quale quest'ultimo è usato a determinare la velocità di «stacking» come funzione del tempo «twt».
(Da Kearey, Brooks and Hill, 2002).

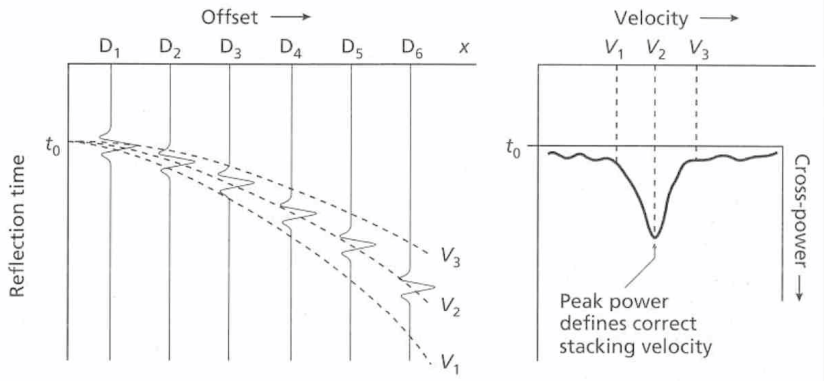


Fig. 4.17 A set of reflection events in a CMP gather is corrected for NMO using a range of velocity values. The stacking velocity is that which produces peak cross-power from the stacked events; that is, the velocity that most successfully removes the NMO. In the case illustrated, V_2 represents the stacking velocity. (After Taner & Koehler 1969.)

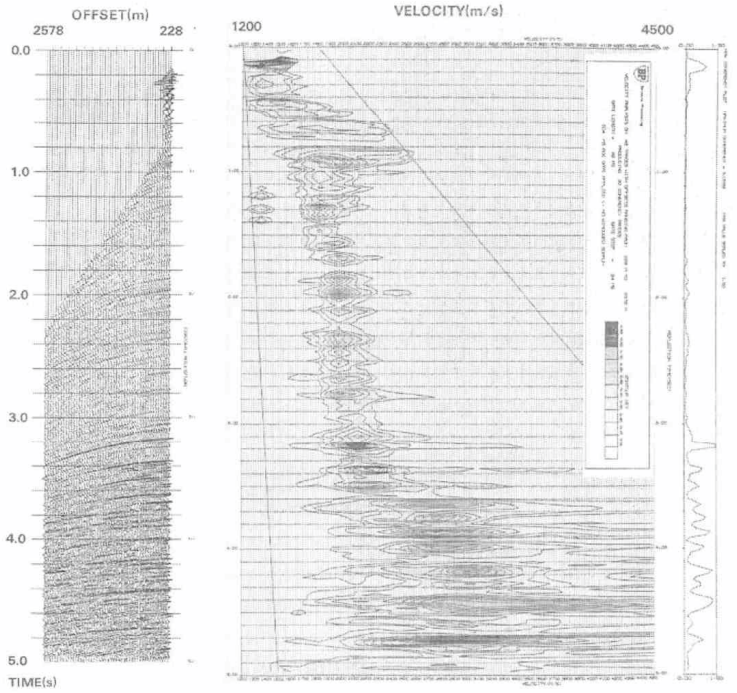


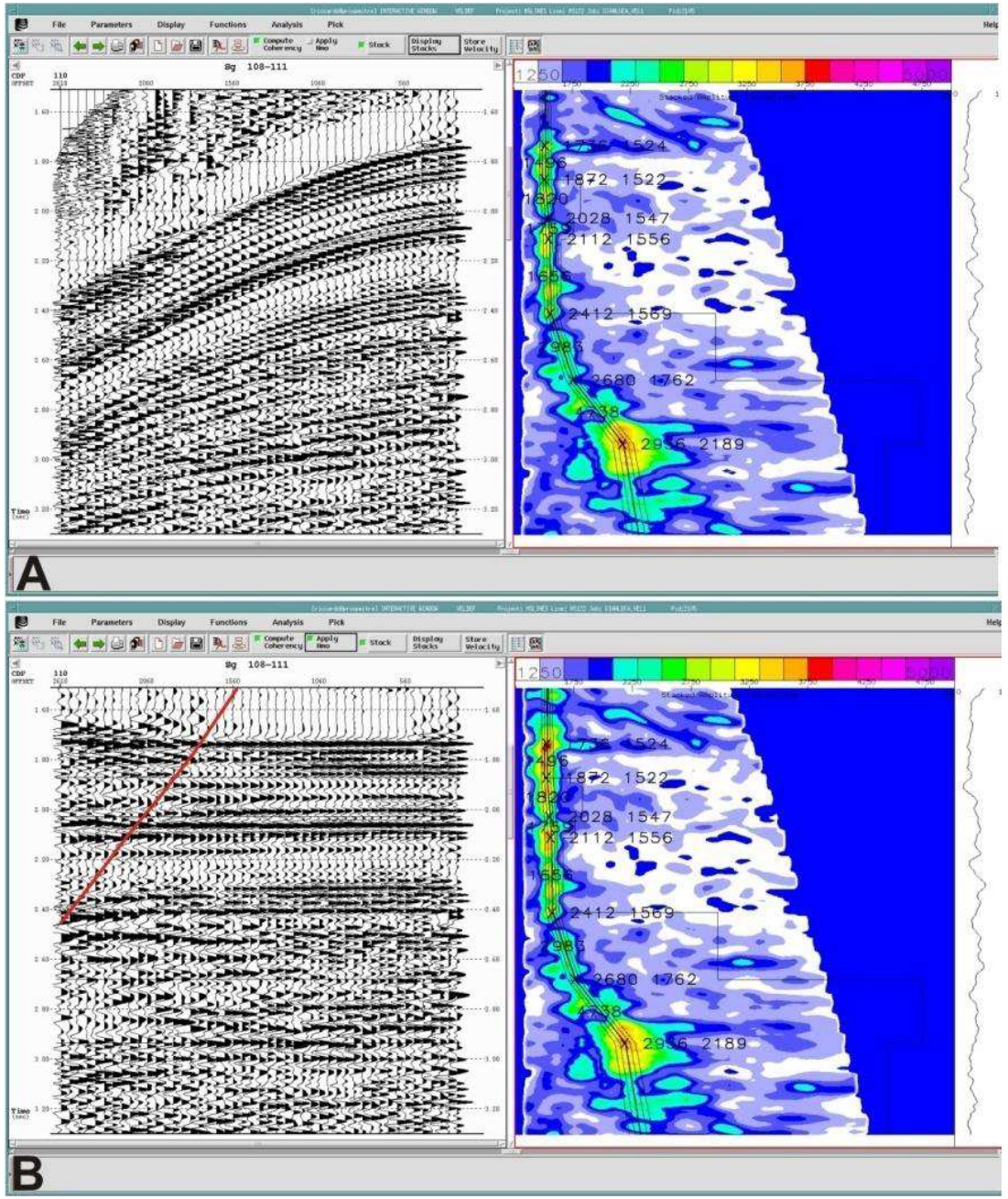
Fig. 4.18 The velocity spectrum is used to determine the stacking velocity as a function of reflection time. The cross-power function (semblance) is calculated over a large number of narrow time windows down the seismic trace, and for a range of possible velocities for each time window. The velocity spectrum is typically displayed alongside the relevant CMP gather as shown. Peaks in the contoured semblance values correspond to appropriate velocities for that travel time, where a reflection phase occurs in the CMP gather.

ANALISI DI VELOCITA'

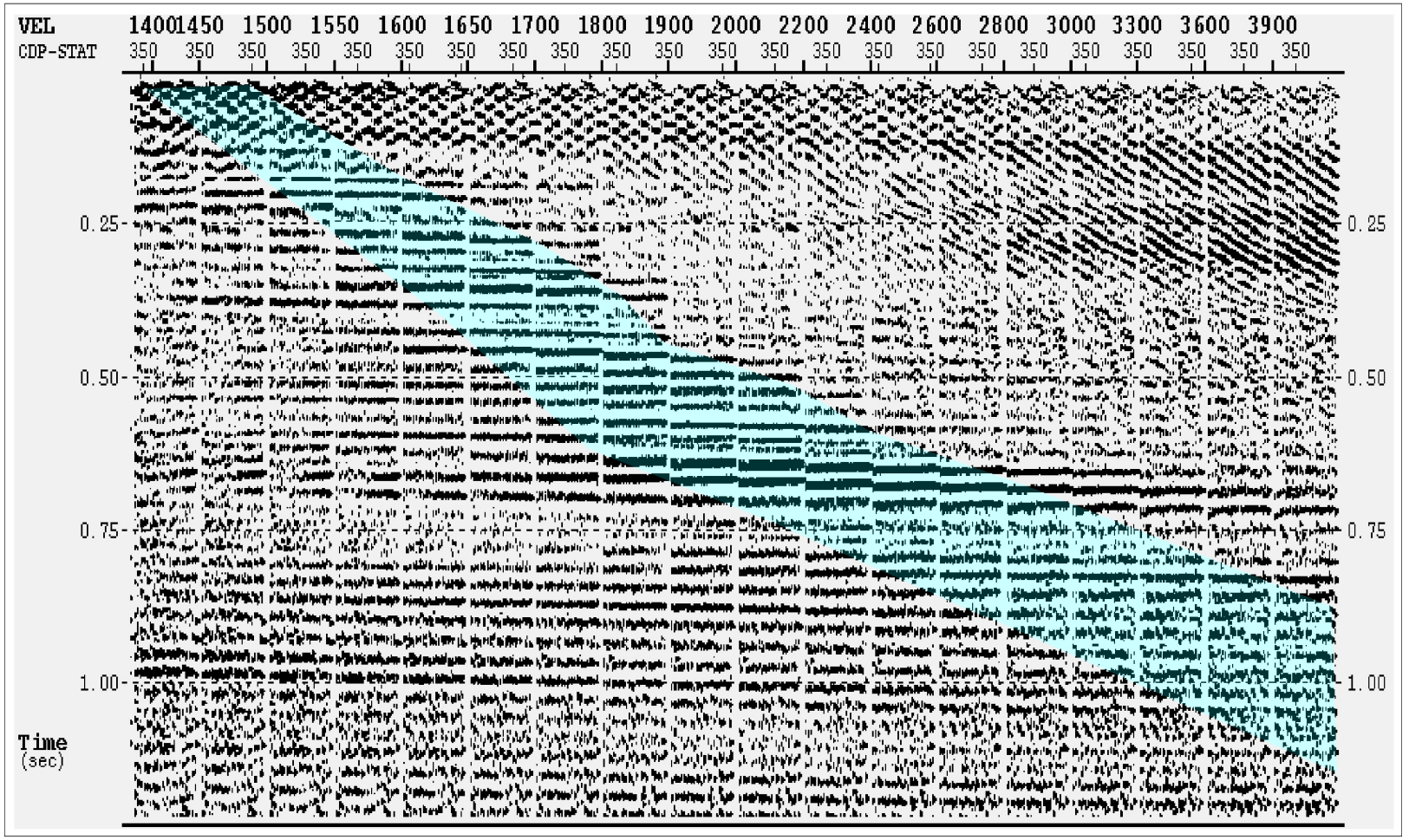
A: CDP (a sinistra) con spettro di coerenza (a destra).

Lo spettro di coerenza è una mappatura dell'indice di coerenza del segnale riflesso del CDP in funzione della velocità di propagazione e del tempo (doppio) di riflessione TWT (two-way traveltime). Su questo si disegna (picking) la funzione di velocità che si applicherà nella correzione di NMO (Normal Move Out)

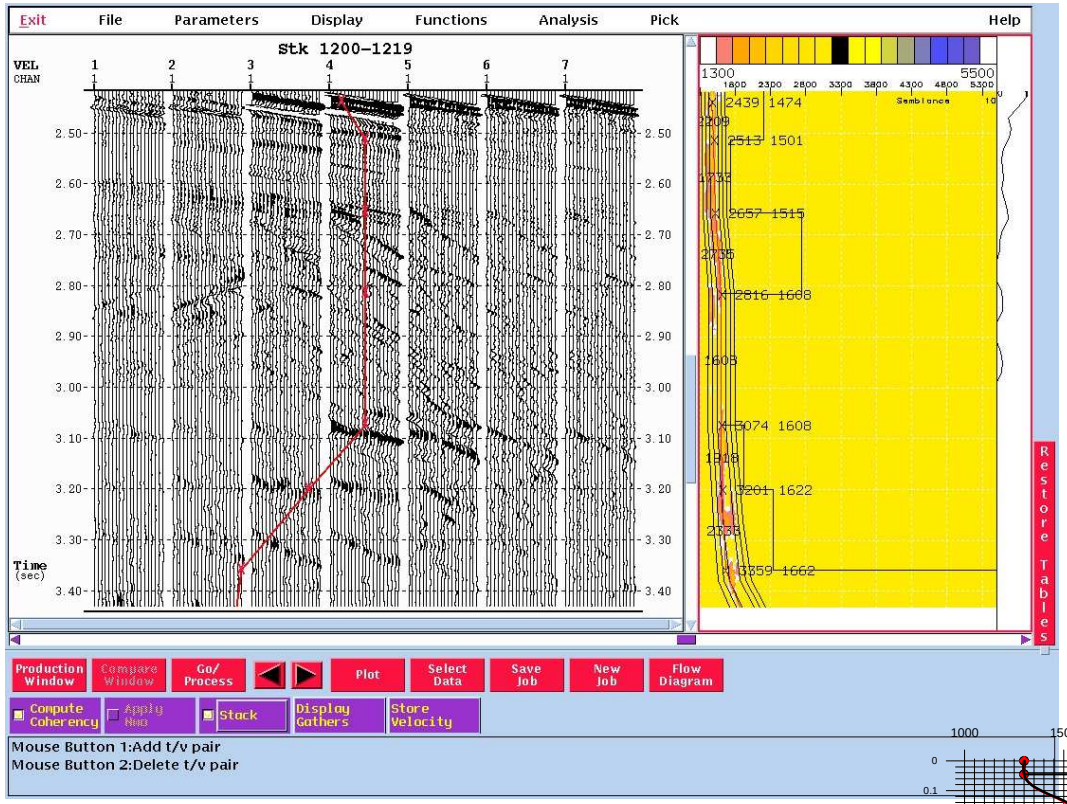
B: cdp corretto con NMO dopo il picking della funzione di velocità sullo spettro di coerenza. Si noti nel CDP l'allineamento orizzontale degli eventi riflessi che poi verranno sommati nella fase di STACKING.



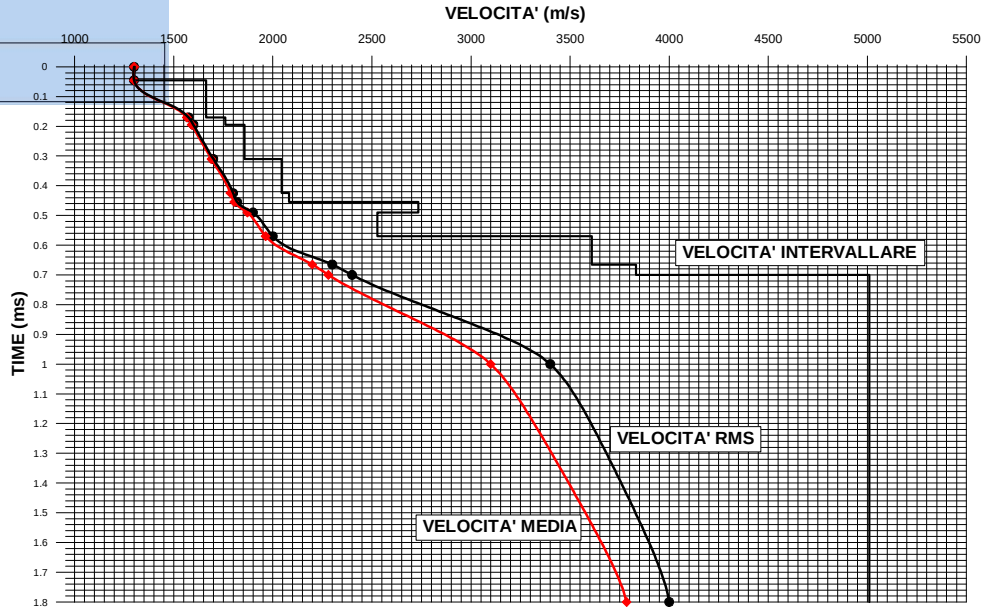
Pannello CVS



Un altro strumento di analisi della funzione di velocità è il pannello Constant Velocity Stacks (CVS): esso è costituito da una serie di stack della stessa sezione sismica utilizzando valori di velocità discreti, costanti e crescenti per ognuno di essi; la banda azzurra indica l'intervallo di velocità che produce il miglior *stack* sui singoli eventi riflessi via via a profondità crescenti. Si può osservare come a tempi crescenti corrispondano velocità crescenti

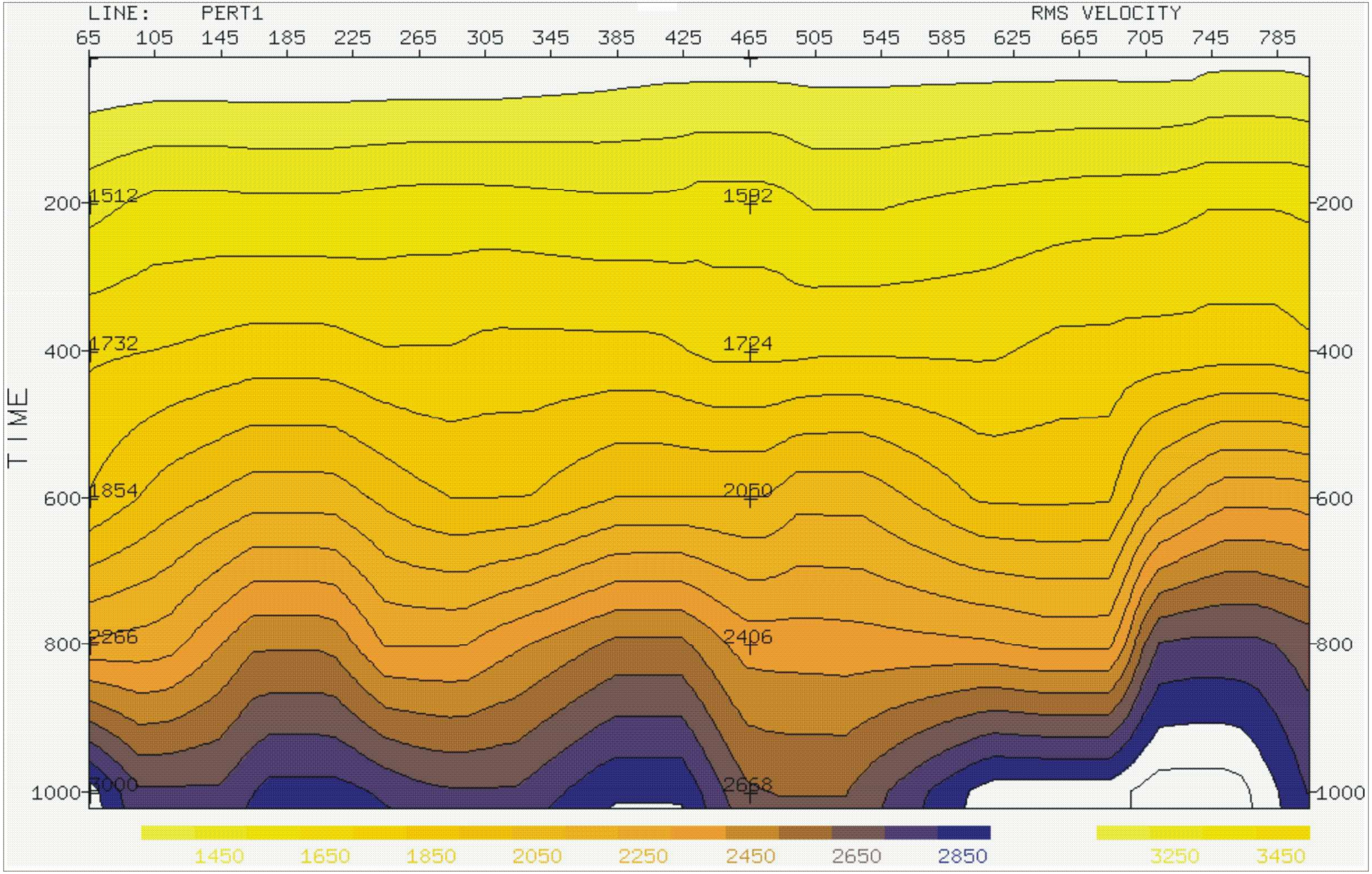


Esempio di segmenti di sezione stack (a sinistra) corretta con diverse funzioni di velocità ricavate dallo spettro relativo (a destra)

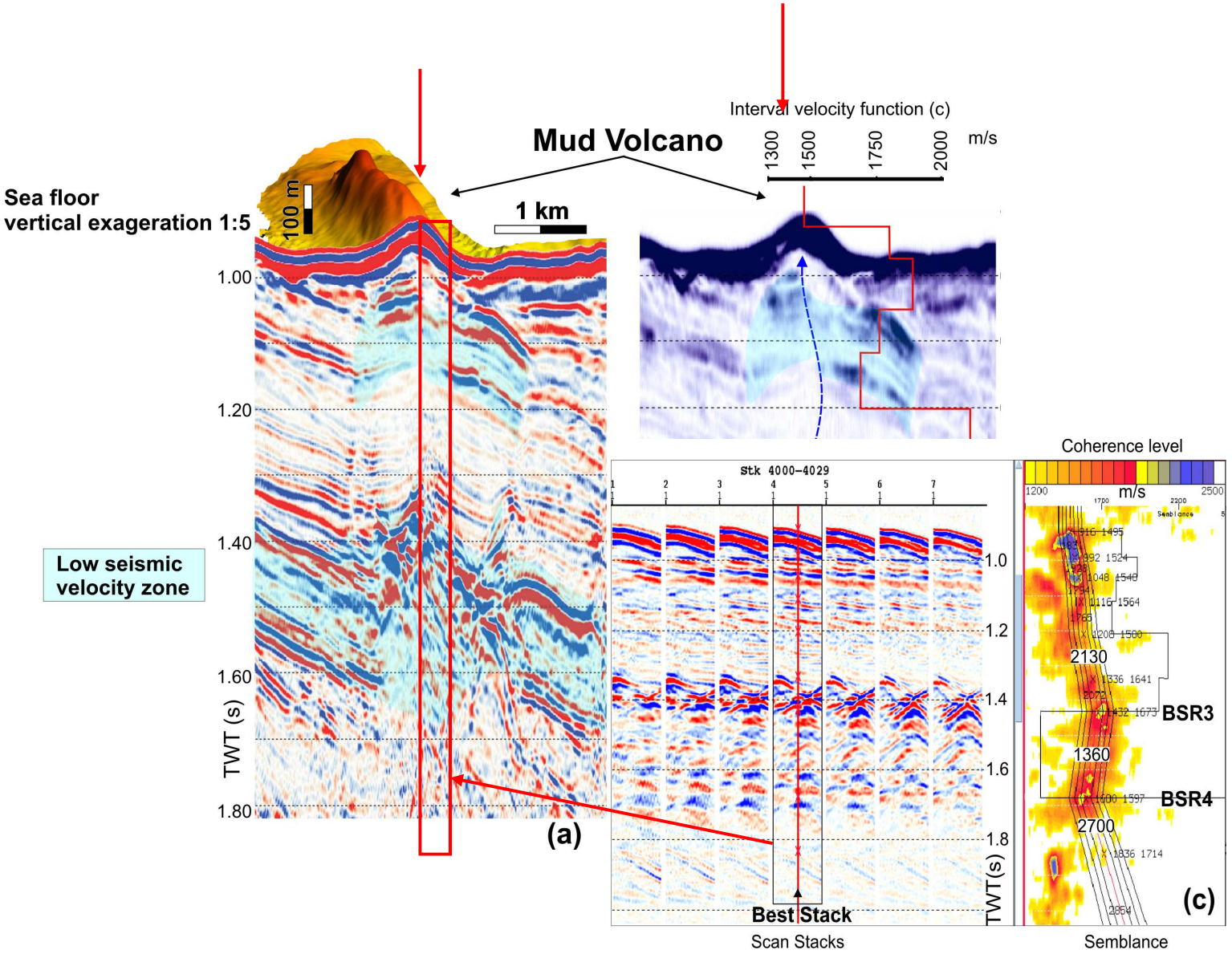


Esempio di funzione di velocità (a destra) ricavata dalle analisi. La velocità RMS è quella utilizzata nelle correzioni dinamiche, quella media (in rosso) per la conversione in profondità mentre quella intervallare rappresenta la velocità di ciascun mezzo (strato) identificato

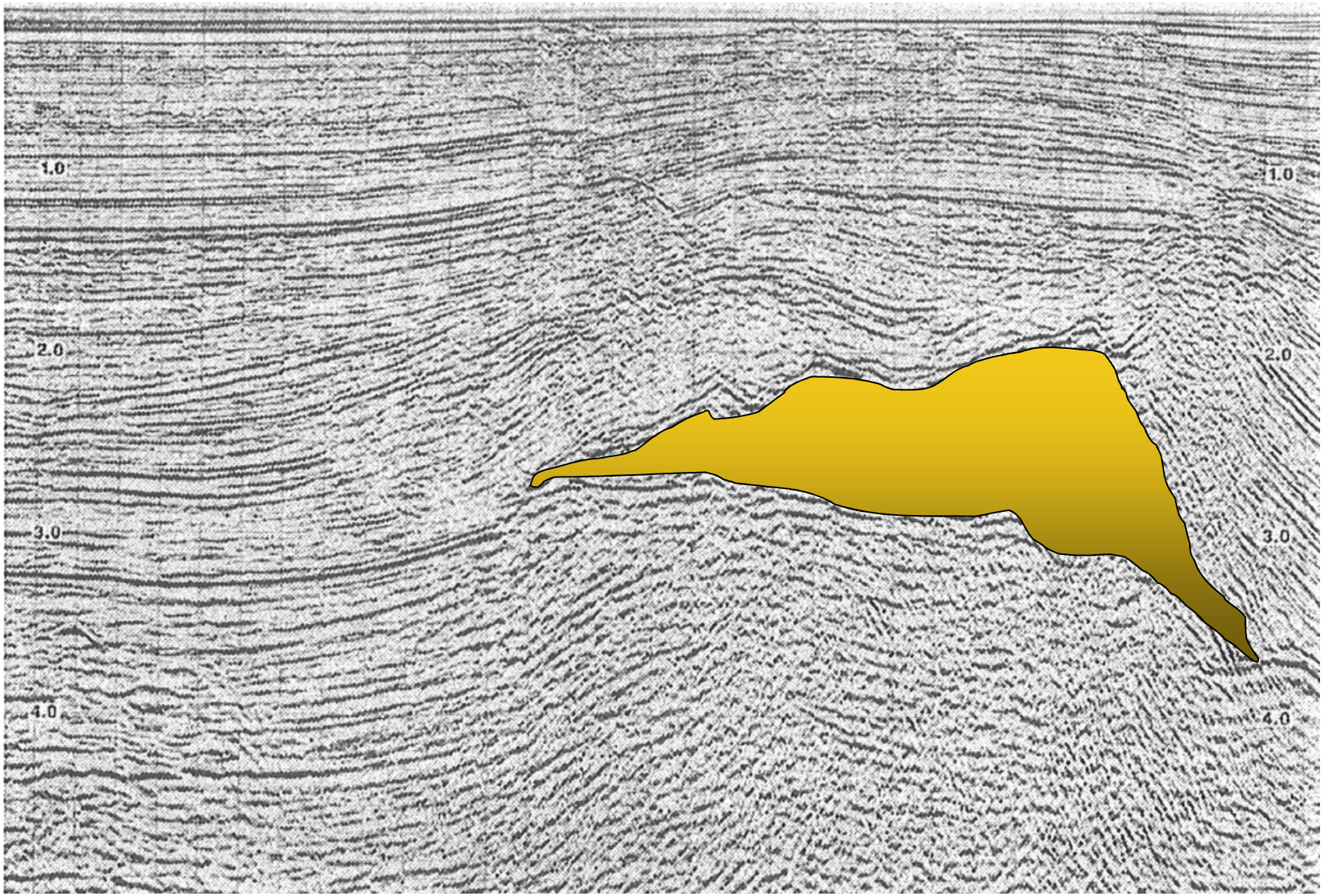
CAMPO DI VELOCITA'



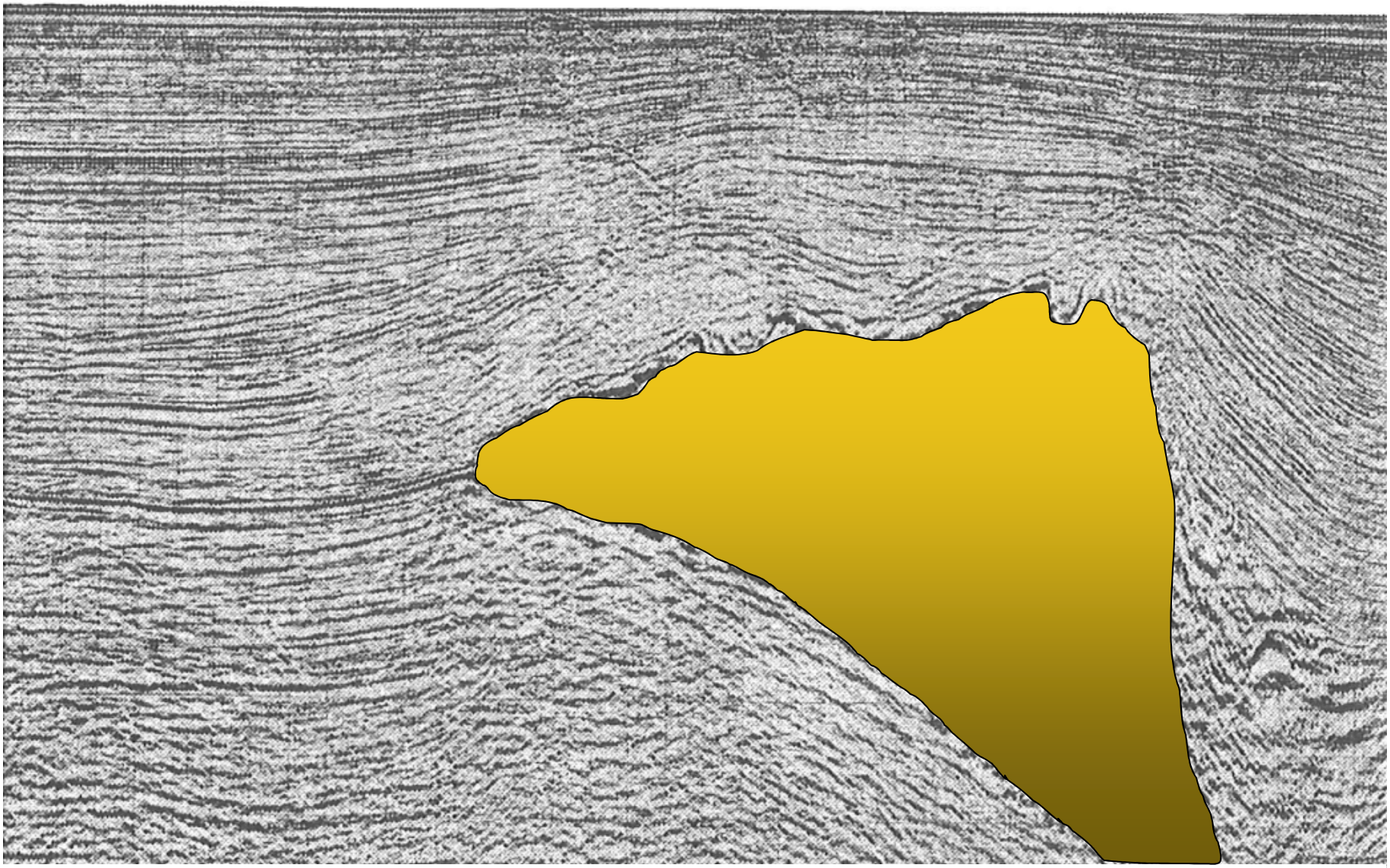
Esempio di un Campo di velocità (di stack) lungo un profilo sismico: da c. 1500 m/s a c. 2900 m/s



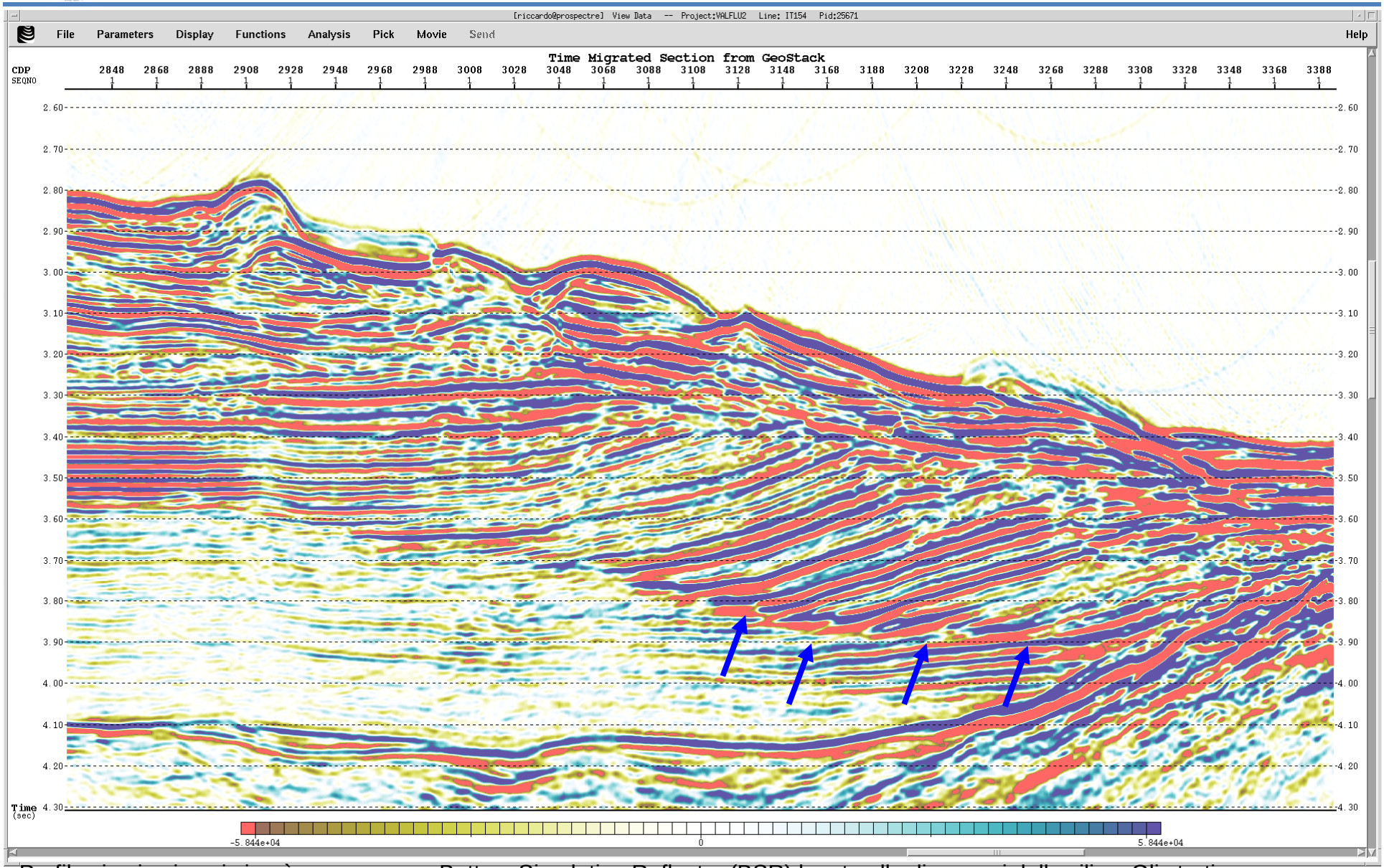
Esempio di analisi di velocità in un profilo con presenza di fluidi in migrazione: si notino le inversioni di velocità nel profilo ottenuto dall'allineamento dei picchi di coerenza sul semblance a destra.



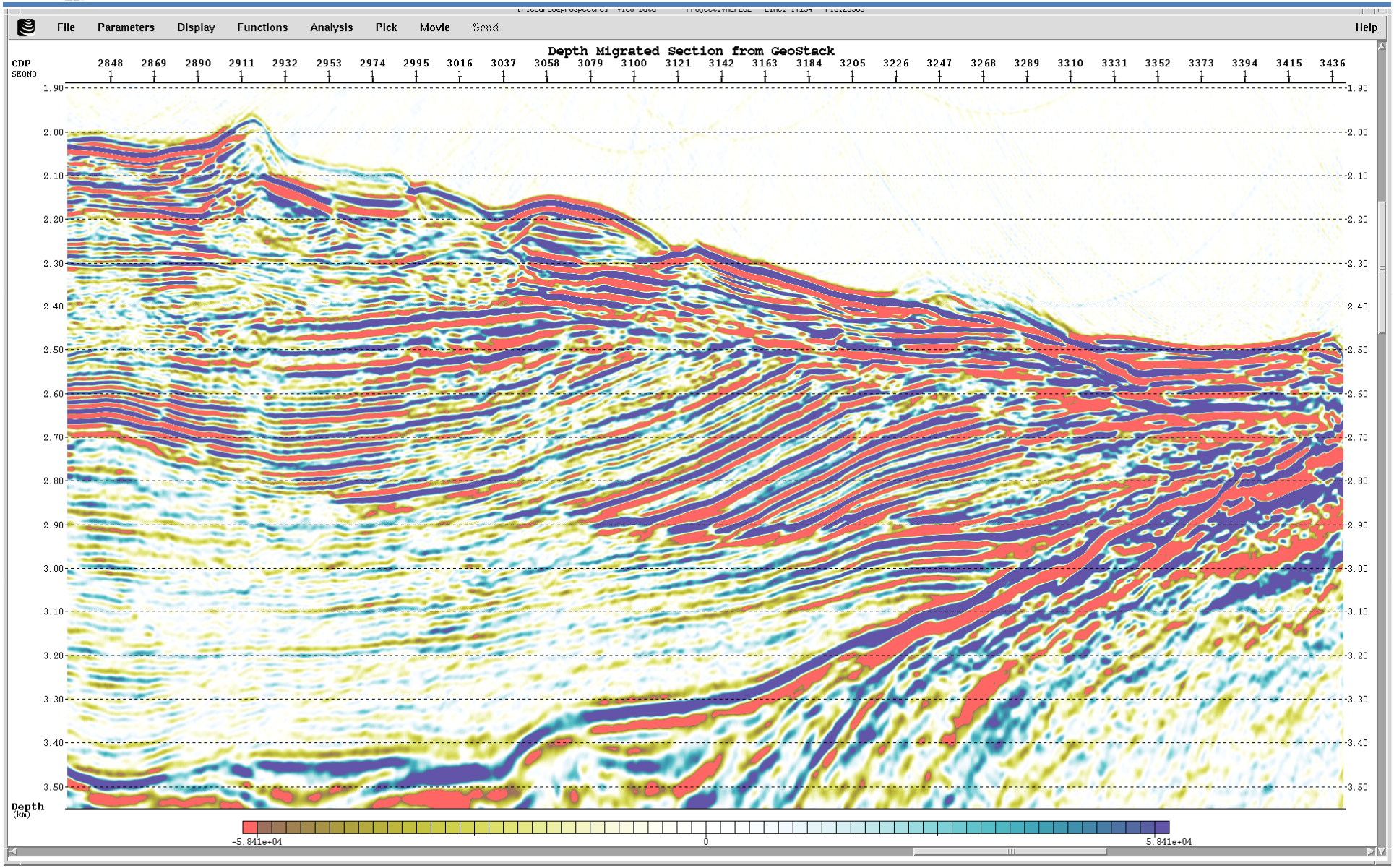
Sezione migrata in tempi: si noti l'intrusione salina al centro della sezione; in generale in un corpo salino l'onda acustica viaggia ad una velocità molto più alta rispetto ai sedimenti circostanti e quindi l'immagine in profondità diventerà .....



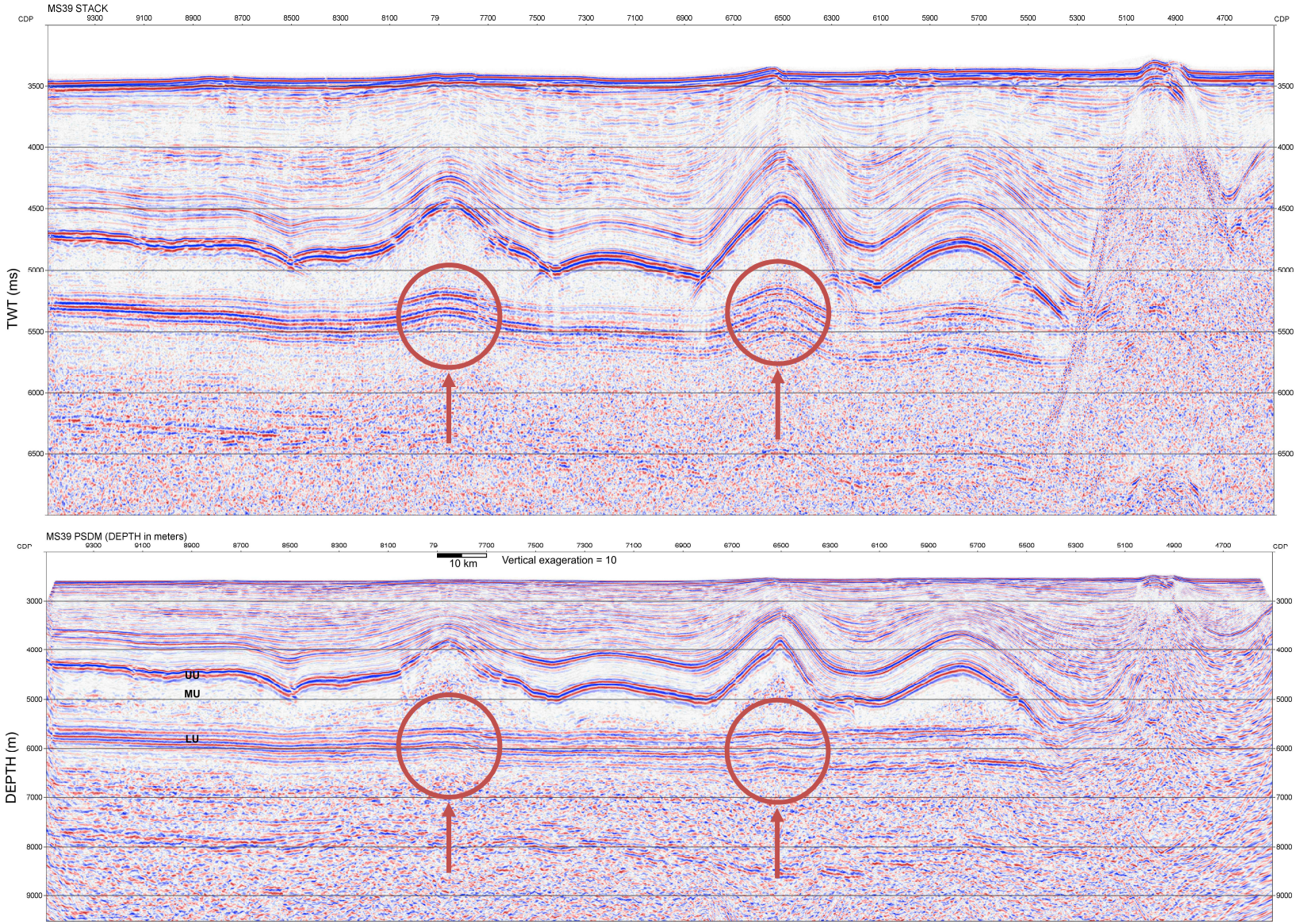
..... nella sezione migrata in profondità l'effetto del campo di velocità sulle reali geometrie dell'intrusione salina la farà apparire molto più estesa di quanto lo fosse nella precedente sezione in tempi.



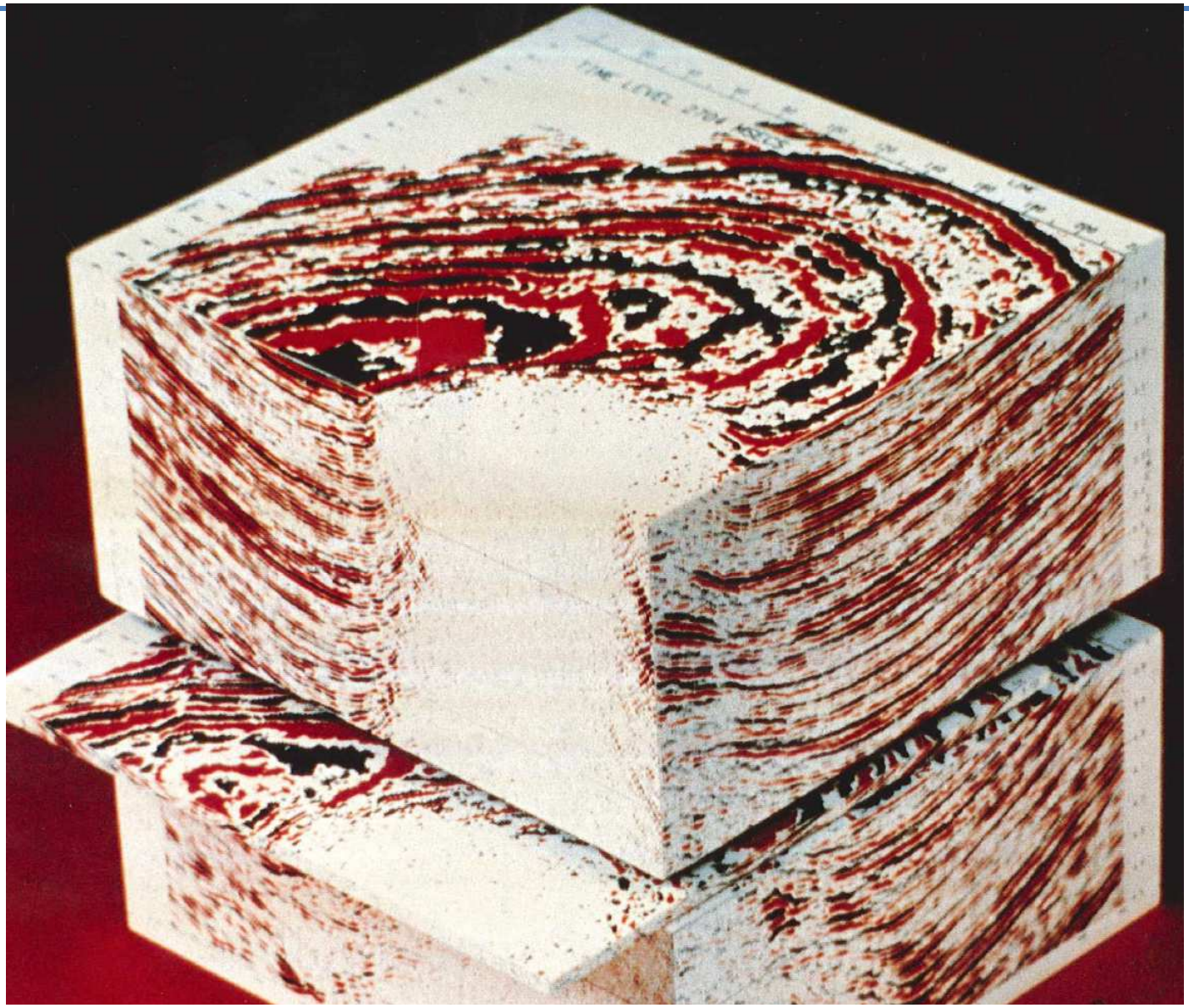
Profilo sismico in cui si può osservare un Bottom Simulating Reflector (BSR) legato alla diagenesi della silice. Gli strati semitrasparenti sono caratterizzati da un aumento repentino della velocità di propagazione dell'onda acustica dando luogo ad una geometria non reale delle formazioni geologiche dando l'idea di una superficie di erosione che non esiste nella realtà (si veda la sezione seguente migrata in profondità)



Stesso profilo sismico dell'immagine precedente, ma dopo l'applicazione della migrazione in profondità. Si noti la continuità dei riflettori anche sotto il BSR.



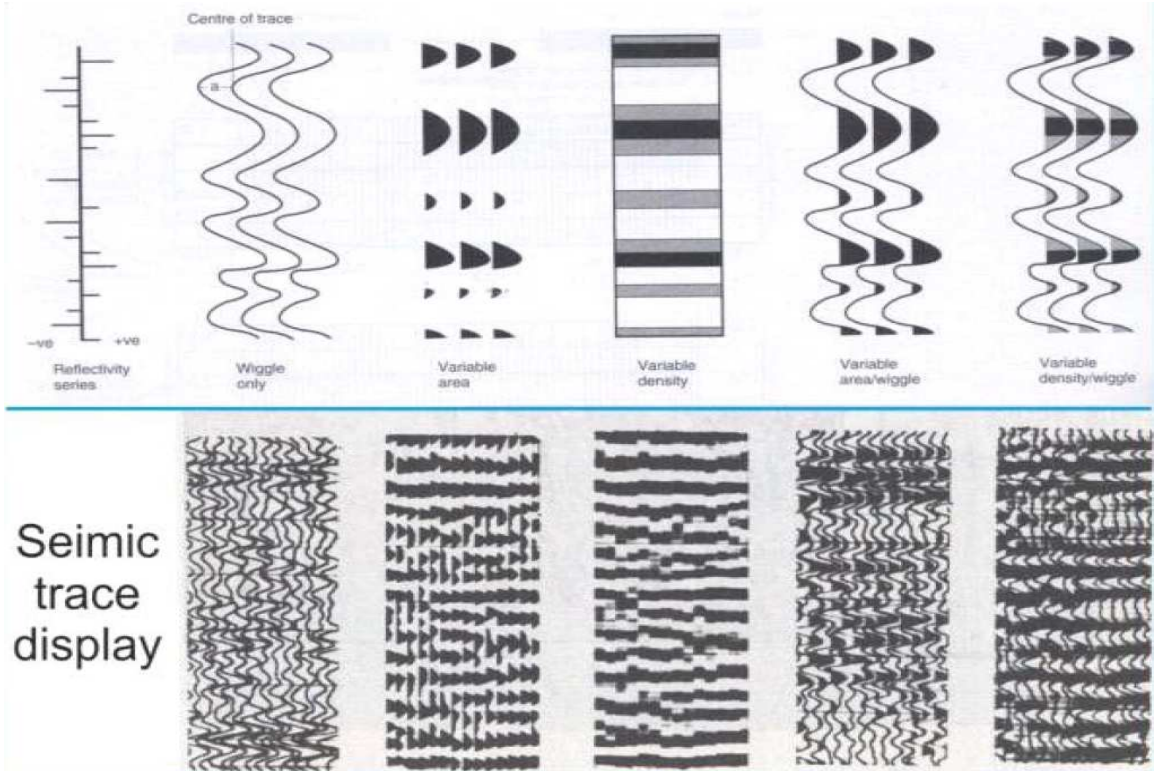
Profilo sismico 2D nella versione stack (sopra) e in quella migrata prestack in profondità (sotto). Si noti che nella versione migrata viene risolto l'effetto di *pull up velocity* evidente nella sezione stack in corrispondenza dei domi salini.



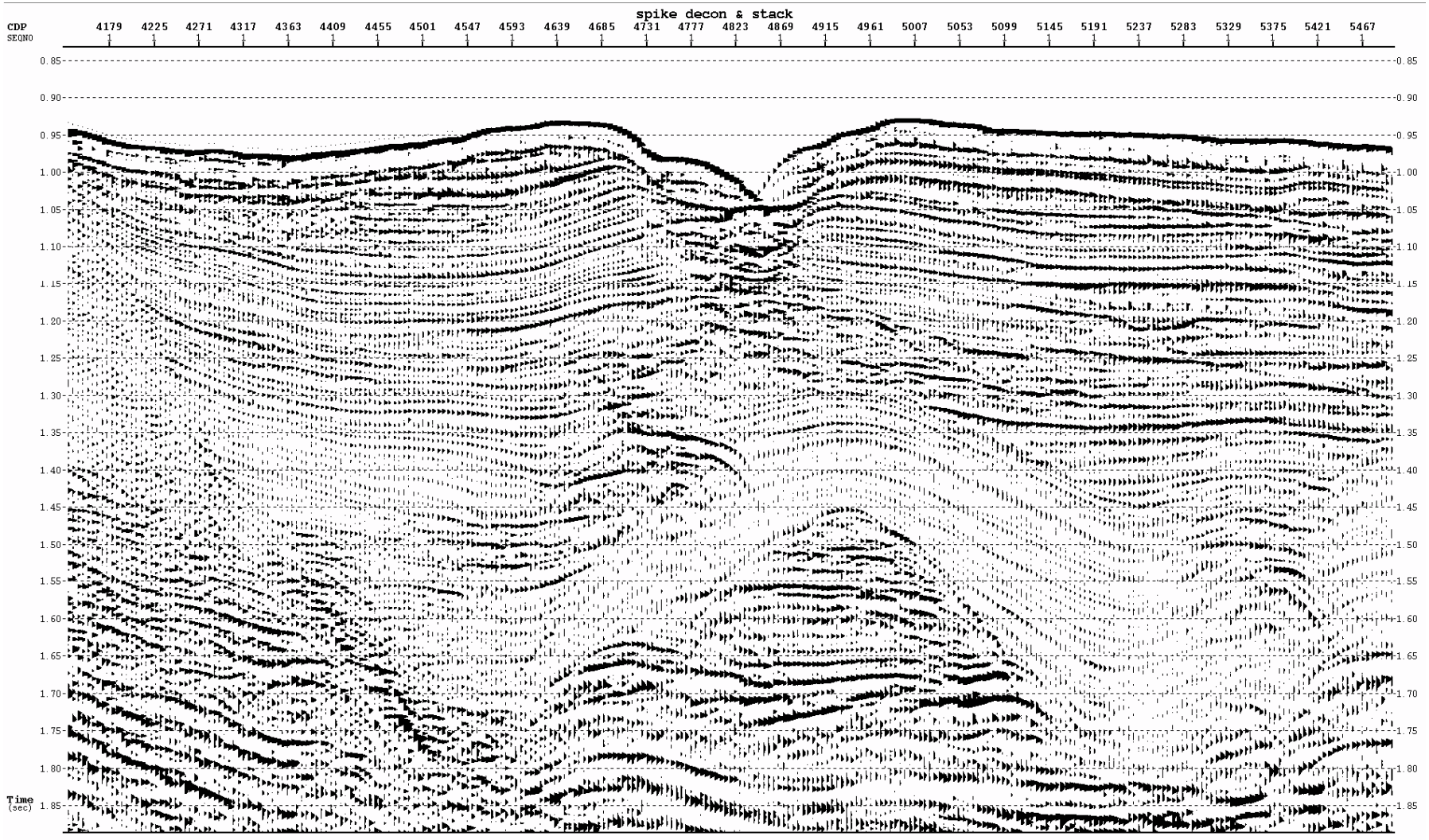
Esempio di “cubo 3D” da Brown (1986): il dato sismico migrato 3D può essere analizzato, oltre che su sezioni verticali, anche per “fette” orizzontali. L’immagine mostra la presenza di un diapiro salino che “perfora” la sequenza sedimentaria del bacino.

Metodi grafici per rappresentare il dato sismico.

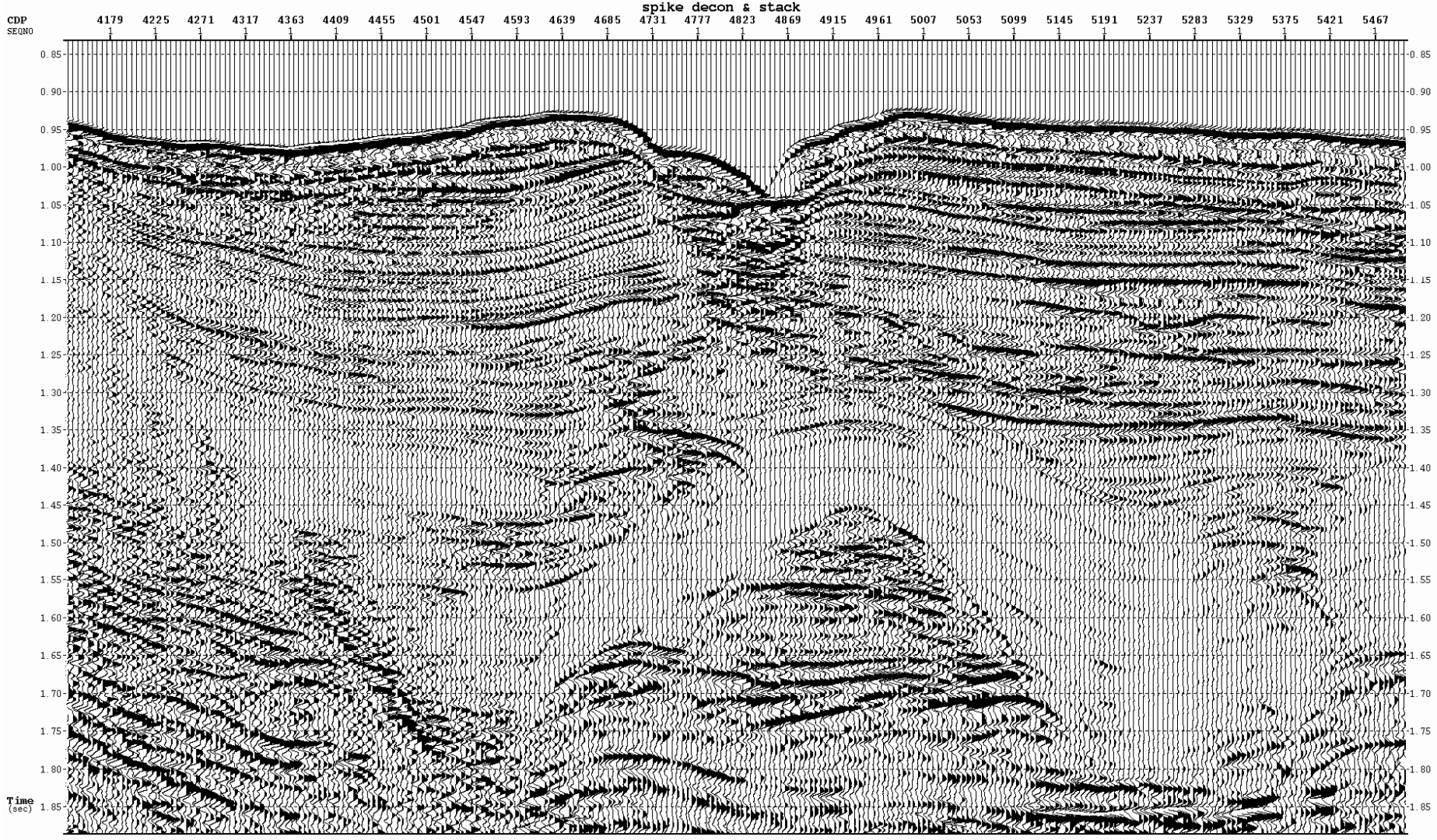
Da sinistra: rappresentazione «wiggle» dove viene tracciato solo il sismogramma; «variable area» dove vengono raffigurati i picchi positivi anneriti; «variable density»dove le variazioni d'ampiezza del segnale vengono raffigurate con una scala colorata o di grigi. Le ultime due sono una combinazione delle prime tre.



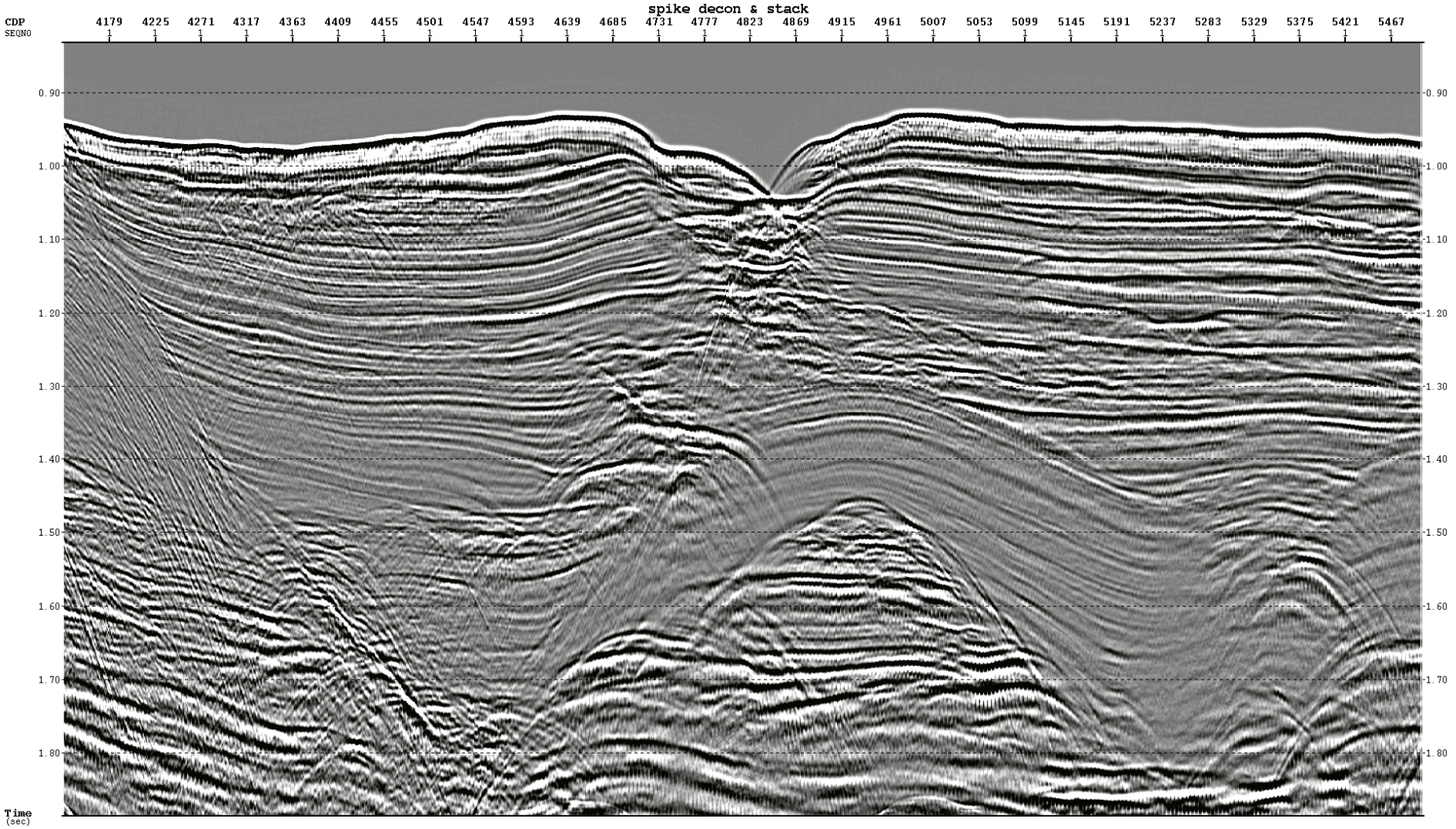
Nelle prossime «slide» vengono fatti alcuni esempi di sezione sismica a varie rappresentazioni grafiche.



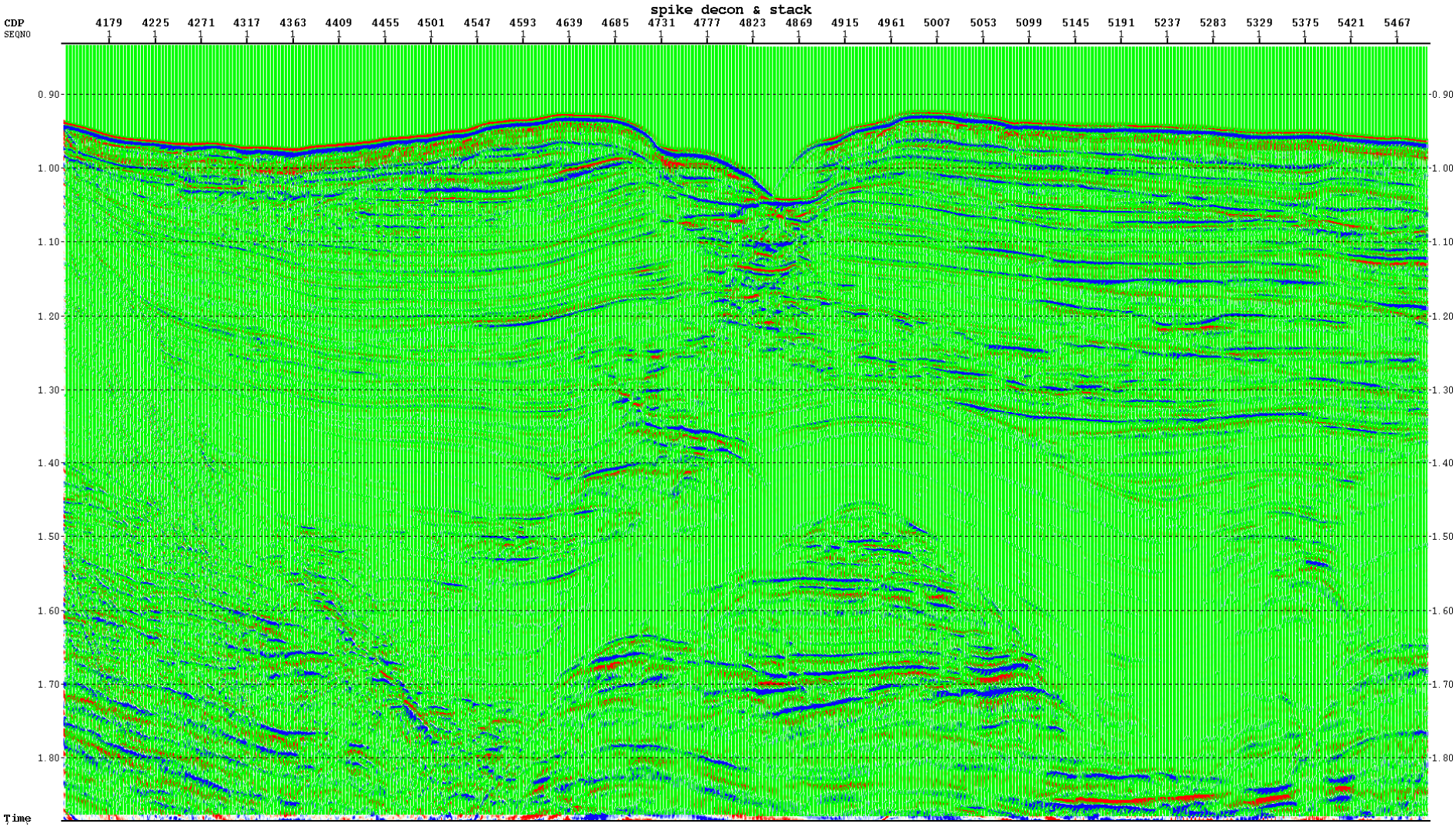
Rappresentazione di una sezione sismica con la «variable area»



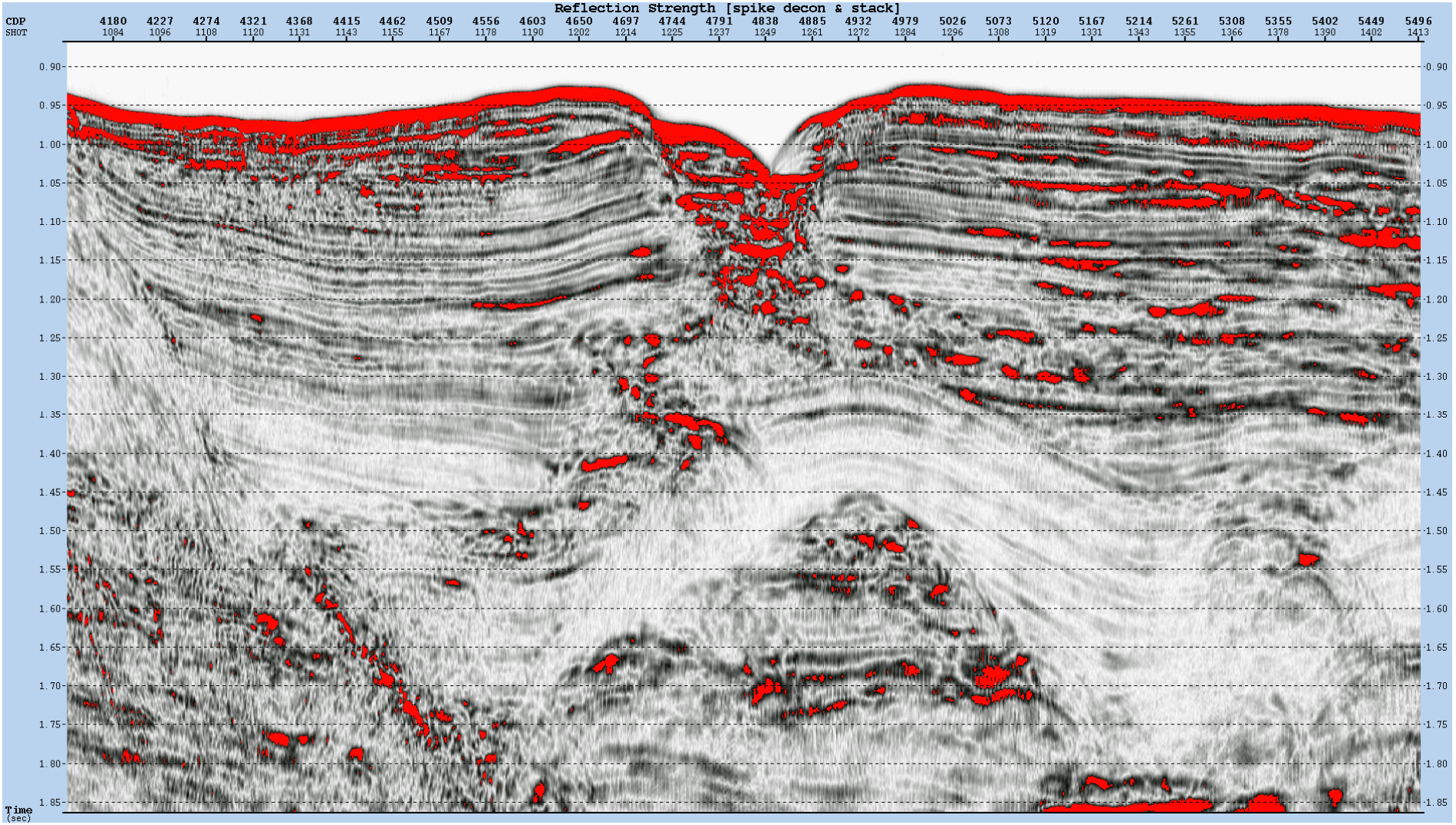
Rappresentazione della sezione sismica con la «wiggle + variable area»



Rappresentazione con la «variable density»



Rappresentazione con la «variable density a scala di colori + wiggle»



Rappresentazione con la “variable density ” su traccia “inviluppo” che è uno dei tanti attributi sismici che si utilizzano nell’interpretare le sezioni sismiche

Concludendo .....

La Sismica a Riflessione Multicanale (MCS) è:

• Il metodo piu' largamente diffuso per la prospezione geofisica del sottosuolo, fondamentale nell'esplorazione e per lo sfruttamento di giacimenti di idrocarburi.

• Fornisce informazioni piu' dettagliate di qualsiasi altro metodo non-invasivo su stratigrafia, struttura e proprietà dei materiali.

• Utilizza tempi di arrivo, ampiezza e fase degli echi dalle discontinuità nelle proprietà elastiche presenti nel sottosuolo per ricavarne posizione e proprietà fisiche (impedenza acustica, velocita' propagazione onde sismiche, parametri elastici, …).

Sismica a Riflessione multicanale PREGI /DIFETTI

PREGI

1. Accurata ricostruzione del Sottosuolo in termini di geometrie, forme, posizione delle discontinuità di impedenza acustica => geologia

2. Stima dei parametri petrofisici delle rocce e dei fluidi

3. Stima del tipo e contenuto in fluidi con tecniche particolari (Amplitude Versus Offset Analysis – AVO; attributi sismici; Hydrocarbon indicator)

4. Virtualmente senza limiti di profondità di investigazione

5. Possibilità di ottenere immagini a grande dettaglio (risoluzione + elevata di tutti gli altri metodi) soprattutto entro i primi Km dalla superficie

6. Possibilità di indagini 2D, 3D (volumi), 4D (confronti nel tempo)

7. Possibile adattamento del metodo per le più svariate applicazioni

DIFETTI

1. Costi elevati (1-10 K€/Km - > a terra rispetto che a mare)

2. Necessaria complessa elaborazione del segnale

3. Logistica di acquisizione spesso complessa. Richieste numerose persone specializzate

4. Per grandi acquisizioni necessari numerosi permessi ed autorizzazioni

Alcuni libri di testo di riferimento/approfondimento:

AN INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL EXPLORATION, di Philip KEAREY, Michael BROOKS, Ian HILL; (2002) – Blackwell Science – ISBN 0-632-04929-4.

MARINE GEOPHYSICS, di E. J. W. JONES; (1999) – Wiley – ISBN 0-471-98694-1

SEISMIC DATA ANALYSIS (Vol. I & II), di Öz YILMAZ; (2001) – SEG – Vol. I ISBN 1-56080-098-4; Vol. II ISBN 1-56080-098-2

INTERPRETATION OF THREE-DIMENSIONAL SEISMIC DATA, BROWN A. R. (1986) – AAPG MEMOIR 42 – ISBN 0-89181-318-7

Ecco quando è meglio smettere di acquisire in mare con la sismica multicanale!