



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

Anno accademico 2015 – 2016

Geologia Marina

Parte I

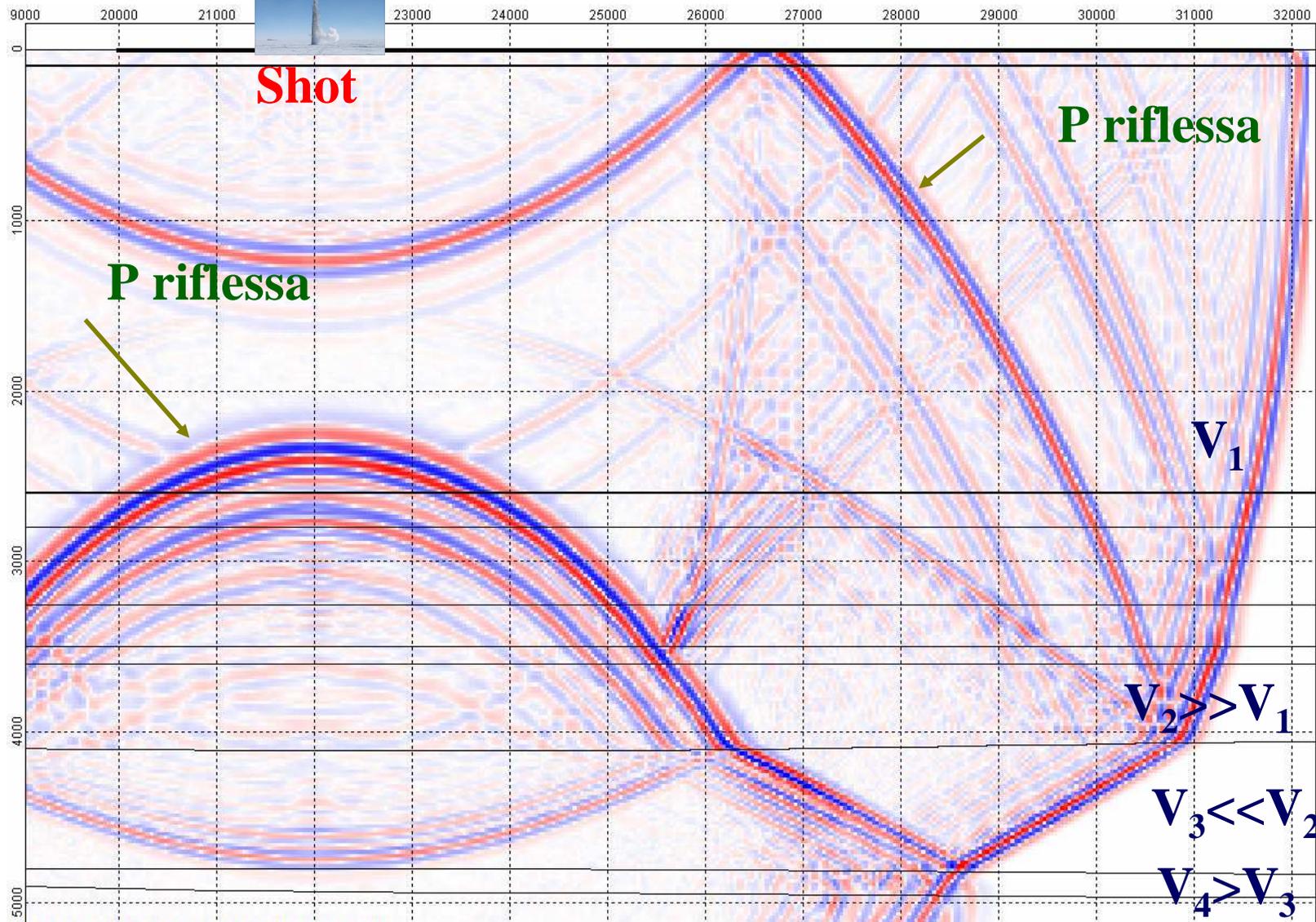
Modulo 2.2 Metodi indiretti: Rilievi acustici e sismica a riflessione

Docente
Riccardo Geletti



SISMICA A RIFLESSIONE (SISMICA ATTIVA)

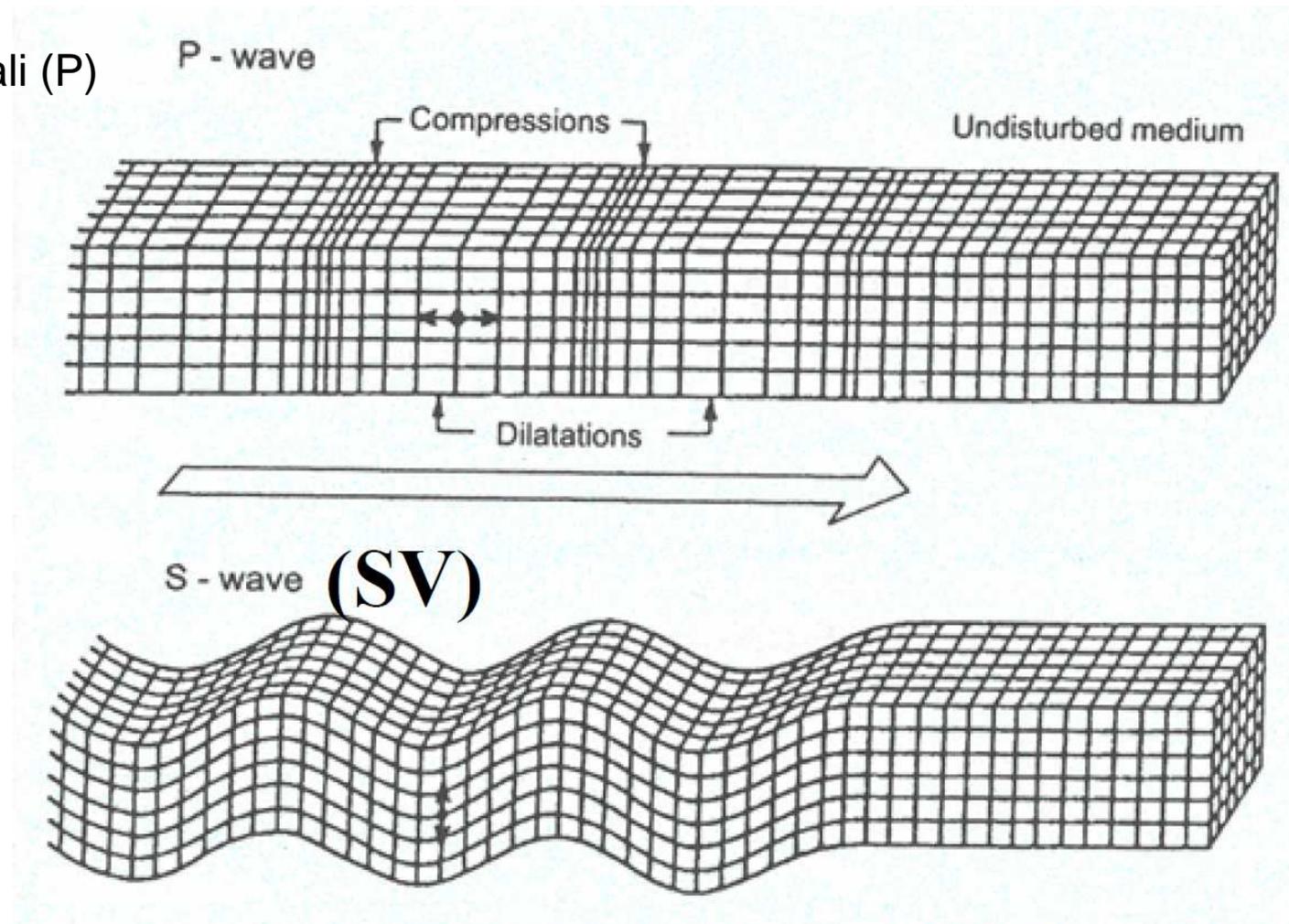




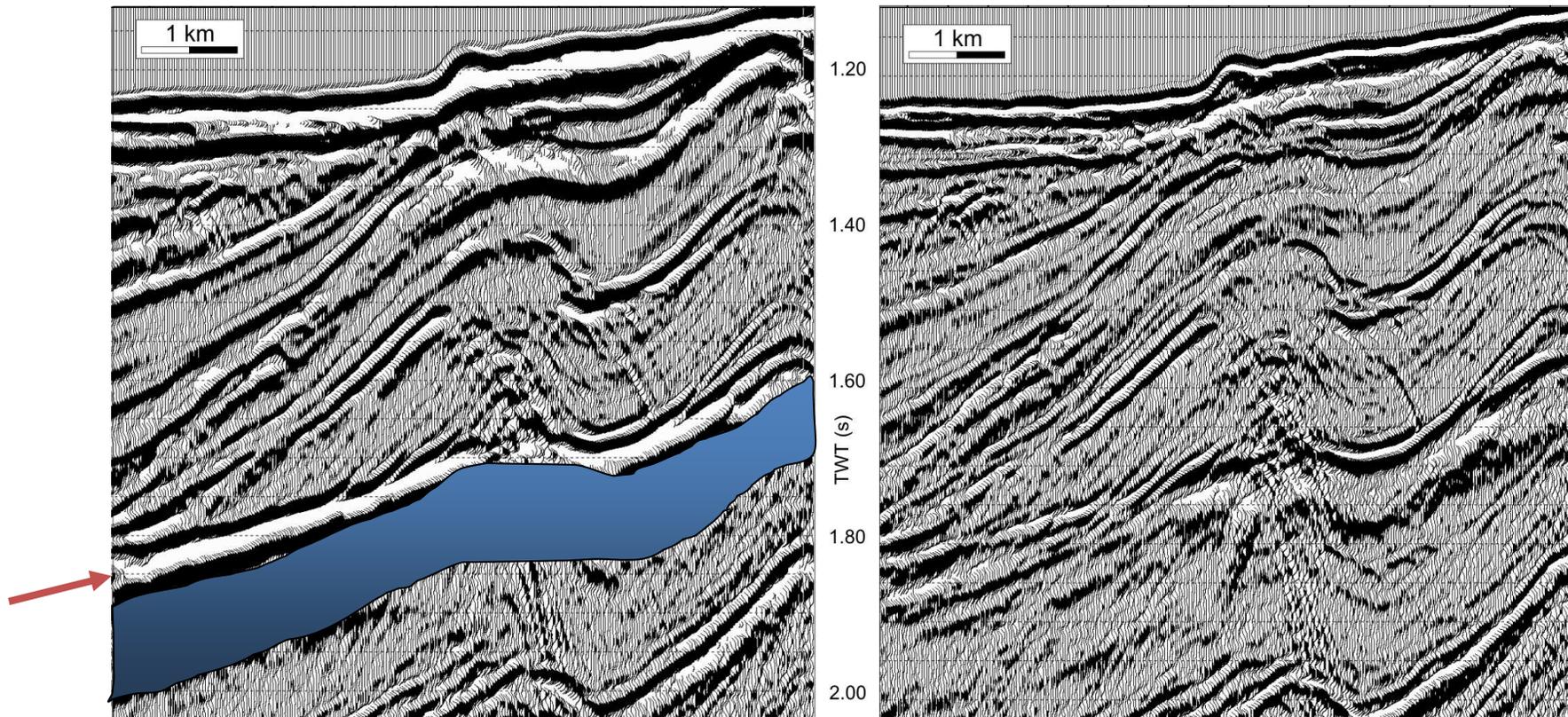
Esempio di simulazione di percorso di un fronte d'onda acustica provocato da un unico scoppio in un mezzo stratificato avente differenti velocità di propagazione; si noti la complessità del campo d'onda risultante.

Onde sismiche:

- Compressionali (P)
- di Taglio (S)

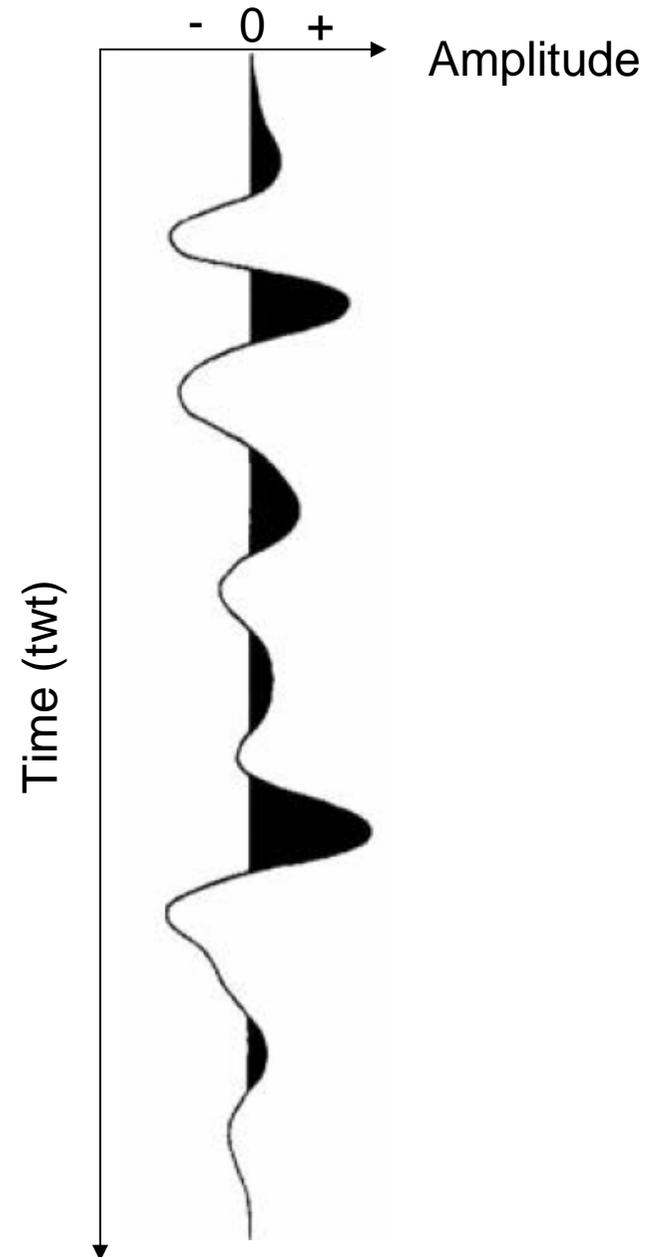


Nella sismica a riflessione marina classica si acquisiscono solo le onde compressionali (a meno di utilizzare particolari tecnologie che pongono i sensori direttamente sul fondo marino o di utilizzare le tecniche di elaborazione AVO ove possibile), in quanto le onde di taglio non si propagano nei liquidi

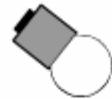


Esempio di profilo sismico marino con presenza di gas nei sedimenti: a sinistra sezione onde P e a destra quella a onde S convertite mediante metodi AVO (Amplitude Versus Offset). Si noti nel profilo a destra la quasi assenza del riflettore a polarità invertita che definisce il limite gas idrato (sopra)/gas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

Rappresentazione di un sismogramma: 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)



Refraction and reflection of waves



Light bulb

Air

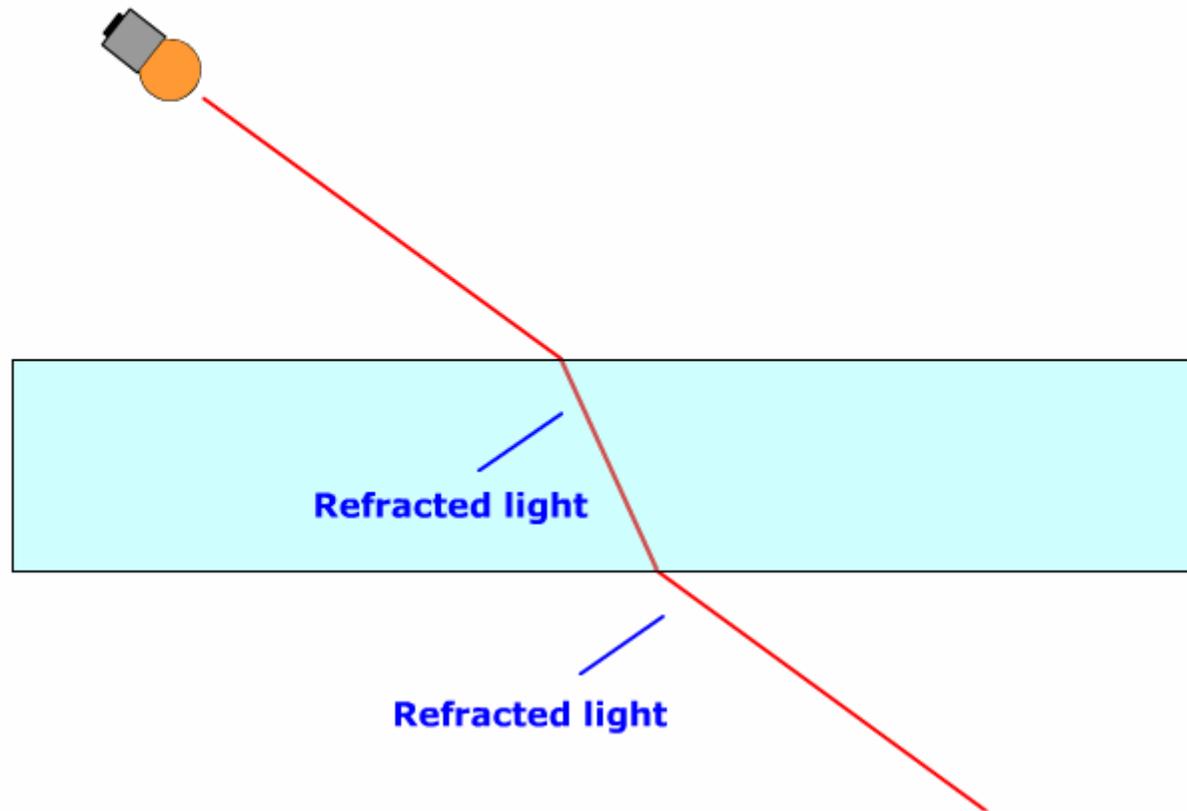


Glass

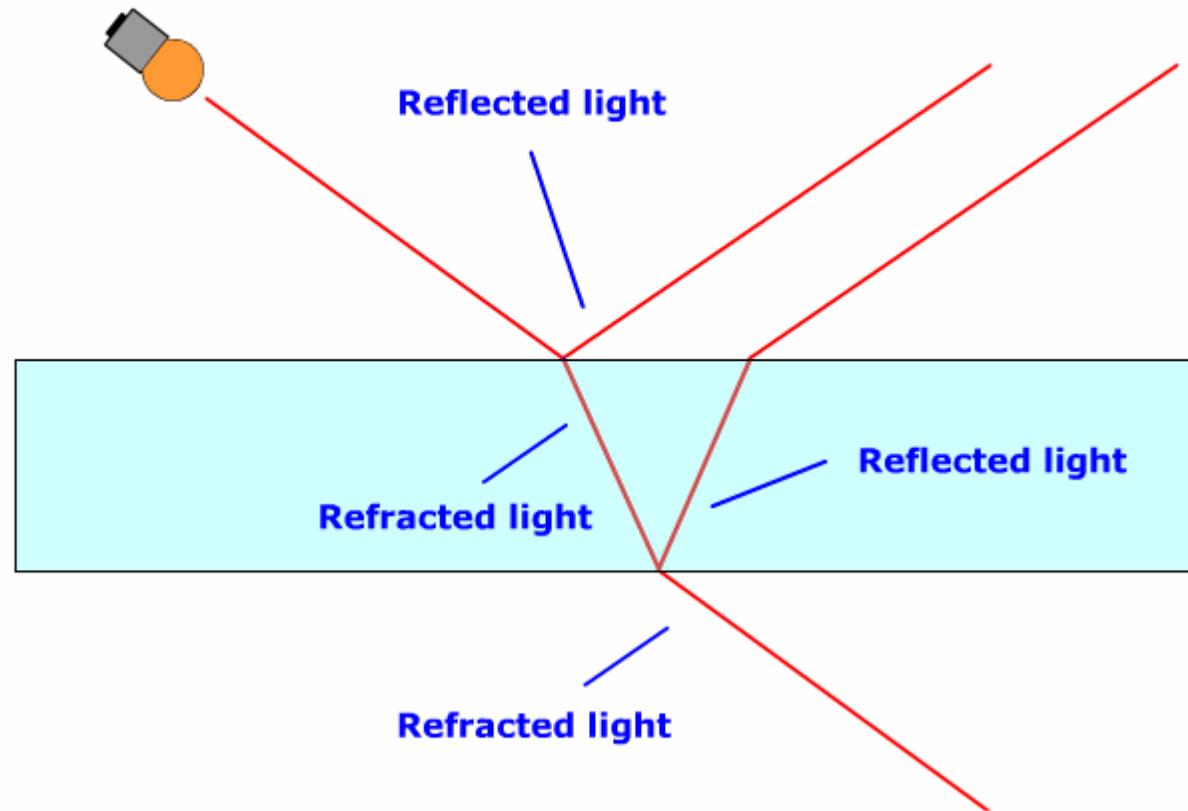
Air

Come si può schematizzare il fenomeno della rifrazione/riflessione? Si può seguire l'esempio del percorso del raggio luminoso attraverso un vetro come riportato di seguito

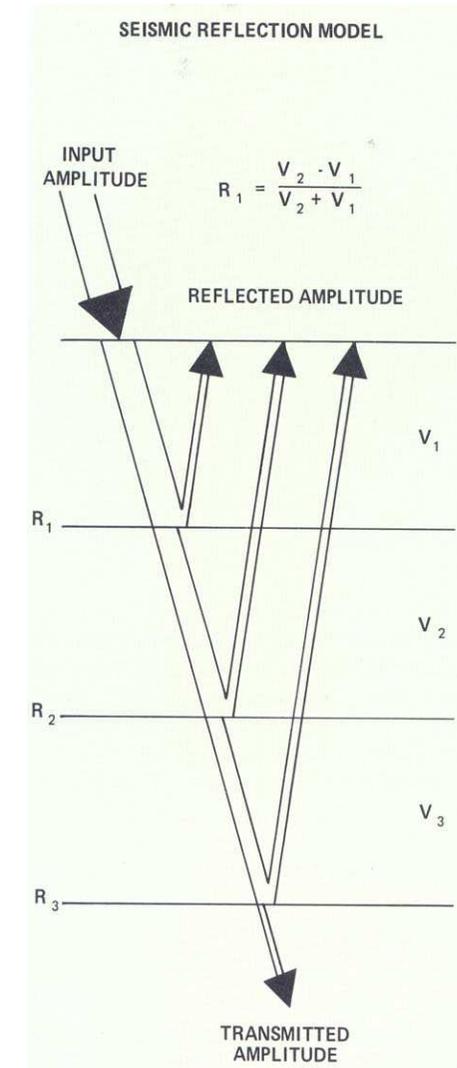
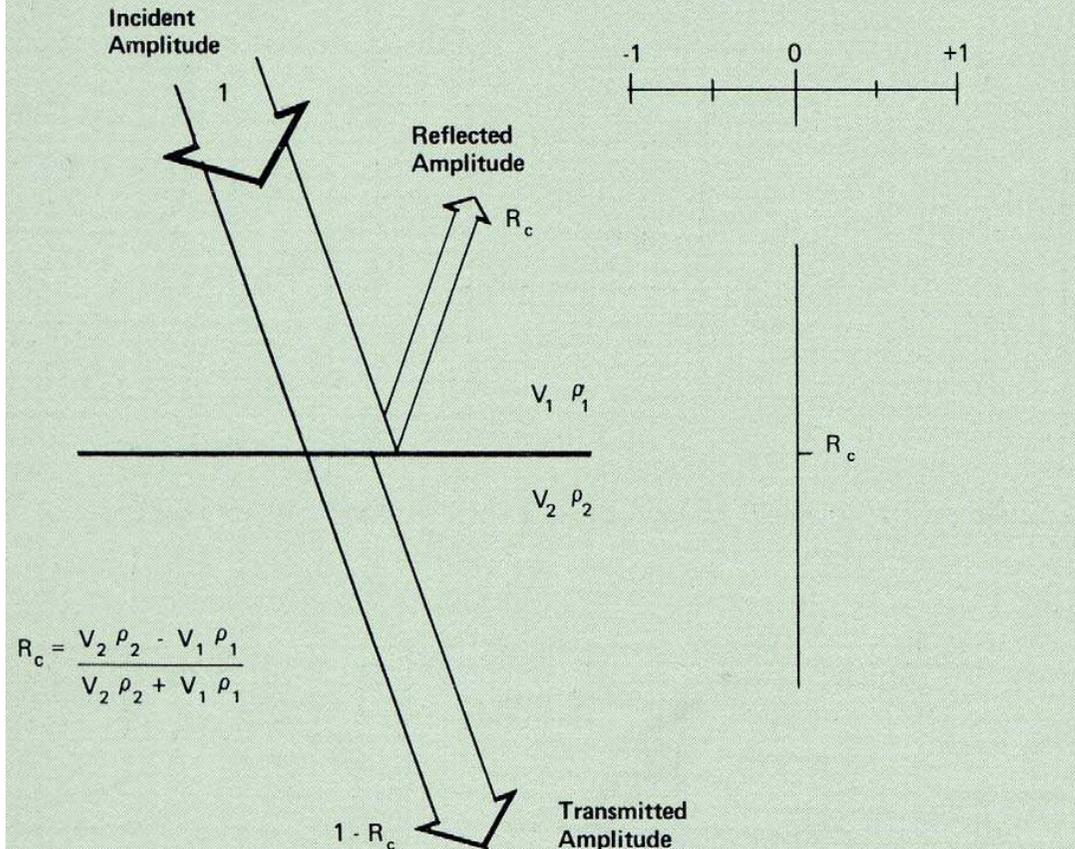
Refraction and reflection of waves



Refraction and reflection of waves

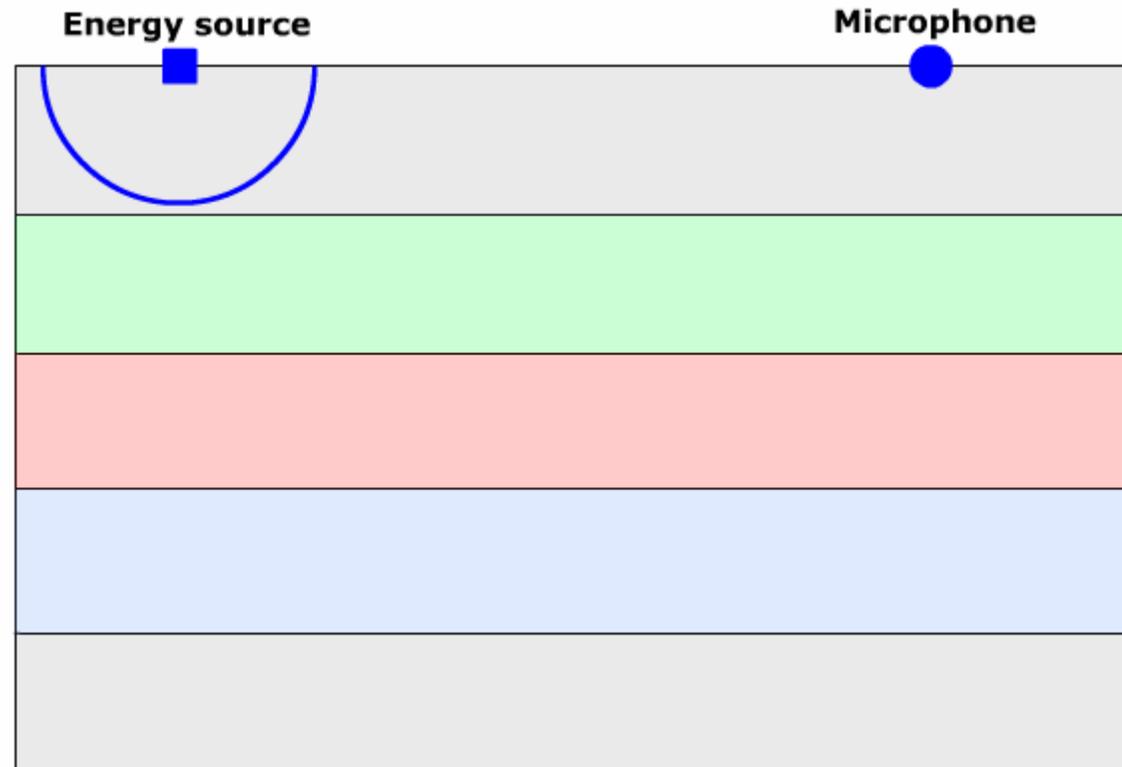


REFLECTION COEFFICIENT FORMULATION

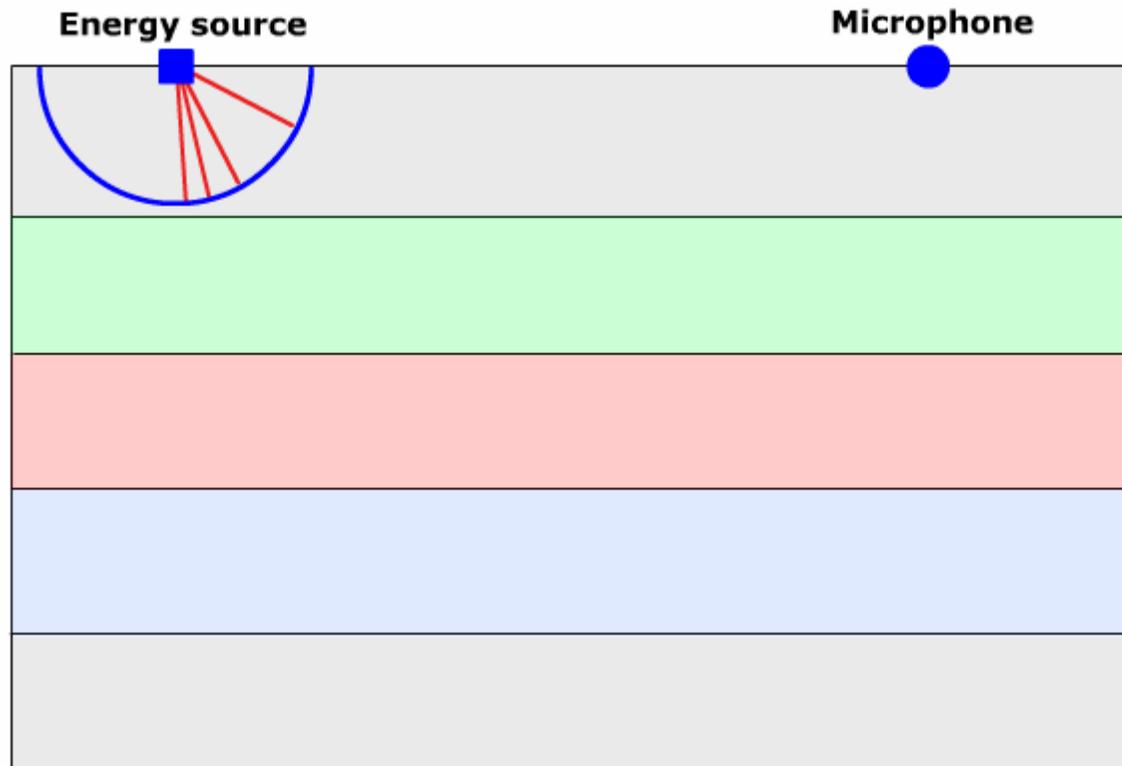


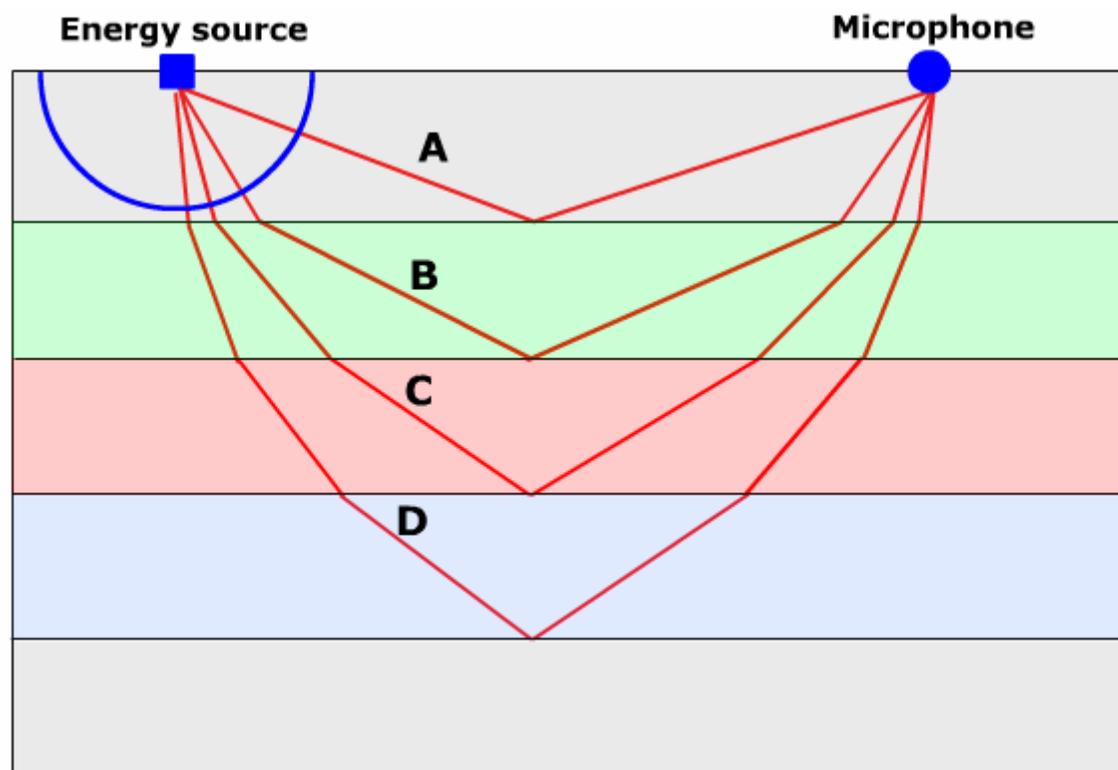
Nella sismica a riflessione si utilizzano le LEGGI dell'Ottrica geometrica:

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

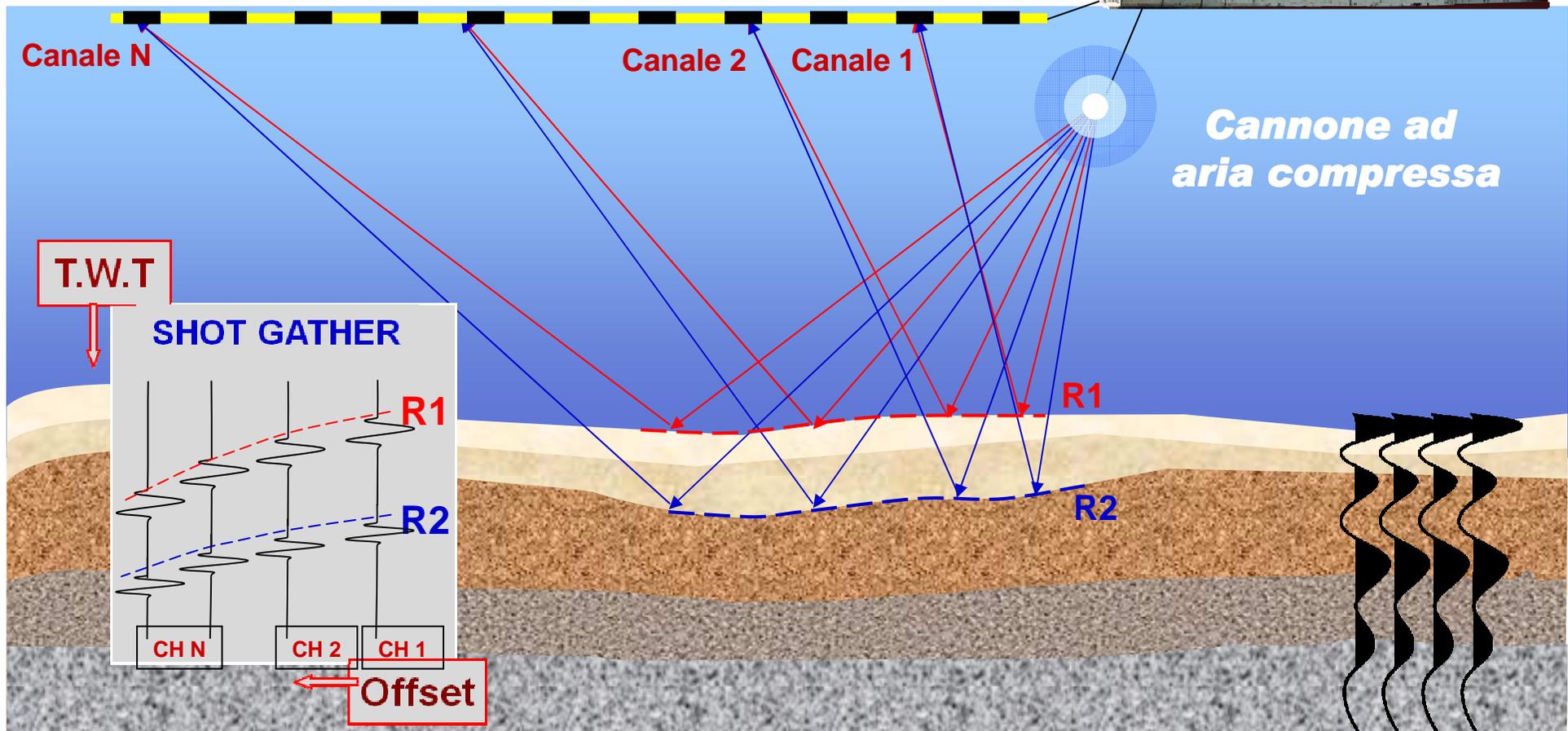


La propagazione dell'onda acustica in un mezzo stratificato si può schematizzare attraverso la rappresentazione dei raggi d'onda come nelle immagini seguenti.





Cavo sismico multicanale



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. Le 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.

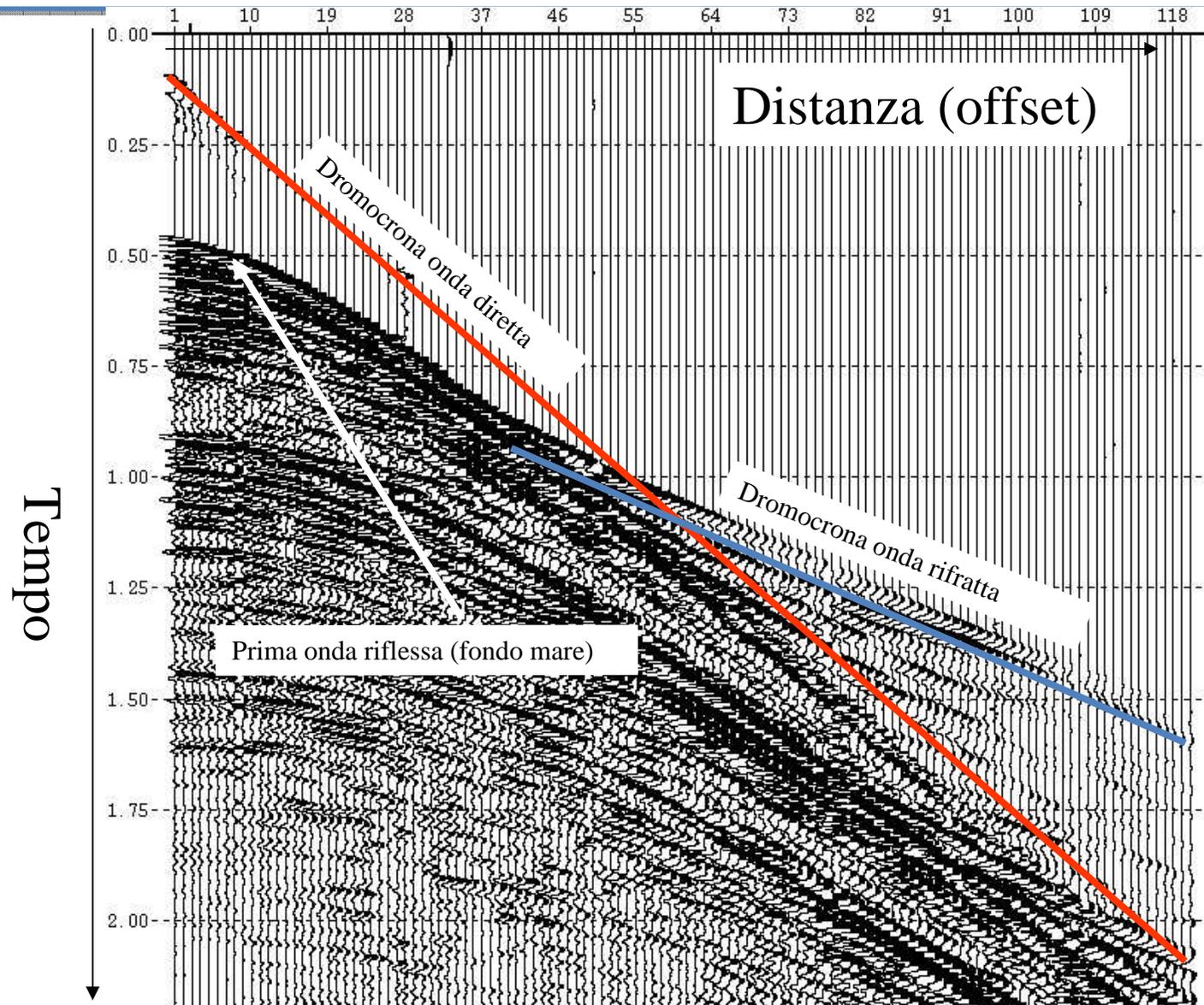
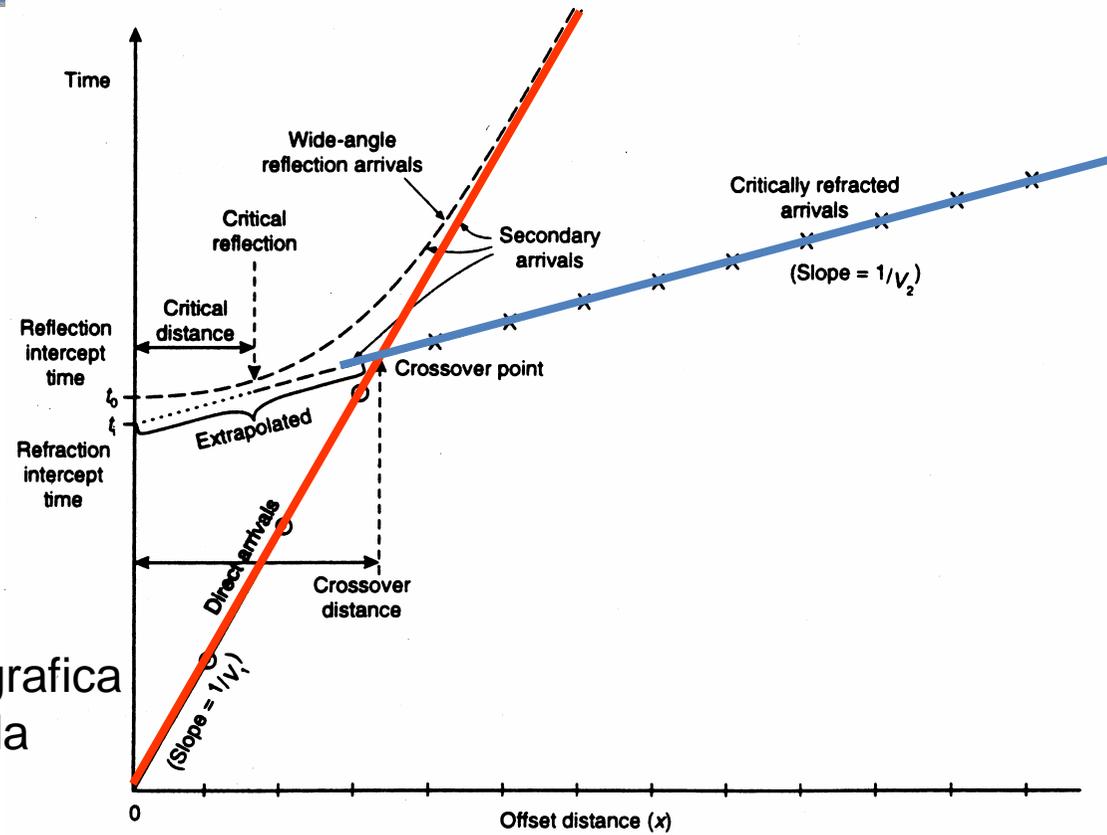
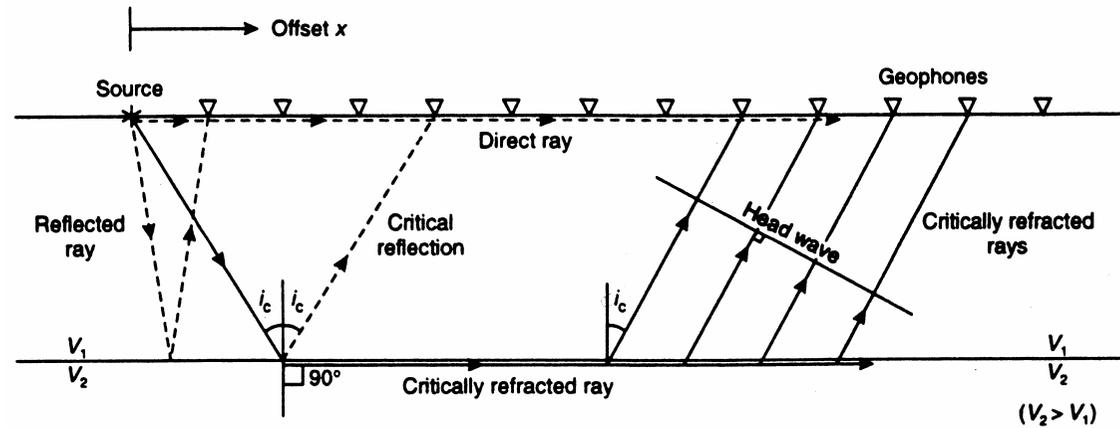
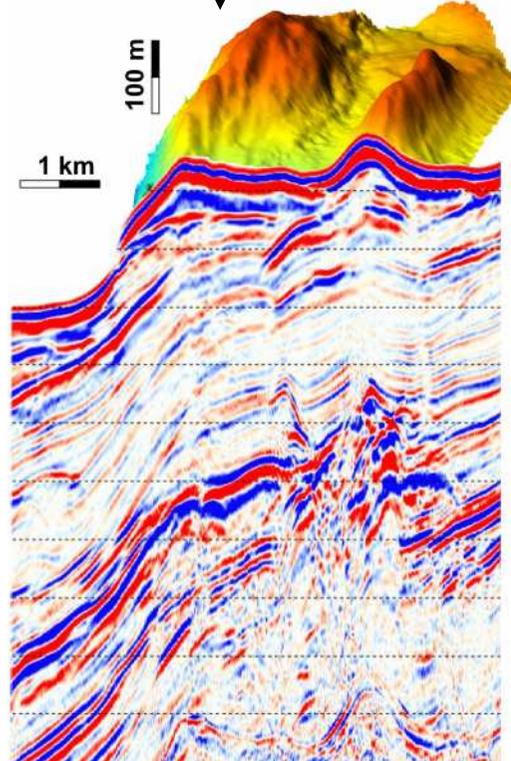
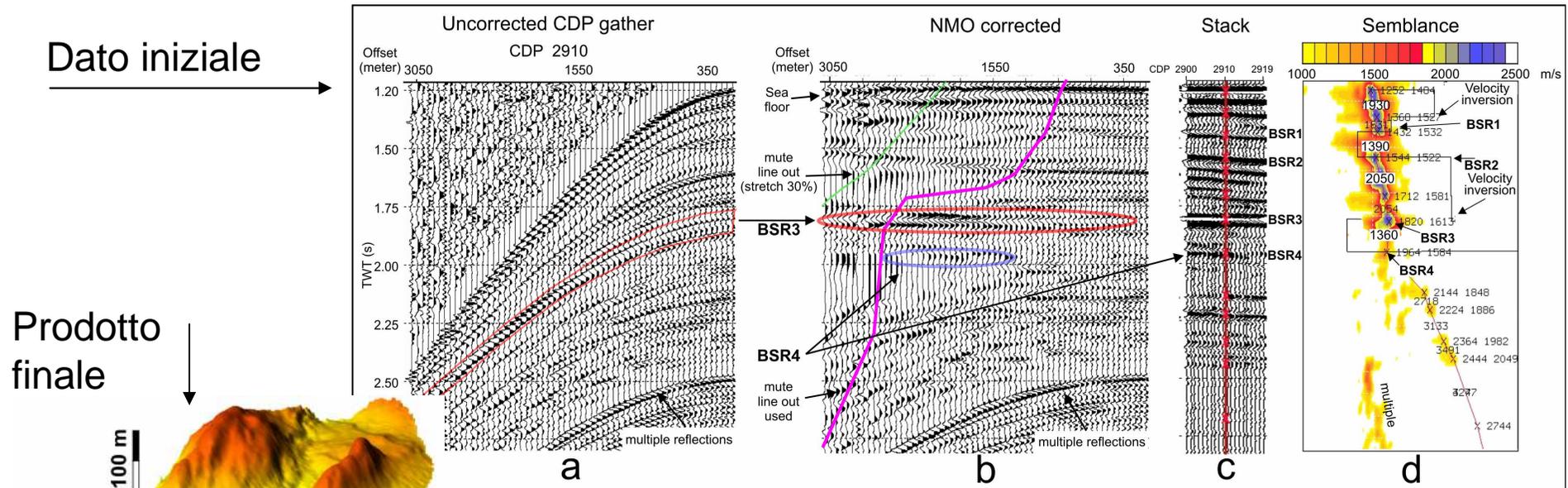


Immagine di una registrazione di uno scoppio: ogni traccia corrisponde alla registrazione di un singolo canale del cavo sismico (streamer). I segmenti rossi e blu indicano rispettivamente l'allineamento delle onde dirette e rifratte, come schematizzato nella figura seguente.

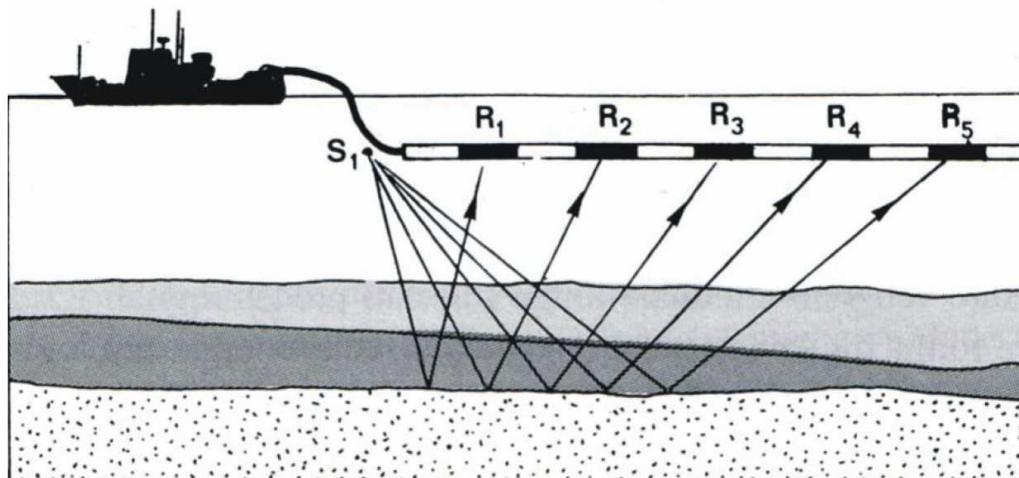


Rappresentazione grafica delle dromocrone (da Reynolds, 1997)

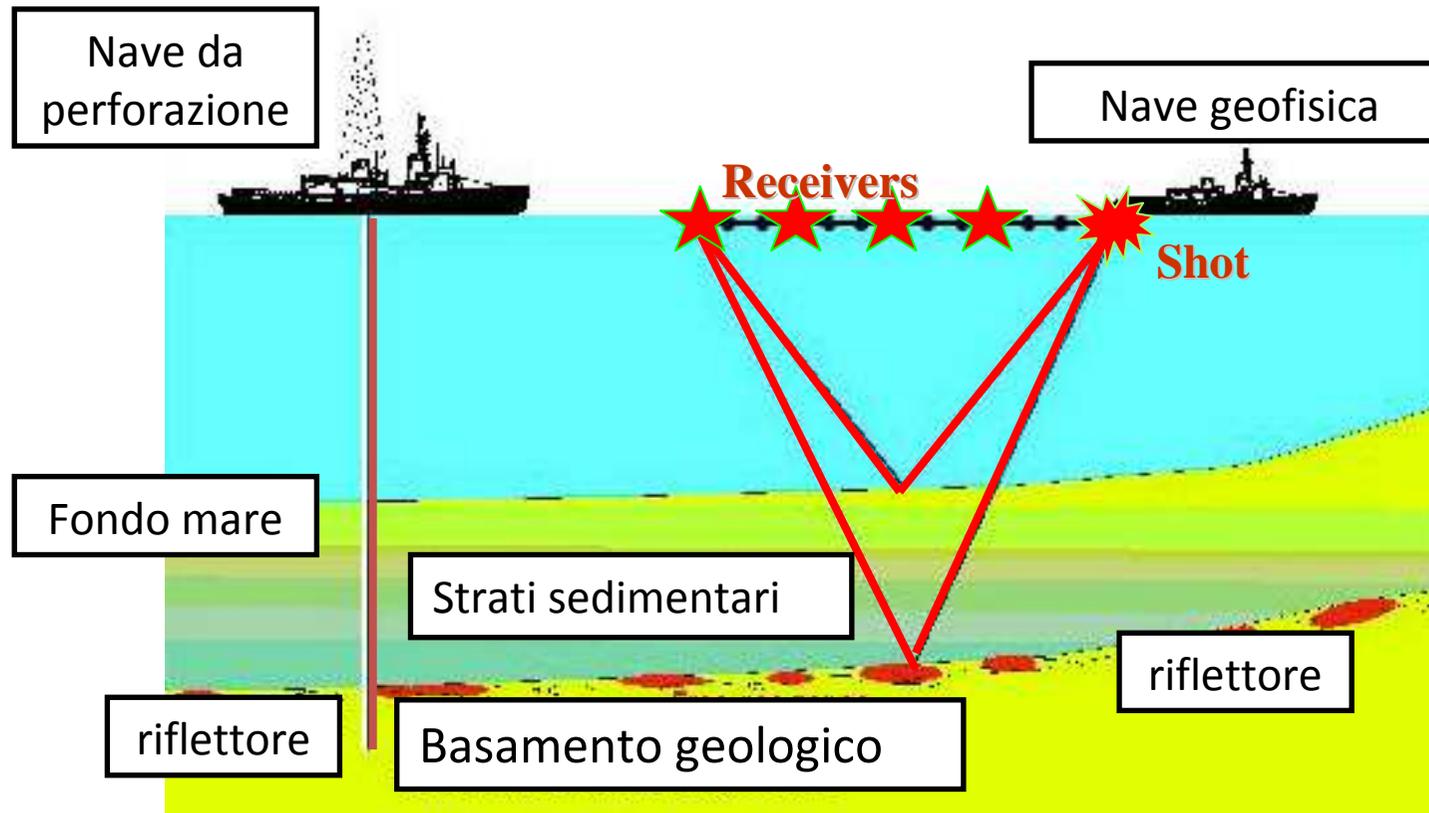




SISMICA A RIFLESSIONE MULTICANALE

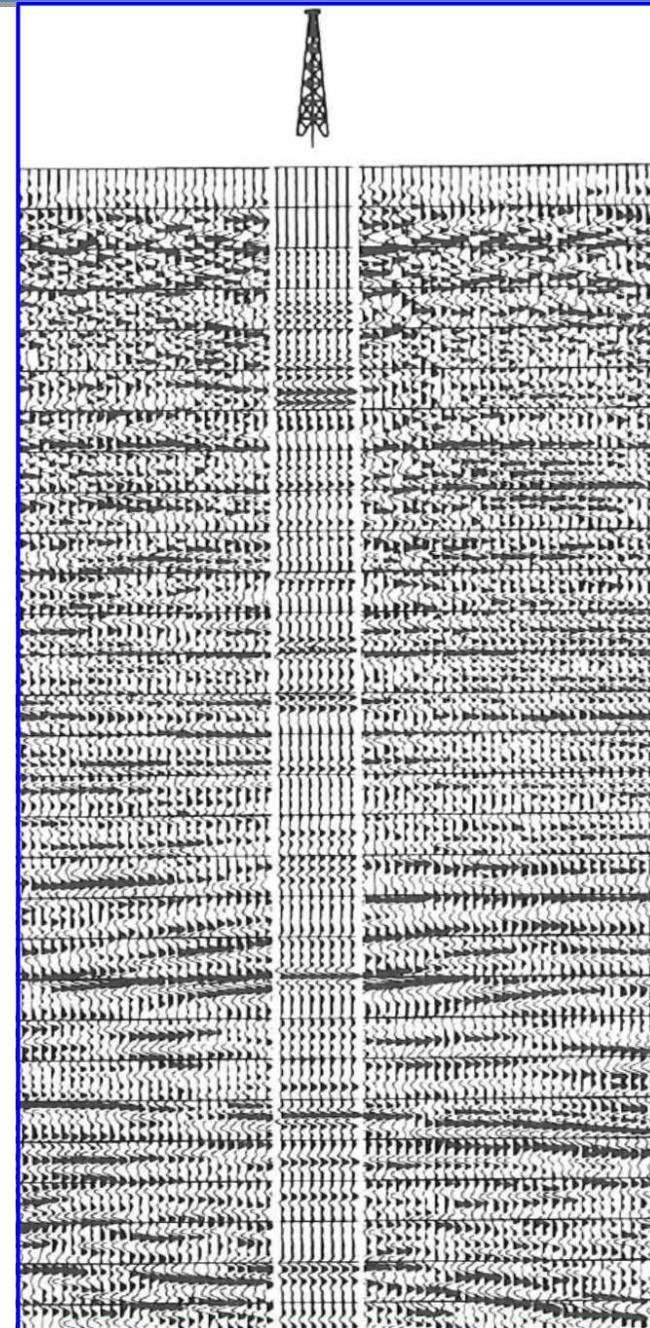


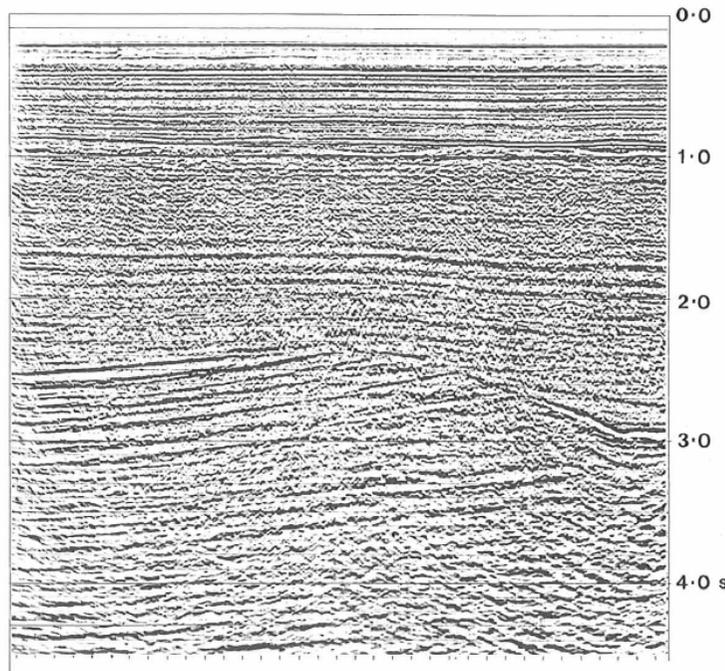
Alcuni dei passaggi di elaborazione del dato sismico multicanale fino all'immagine finale da interpretare



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)

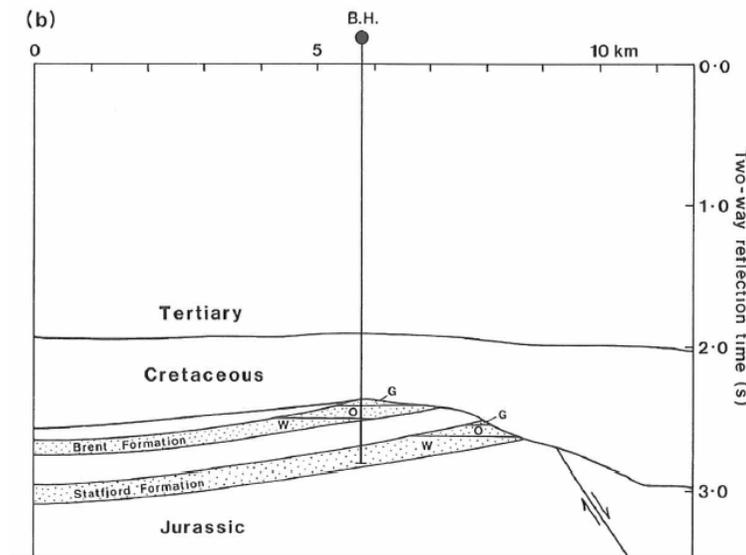




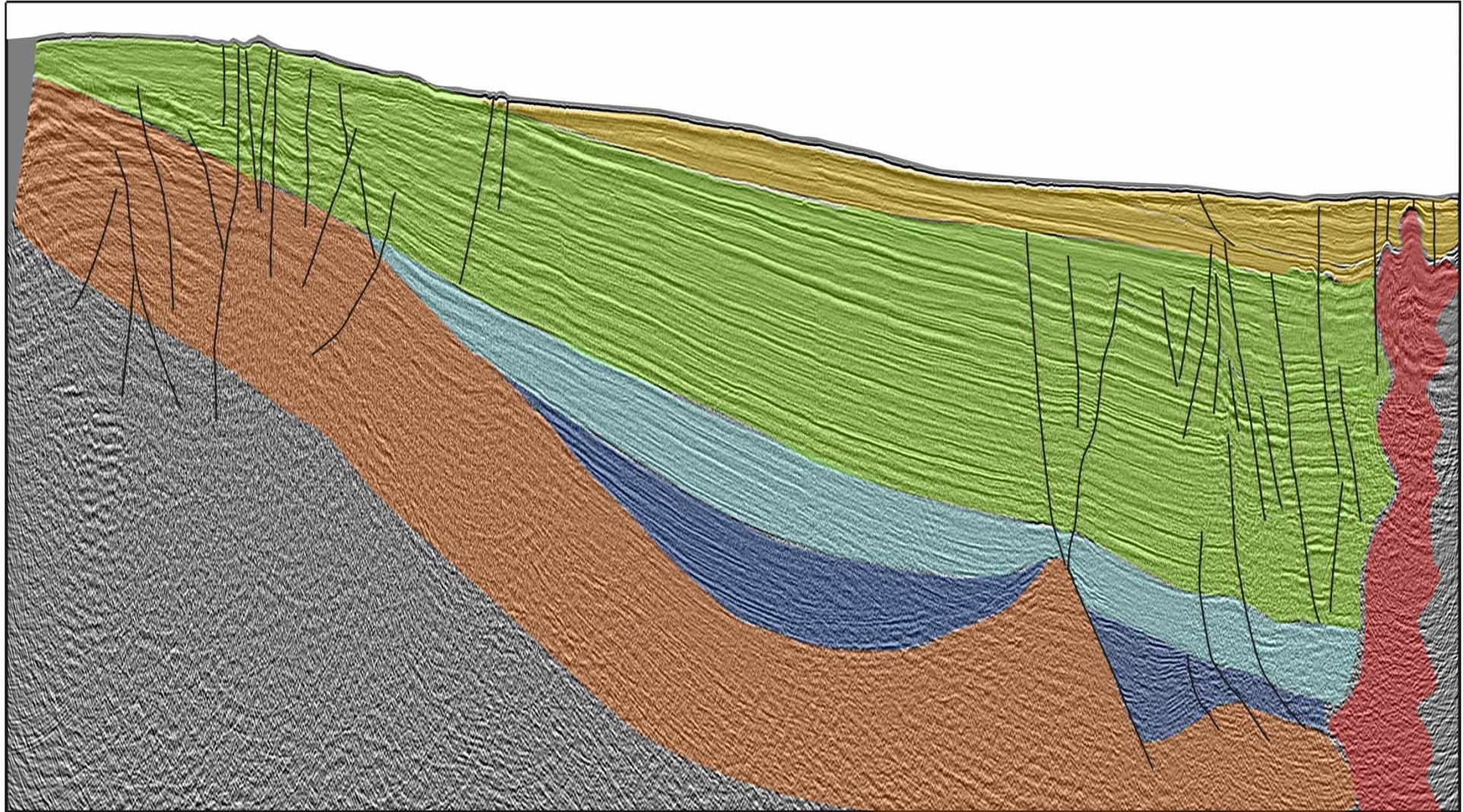
Sezione sismica

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

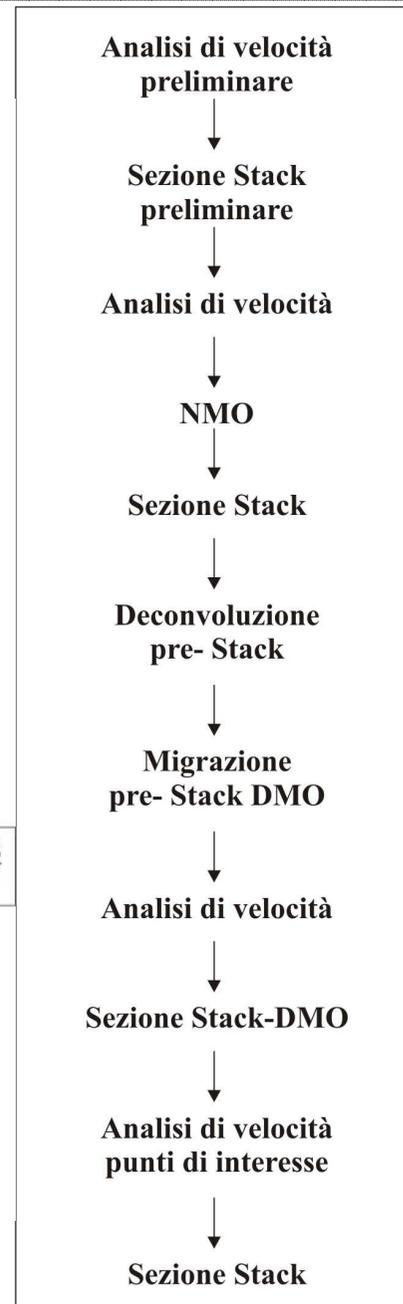


Per ottenere la sezione sismica dal dato grezzo sono necessarie molte operazioni di elaborazione da applicare in una sequenza ben definita, chiamata “processing flow”

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

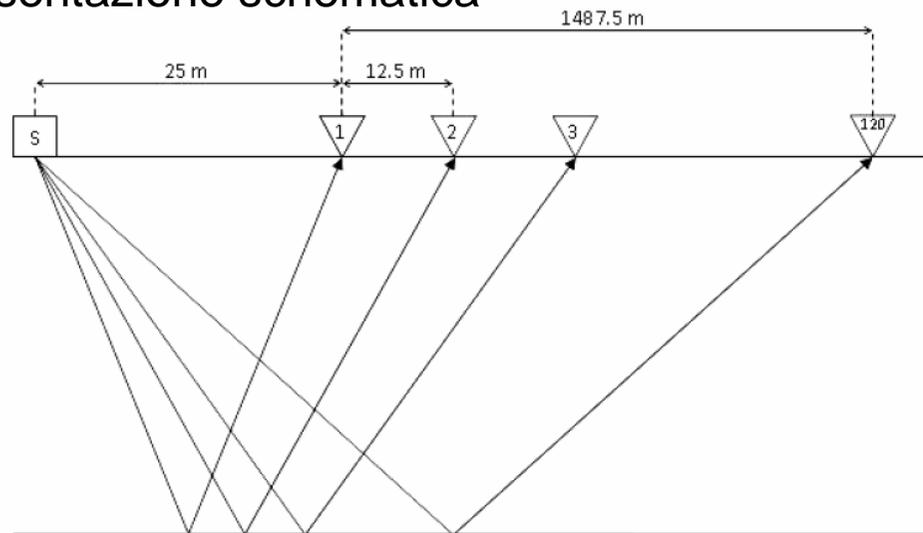
I passi fondamentali nell'elaborazione sismica multicanale sono:

- 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



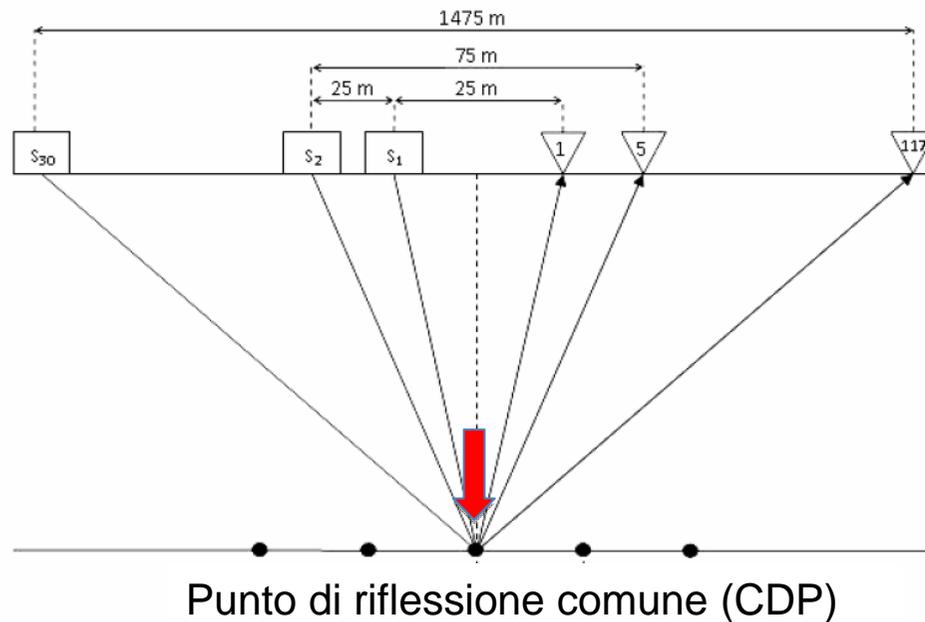
Esempio di rappresentazione schematica delle geometrie di:

Shot gather



e

CDP gather



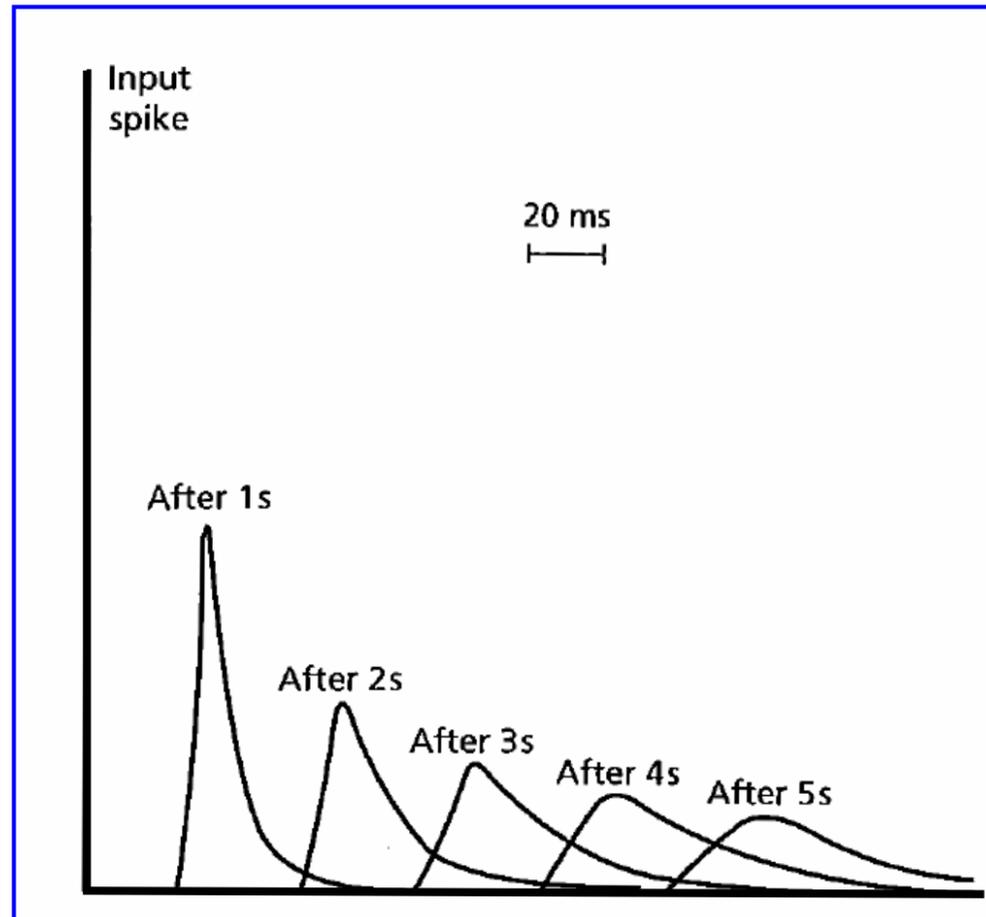
Nella procedura di “gaining” si vuole correggere l’attenuazione d’ampiezza dell’ondina sismica dovuta all’effetto della divergenza sferica e all’assorbimento del terreno.

Assorbimento

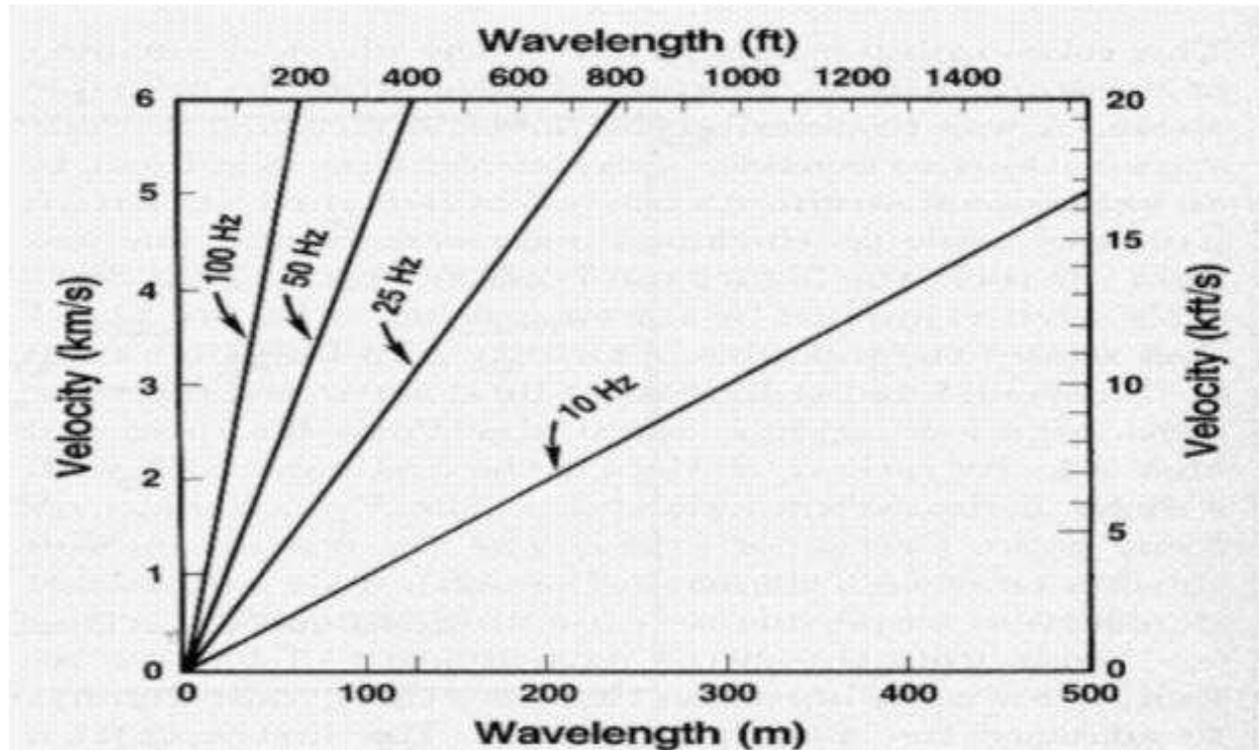
L’effetto dell’assorbimento produce un progressivo allungamento dell’impulso sismico.

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 :

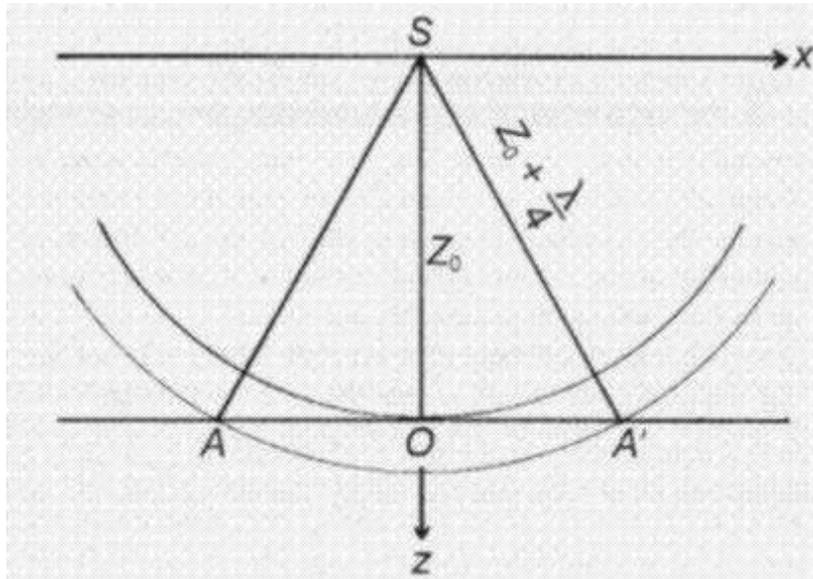
- Proprietà fisiche del sottosuolo
- Frequenza immessa nel terreno
- Parametri di registrazione
- Processing del segnale acquisito

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



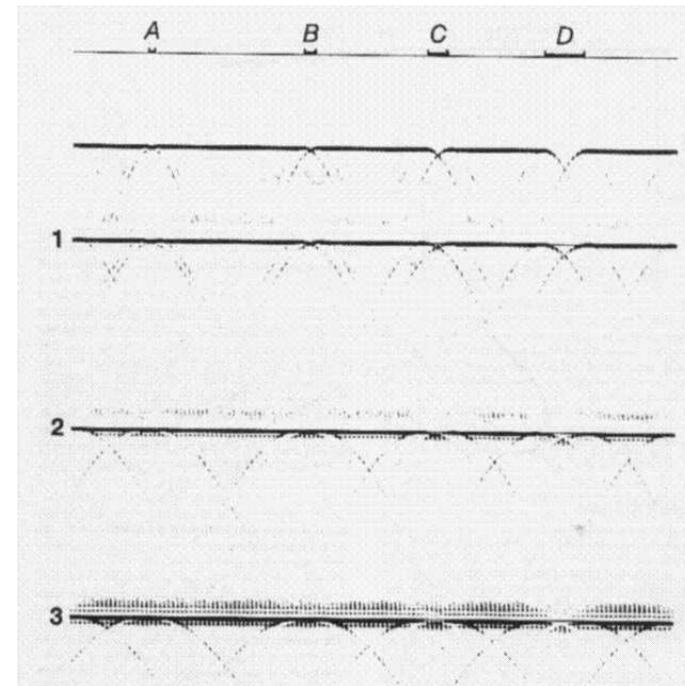
È definita come la distanza laterale minima tra due elementi riflettenti, necessaria per poterli distinguere individualmente all'interno di un profilo sismico. La risoluzione laterale è determinata dal raggio della *Zona di Fresnel*, l'area compresa fra il fronte d'onda tangente alla superficie di discontinuità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

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)

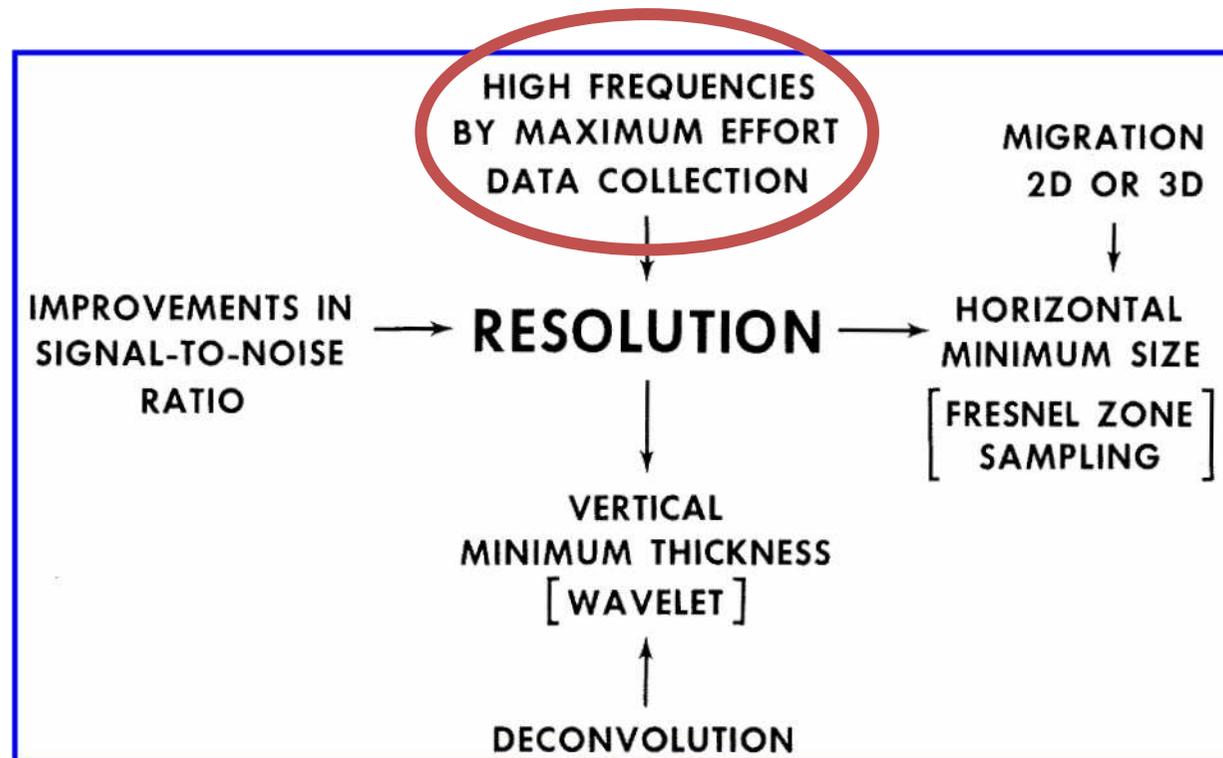
Table 11-2. Threshold for lateral resolution (first Fresnel zone).

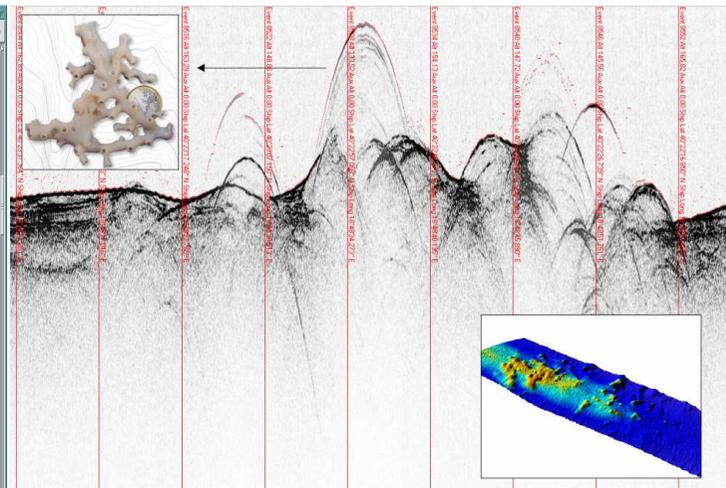
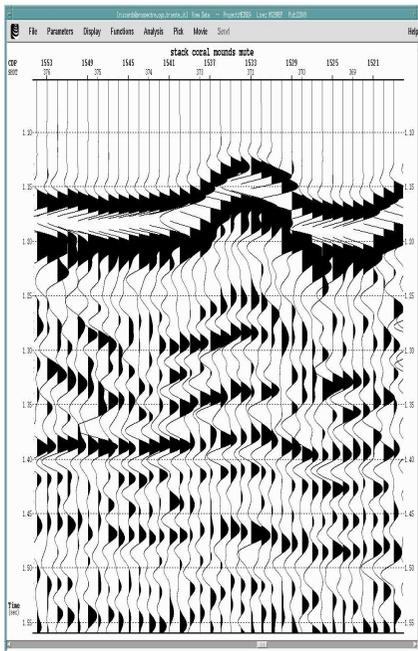
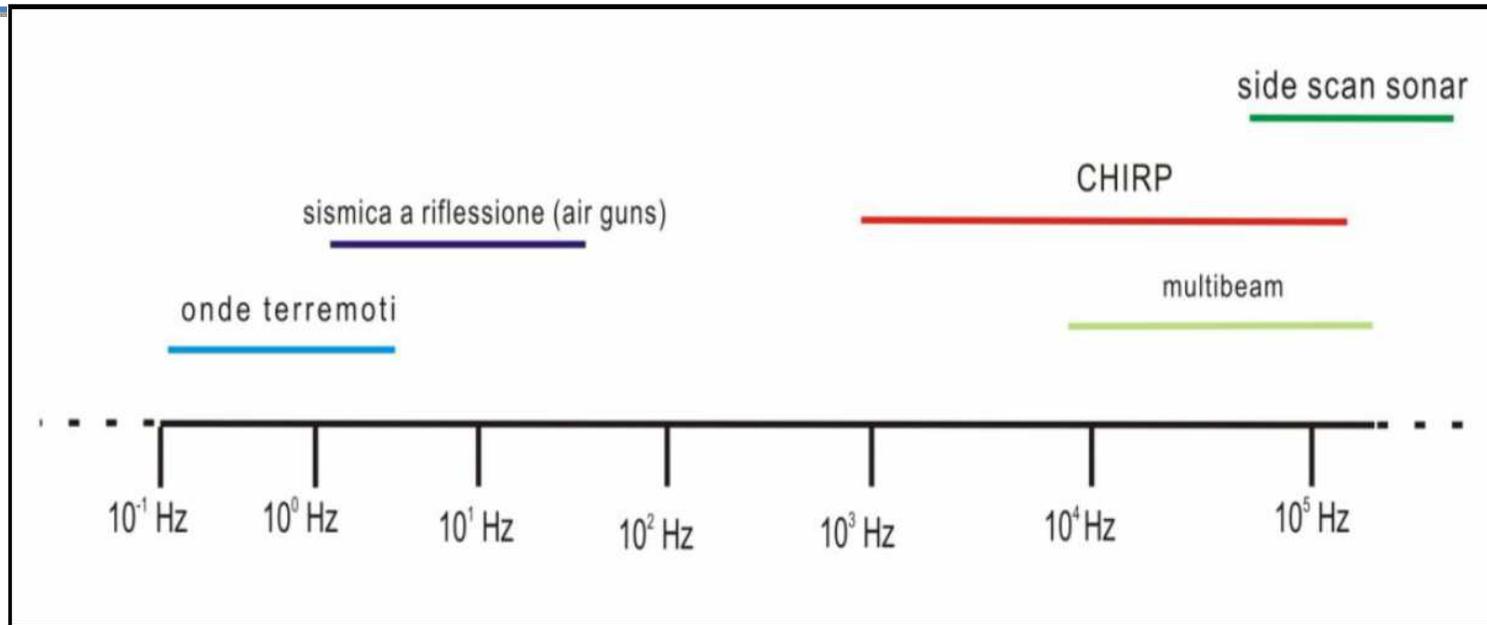
$r = (v/2)\sqrt{t_0/f}$			
t_0 (s)	v (m/s)	f (Hz)	r (m)
1	2000	50	141
2	3000	40	335
3	4000	30	632
4	5000	20	1118

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

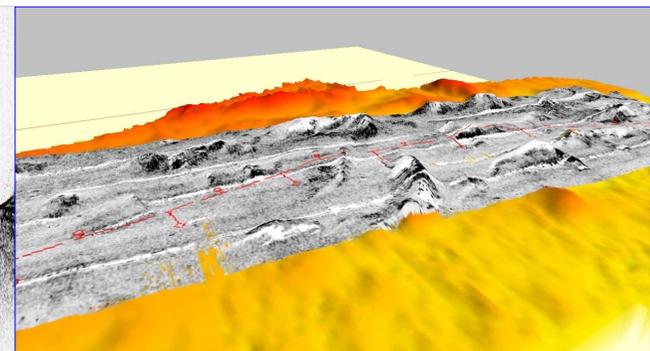


Si può agire sulla risoluzione in acquisizione

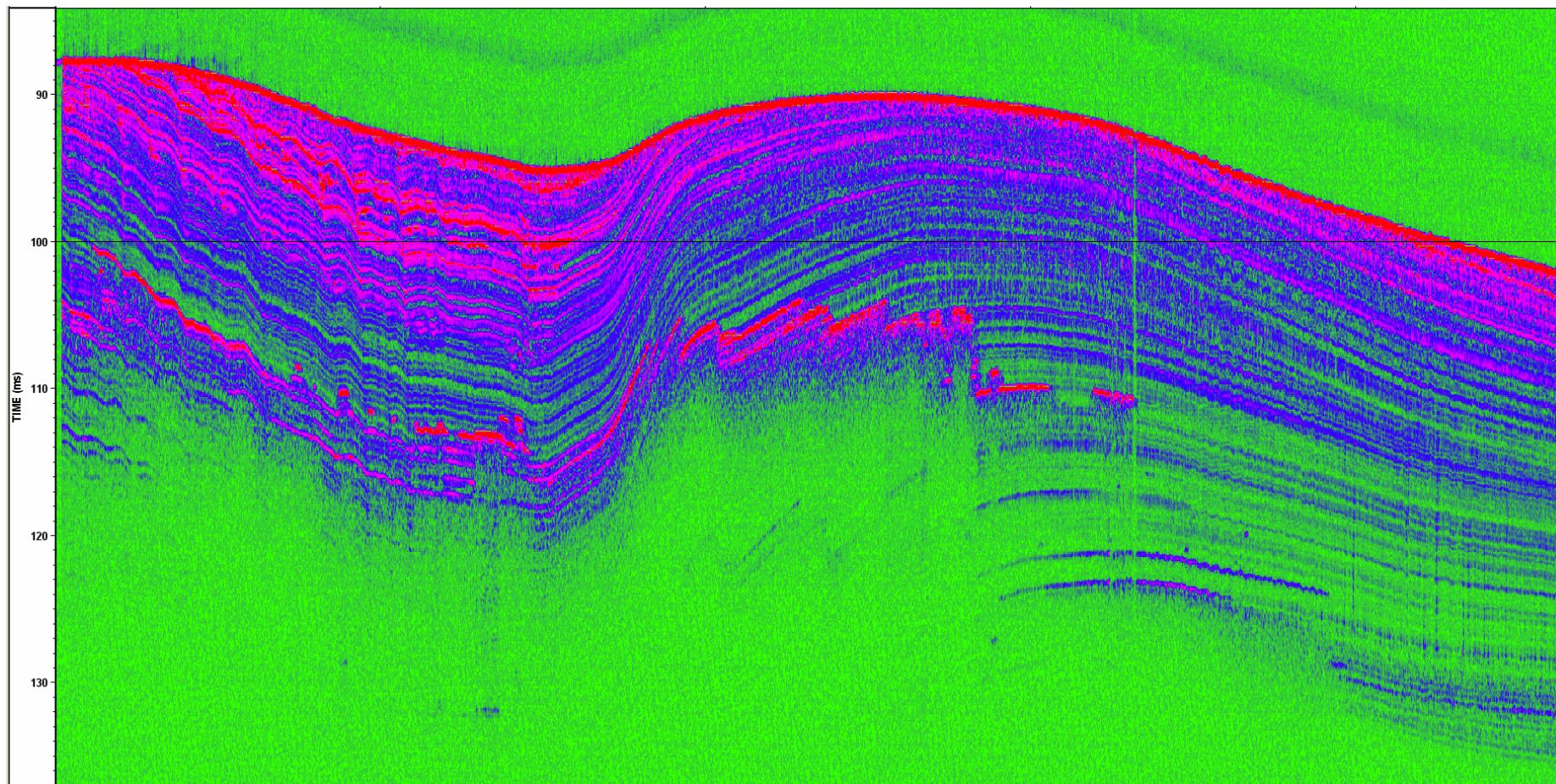




↑ Profilo CHIRP
← Profilo sismico a bassa risoluzione

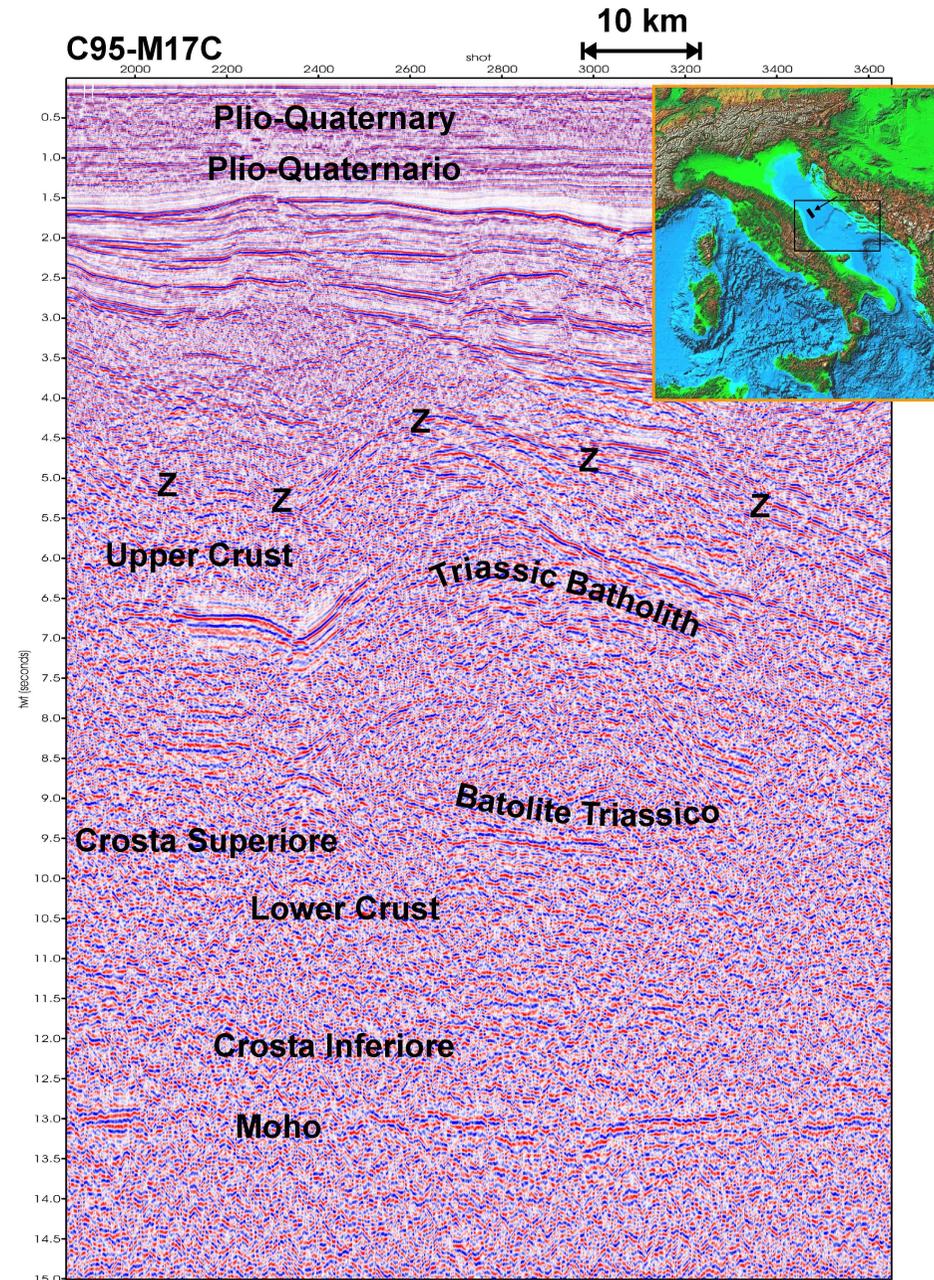


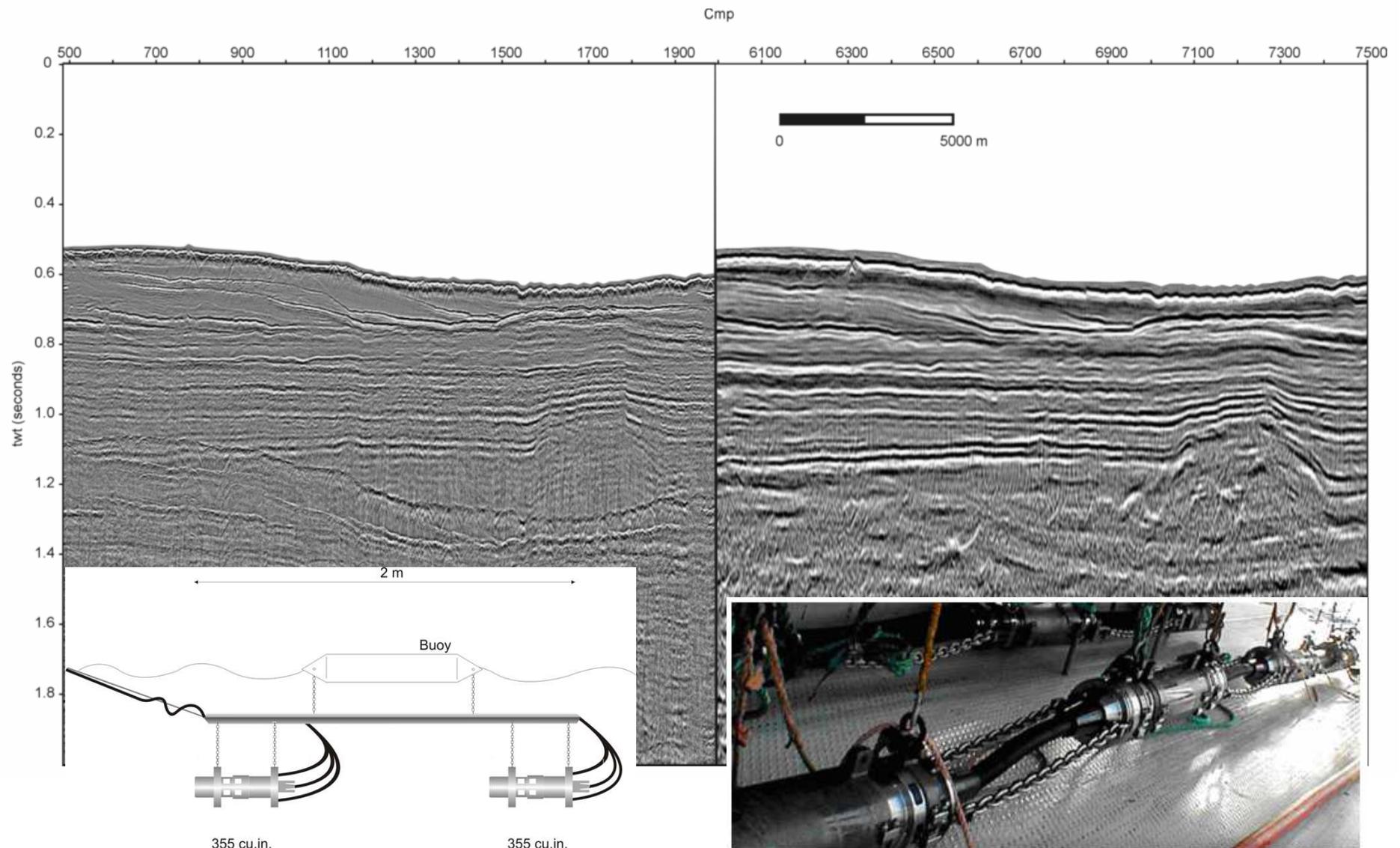
↑ Strisciata side scan sonar su multibeam



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

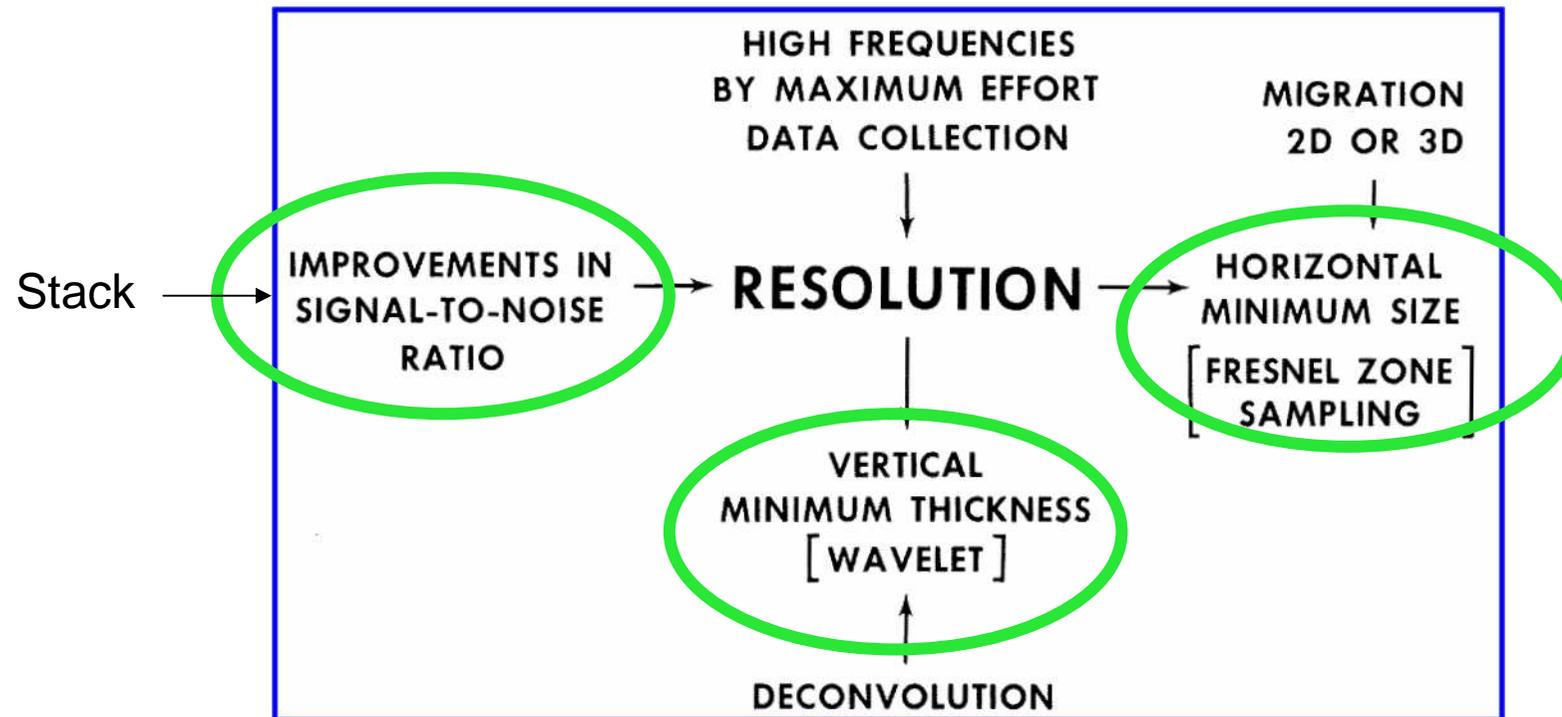
Esempio di profilo sismico crostale in cui si possono osservare alcuni evidenti orizzonti riflettenti tra i quali la base del Plio-Quaternario (ad una profondità di c. 1,5/2 km) e la Moho ad una profondità di c. 30 km (13 s). Il segnale relativo a quest'ultima ha una risoluzione verticale dell'ordine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

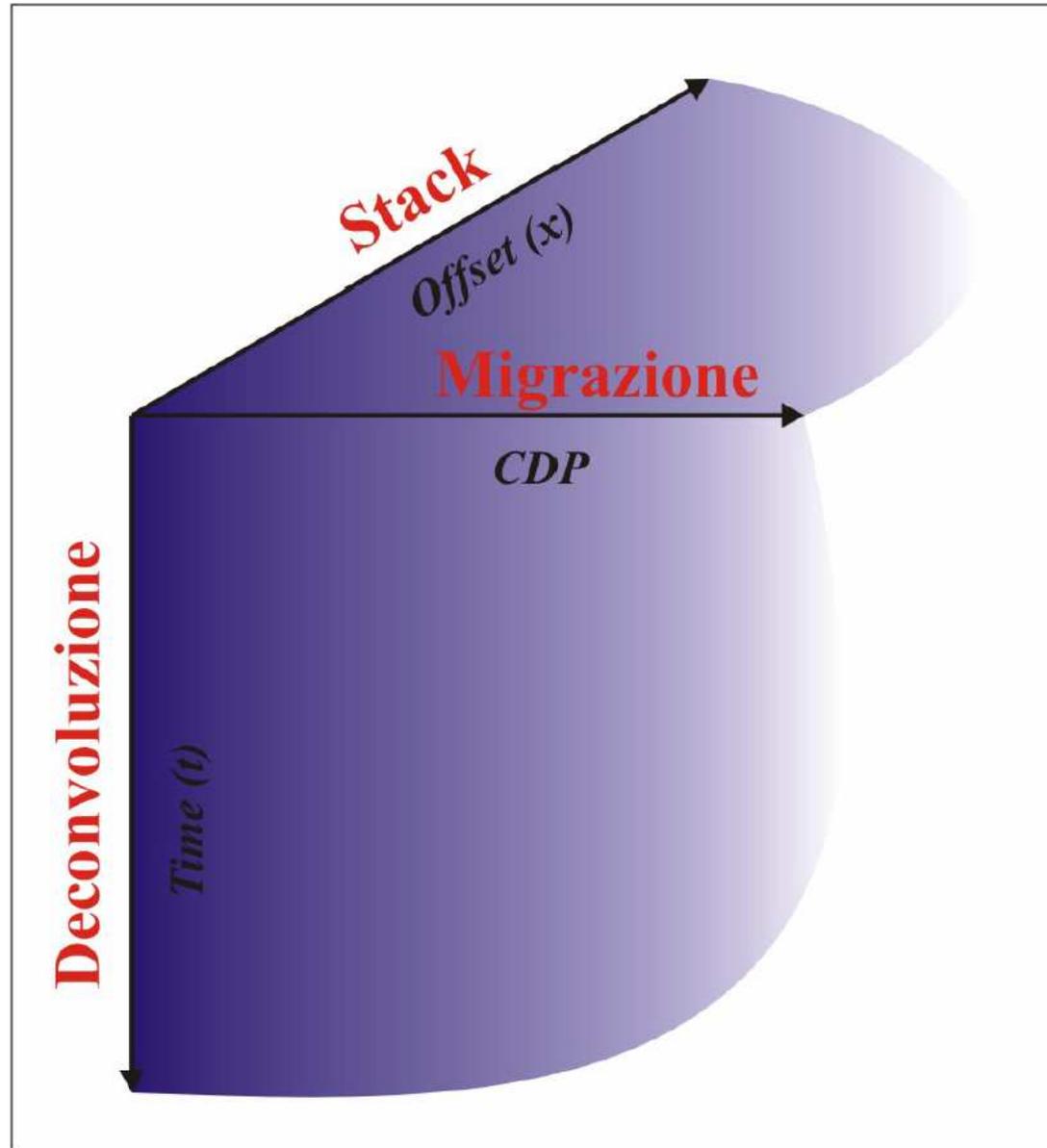




Differenti sorgenti di una stessa linea: 2 GI gun sulle sinistra per sismica a media risoluzione e un array di 18 air gun a destra per indagine crostale

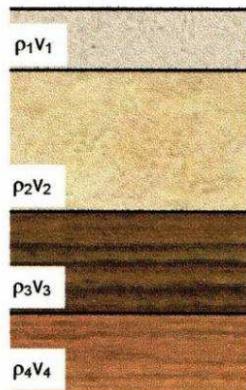
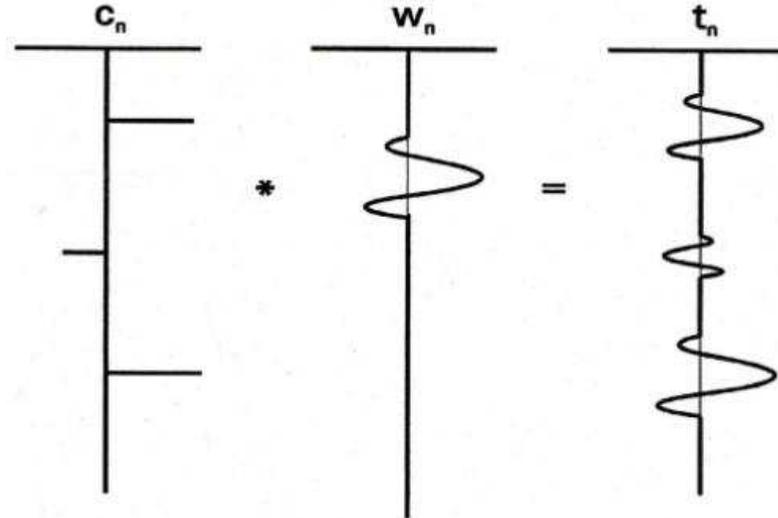
Inoltre si può agire sulla risoluzione in fase di elaborazione





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

Rappresentazione schematica del modello convolutivo



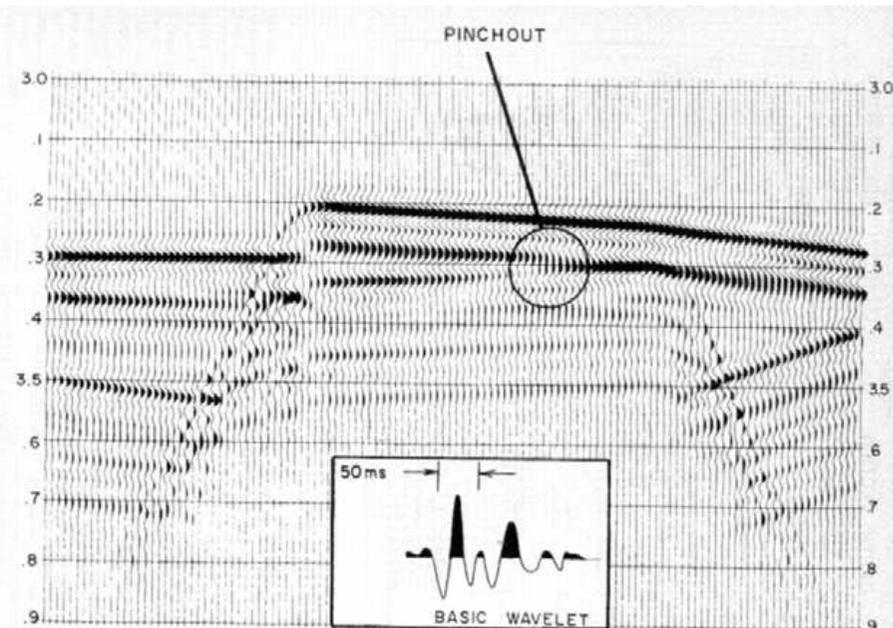
Deconvoluzione

La funzione primaria della deconvoluzione è di operare inversamente al modello sopra esposto e cioè quello di comprimere l'ordina 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.

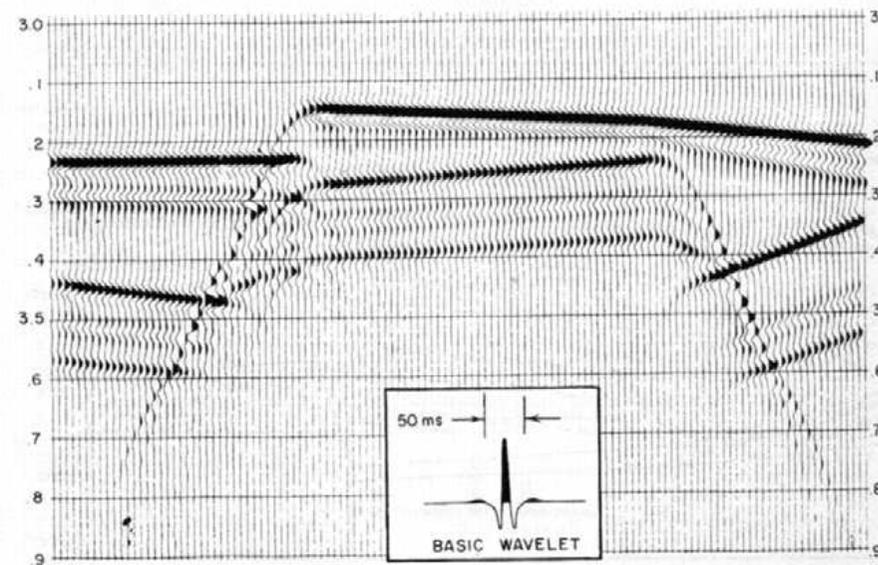
Rappresentazione della sequenza di coefficienti di riflessione (a destra) che descrive la colonna stratigrafica reale (a sinistra)

Risoluzione verticale

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



Prima della deconvoluzione

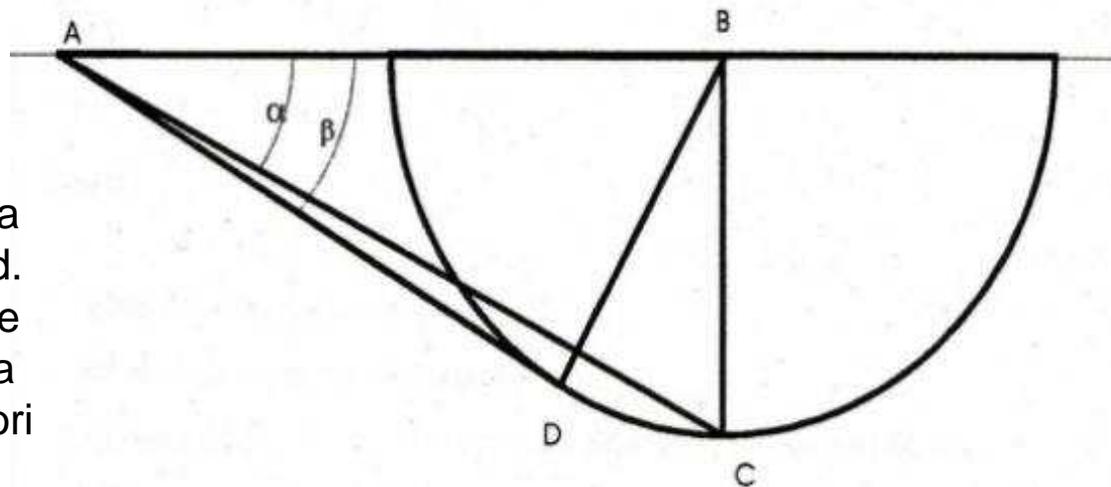


Dopo il processo deconvolutivo

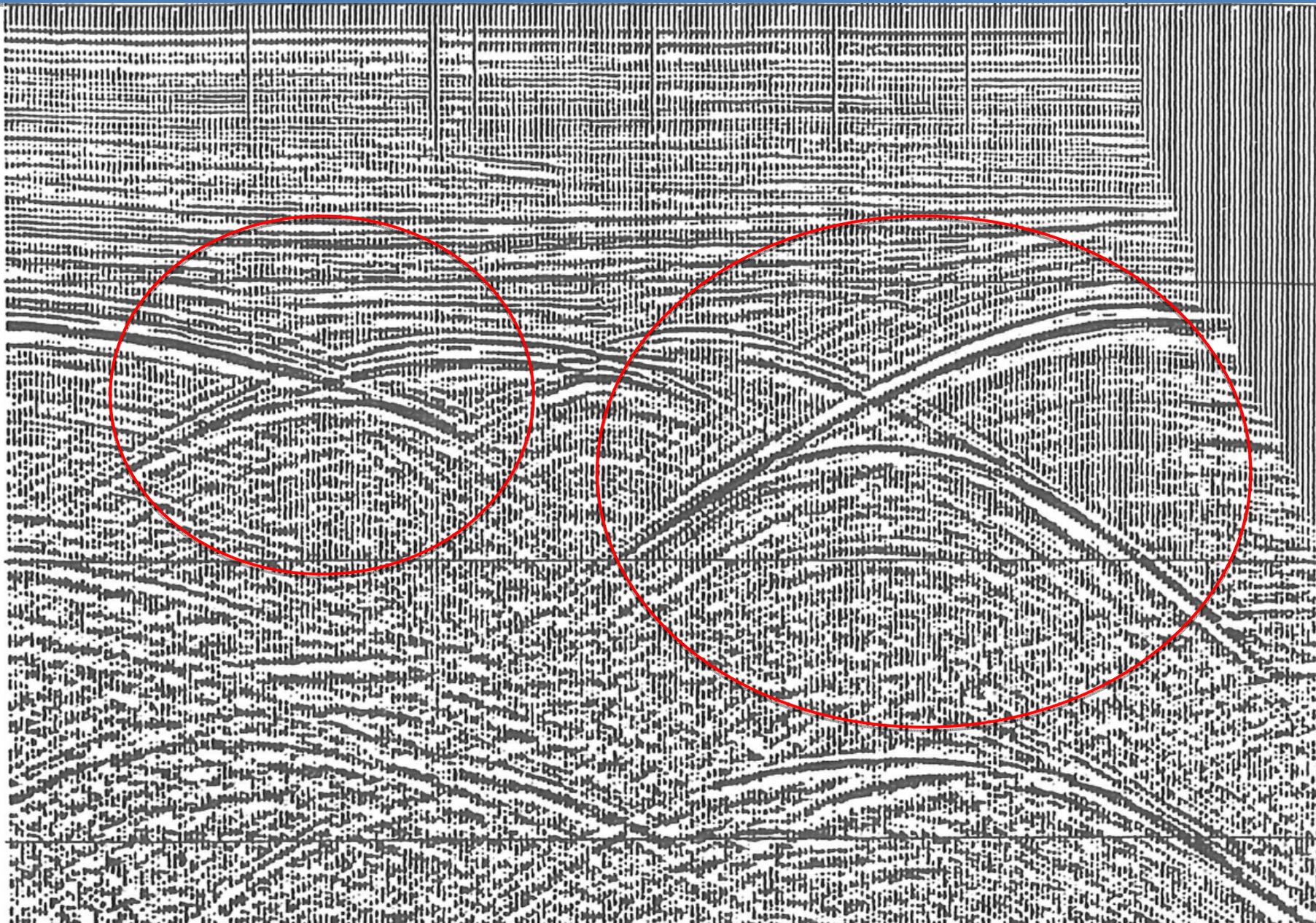
FIG. 19—North Sea horst-fault model, wave-theory solution (primaries only).

Risoluzione orizzontale

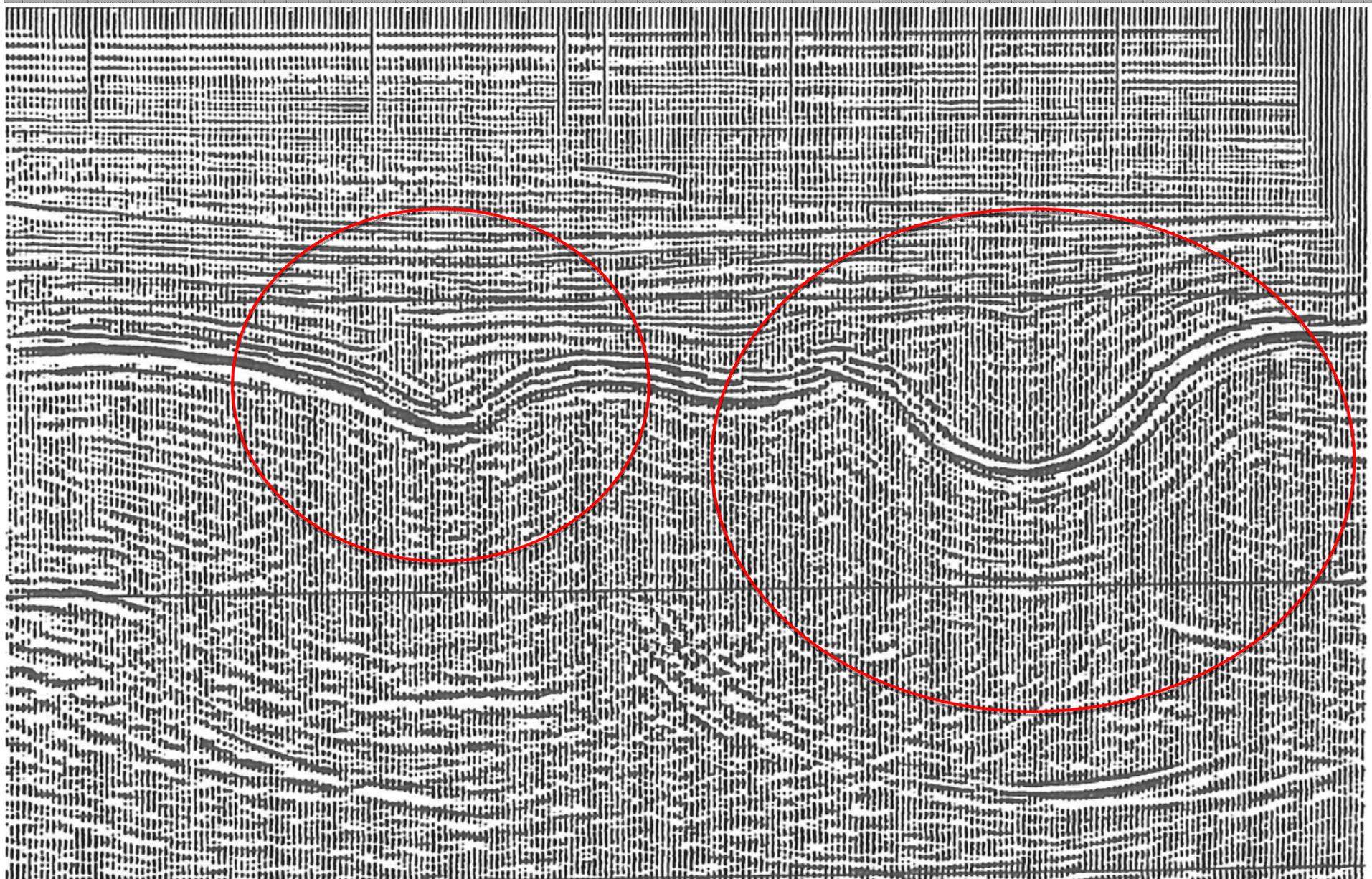
La migrazione viene applicata comunemente ai dati stacked. È un processo che collassa le iperboli di diffrazione e riporta alla giusta inclinazione riflettori inclinati.



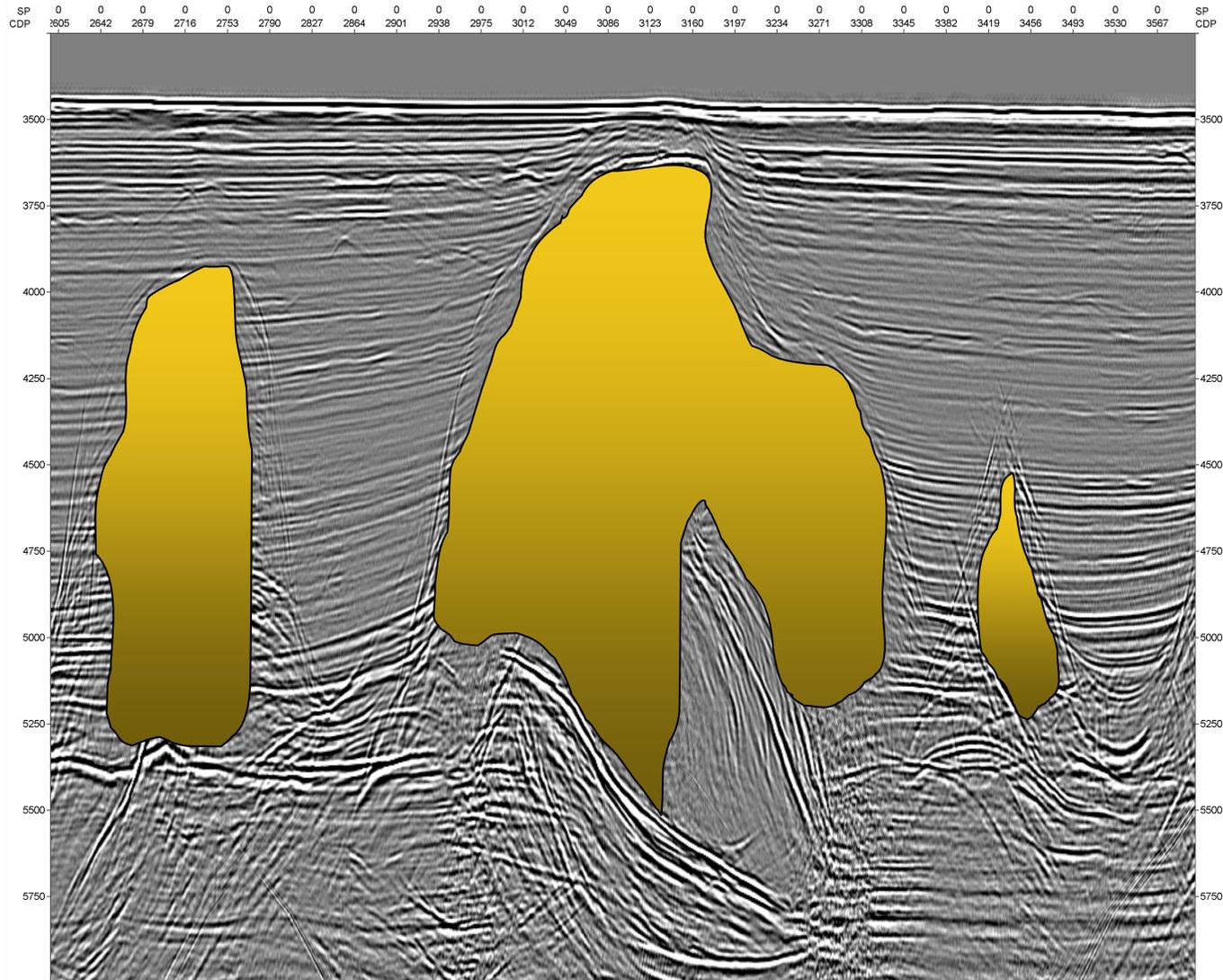
1. L'inclinazione dei riflettori nella sezione geologica è maggiore rispetto alla sezione stack (zero-offset/tempo). La migrazione, recuperando la corretta posizione spaziale degli eventi sismici, aumenta l'inclinazione dei riflettori
2. Le dimensioni lineari di un riflettore nella sezione stack (zero-offset) sono maggiori rispetto alla sezione migrata. La migrazione riduce le dimensioni lineari dei riflettori



Sezione STACK: si noti la presenza di numerose iperboli di diffrazione (bow-tie event) (segue)



..... sezione MIGRATA : si osservino che le diffrazioni nella sezione stack sono state collassate, mettendo in luce le reali geometrie del sottosuolo con alcuni canali sepolti

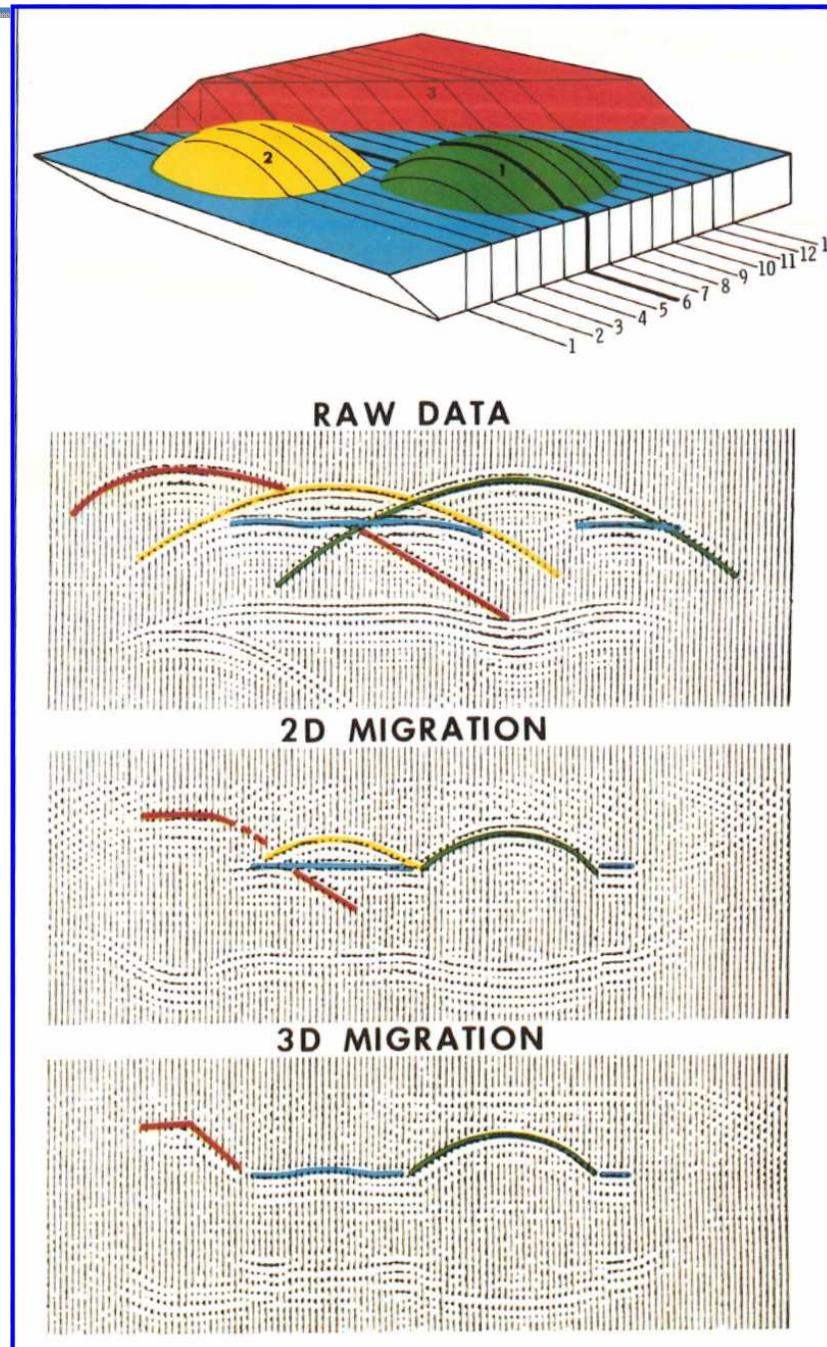


Esempio di profilo sismico migrato in 2D con presenza di domi salini, alcuni dei quali sono laterali al piano della sezione.

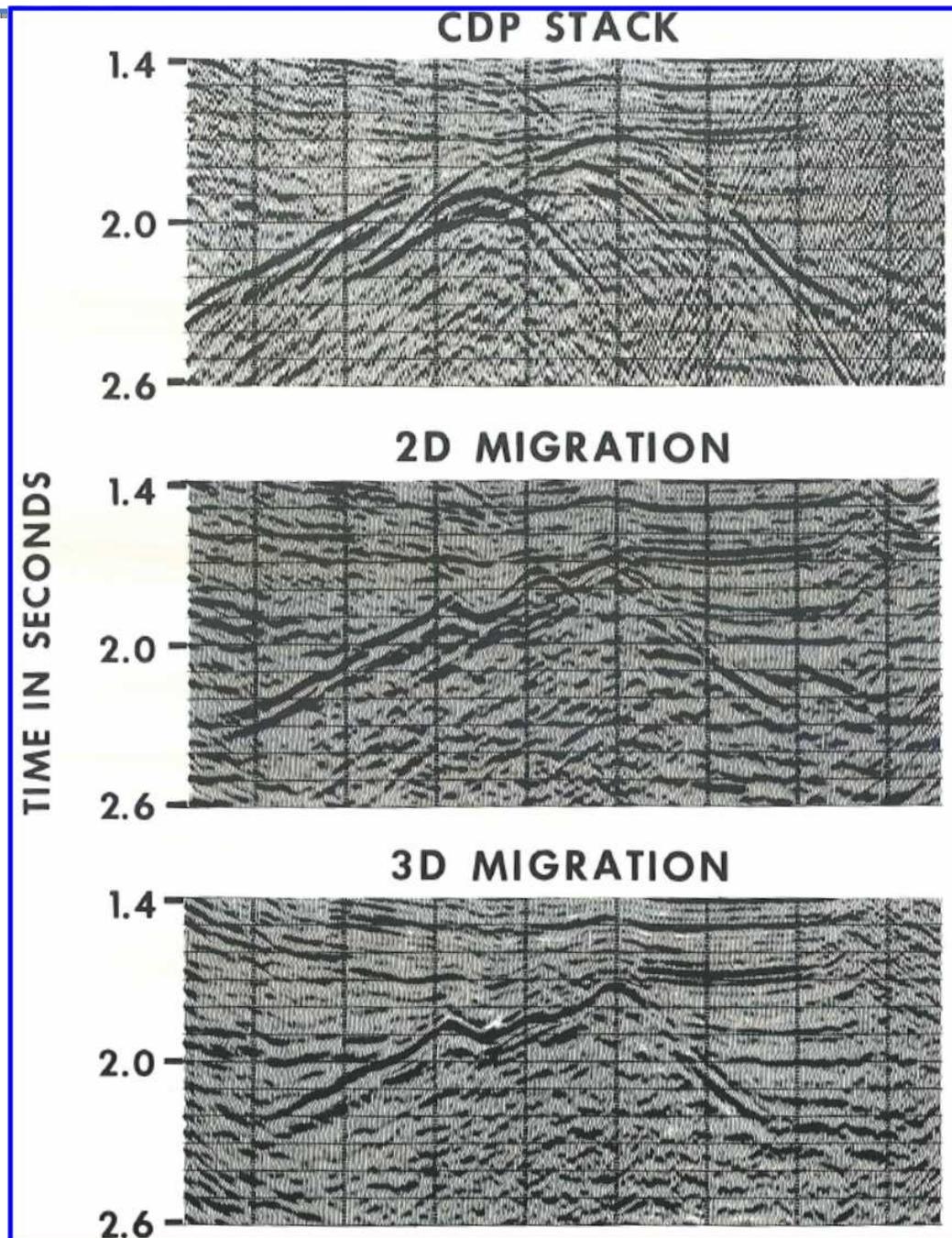
Migrazione 2D e 3D

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 2D, mentre lo è in quella 3D. Infatti nella migrazione 2D gli oggetti laterali non vengono discriminati e rientrano erroneamente nell'immagine sismica.



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



Modello geologico
 x, y, z

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

Velocità

Esperimento sismico:
 x, y, t

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.

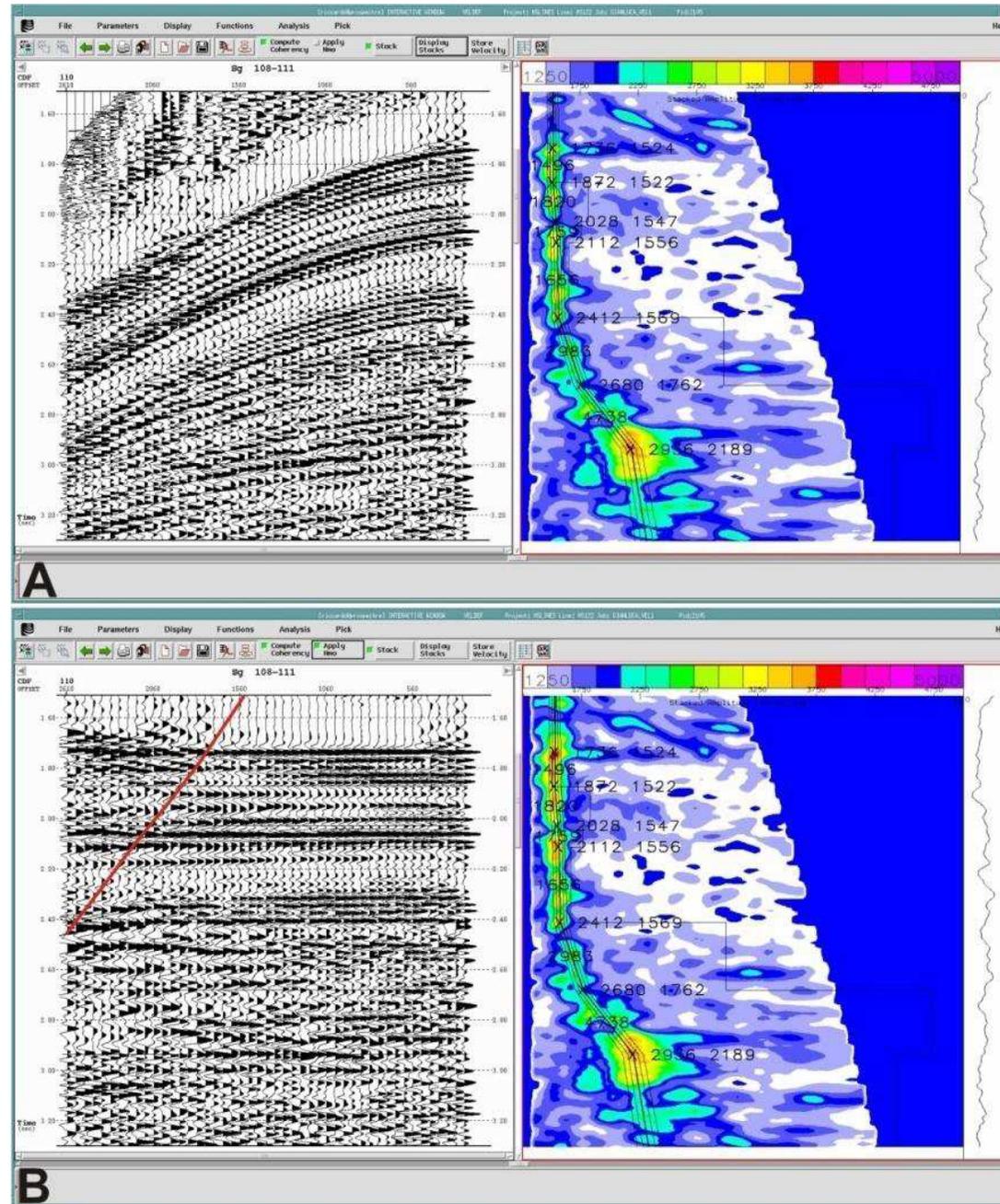
Per convertire la sezione-tempi in sezione-profondità si rende necessario l'utilizzo di un campo di velocità che può essere ricavato da quello derivante dalle analisi di velocità

ANALISI DI VELOCITA'

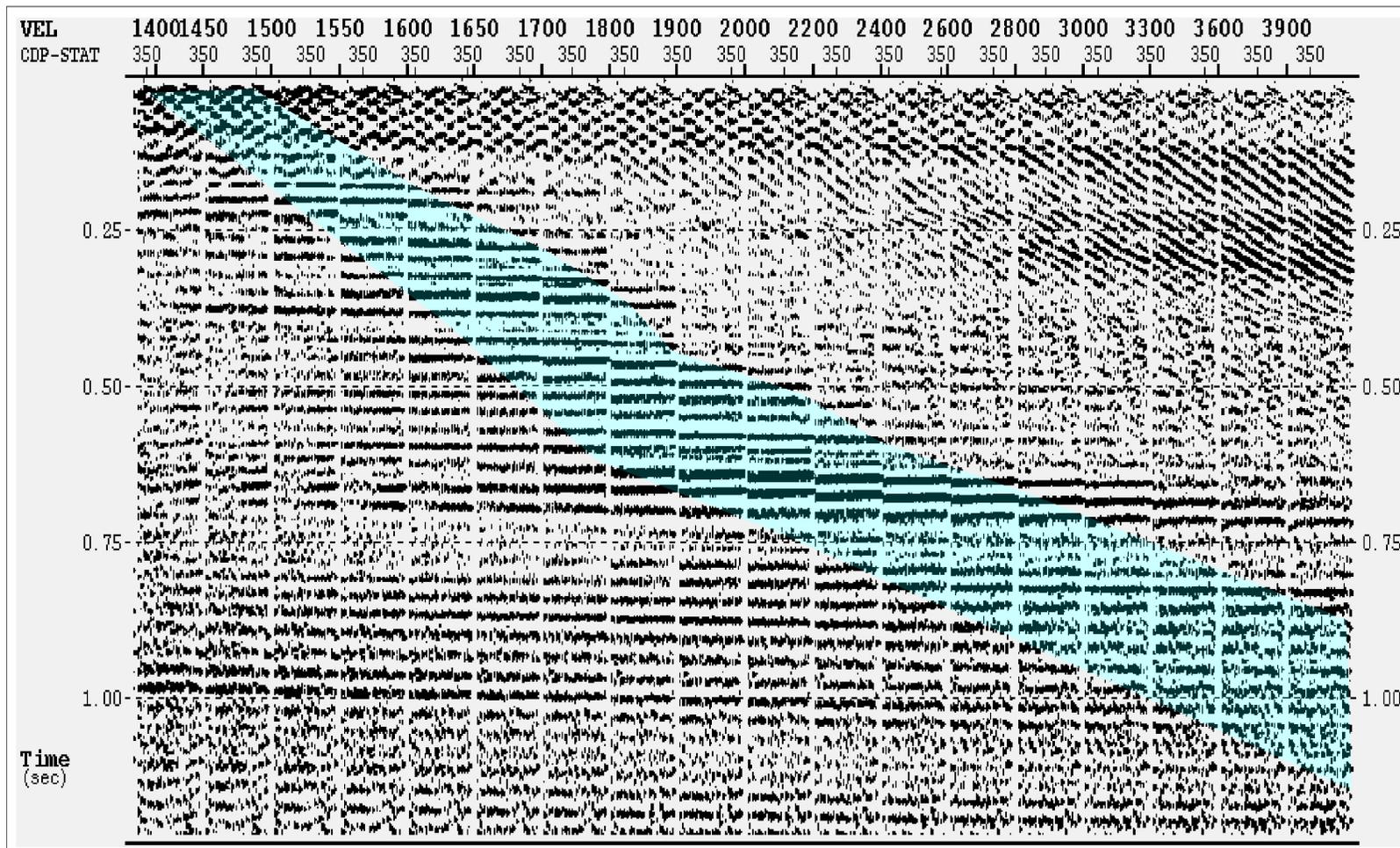
A: CDP (a sinistra) con spettro di coerenza (a destra).

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 travelttime). Su questo si disegna (picking) la funzione di velocità che si applicherà nella correzione di NMO (Normal Move Out)

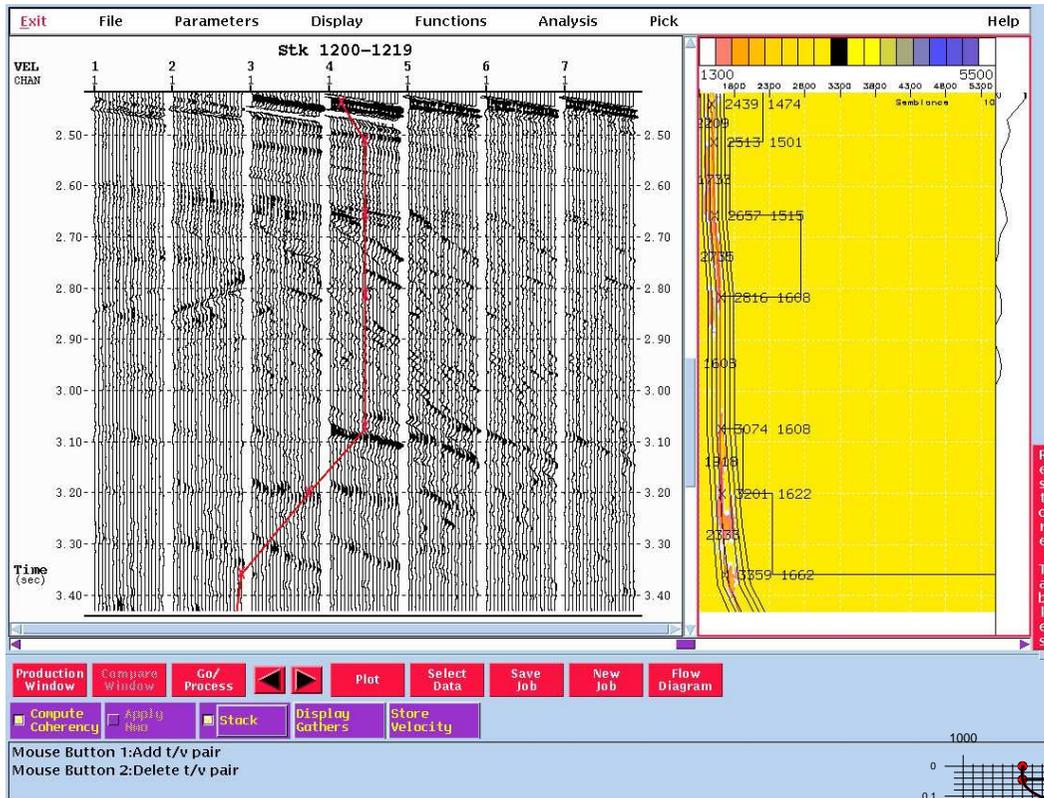
B: cdp corretto con NMO dopo il picking della funzione di velocità sullo spettro di coerenza. Si noti nel CDP l'allineamento orizzontale degli eventi riflessi che poi verranno sommati nella fase di STACKING.



Pannello CVS

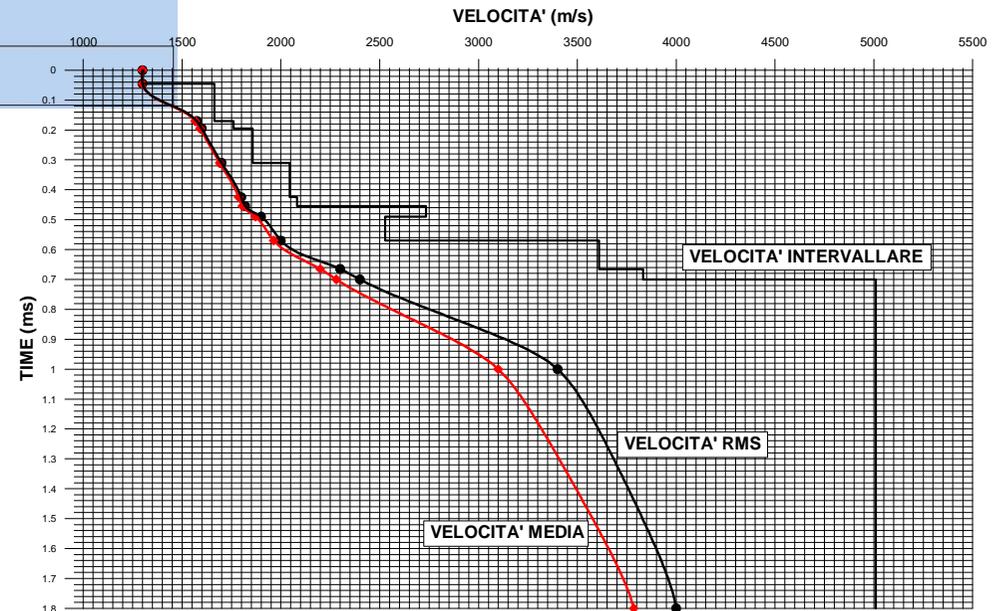


Un altro strumento di analisi della funzione di velocità è il pannello Constant Velocity Stacks (CVS): esso è costituito da una serie di stack della stessa sezione sismica utilizzando valori di velocità discreti, costanti e crescenti per ognuno di essi; la banda azzurra indica l'intervallo di velocità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

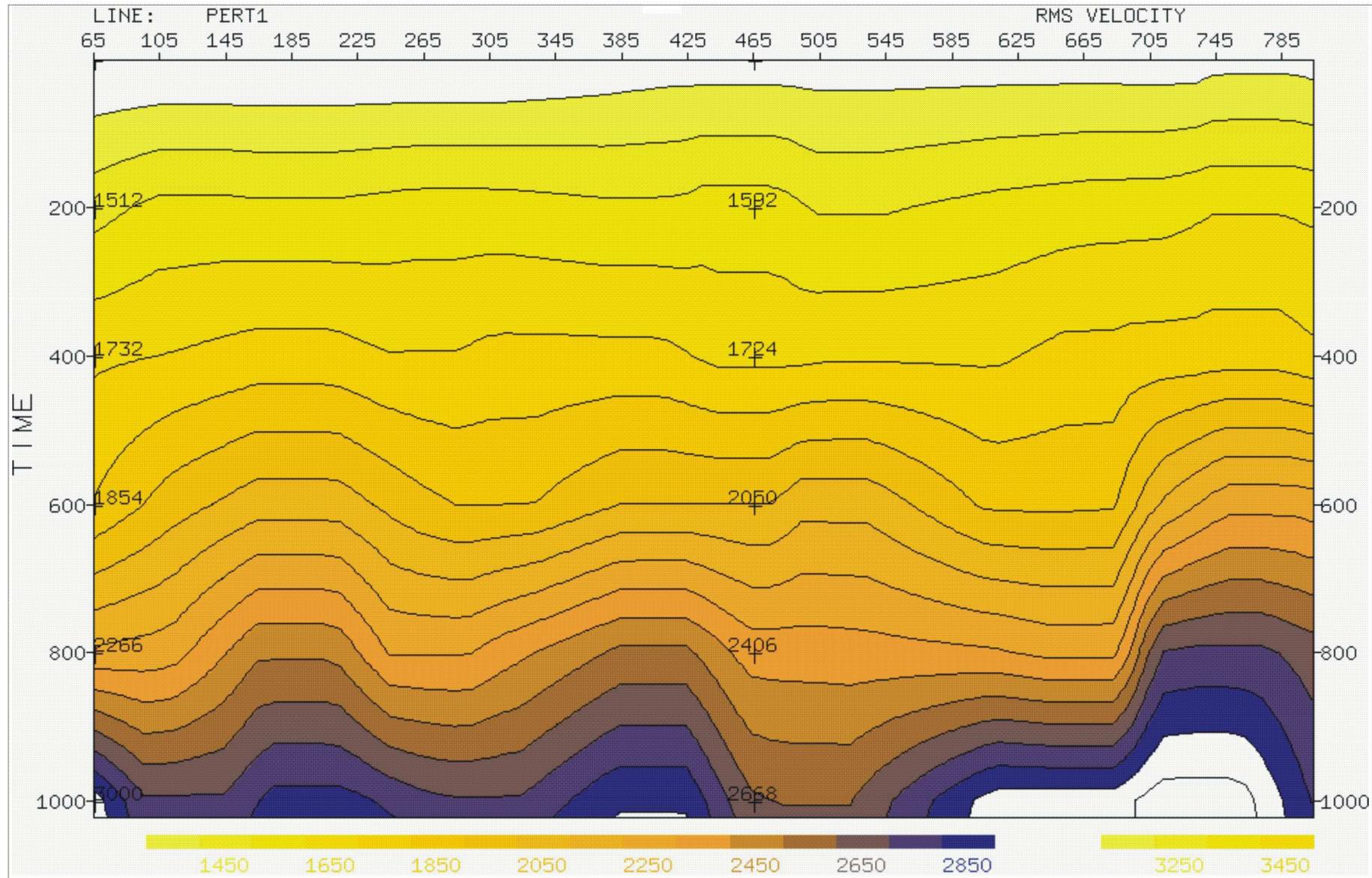


Esempio di segmenti di sezione stack (a sinistra) corretta con diverse funzioni di velocità ricavate dallo spettro relativo (a destra)

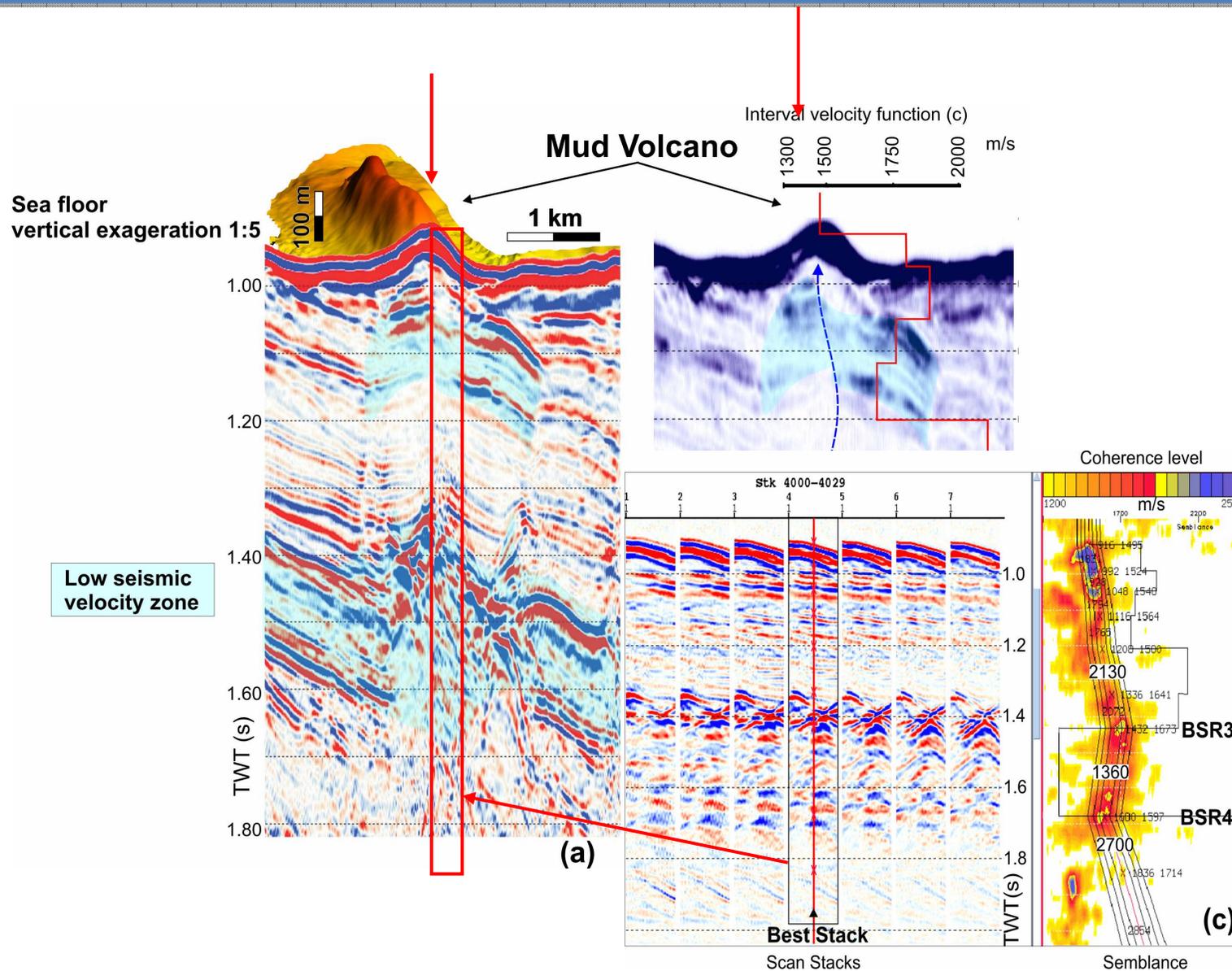
Esempio di funzione di velocità (a destra) ricavata dalle analisi. La velocità RMS è quella utilizzata nelle correzioni dinamiche, quella media (in rosso) per la conversione in profondità mentre quella intervallare rappresenta la velocità di ciascun mezzo (strato) identificato



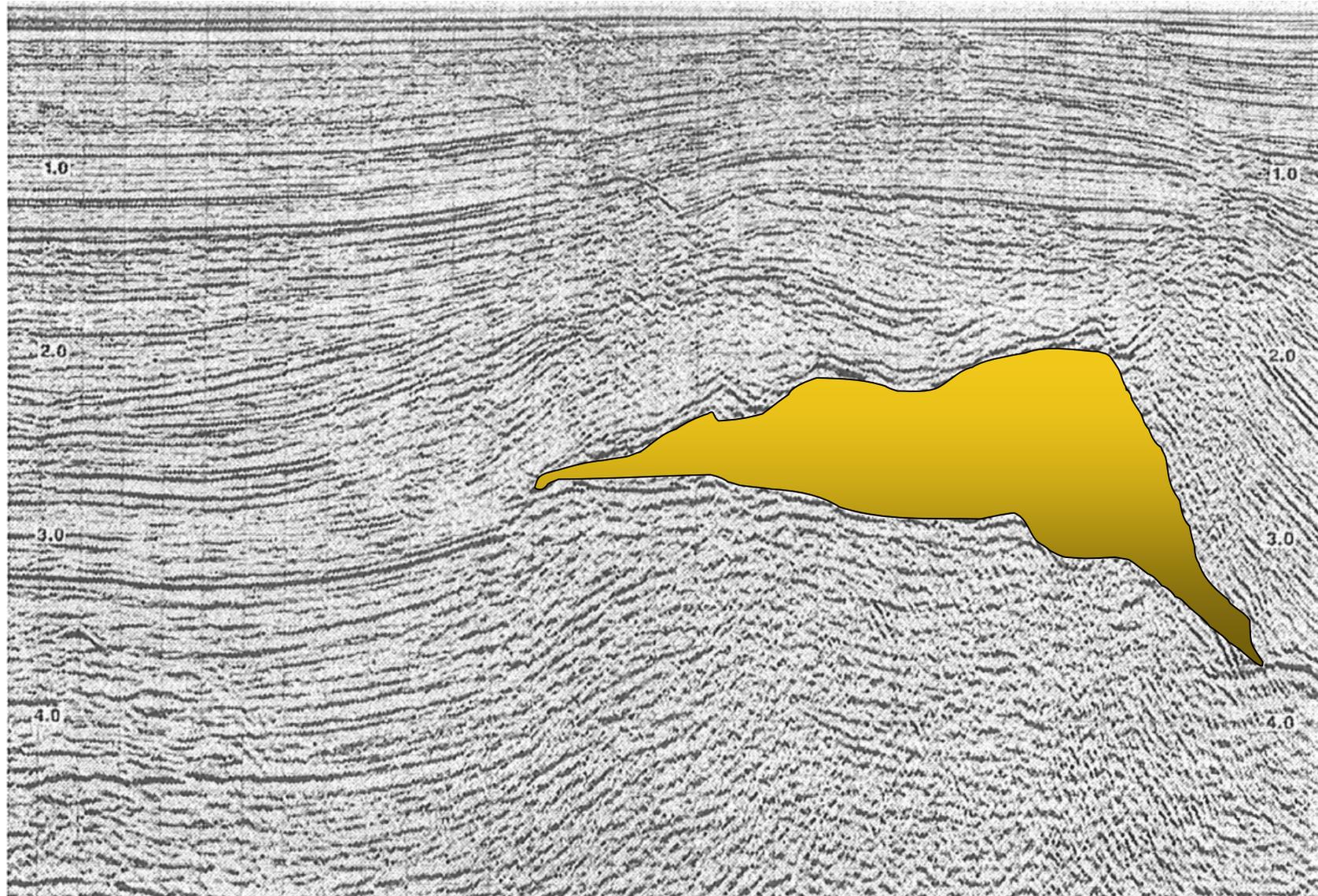
CAMPO DI VELOCITA'



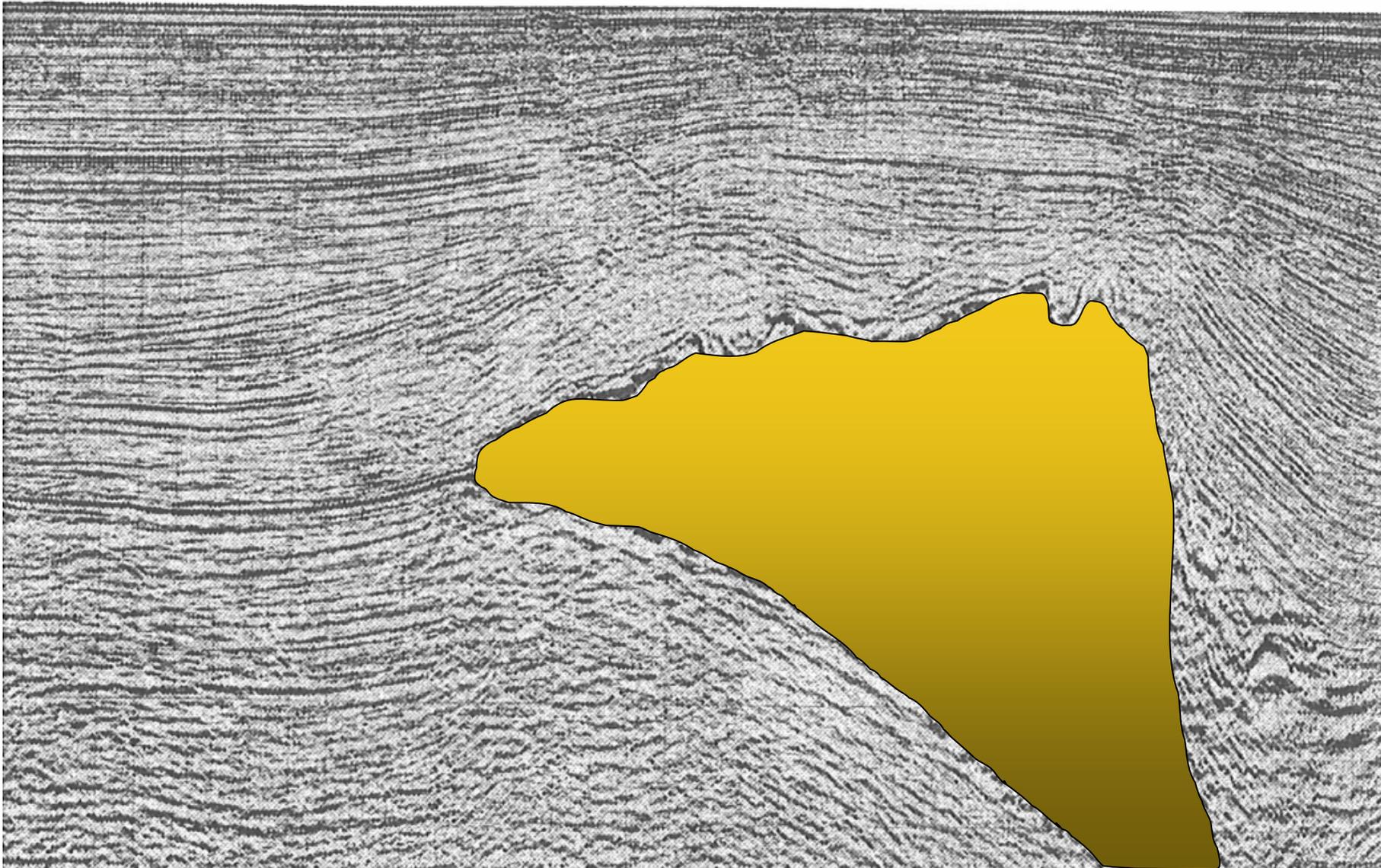
Esempio di un Campo di velocità (di stack) lungo un profilo sismico: da c. 1500 m/s a c. 2900 m/s



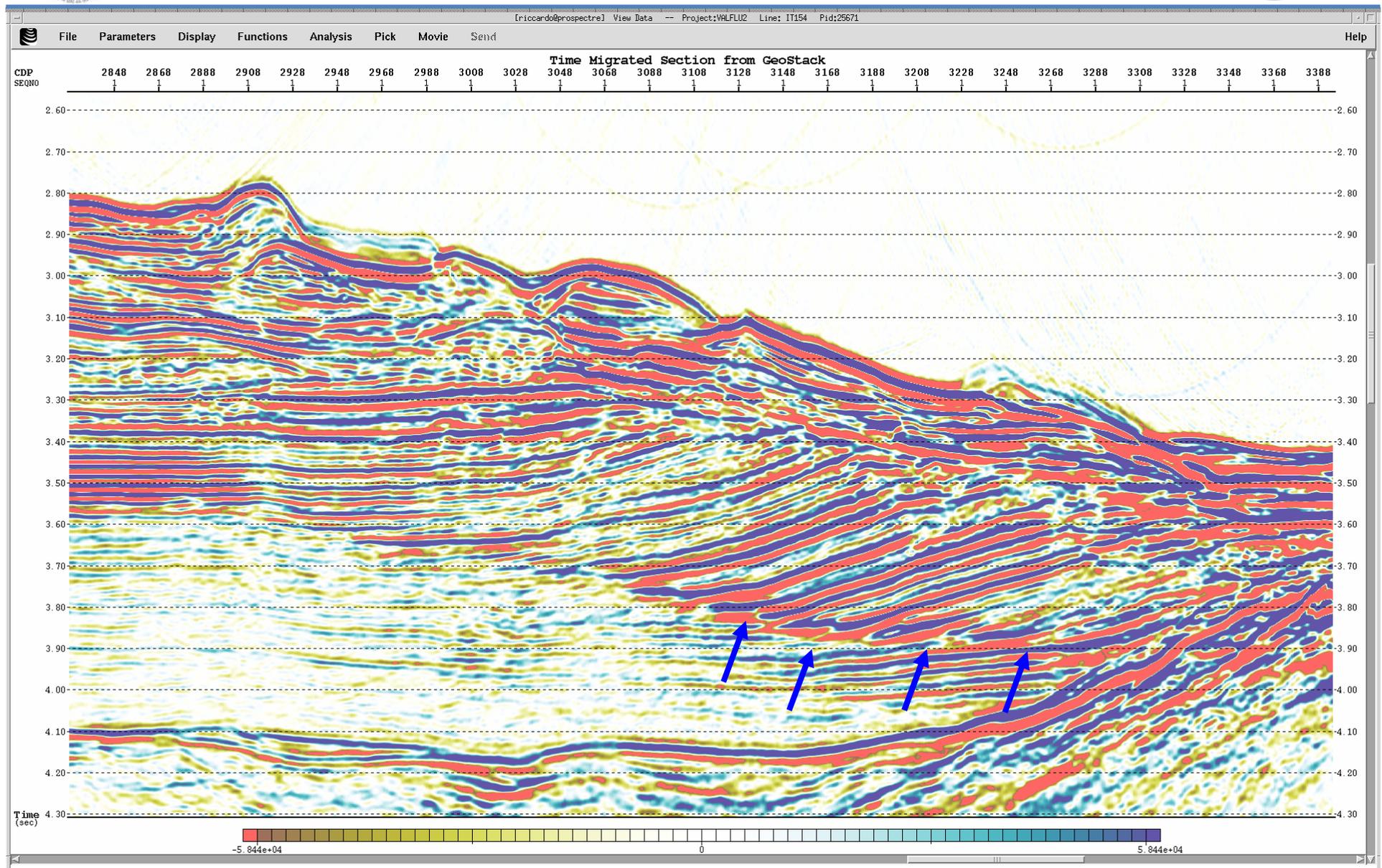
Esempio di analisi di velocità in un profilo con presenza di fluidi in migrazione



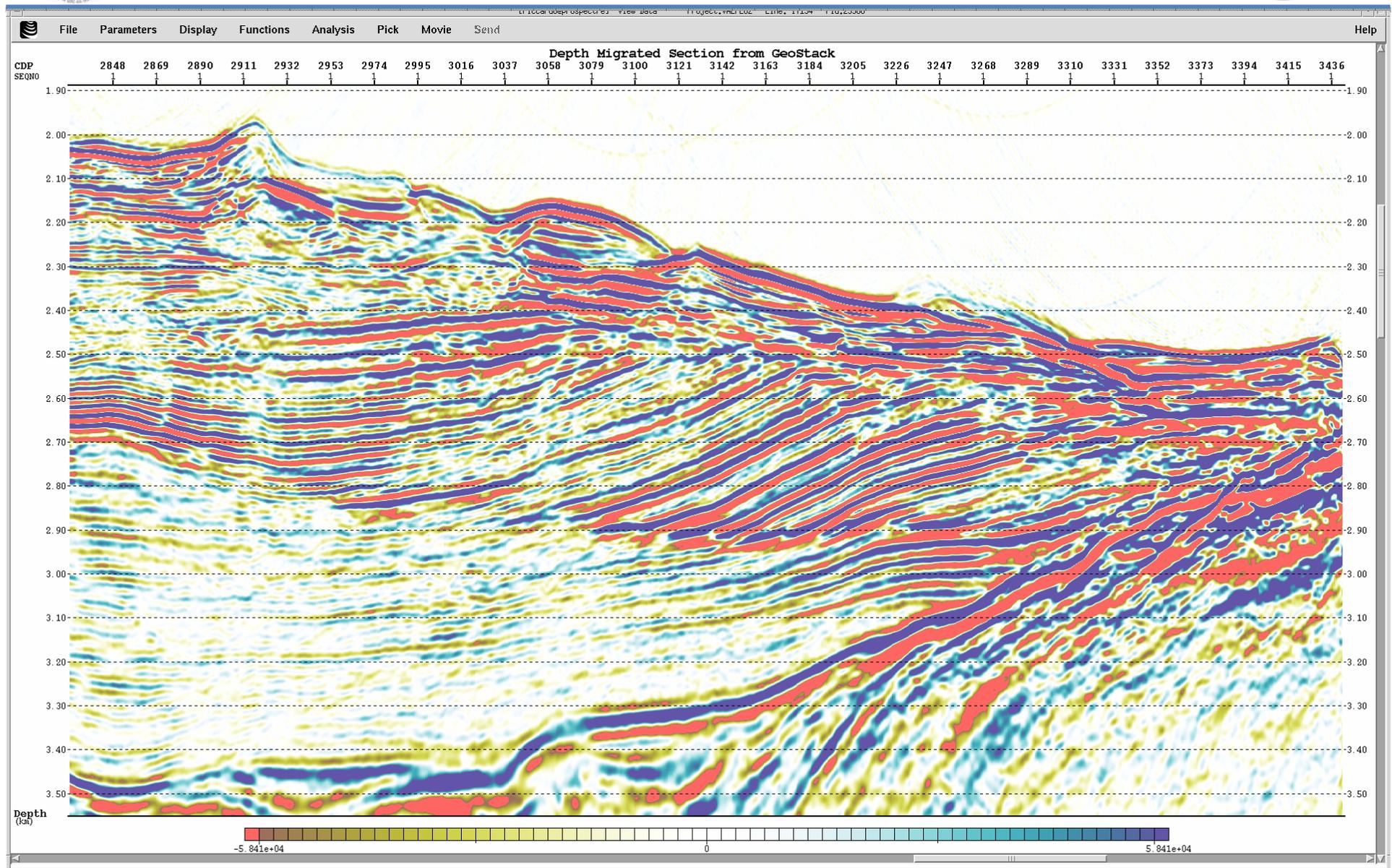
Sezione migrata in tempi: si noti l'intrusione salina al centro della sezione; in generale in un corpo salino l'onda acustica viaggia ad una velocità molto più alta rispetto ai sedimenti circostanti e quindi l'immagine in profondità diventerà



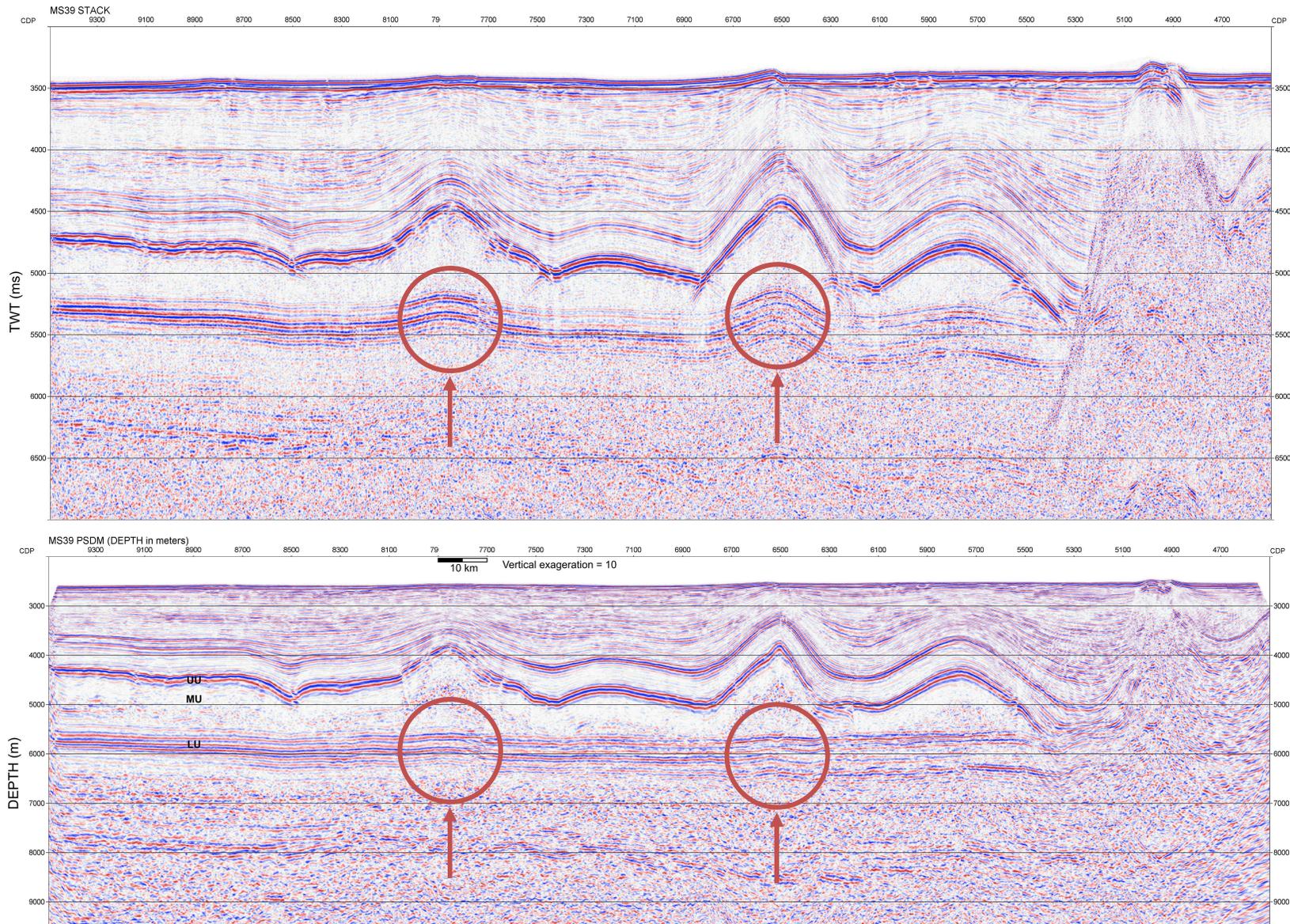
..... nella sezione migrata in profondità l'effetto del campo di velocità sulle reali geometrie dell'intrusione salina la farà apparire molto più estesa di quanto lo fosse nella precedente sezione in tempi.



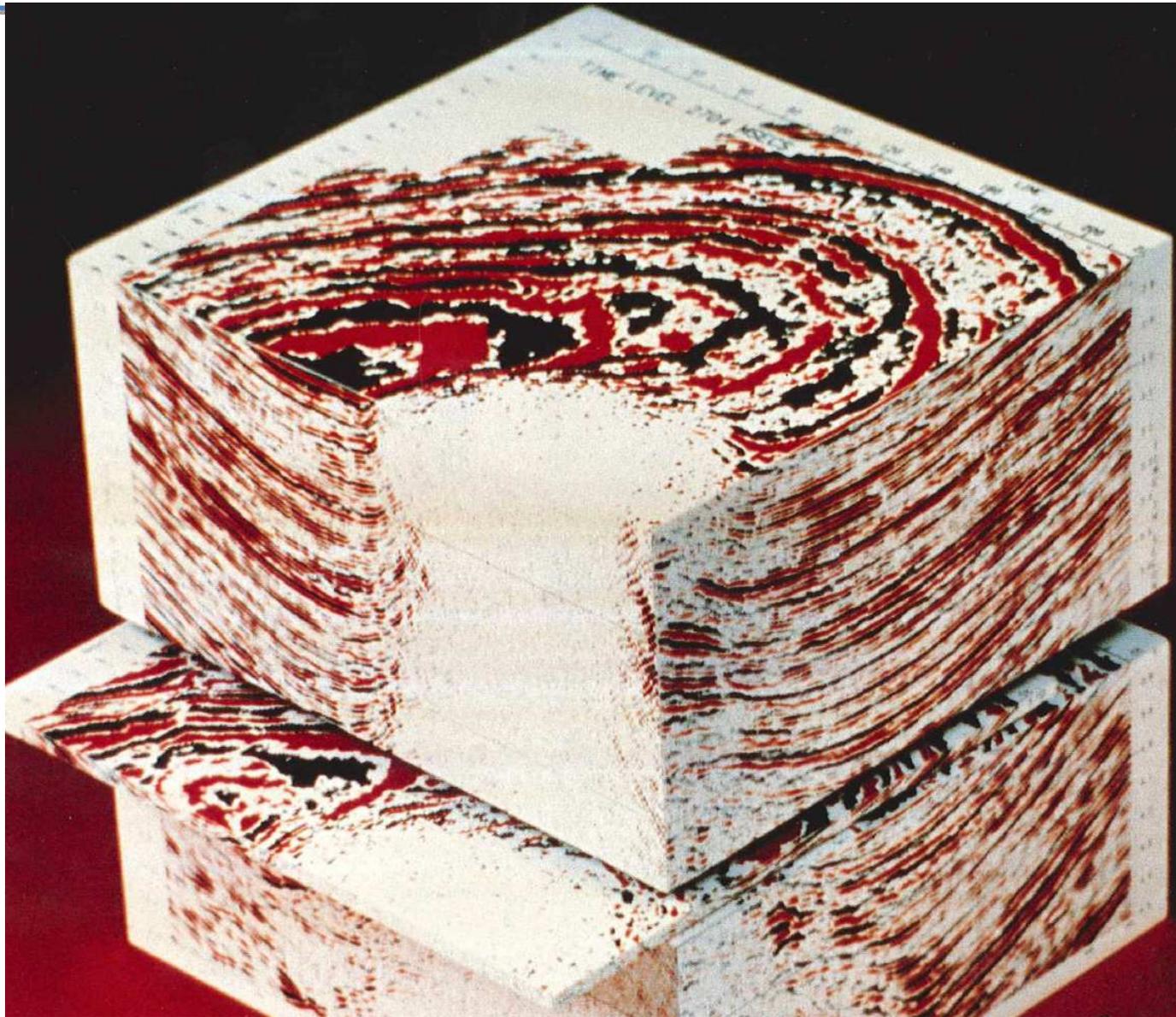
Profilo sismico in cui si può osservare un Bottom Simulating Reflector (BSR) legato alla diagenesi della silice. Gli strati semitrasparenti sono caratterizzati da un aumento repentino della velocità di propagazione dell'onda acustica dando luogo ad una geometria non reale delle formazioni geologiche 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.

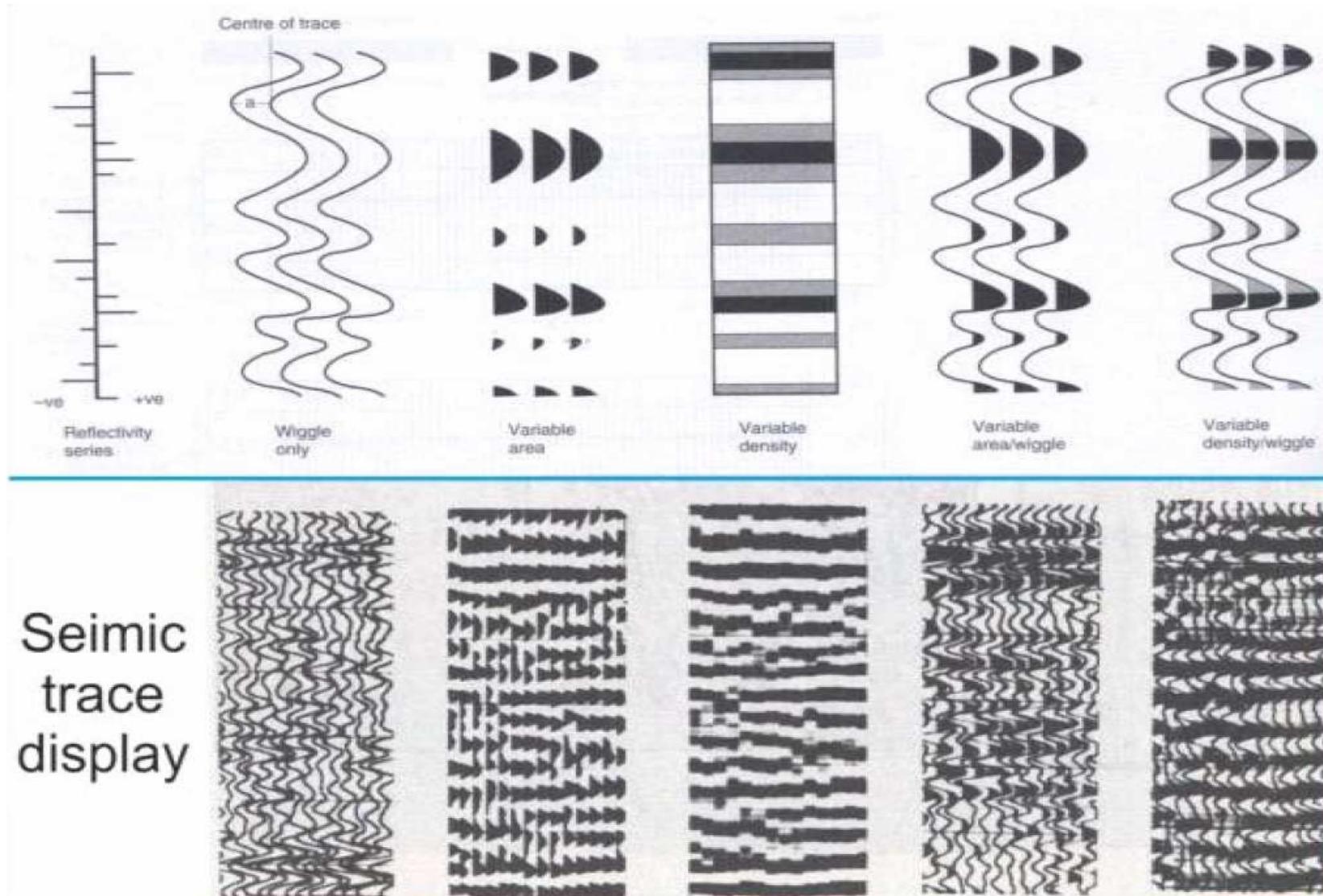


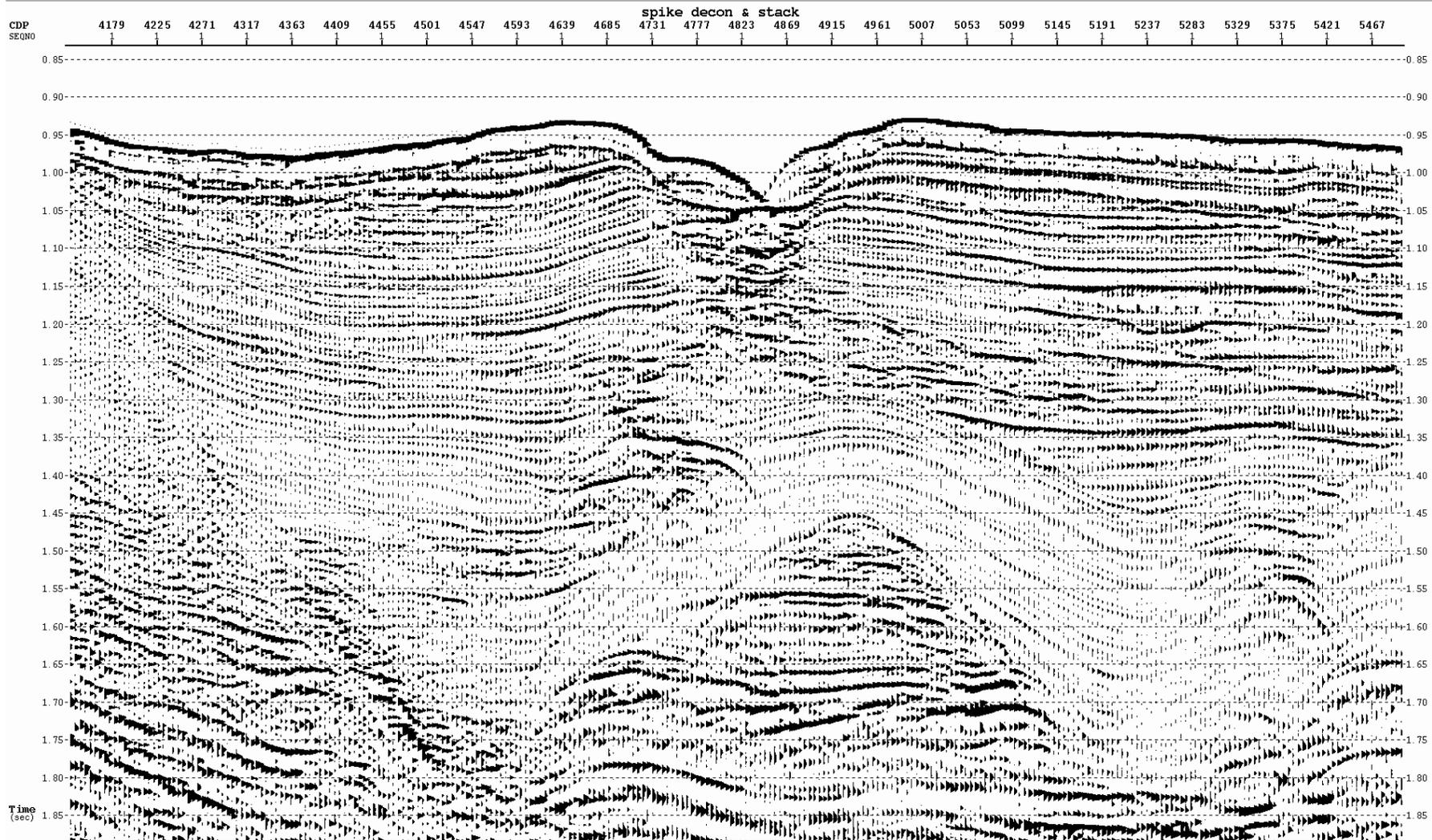
Profilo sismico 2D nella versione stack (sopra) e in quella migrata prestack in profondità (sotto). Si noti che nella versione migrata viene risolto l'effetto di *pull up velocity* evidente nella sezione stack in corrispondenza dei domi salini.



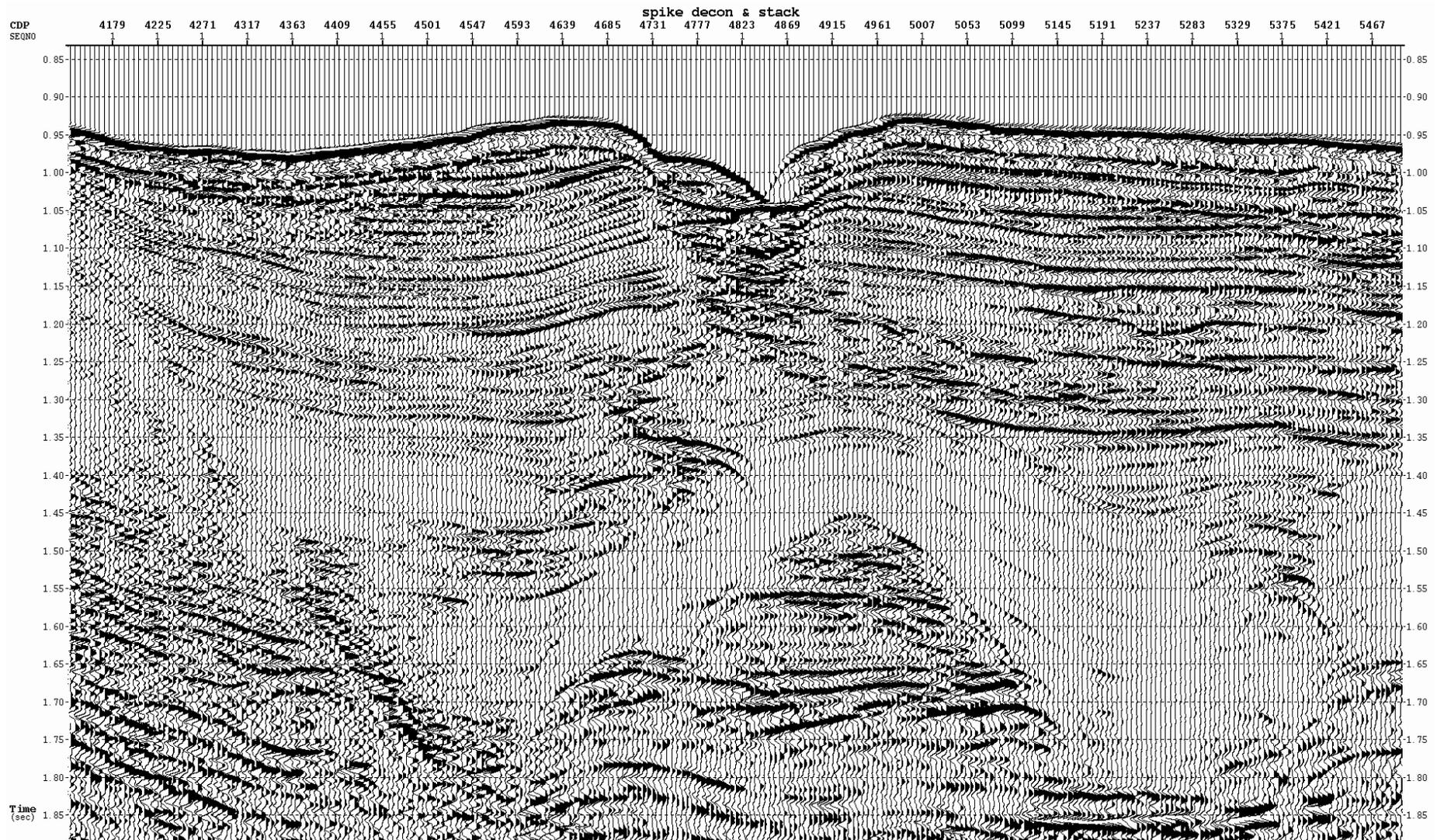
Esempio di “cubo 3D” da Brown (1986): il dato sismico migrato 3D può essere analizzato, oltre che su sezioni verticali, anche per “fette” orizzontali. L’immagine mostra la presenza di un diapiro salino che “perfora” la sequenza sedimentaria del bacino.

Metodi grafici per rappresentare il dato sismico

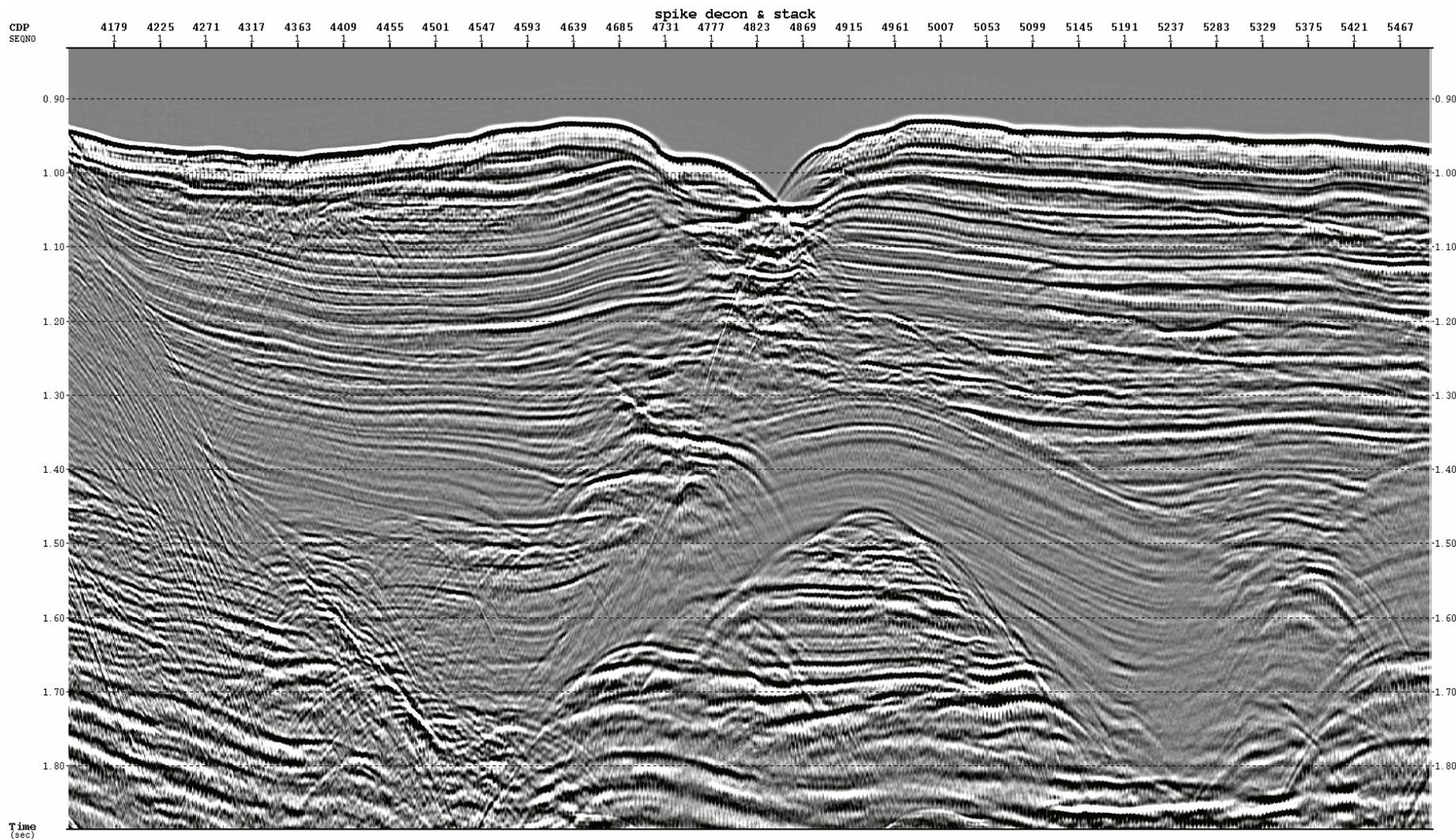




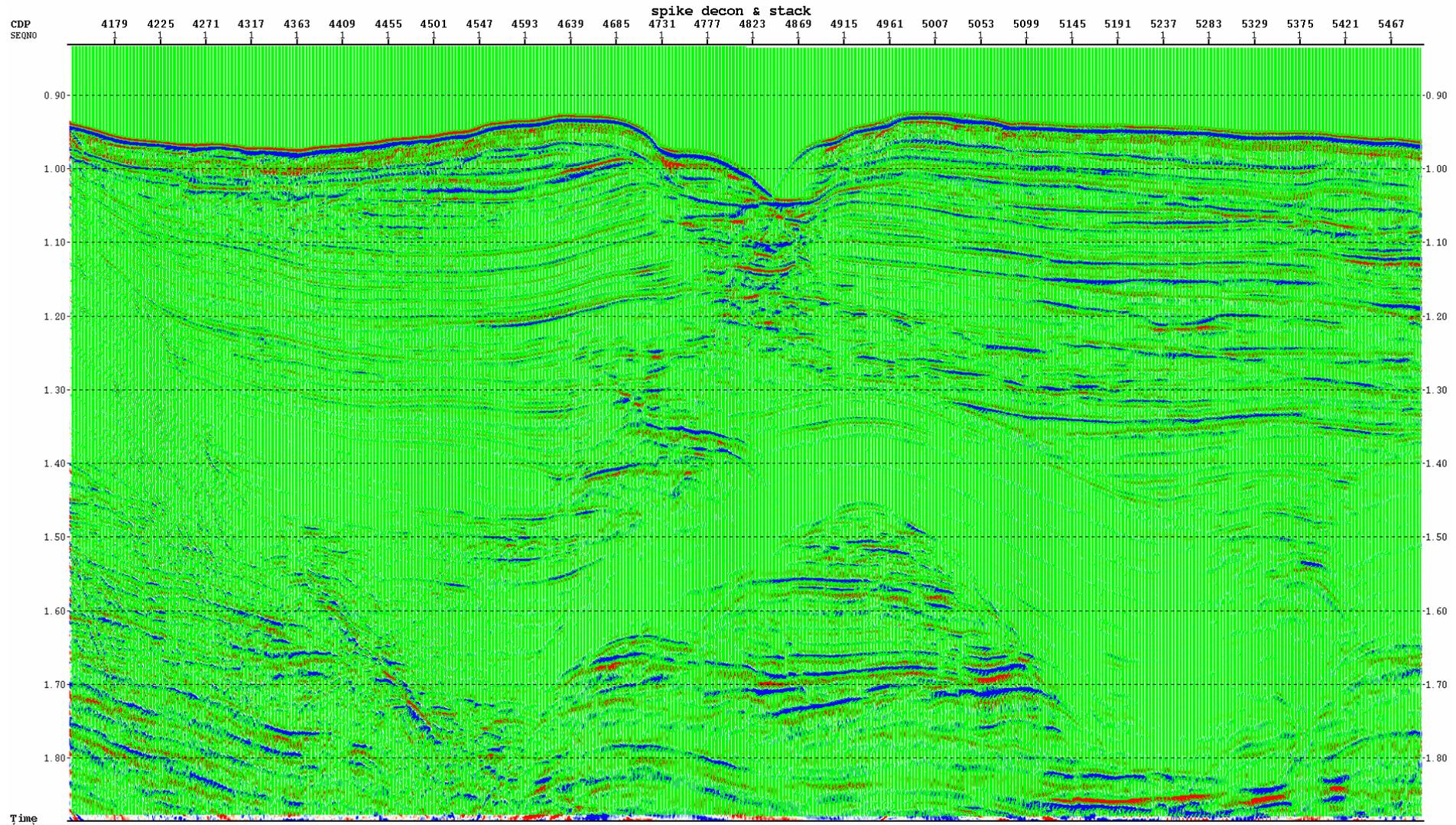
Rappresentazione di una sezione sismica con la “variable area”



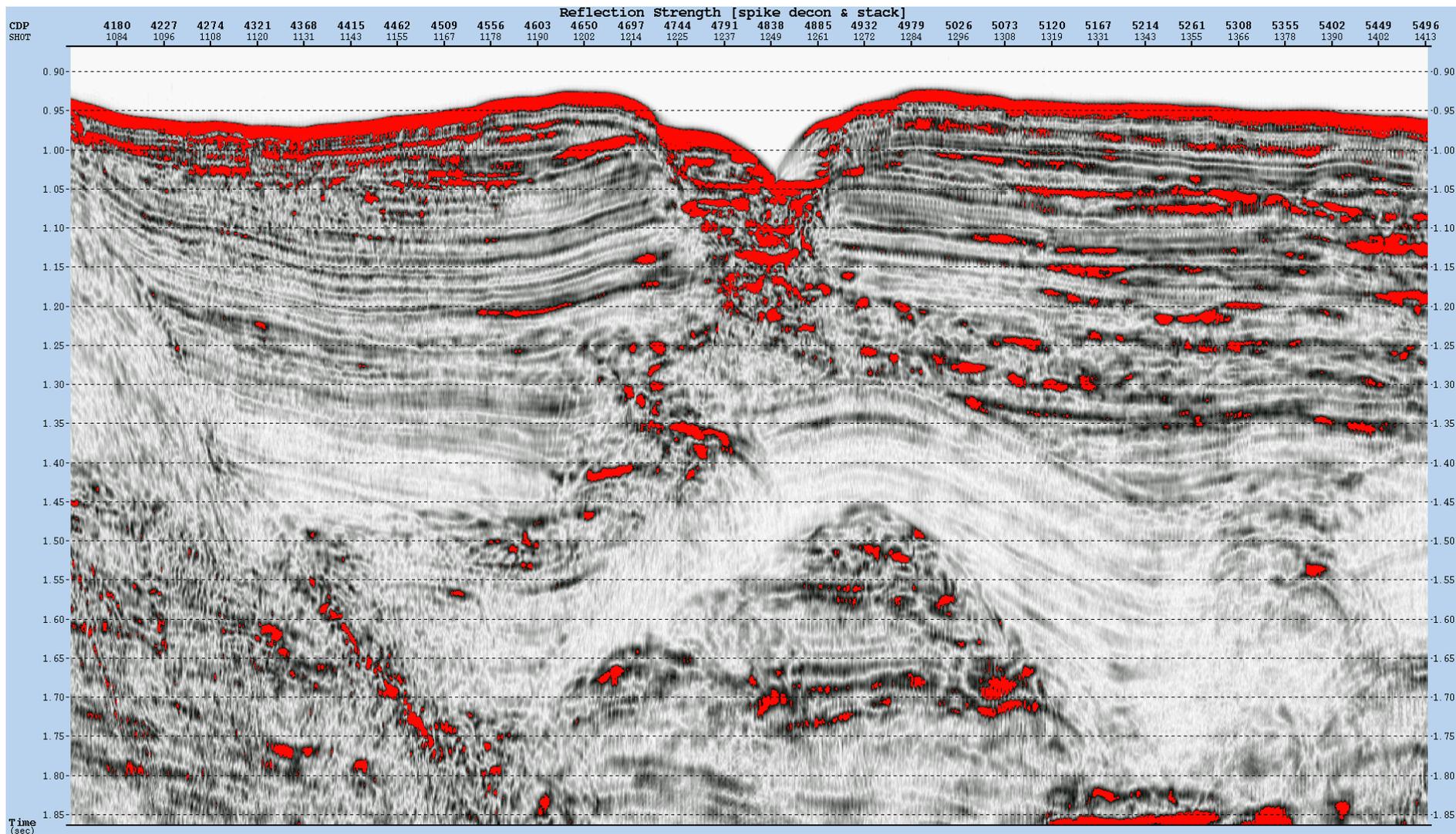
Rappresentazione della sezione sismica con la “wiggle + variable area”



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, velocità propagazione onde sismiche, parametri elastici, ...).

Sismica a Riflessione multicanale PREGI /DIFETTI

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
-
1. Costi elevati (1-10K€ 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



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