



Scuola estiva di Geologia Marina CARTOGRAFIA GEOLOGICA DELLE AREE MARINE



ISPRA

Dipartimento Difesa del Suolo Servizio CARG,
Geologia e Geomorfologia Settore rilevamento
geologico e analisi di laboratorio
Dipartimento per le Attività Bibliotecarie
Documentali e per l'Informazione Servizio
Educazione e Formazione Ambientale

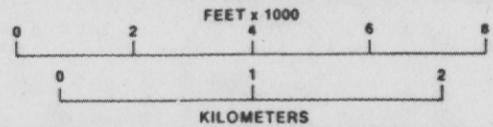
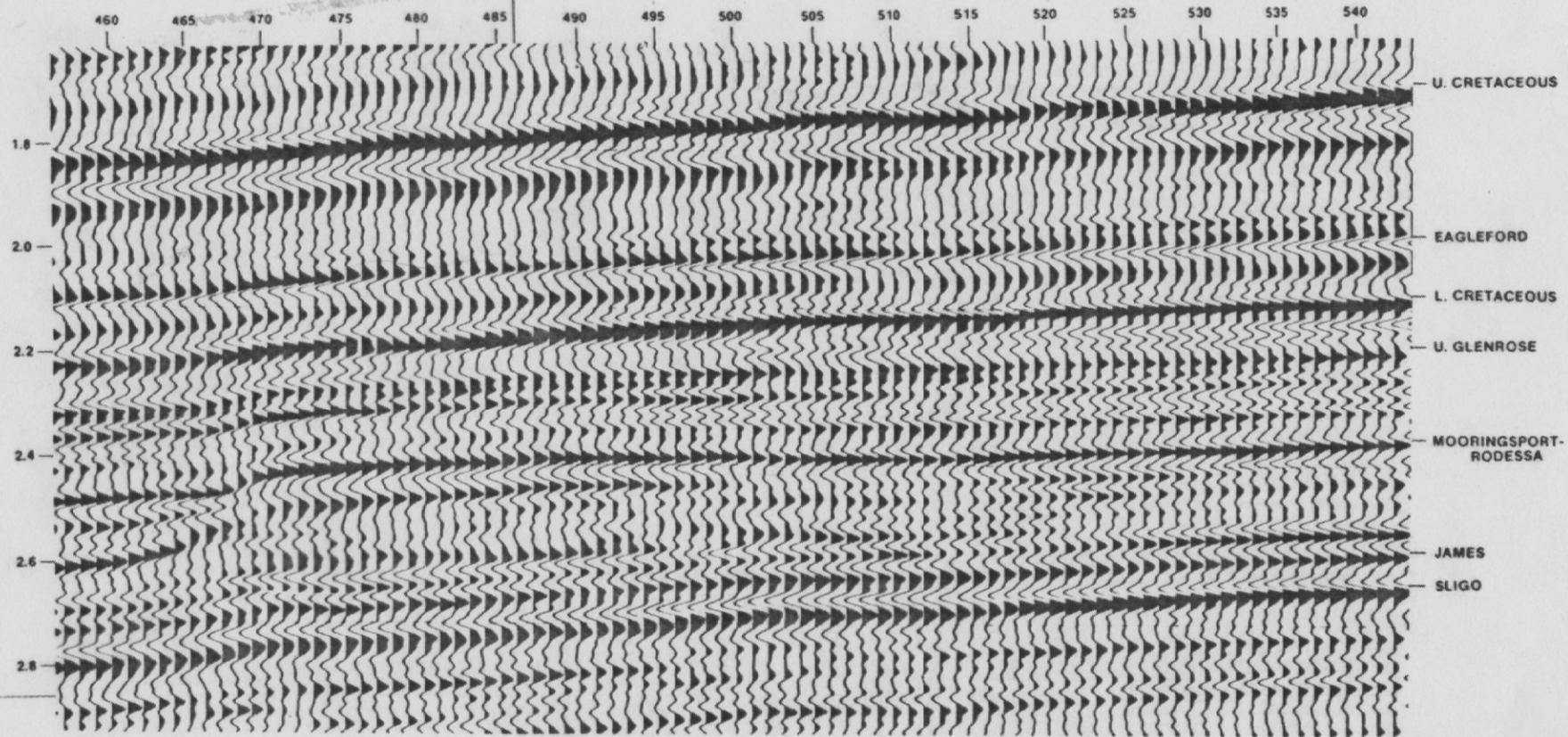
SGI

Società Geologica Italiana
Sezione di
Geologia Marina

M. Agate

Analisi sismostratigrafica e delle facies sismiche

Roma, 26 10 2010



SOURCE: DYNAMITE
 MULTIPLICITY: 30
 CHANNELS: 60 AT 300 FT. (91 METERS)
 OFFSETS: 150-8850 (46-2697 METERS)
 FIELD POLARITY: SEG STD DISPLAY: REVERSE

STATIC CORRECTIONS
 DECONVOLUTION
 TIME VARYING BANDPASS
 INTEGRATION
 MIGRATION

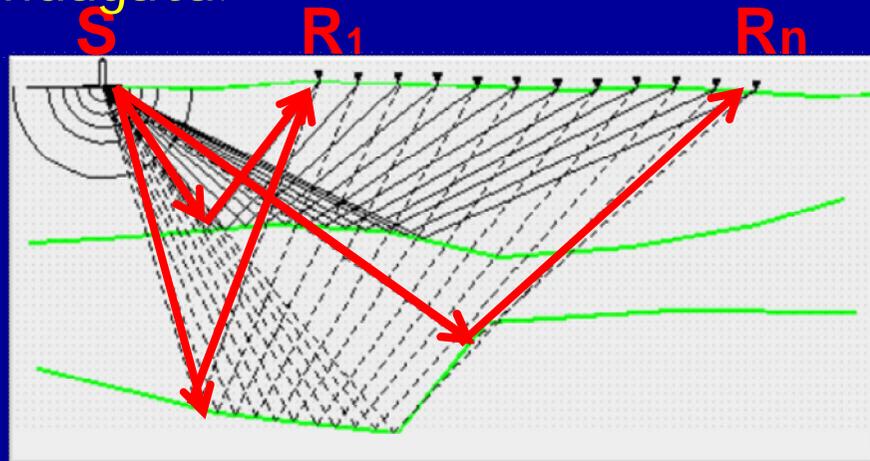
GH JR.

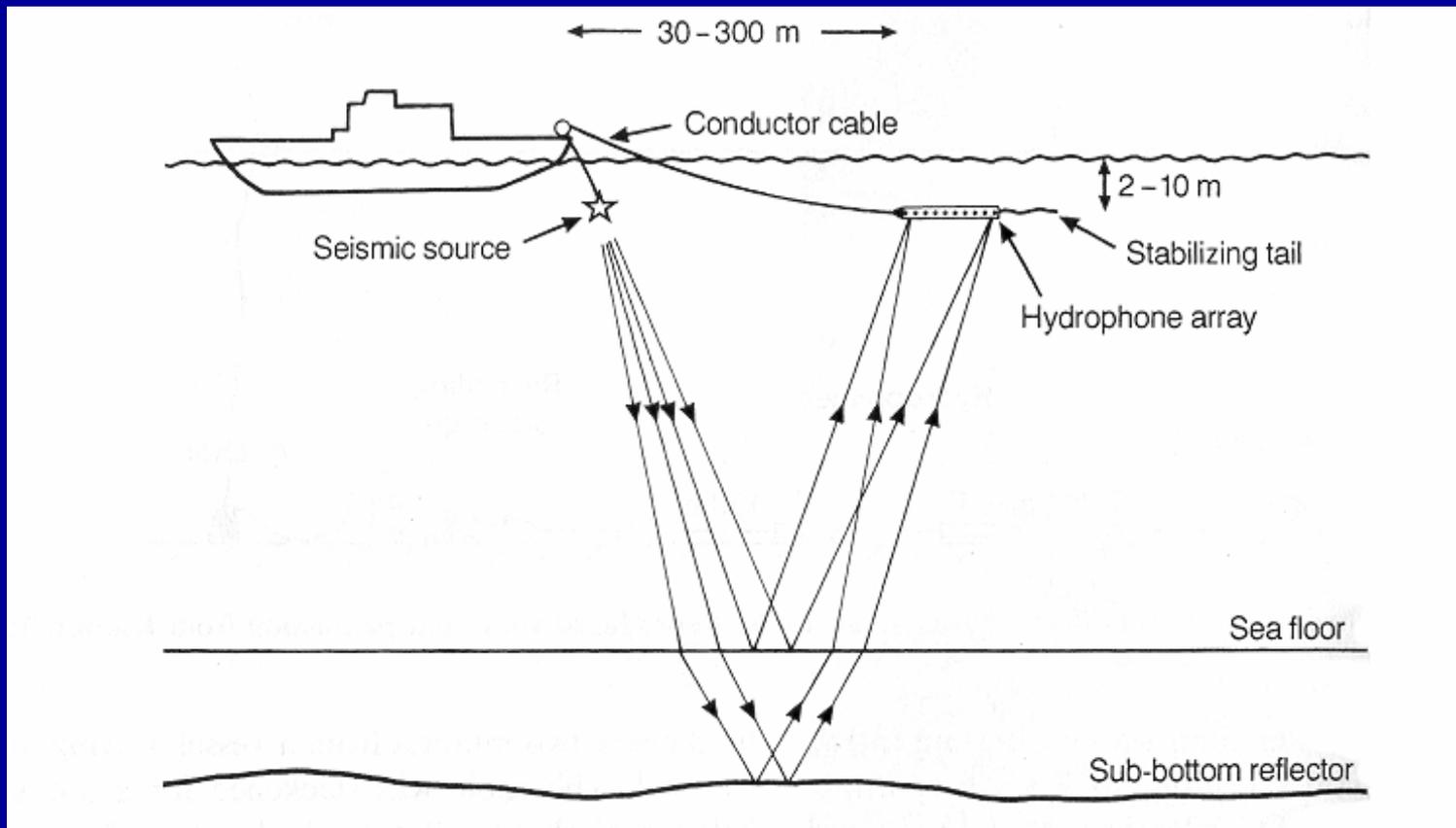
INTRODUZIONE

- la sismica a riflessione è una metodologia d'indagine geofisica utilizzata nell'esplorazione del sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici: stratificazione, superfici di discordanza, faglie, sovrascorrimenti
- è *“il più geologico” dei metodi geofisici (!?)*

P R I N C I P A L I M E T O D I S I S M I C I

La **SISMICA A RIFLESSIONE** è una tecnica d'indagine geofisica **attiva** che sfrutta le proprietà elastiche del terreno; ogni superficie che marca un passaggio litologico, sia essa di carattere stratigrafico o tettonico, rappresenta una discontinuità elastica in grado di riflettere parte dell'energia sismica, generata da una sorgente, che si propaga nel sottosuolo. I segnali riflessi, registrati in superficie da appositi sensori (**geofoni o idrofoni**) ed opportunamente elaborati, permettono di produrre sezioni sismiche in grado di fornire utili informazioni sull'assetto strutturale dell'area indagata.





Il metodo sismico consiste nel produrre uno scoppio e nel registrare le **riflessioni** da esso generate. Le riflessioni si formano perché le **onde sismiche** generate dallo scoppio, propagandosi nel sottosuolo, danno origine ad una riflessione ogni qualvolta incontrano un'interfaccia tra due formazioni rocciose con caratteristiche litologiche e/o fisiche differenti

- È una **metodologia** geofisica **attiva** (diversamente dalla sismologia) che trova applicazione principalmente nell'individuazione dei giacimenti di idrocarburi ma anche nell'ingegneria civile e nella ricerca di base (progetto CROP)

- La propagazione delle onde sismiche dipende dalle **caratteristiche elastiche** del mezzo
- La trasmissione delle onde sismiche (onde elastiche) nel terreno può essere descritta in base alla ***teoria dell'elasticità***

Velocità delle onde sismiche

- La velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo può essere espressa in funzione di due costanti elastiche (costanti di Lamé) e della densità
- $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ (velocità onde longitudinali)
- $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ (velocità onde trasversali)
- μ = modulo di rigidità o di taglio; per i liquidi $\mu = 0$

- Le onde trasversali si propagano meno velocemente delle onde longitudinali ($V_p = \sqrt{3}V_s$)
- I valori delle velocità delle onde sismiche nei diversi tipi di formazioni rocciose dipendono da: tessitura, compattezza, porosità, grado di alterazione
- La velocità aumenta con l'età e con la profondità, nel senso che ...

...Origine delle riflessioni

Il prodotto della velocità (v) per la densità (ρ)
è chiamato *impedenza acustica* (I):

$$I = \rho * V$$

R (*coefficiente di riflessione*) =
ampiezza dell'onda riflessa/ampiezza
dell'onda incidente

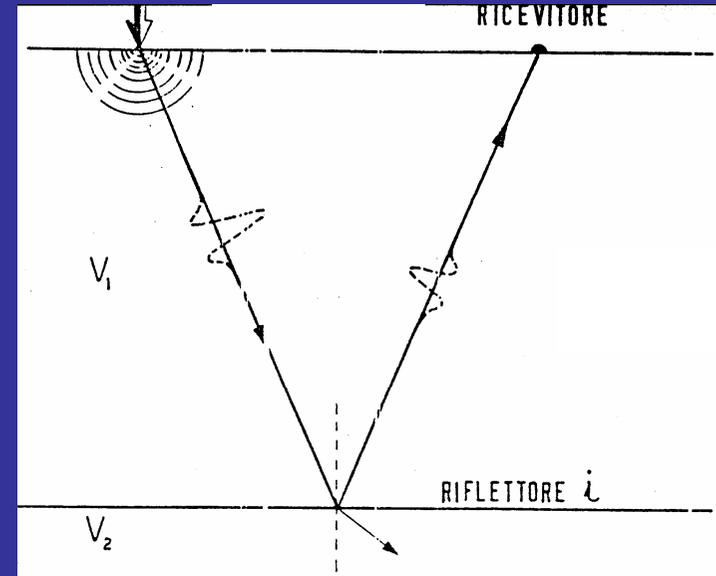
$$R = \rho_2 V_2 - \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2 + \rho_1 V_1 = I_2 - I_1 / I_2 + I_1$$

T (*coefficiente di trasmissione*) =

$$2I_1 / I_2 + I_1$$



$$T+R=1$$

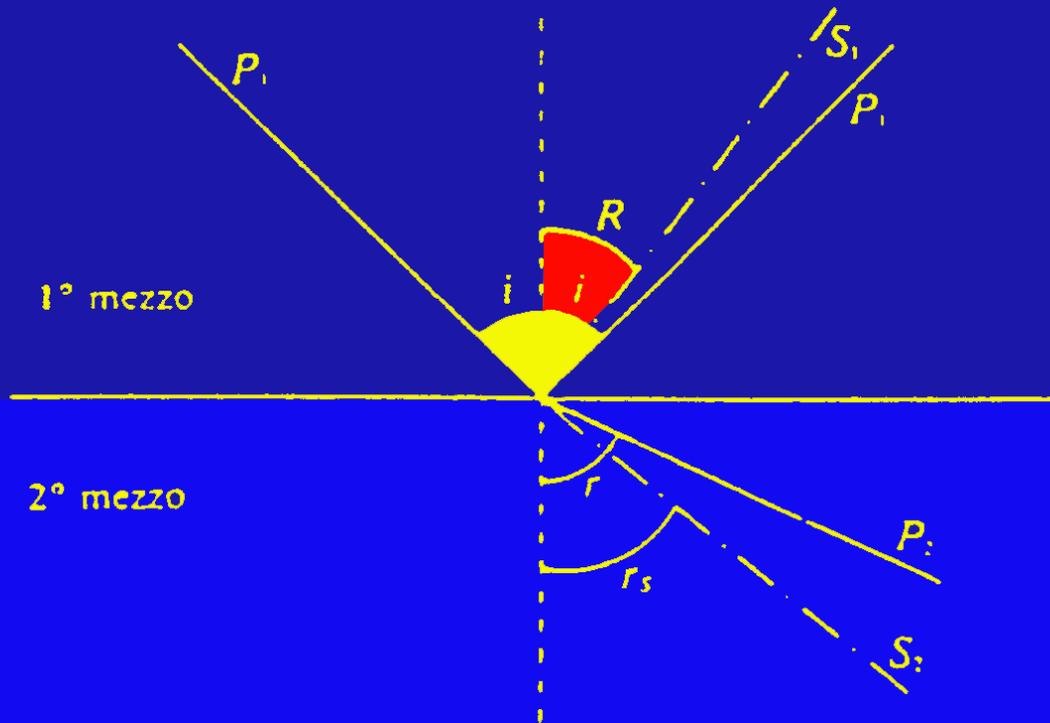


- Moltiplicando l'ampiezza dell'onda incidente per il coefficiente di riflessione otterremo l'ampiezza delle oscillazioni indotte dalle onde riflesse
- Quanto più grande è il contrasto di impedenza acustica tra le due formazioni, tanto maggiore è il potere riflettente dell'interfaccia tra due mezzi
- Con l'aumentare della profondità, aumentando sia la densità che la velocità (denominatore), diminuisce il coefficiente di riflessione
- $R = \rho_2 V_2 - \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2 + \rho_1 V_1$

Geometria dei raggi sismici

- Riflessione e rifrazione
- Legge di Cartesio o di Snell

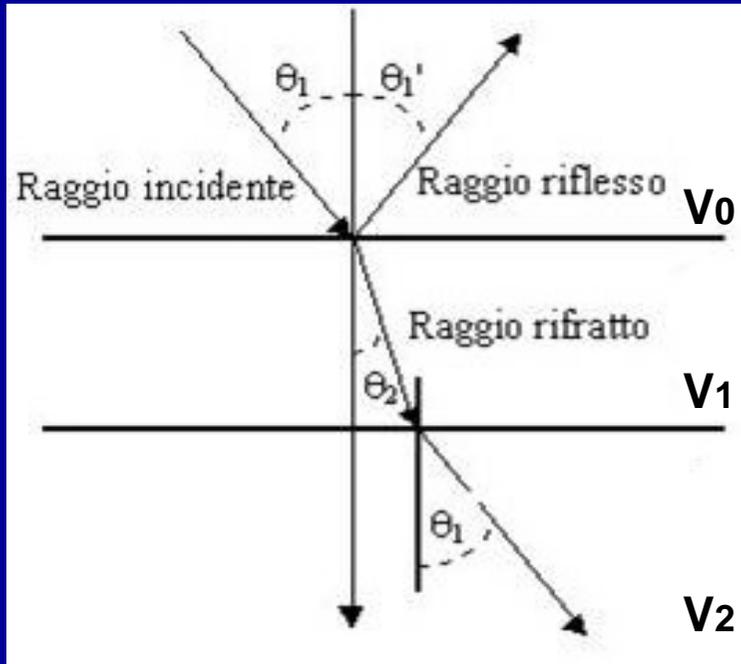
$$\frac{\text{sen } i}{V_{P_1}} = \frac{\text{sen } r}{V_{P_2}} = \frac{\text{sen } r_s}{V_{S_2}}$$



Riflessione e rifrazione di un'onda longitudinale.

Lo scoppio genera un'onda sismica che si propaga nel mezzo dando origine ad una riflessione ogni qualvolta incontra un'interfaccia tra due formazioni dalle caratteristiche litologiche e fisiche diverse.

Questi metodi geofisici si basano sulle leggi fisiche della **riflessione** e della **rifrazione**.



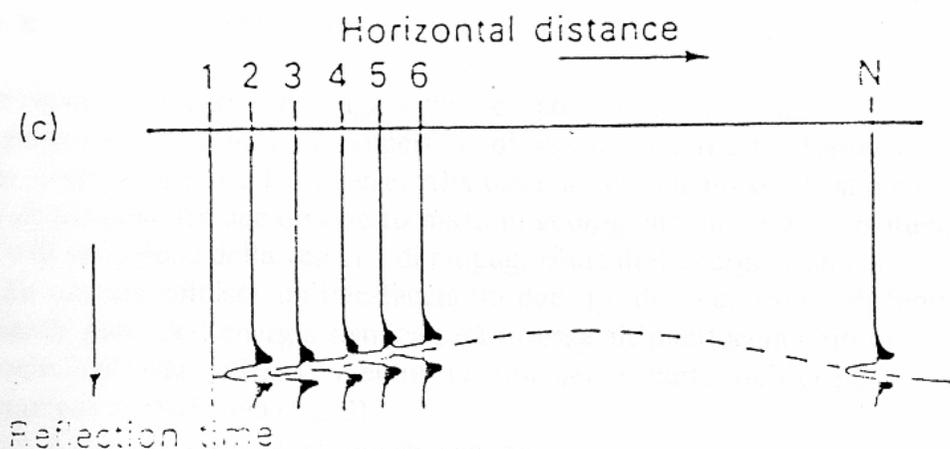
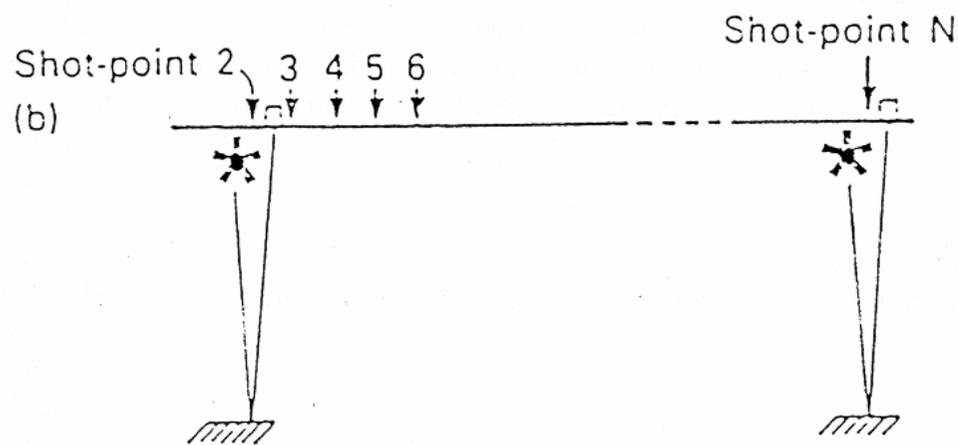
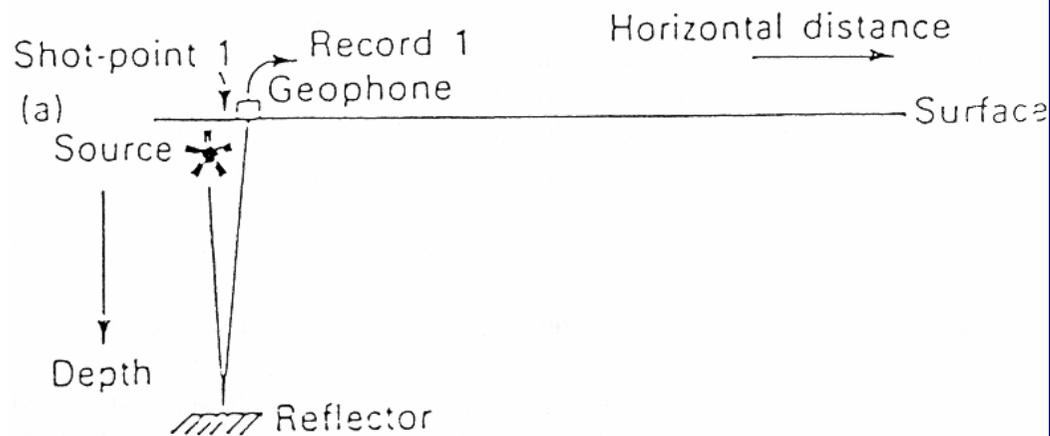
RI FLESSIONE: $\sin \theta_i = \sin \theta_r$

RI FRAZIONE $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$

(legge di Snell): $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

- se $V_1 < V_0$, il raggio rifratto si avvicinerà alla normale;
- se $V_2 > V_1$ il raggio rifratto si allontanerà dalla normale.

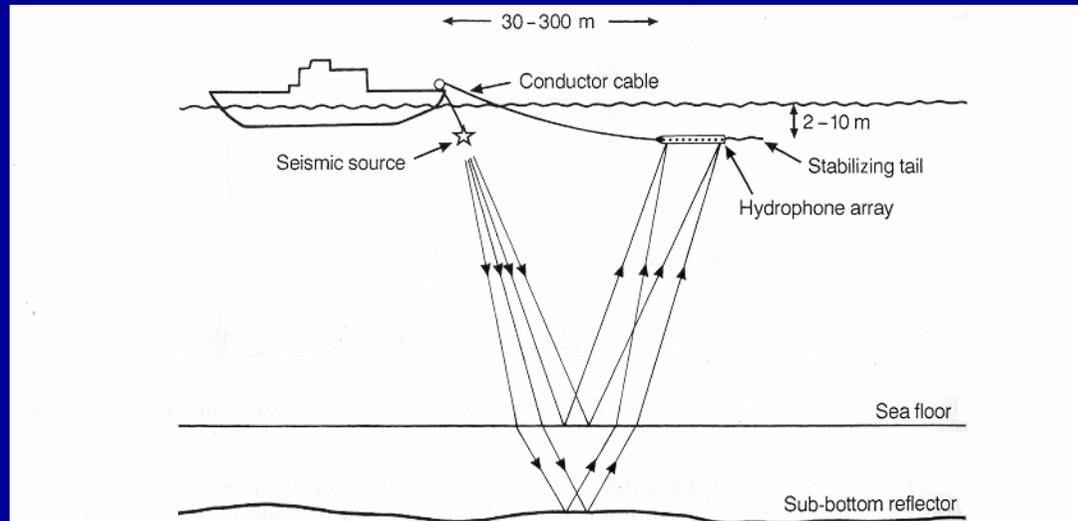
[Nell'esempio precedente, le onde sismiche rifrangendosi sulla superficie di separazione tra due mezzi caratterizzati da differenti velocità di propagazione, che si suppone crescente in profondità (quindi $V_0 < V_1 < V_2 < \dots < V_n$), viaggeranno parallelamente alla superficie di separazione tra i due mezzi con la velocità caratteristica del mezzo sottostante (quindi dello strato "più veloce"). Tale superficie, secondo il principio di Huygens, diventerà sorgente elementare di onde sferiche secondarie che si rifrangeranno verso l'alto (quindi verso il mezzo "più lento") seguendo un percorso inverso (quindi avvicinandosi sempre di più alla normale). La sismica a rifrazione consente pertanto di effettuare indagini più profonde, ma i percorsi delle onde rifratte sono più complessi.]



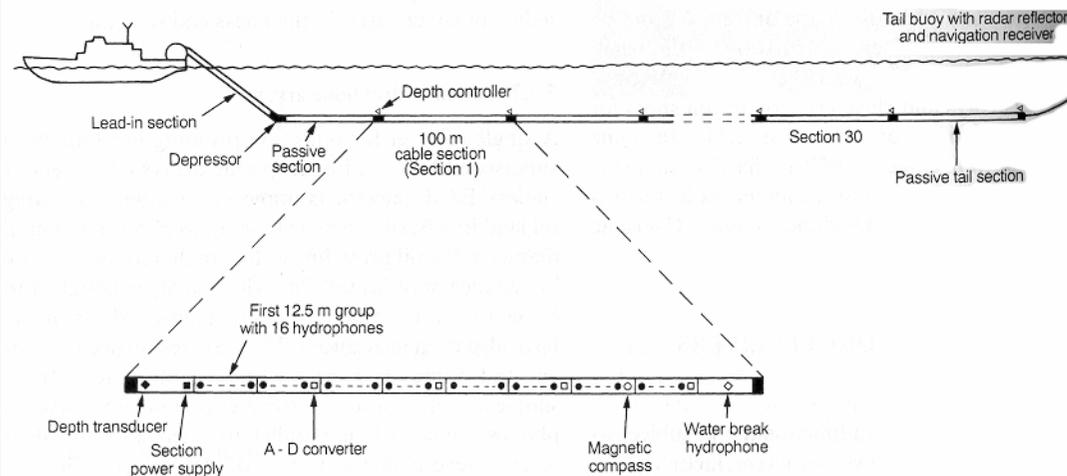
Schema base per la costruzione di una sezione sismica

- si produce uno scoppio in un punto SP1 (shot point);
- si registrano le riflessioni per mezzo di un geofono posto in superficie vicino alla sorgente;
- si ripete l'osservazione lungo un allineamento di punti di scoppio equidistanti;
- su un grafico si tracciano: una linea orizzontale rappresentante la linea del profilo, i punti di scoppio lungo di essa e si disegna un asse verticale in cui verranno segnati i tempi di riflessione (andata e ritorno) dei raggi sismici;
- si traccia la riflessione sismica ricevuta sotto il punto di scoppio 1 (SP1) in corrispondenza del suo punto di andata e ritorno;
- si ripete tutto ciò per gli altri punti di scoppio.

COPERTURE MULTIPLE

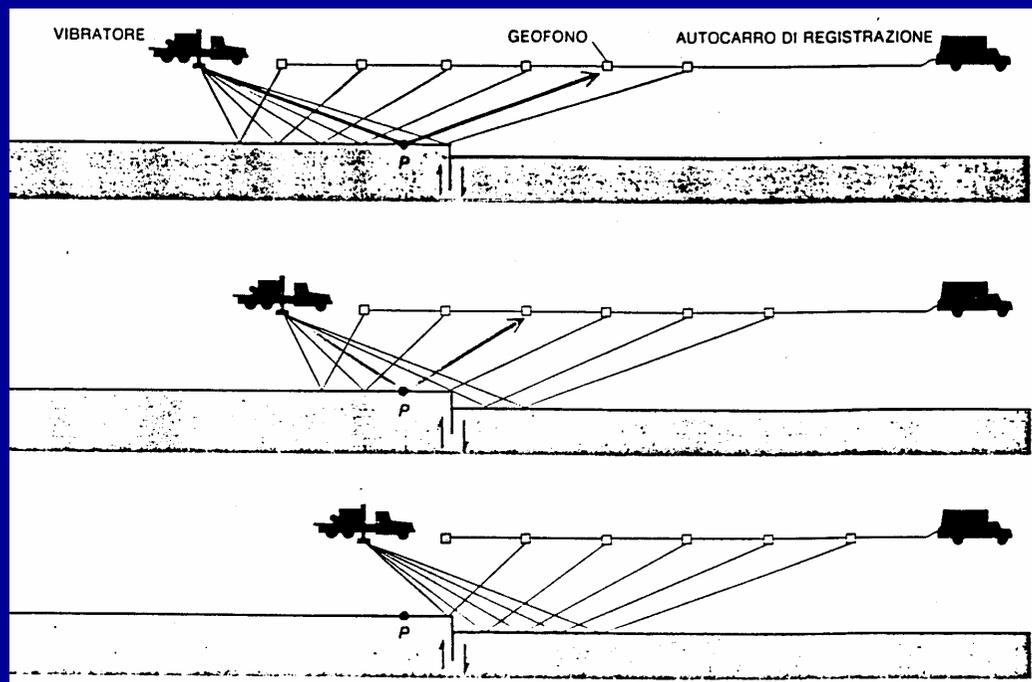


Single-channel hydrophone array for reflection profiling. The hydrophones are connected in parallel to form an equivalent line receiver several tens of metres long.

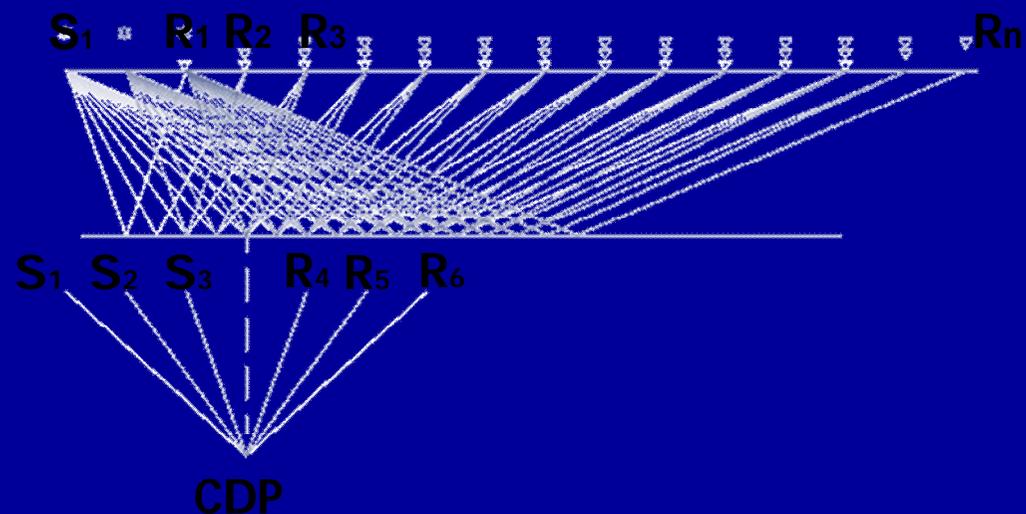


A multichannel hydrophone array (courtesy of Western Geophysical).

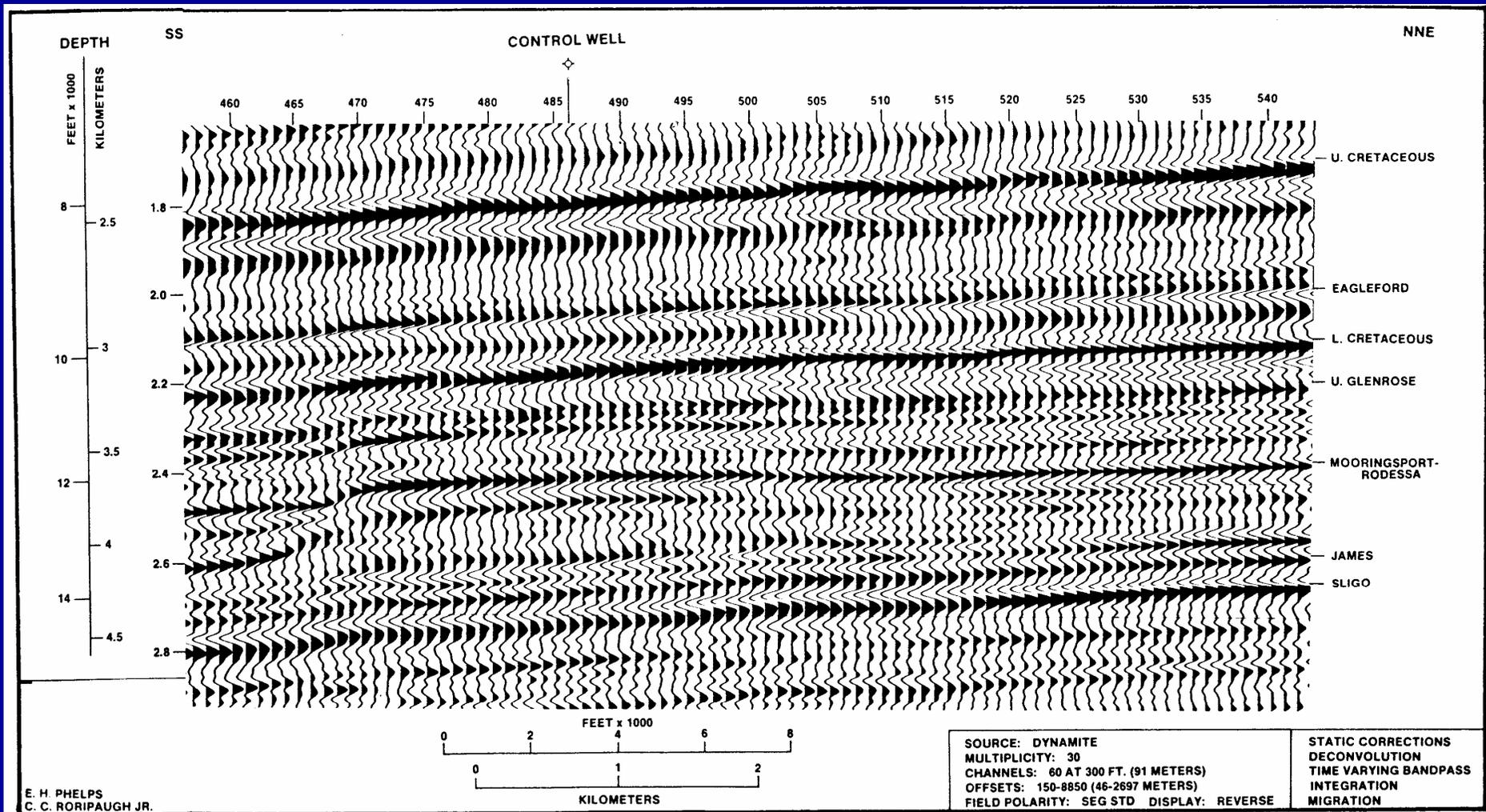
COPERTURE MULTIPLE



Si utilizza uno stendimento di n geofoni che viene spostato lungo la traccia dopo ogni liberazione di energia. La **SISMICA MULTICANALE** consente di raggiungere profondità più elevate della **SISMICA MONOCANALE**, inoltre effettua su diversi geofoni la registrazione dei segnali provenienti dallo stesso riflettore, ottenendo un'amplificazione del rapporto segnale/rumore.



Le onde provenienti dallo stesso punto in profondità (**Common Depth Point - CDP**) hanno seguito percorsi caratterizzati da diversi angoli di incidenza. I segnali sismici opportunamente corretti ed elaborati *si sommano* tra loro attenuando gli effetti di eventuali disturbi.

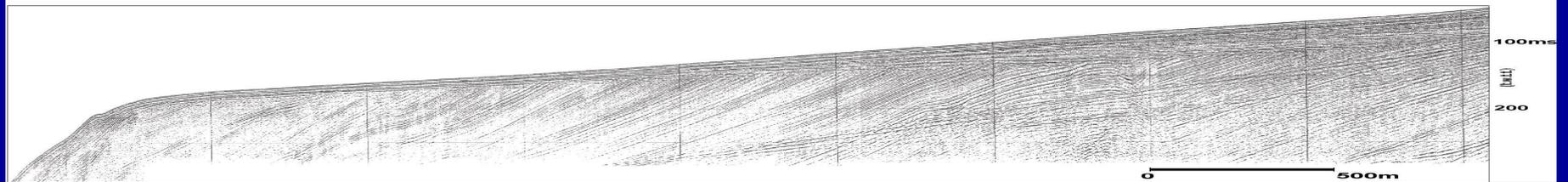
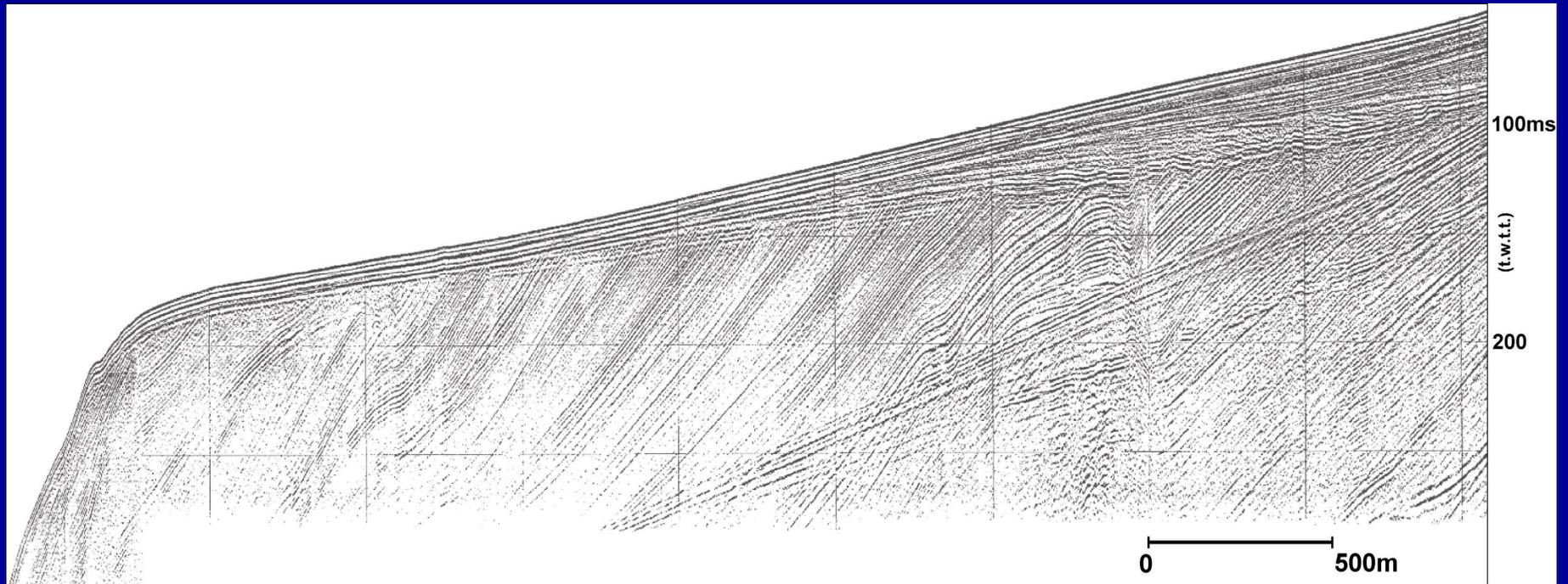


Il risultato finale è una rappresentazione, in unità di tempo, di una sezione verticale del sottosuolo lungo la linea del profilo. Ciascun RIFLETTORE SISMICO segnala la presenza di una discontinuità (strato, discordanza, contatto tettonico).

La scala verticale è data dai tempi di percorso delle onde, dalla superficie al riflettore e dal riflettore al geofono, e non dalla profondità in metri. Di conseguenza, per avere un'idea della profondità occorre conoscere la velocità di propagazione delle varie formazioni, ed ogni interpretazione geologica basata sui profili sismici deve essere convalidata dai dati di pozzi opportunamente posizionati.

- Ricordare che in sismica si considerano sempre tempi doppi (andata e ritorno delle onde sismiche), pertanto la generica formula $s=v*t$ diventa $s=v*t/2$

Esagerazione verticale



La distanza minima tra due riflettori che si possono individuare sulle registrazioni sismiche è detta **potere di risoluzione**. La risoluzione dipende dalla distanza tra le discontinuità quando comparate con la lunghezza d'onda. Per avere quindi una risoluzione di 1 m, e cioè per discriminare gli intervalli o strati di 1 m di spessore, di sedimenti aventi una velocità di 2000 m/s, il segnale dovrà avere un periodo di 1 ms ($2/2000$). **Lunghezze d'onda più corte hanno un più alto potere di risoluzione.**

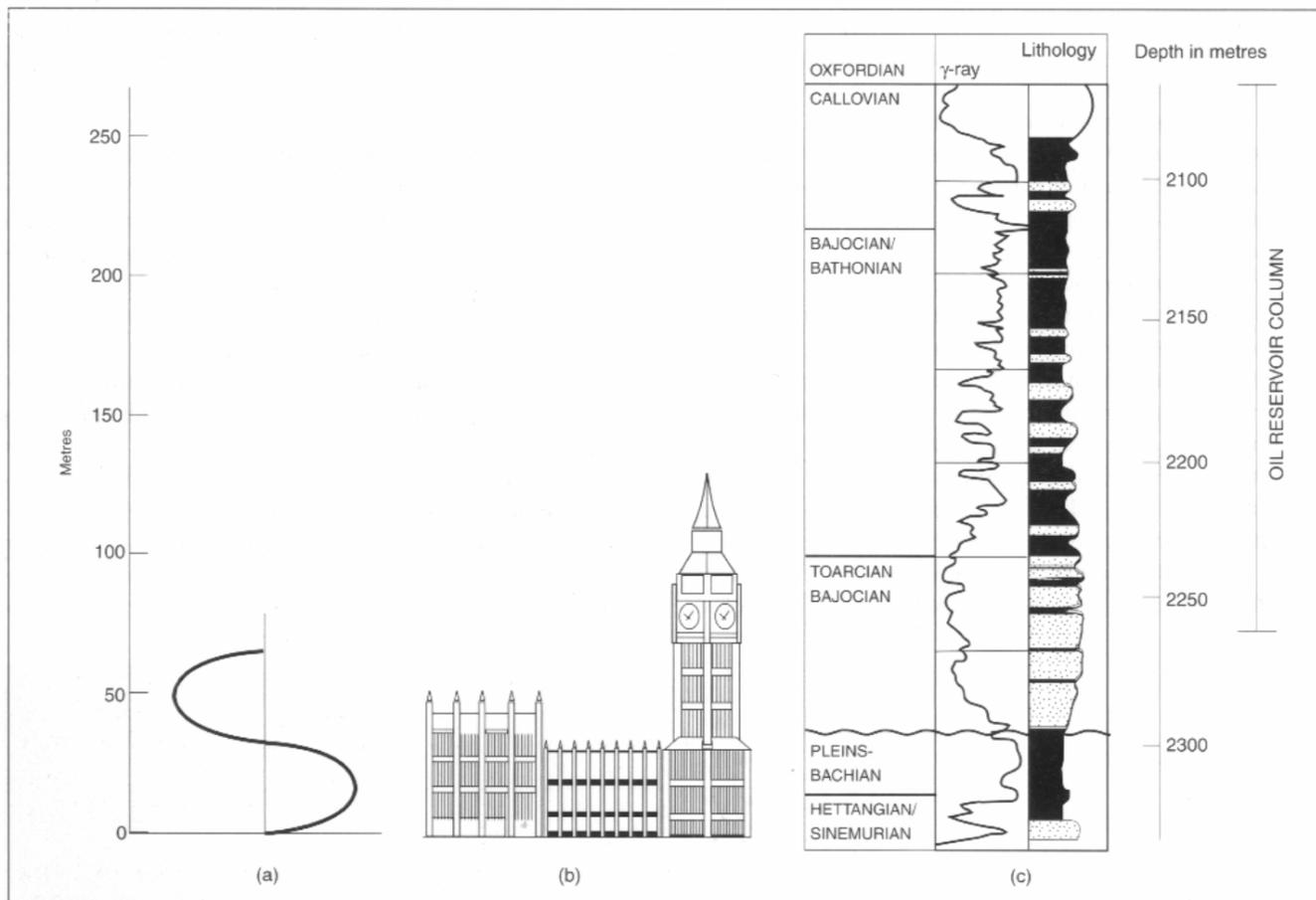


Fig. 3.2 A comparison of resolution of interpretation tools for the Beatrice Field, North Sea. (a) A single cycle sine wave of 30 Hz in medium of velocity 2000 ms^{-1} (or 60 Hz; 4000 ms^{-1}); (b) Big Ben, London, c. 380 ft; (c) A γ -ray log through the Beatrice Oil Field

La risoluzione ideale si avrebbe con un segnale infinitamente breve. Il solo modo per avere lunghezze d'onda più piccole è quello di aumentare la frequenza dell'onda.

DA TENERE A MENTE...

Man mano che l'onda attraversa il terreno le alte frequenze vengono filtrate; ***più si va in profondità e minore è la risoluzione.*** Il potere risolutivo è in genere compreso tra $1/8$ e $1/4$ della lunghezza d'onda.

La ***penetrazione*** è la capacità di un'onda sismica di indagare riflettori profondi. Essa decresce all'aumentare della frequenza, perché gran parte dell'energia viene riflessa dai riflettori più superficiali.

La quantità di energia di un'onda sismica decresce man mano che essa attraversa gli strati verso il basso. Questo decremento della quantità di energia è inversamente proporzionale al quadrato della distanza che l'onda ha attraversato, assumendo una velocità costante; questo fenomeno è conosciuto come ***divergenza sferica***.

Risoluzione e penetrazione sono pertanto due grandezze inversamente proporzionali: un profilo sismico con un elevato potere di risoluzione non raggiungerà alte profondità, analogamente un profilo con una alta penetrazione avrà un minor dettaglio e non darà una buona risoluzione dei livelli più superficiali.

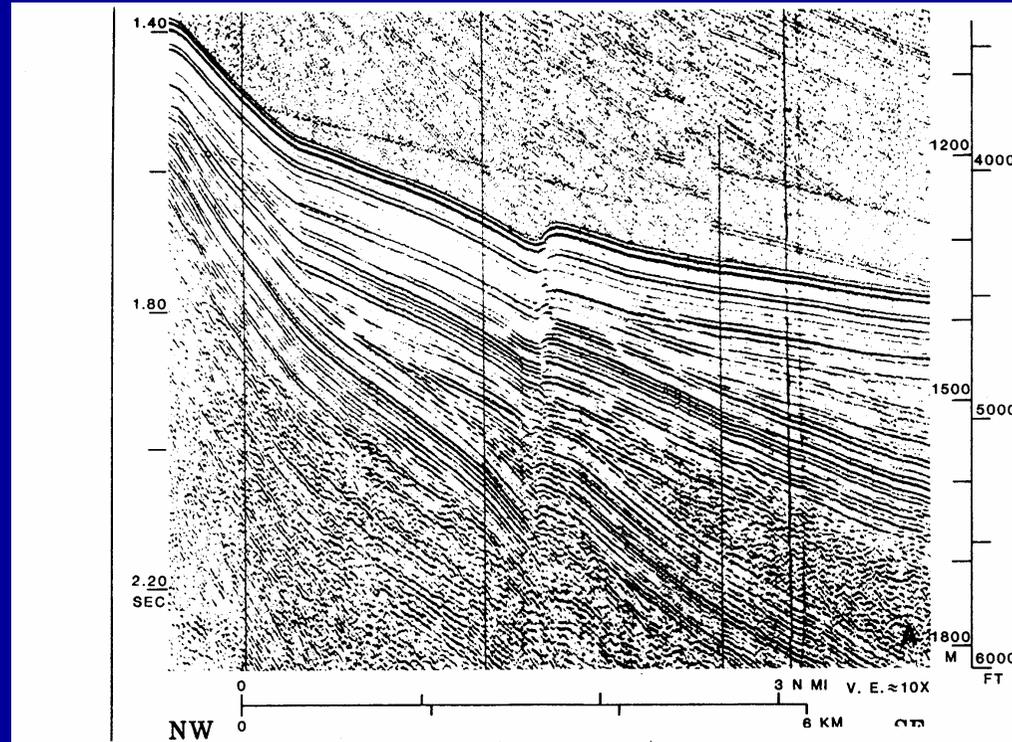
Interpretazione

- Cosa deve ricordarsi il geologo interprete
- Problemi con l'interpretazione dei profili sismici a riflessione
- Tipi di sorgenti e rilievi sismo-acustici
- (vedremo domani esempi concreti)

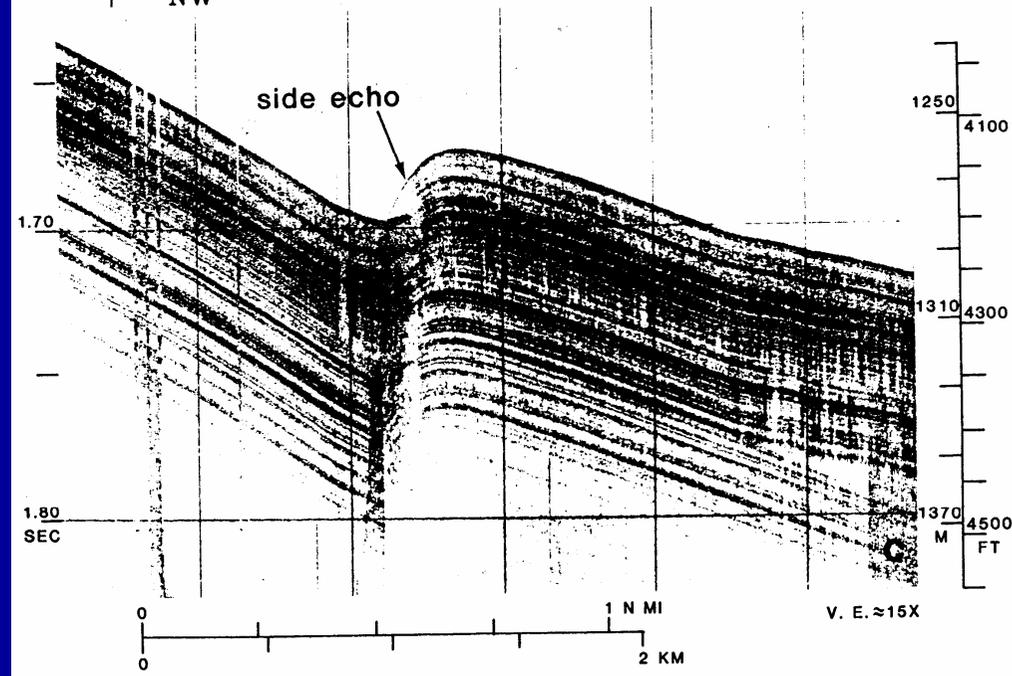
Sorgenti di energia nei rilievi marini

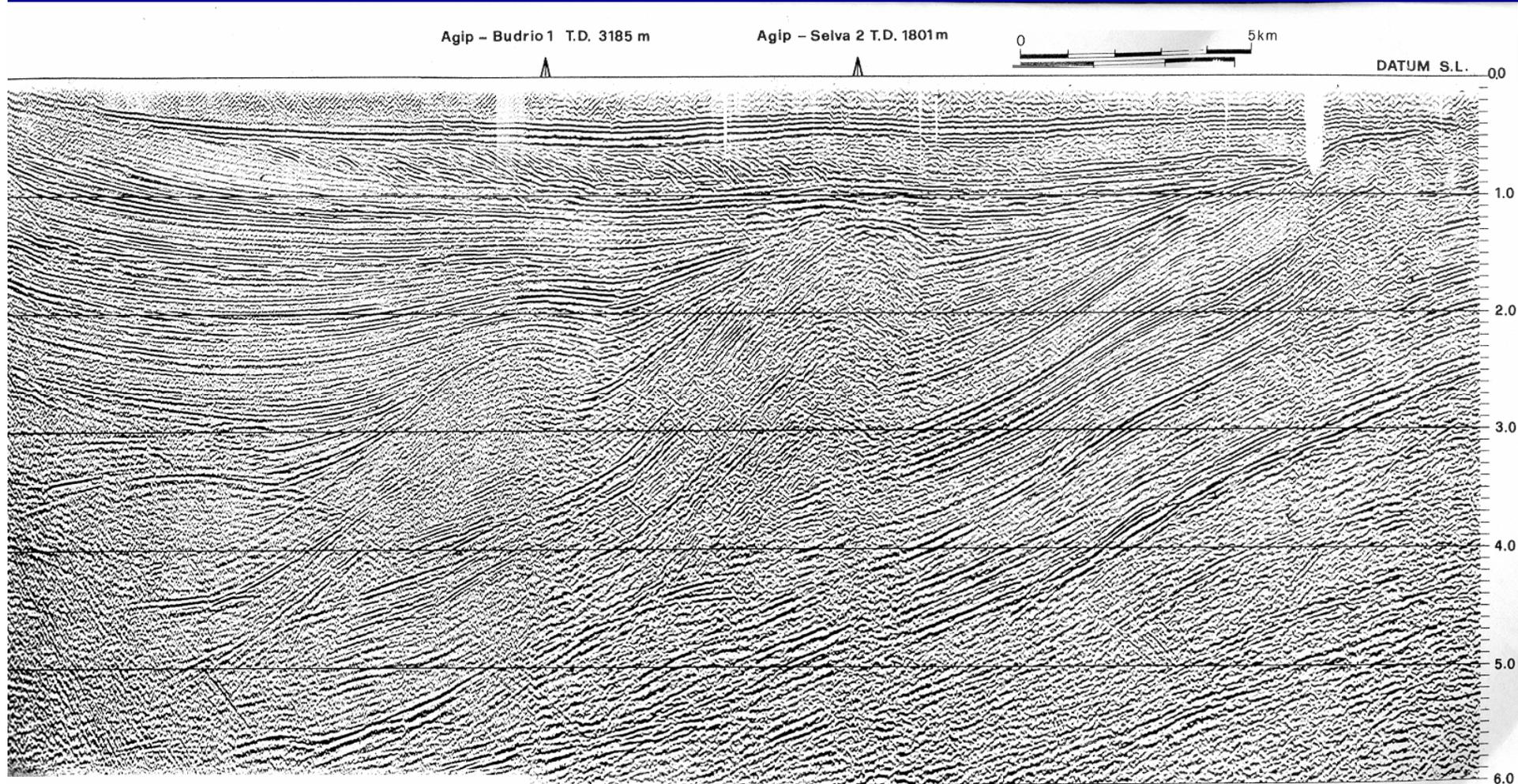
METODO	FONTI DI ENERGIA	TIPO DI SEGNALE
Vibroscis	Massa vibrante	Continuo
Dinoseis	Detonazione di gas	Impulso
Corda detonante	Esplosione progressiva	Impulso
Aquapulse	Detonazione di gas	Impulso
Air Gun	Aria compressa	Impulso
Flexotir	Piccola carica di esplosivo	Impulso
Sparker	Scintilla	Impulso

Sparker



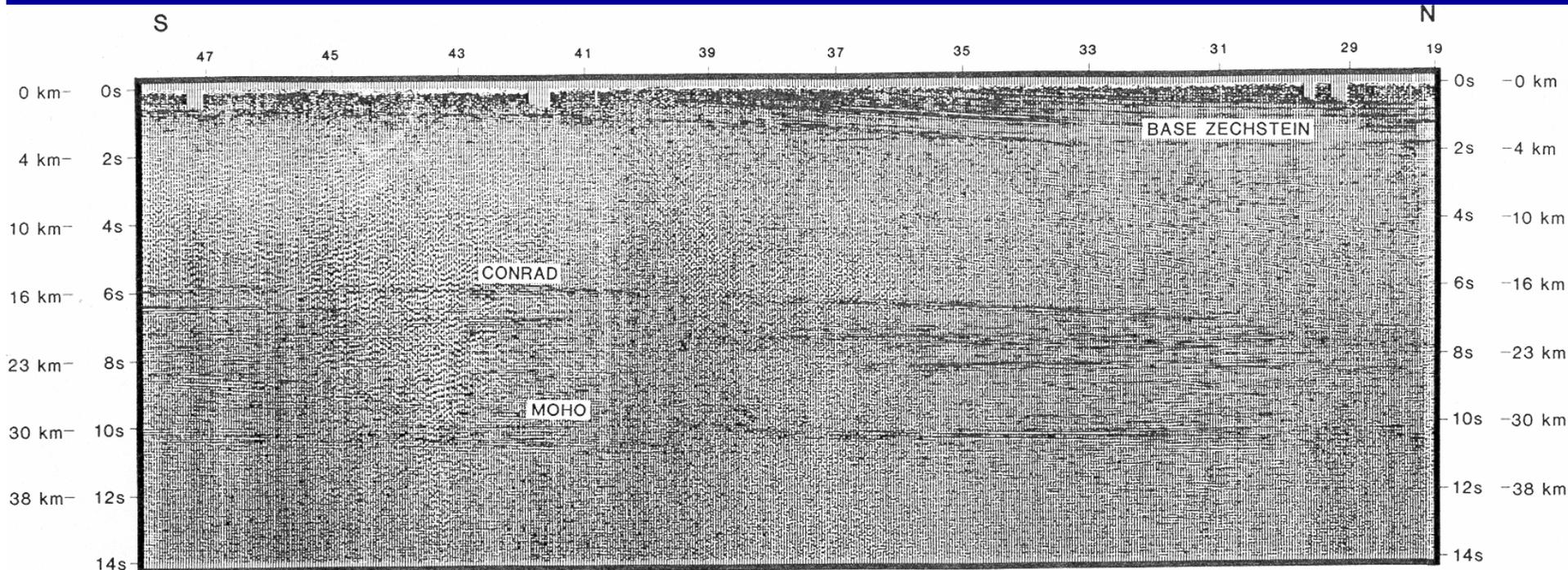
Sub Bottom Profile





Dinamite





PREUSSAG AG
DEEP CRUSTAL REFLECTIONS
IN THE NORTHWEST-GERMAN BASIN

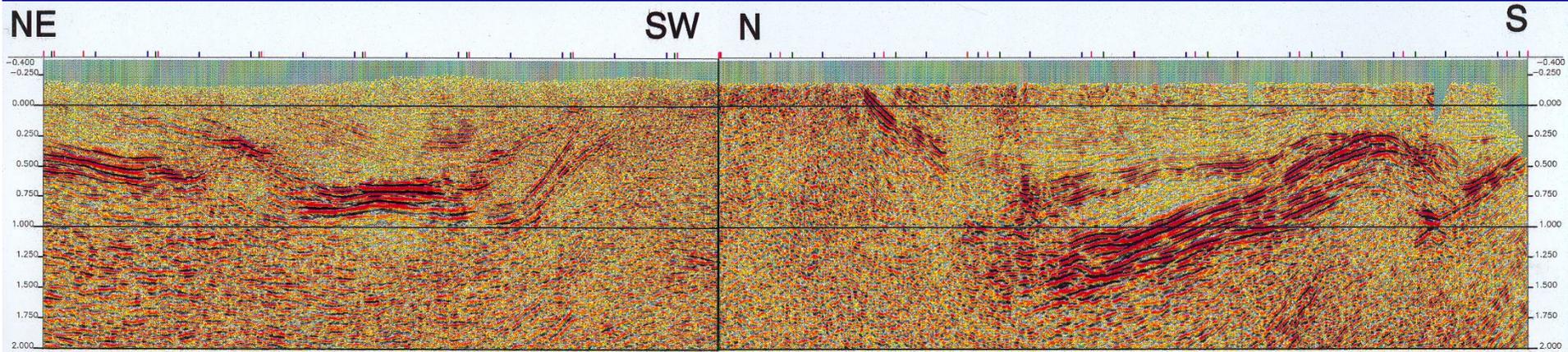
G. DOHR, P. LUKIĆ, & G. H. BACHMANN

STUDY GROUP BEB, DEILMANN, DST, DTA,
 GELSENBERG, ITAG, MOBIL, PREUSSAG, & WIAG

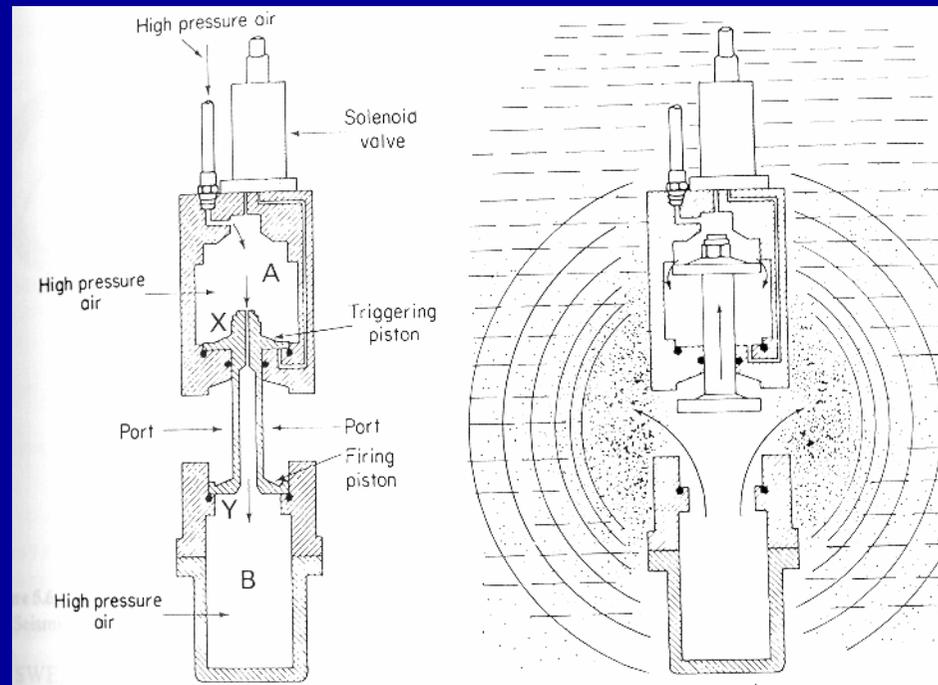
ENERGY SOURCE:	EXPLOSIVE
STACKING MULTIPLICITY:	12-FOLD
CHANNELS RECORDED:	48
INTERVALS BETWEEN INPUT CHANNELS:	50 m
OFFSET DISTANCE:	50-2820 m
STATIC CORRECTIONS:	DATUM 50 m ABOVE SL
DECONVOLUTION:	PREDICTIVE
FREQUENCY FILTERING:	18-124 Hz
SOURCE OF VELOCITIES FOR PROCESSING:	VELOCITY ANALYSIS

0 km 2 km

Profilo crostale

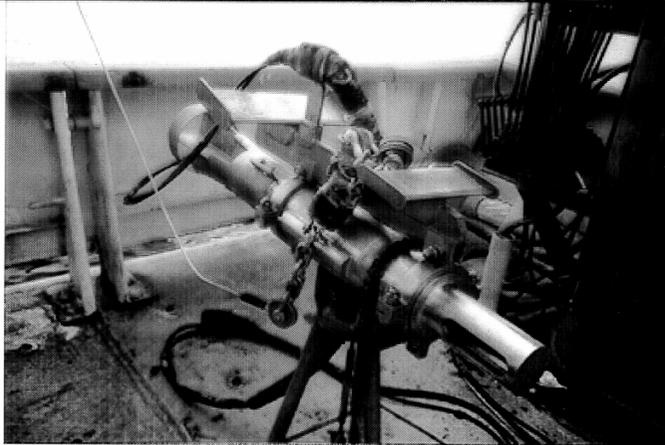
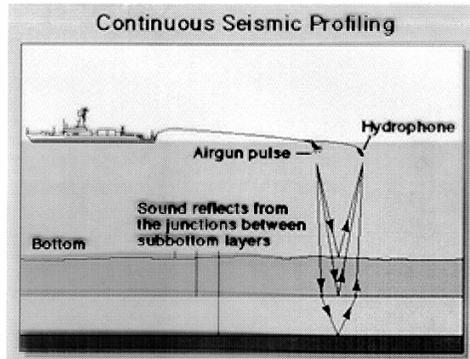


Generazione dell'energia sismica: Airgun



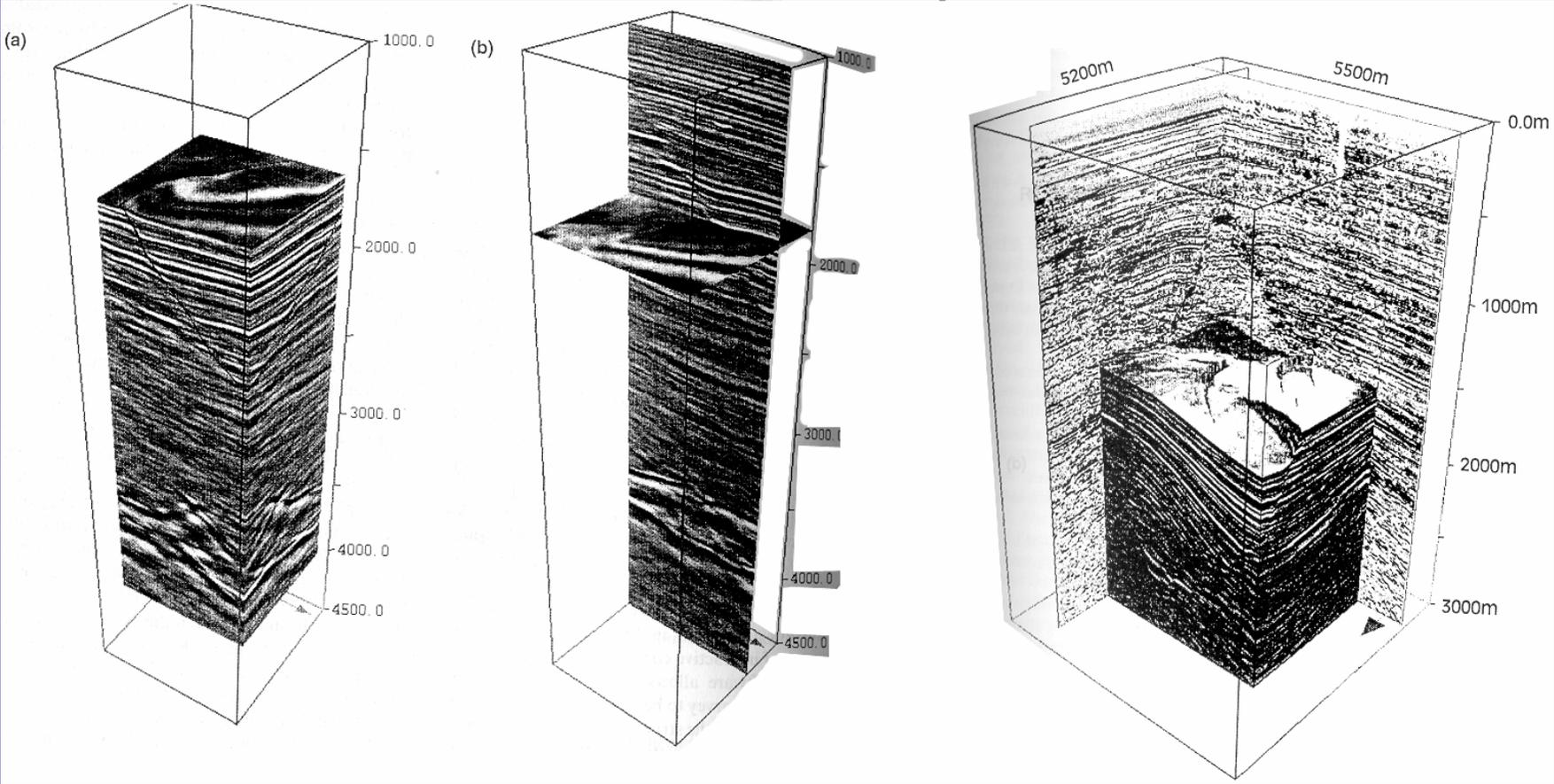


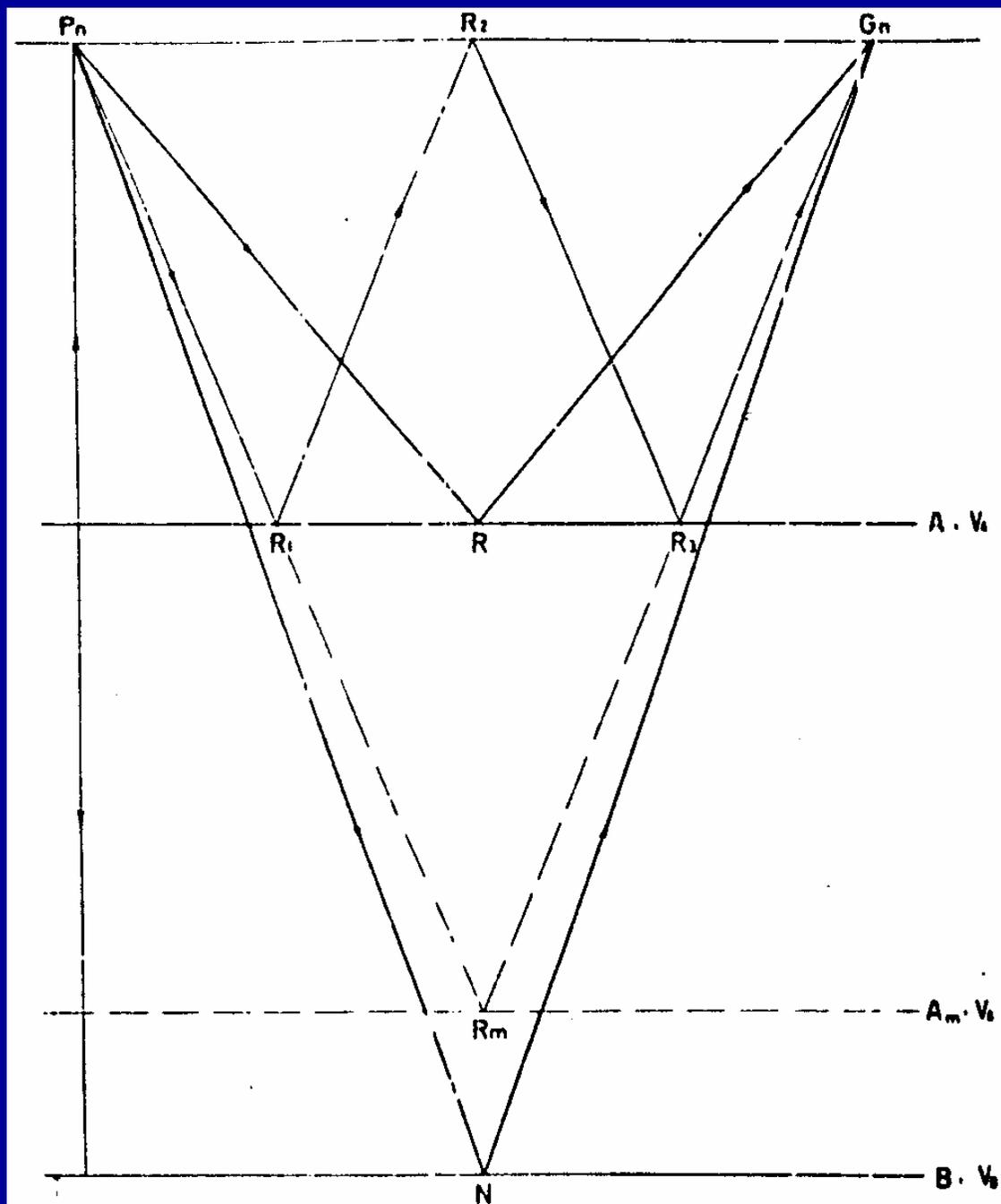
Operazione di messa in mare del sistema sorgente-ricevitore per sismica "Chirp-SBP".



La ricezione del segnale:
il cavo sismico e gli
idrofoni

Sismica 3D





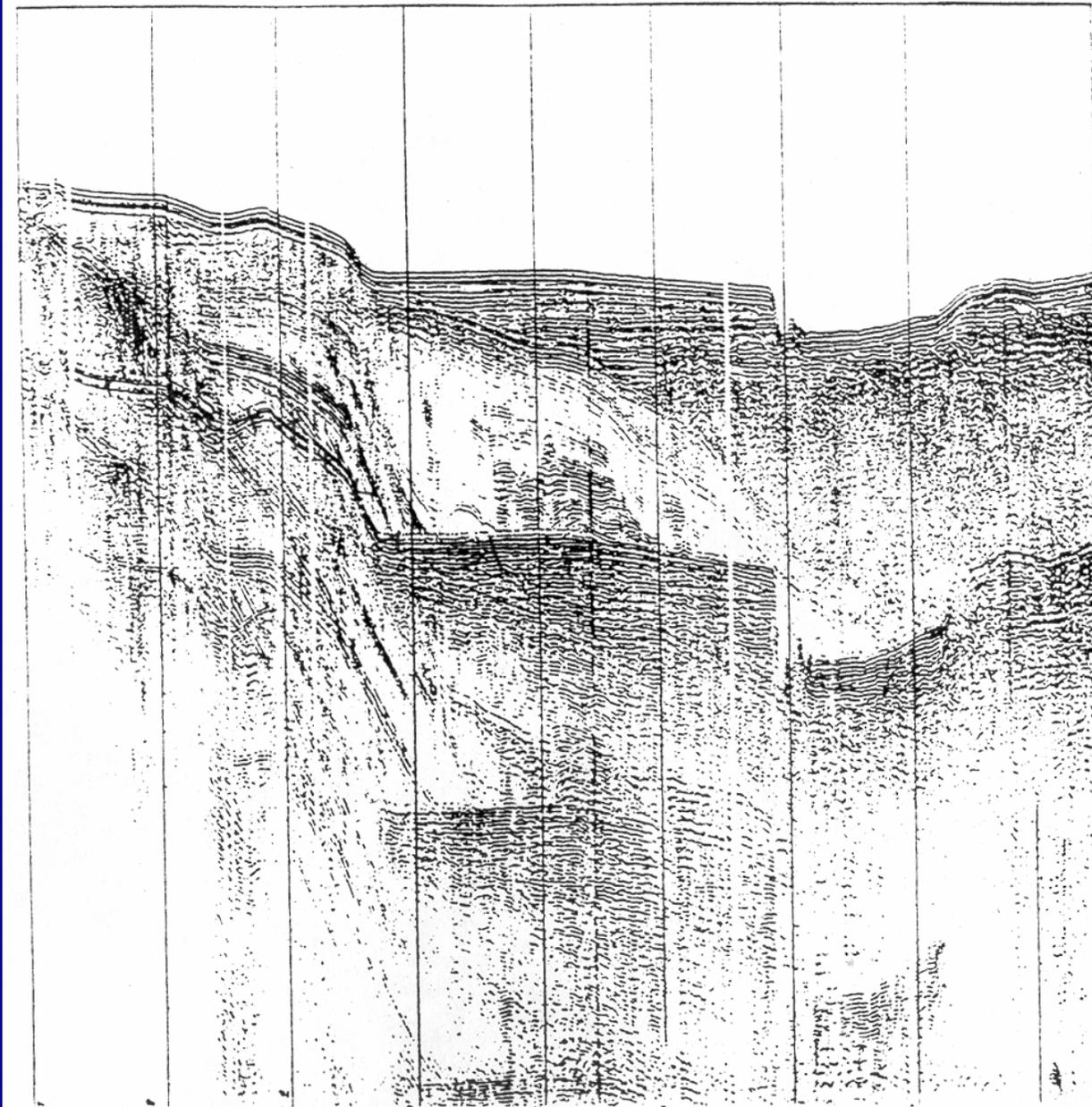
Riflessioni multiple

Le interfacce caratterizzate da una grande variazione dell'impedenza acustica, cioè da un alto coefficiente di riflessione, sono i principali generatori di *multipli*, energia sismica che è stata rimbalzata più volte nel sottosuolo

SE

LINE 05

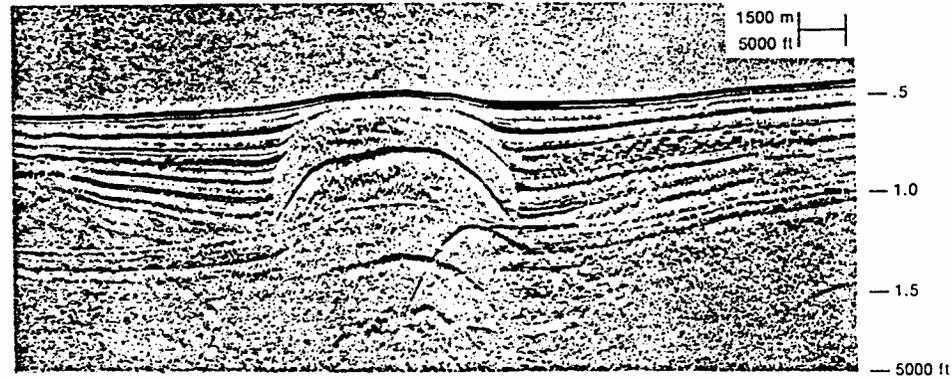
NW



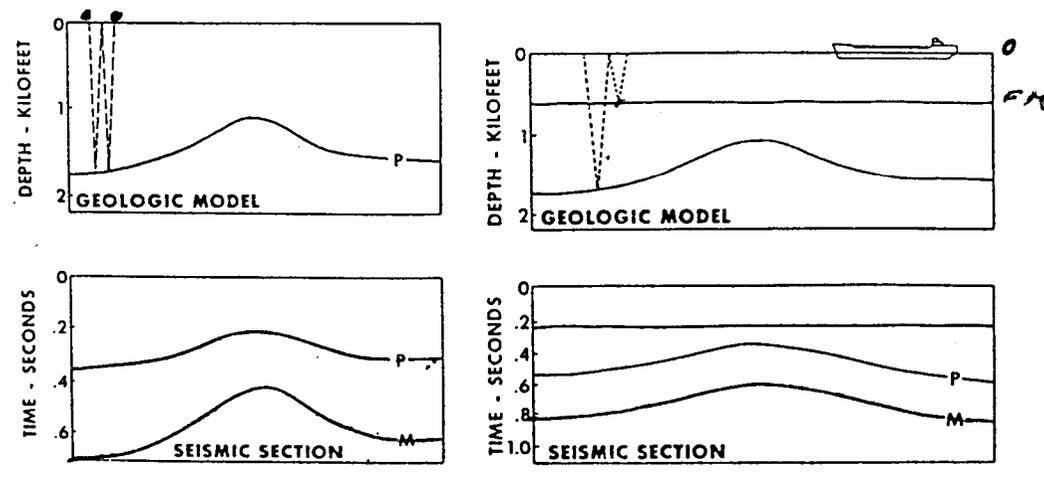
Il fondo del mare è un importante generatore di multipli.

CARATTERISTICHE DI UNA RIFLESSIONE MULTIPLA:

- La riflessione è costantemente localizzata ad una profondità doppia rispetto al primo riflettore (fondo del mare);
- Il falso riflettore ricalca la morfologia del fondo, ma ne amplifica le pendenze;
- L'orizzonte "si sovrappone" ai segnali reali sottostanti;
- Si osservano segnali continui e ben evidenti anche a profondità elevate;
- Se il contrasto di impedenza acustica è molto elevato (es. fondo mare), la riflessione multipla può ripetersi più volte sempre ad intervalli regolari.

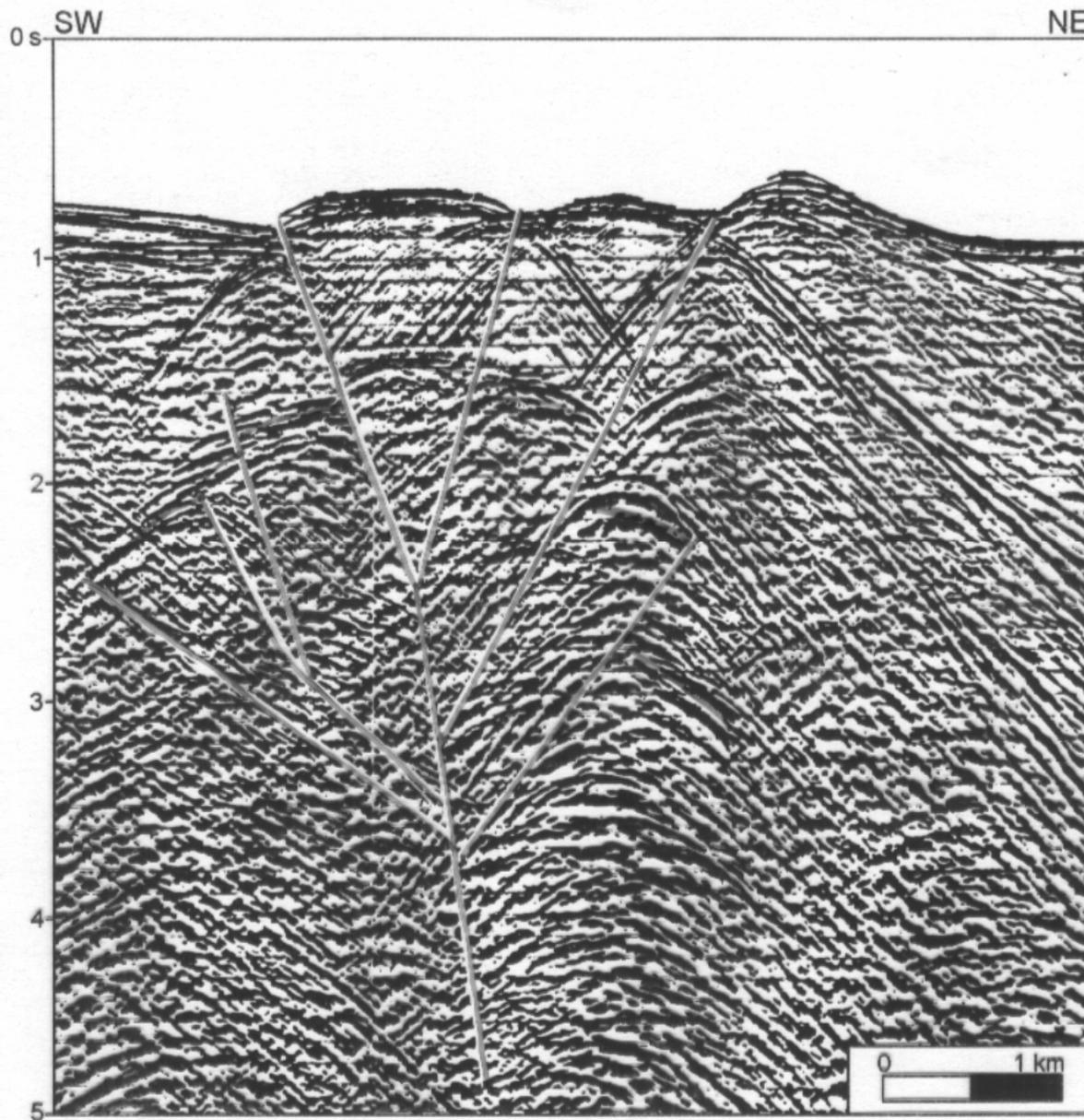


Model study

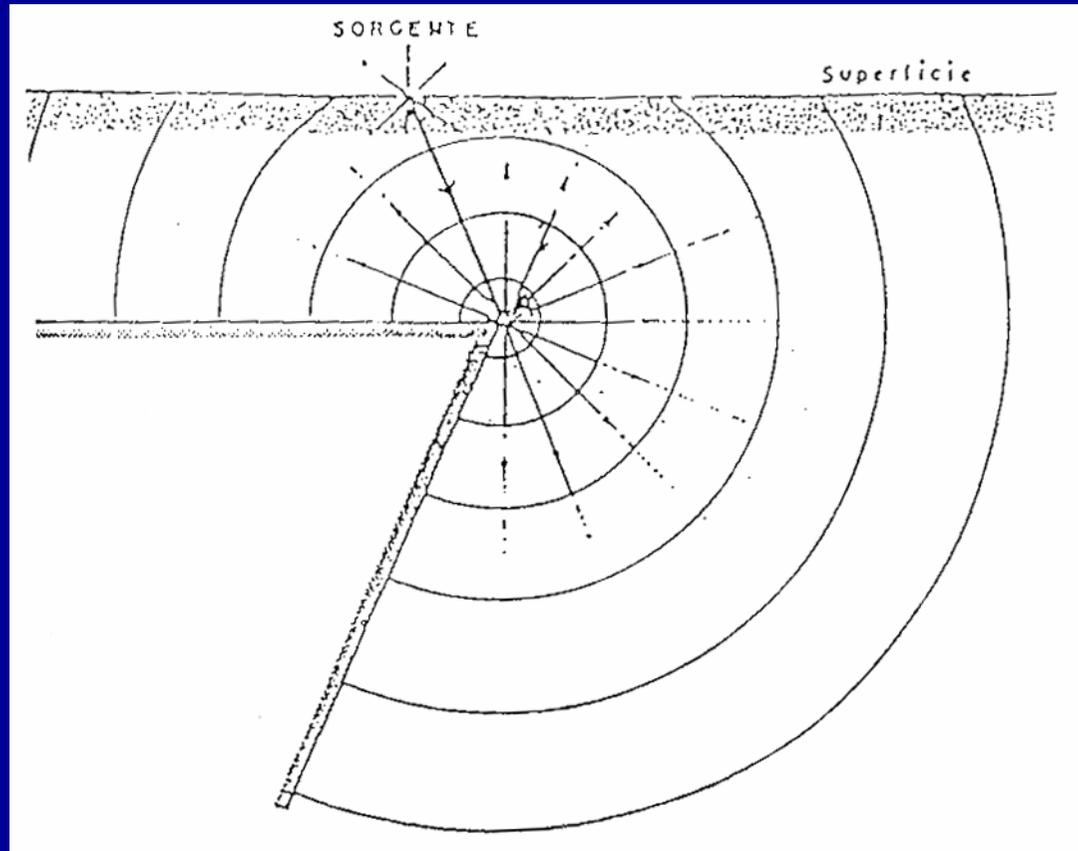


Multiple peg-leg

Iperboli di diffrazione



I perboli di diffrazione

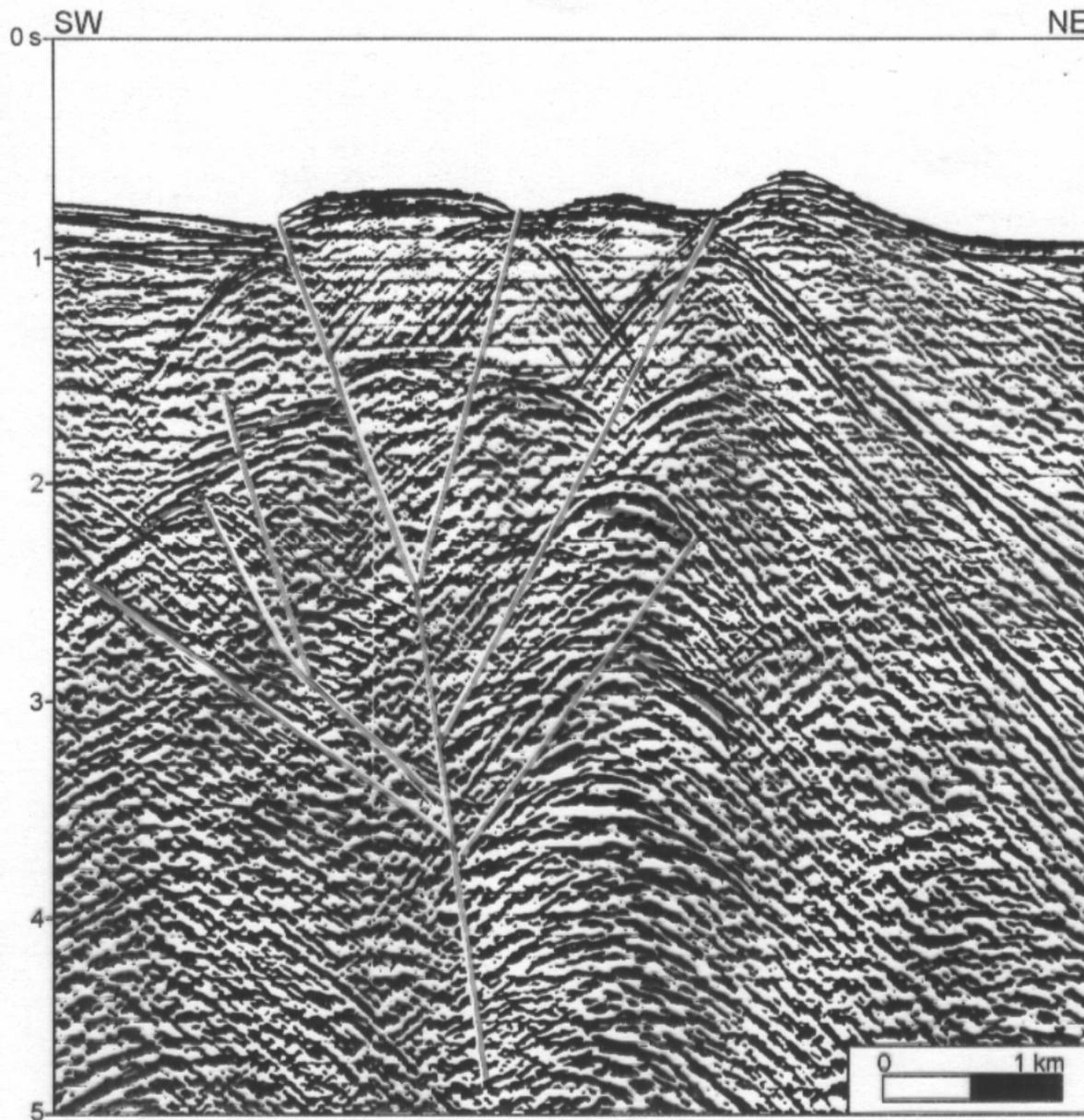


Quando un'onda sismica colpisce un punto di discontinuità di un orizzonte, ad esempio il bordo di una faglia, questo si comporta come una sorgente puntiforme secondaria e, in accordo col principio di Huygens, genera un'onda sferica. Tale fenomeno prende il nome di diffrazione e dà origine ad una serie di falsi segnali, dalla tipica forma ad iperbole, chiamati **iperboli di diffrazione**.

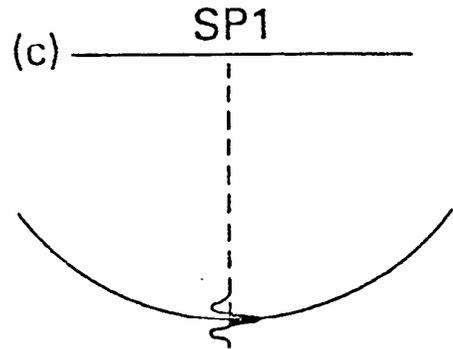
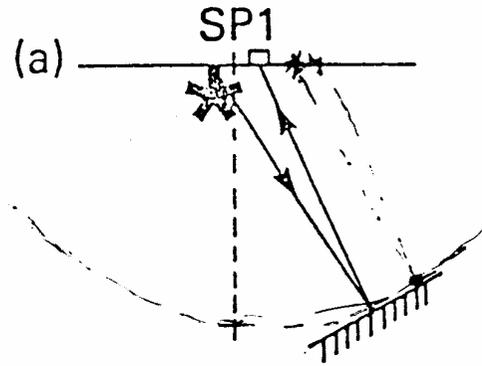
CARATTERISTICHE DI UN'IPERBOLE DI DIFFRAZIONE:

- Forma tipicamente arcuata;
- E' un segnale che "si sovrappone" e "si incrocia" ai segnali reali sottostanti;
- Il vertice dell'iperbole si trova in corrispondenza del punto che l'ha generata;
- Si genera frequentemente in corrispondenza di faglie;
- Unendo i vertici di una serie di iperboli si può ricostruire idealmente il piano di faglia che le ha generate.

Iperboli di diffrazione

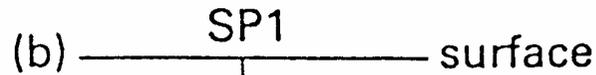


Actual seismic path

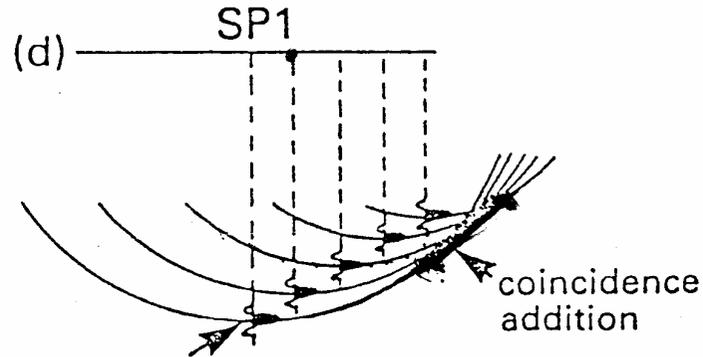


unmigrated position of reflection

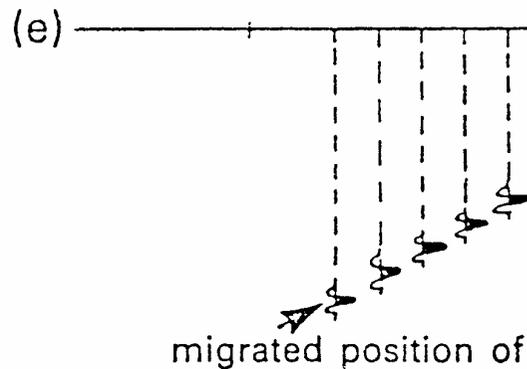
Cross-sectional representation



plotted vertically below SP1,
but should really be here



coincidence
addition



migrated position of reflection

La migrazione

Per un riflettore
inclinato la
riflessione si
verifica in una
zona che è
spostata rispetto
alla traccia
verticale della
sezione

INTERPRETAZIONE

Riconoscere e tracciare riflettori e gruppi di riflettori in modo da riprodurre l'assetto stratigrafico e strutturale dell'area indagata. Gli orizzonti riflettenti seguono gli strati, le superfici di discordanza, i contatti stratigrafici e/o tettonici etc...

Fasi dell'interpretazione:

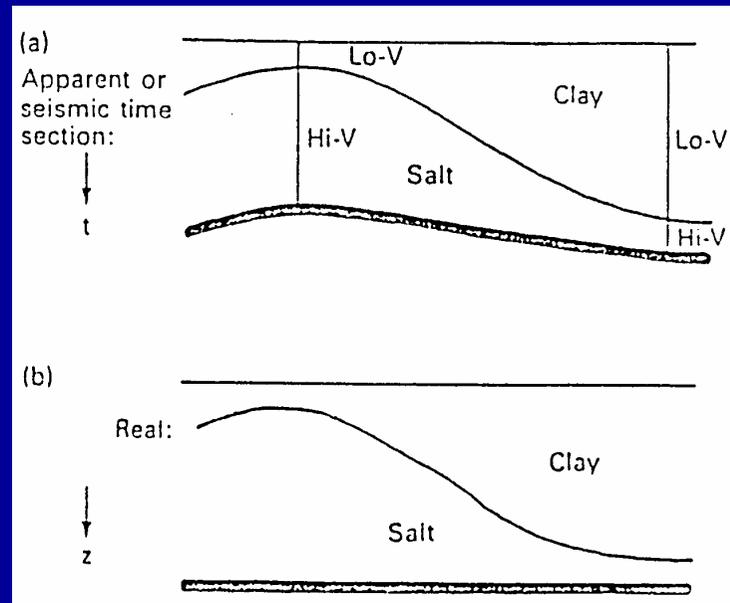
- Osservare il profilo sismico e prendere nota di tutte le informazioni generiche (profilo acquisito a terra o a mare, ambiente deposizionale, presenza di pozzi, tipo di sorgente, etc..)
- Individuare la scala orizzontale e verticale, tenendo conto del potere di risoluzione;
- Tracciare il primo orizzonte (superficie topografica o fondo del mare);

INTERPRETAZIONE

- Procedere verso il basso, selezionando gli orizzonti più significativi da tracciare;
- Individuare gli attributi sismici che caratterizzano ciascun riflettore (ampiezza, frequenza e continuità laterale);
- Riconoscere segnali reali e segnali falsi (multipli e iperboli di diffrazione);
- Riconoscere la **facies sismica** che caratterizza ogni corpo sismico o pacchetto di riflettori;
- Individuare gli orizzonti che limitano i pacchetti di riflettori caratterizzati da una stessa facies sismica;
- Individuare e segnalare la presenza di faglie (riflettori interrotti e dislocati, variazione nelle inclinazioni, presenza di iperboli);

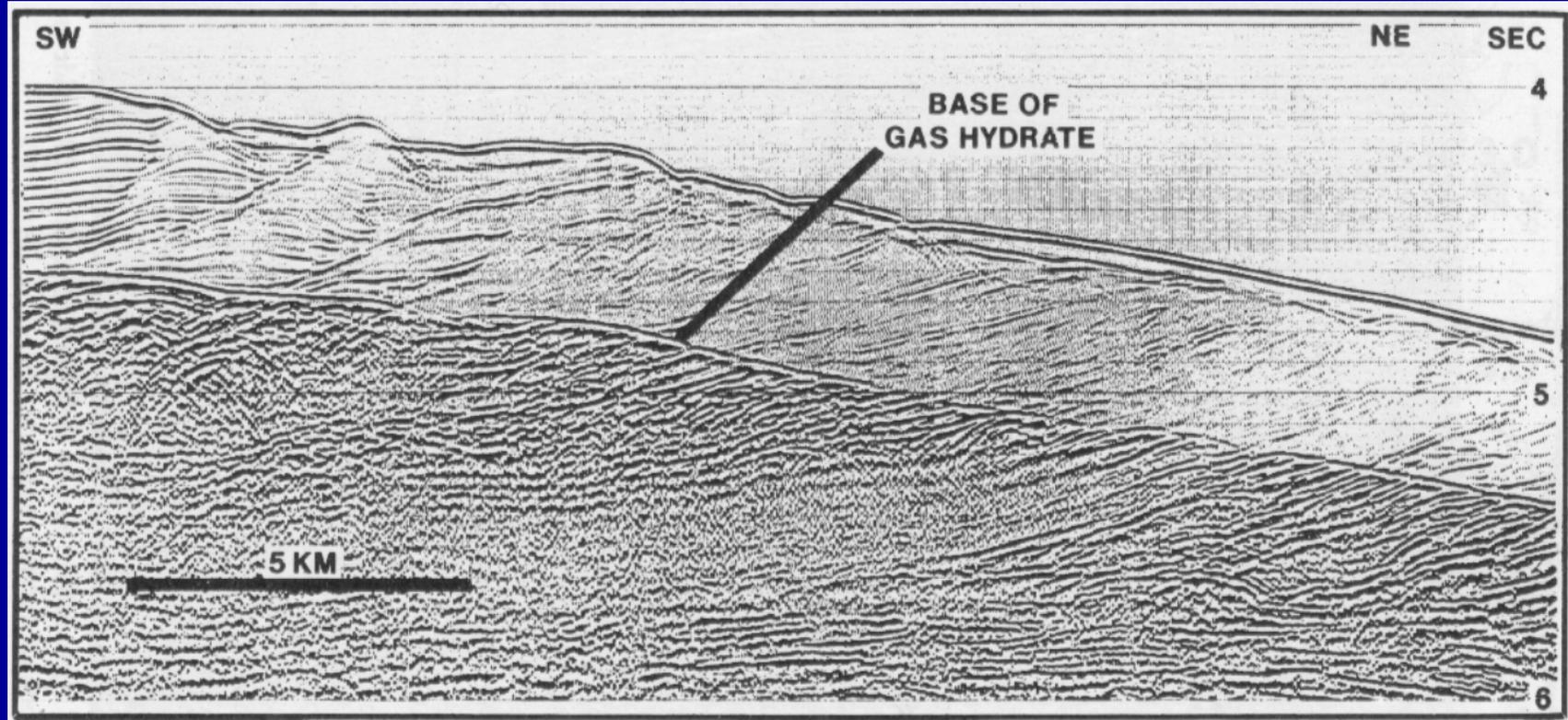
INTERPRETAZIONE

- Riconoscere geometrie reali e geometrie false (es. fenomeni di velocity pull up).



- Riconoscere lo stile strutturale dell'area in esame (es. area in compressione o in distensione)
- Ricostruire l'evoluzione stratigrafica e tettonica dell'area esaminata

Gas idrato



- Molecole di idrocarburi allo stato gassoso vengono intrappolate all'interno del reticolo molecolare "espanso" dell'acqua, senza però che avvenga una vera e propria reazione chimica
- Condizioni di alta pressione e bassa temperatura (più bassa è la profondità, minore è la temperatura richiesta, e viceversa)
- I gas idrati si presentano sotto forma di cristalli vagamente simili al ghiaccio, diffusamente disseminati nei primi strati di sedimento
- Ciò può produrre una omogeneizzazione dei caratteri acustici che attenua i contrasti di impedenza acustica e l'ampiezza delle riflessioni sismiche
- La velocità sismica è maggiore di quella dei sedimenti sottostanti
- Conseguentemente si genera un ampio riflettore alla base, che segue l'andamento del fondo del mare e che tronca le riflessioni, attenuate, degli strati (*bottom simulating reflector*)
- Possono favorire l'innescò di frane lungo pendii sottomarini, se destabilizzati a seguito di una diminuzione della pressione o un aumento della temperatura

Lineamenti tettonici

