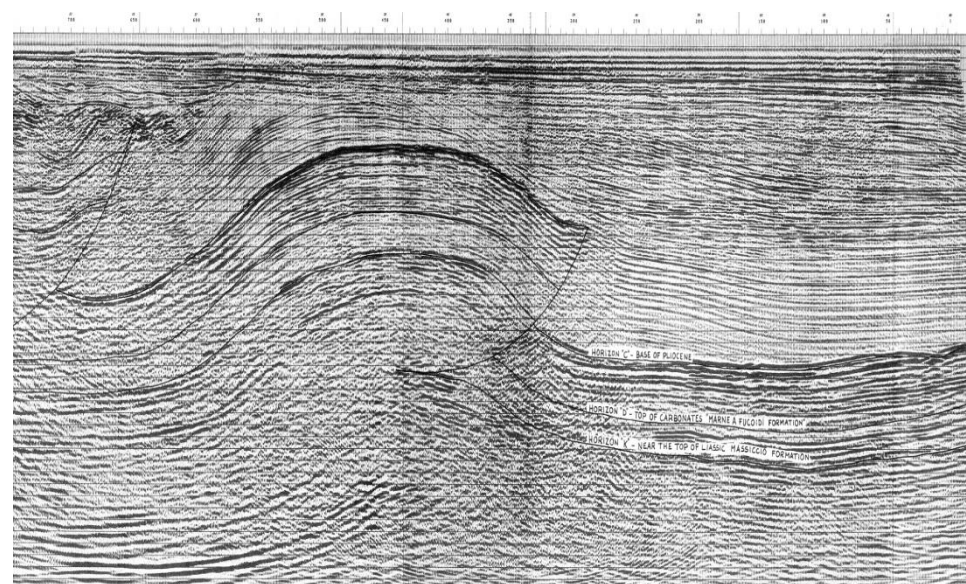
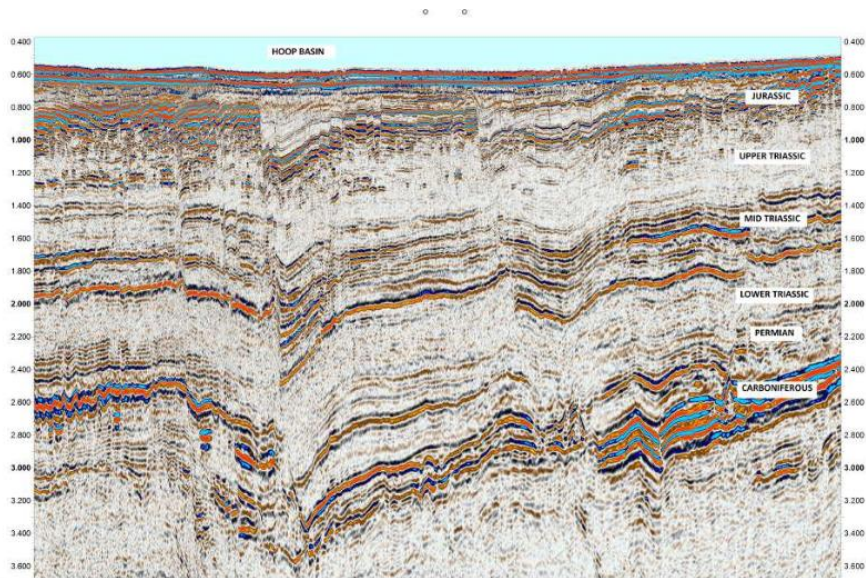


# Evidenze sismiche di (sistemi di) faglie

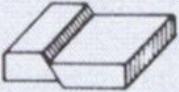
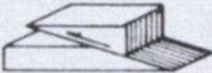

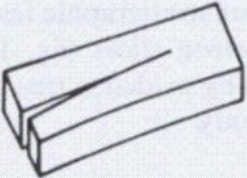
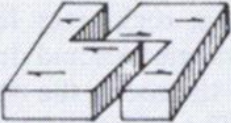
Un regime tettonico è caratterizzato dalla presenza di un sistema più o meno complesso di fratture associate alla deformazione fragile degli strati sedimentari, a cui si associa spesso una deformazione duttile.



# Diversi tipi di faglie

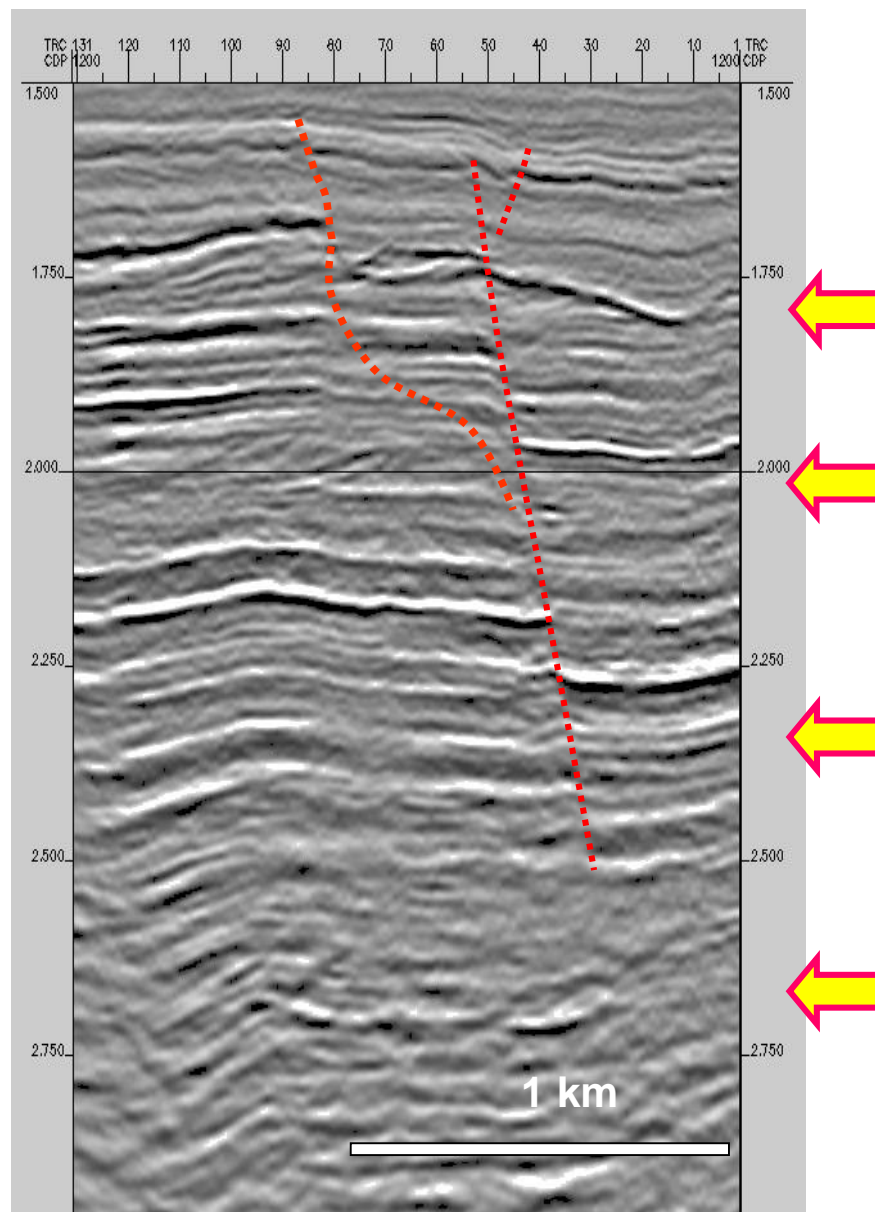
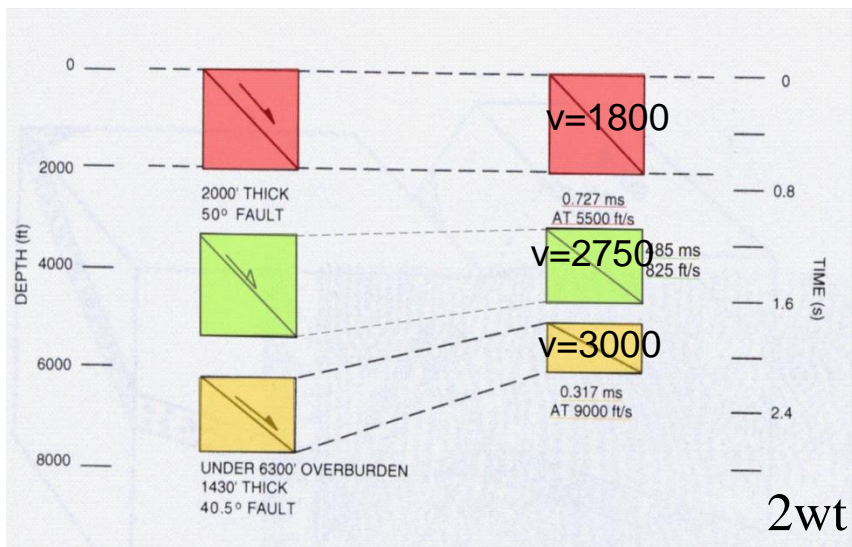
Lungo i profili sismici le faglie possono avere aspetto molto variabile: superfici di riflessione vera e propria o sistemi diffusi di fratture che interrompono la continuità dei riflettori.

La pendenza è apparente, in funzione delle velocità delle onde P, del fattore di scala adottato (esagerazione verticale), della direzione del profilo sismico rispetto alla direzione della faglia.

FAULT TYPE	RELATED TERMS	STRESS DIRECTION		CHARACTERISTICS
		MINIMUM	MAXIMUM	
NORMAL 	TENSION FAULT GRAVITY FAULT SLIP FAULT LISTRIC FAULT (CURVED FAULT PLANE)	HORIZONTAL (Tension)	VERTICAL (Gravity)	Dip usually 75° to 40°
REVERSE 	THRUST FAULT LOW ANGLE (dip < 45°) HIGH ANGLE (dip > 45°)	VERTICAL	HORIZONTAL (Compression)	Fault plane may disappear along bedding  → faglie listriche
STRIKE - SLIP 	TRANSCURRENT FAULT TEAR FAULT WRENCH FAULT RIGHT LATERAL (Dextral) ⇨⇨ LEFT LATERAL (Sinistral) ⇨⇨	HORIZONTAL	HORIZONTAL	Fault trace often 30° to maximum stress
ROTATIONAL 	SCISSORS FAULT HINGE FAULT			Throw varies along fault strike; may vary from normal throw to reverse.
TRANSFORM 	DEXTRAL ⇨⇨⇨ SINISTRAL ⇨⇨⇨	HORIZONTAL		Associated with separation or collision of plates  New material fills rifts between separating plates or one plate rides up on another if plates collide.

STEP Subduction-Transform Edge Propagator

# Rapporto tra le pendenze reali dei piani di faglia e pendenze rappresentate lungo i profili sismici

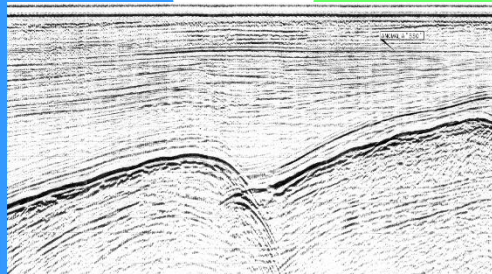


# Interpreting Faults



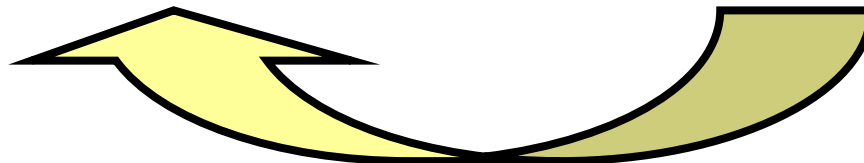
## *Structural Observations*

- Fault segments on seismic lines
- Fault plane orientation
  - Sense of motion
- Magnitude of offset
  - Range of depths
  - Relative timing
    - when faults moved
    - when structures grew



## *Structural Concepts*

- Tectonic Setting
  - Divergent zones
  - Convergent zones
  - Strike-slip zones
  - Mobile substrate
- How Structures Evolve
  - Fault-bend folds
  - Fault-propagation folds
  - Salt movement
  - etc.



# Riconoscimento di faglie

Le faglie vengono identificate nei profili sismici in base a:

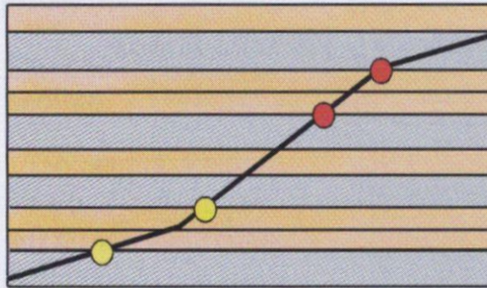
- 1 - *Fault cutoffs*: terminazione delle riflessioni o brusca variazione degli attributi
- 2 - *Kink bands*: “piega a gomito” degli strati
- 3 - Riflessione direttamente dal piano di faglia.

I criteri 1 e 3 forniscono direttamente la posizione della faglia; tutti i tre criteri, se applicabili, sono utili per identificare e interpretare correttamente una faglia.

## Fault cutoffs and kink-band terminations

### *balanced model*

Incipient fault with markers along fault surface.

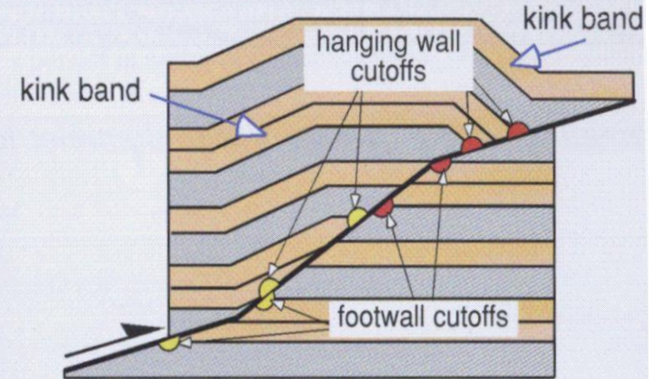


### *in outcrop*

Fault cutoffs in outcrop, Mississippian Joana limestone, Nevada, U.S.A.

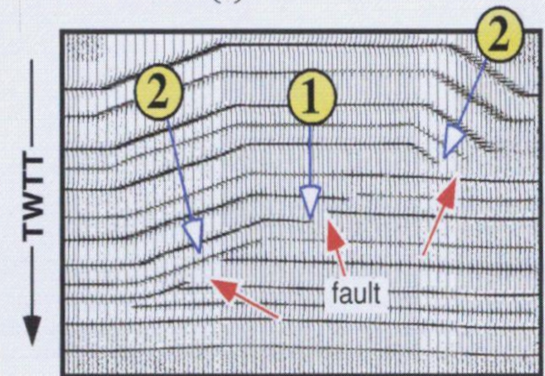


Fault with offset markers and cutoffs. Note that hanging wall kink bands terminate downward into the fault surface.

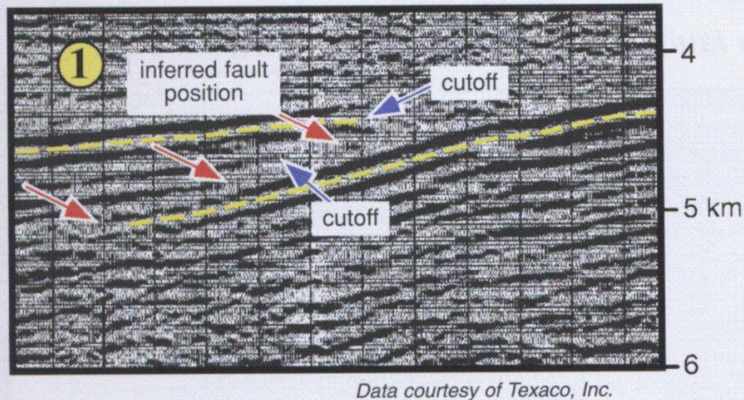


### *in synthetic seismic*

Seismic forward model showing fault cutoffs (1) and downward terminating kink-bands (2).



## Recognizing and interpreting faults in seismic section

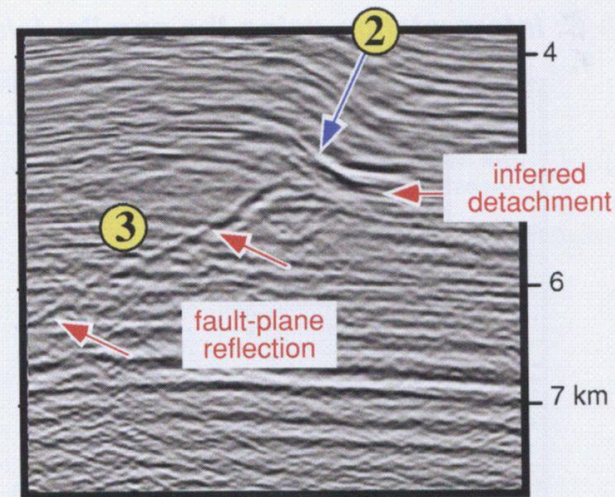
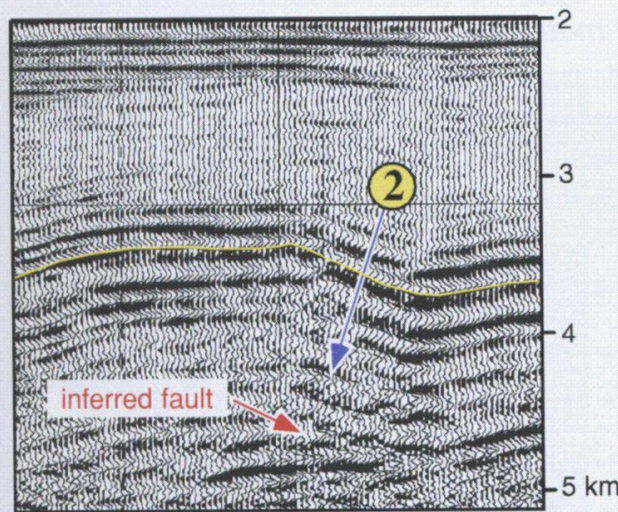


### ***fault cutoffs***

Abrupt terminations (cutoffs) and duplications of prominent reflections constrain the position of a gently dipping thrust fault. (2-D seismic data, Permian basin, Texas, U.S.A.)

### ***kink-band terminations***

Thrust faults and bed-parallel detachments can be identified by the abrupt, downward terminations of kink bands. Terminations are generally marked by regions of dipping reflections above horizontal or more gently dipping reflections, and may contain fault cutoffs. Dipping reflections in kink bands represent strata folded in the hanging wall of a thrust/reverse fault or detachment; whereas, horizontal or more gently dipping reflections represent footwall strata below the fault or detachment. Thus faults and/or detachments should be interpreted at the transition between these two dip domains.



Esempio di profili sismici in cui si possono riconoscere:

1 - *Fault cutoffs*:  
terminazione delle riflessioni o brusca variazione degli attributi

2 - *Kink bands*:  
“piega a gomito” degli strati

3 - Riflessione direttamente dal piano di faglia

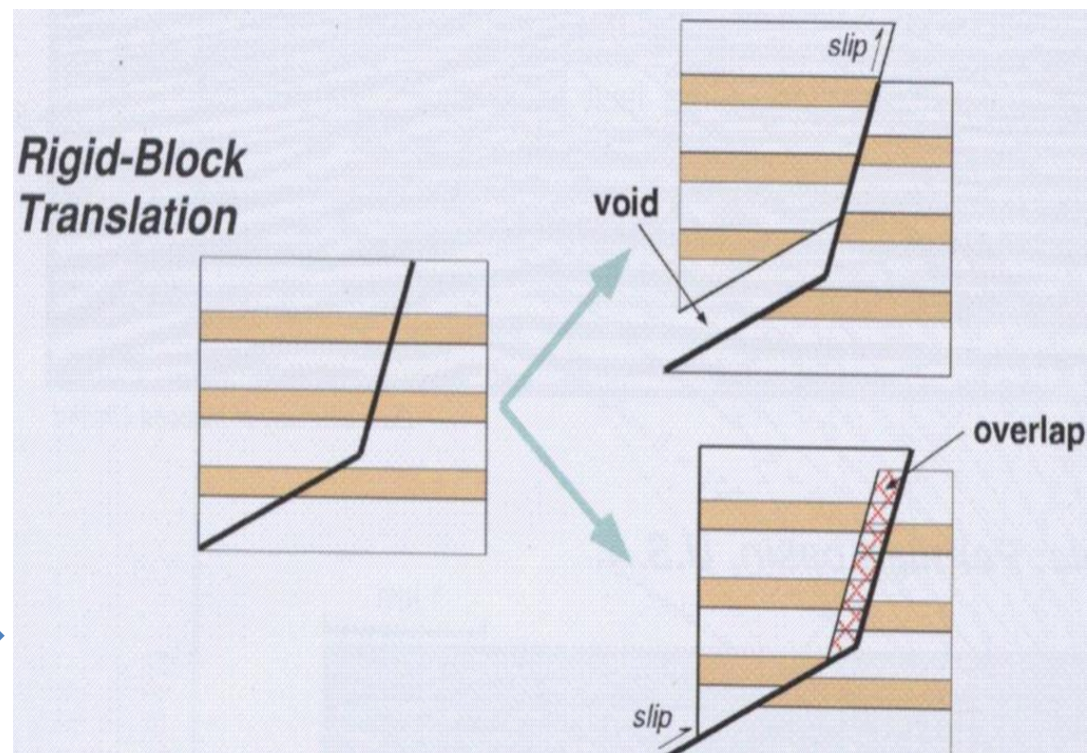
# Fault-bend folds

(bending of fault blocks as they ride over non planar fault surfaces)

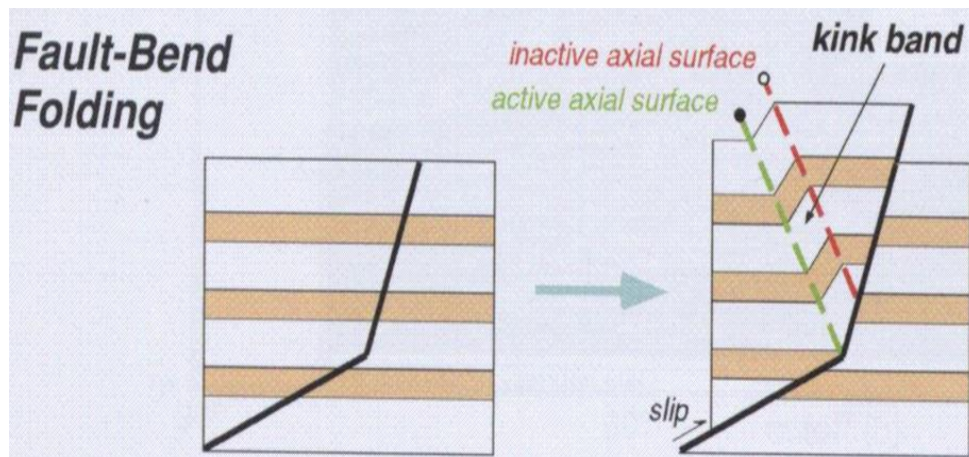
Si formano quando l'*hanging wall* si muove sopra il "gomito" di una faglia.

Nello scorrimento lungo segmenti diversi della faglia, la traslazione di un blocco rigido produrrebbe un vuoto o una sovrapposizione tra i due blocchi delimitati dalla faglia. →

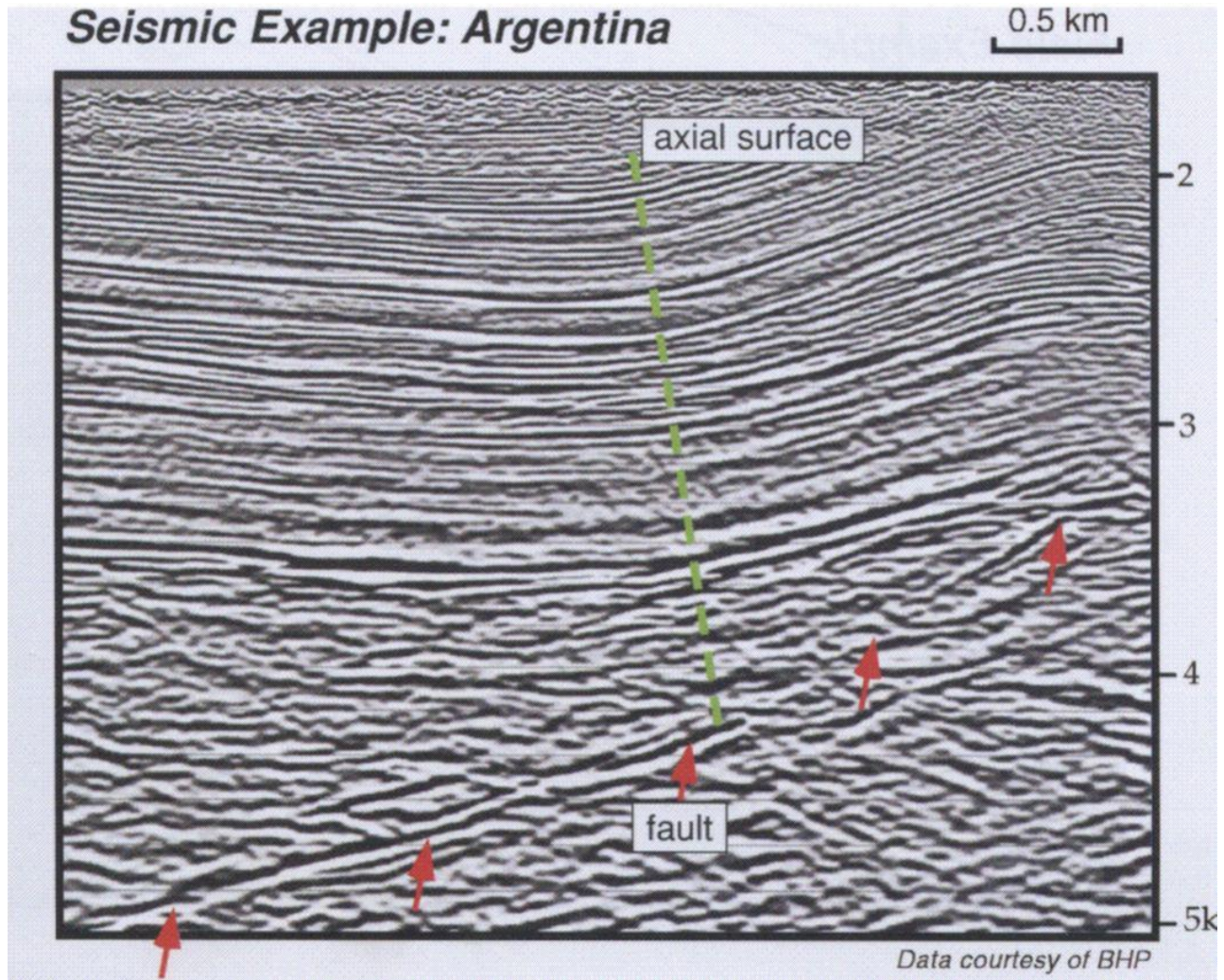
Entrambe queste situazioni sono irrealizzabili nella realtà.



L'accomodamento si ottiene attraverso la formazione di una piega nel blocco di *hanging wall*, localizzata lungo una **superficie assiale attiva**, mentre la **superficie assiale inattiva** localizza la superficie attiva nella fase iniziale.

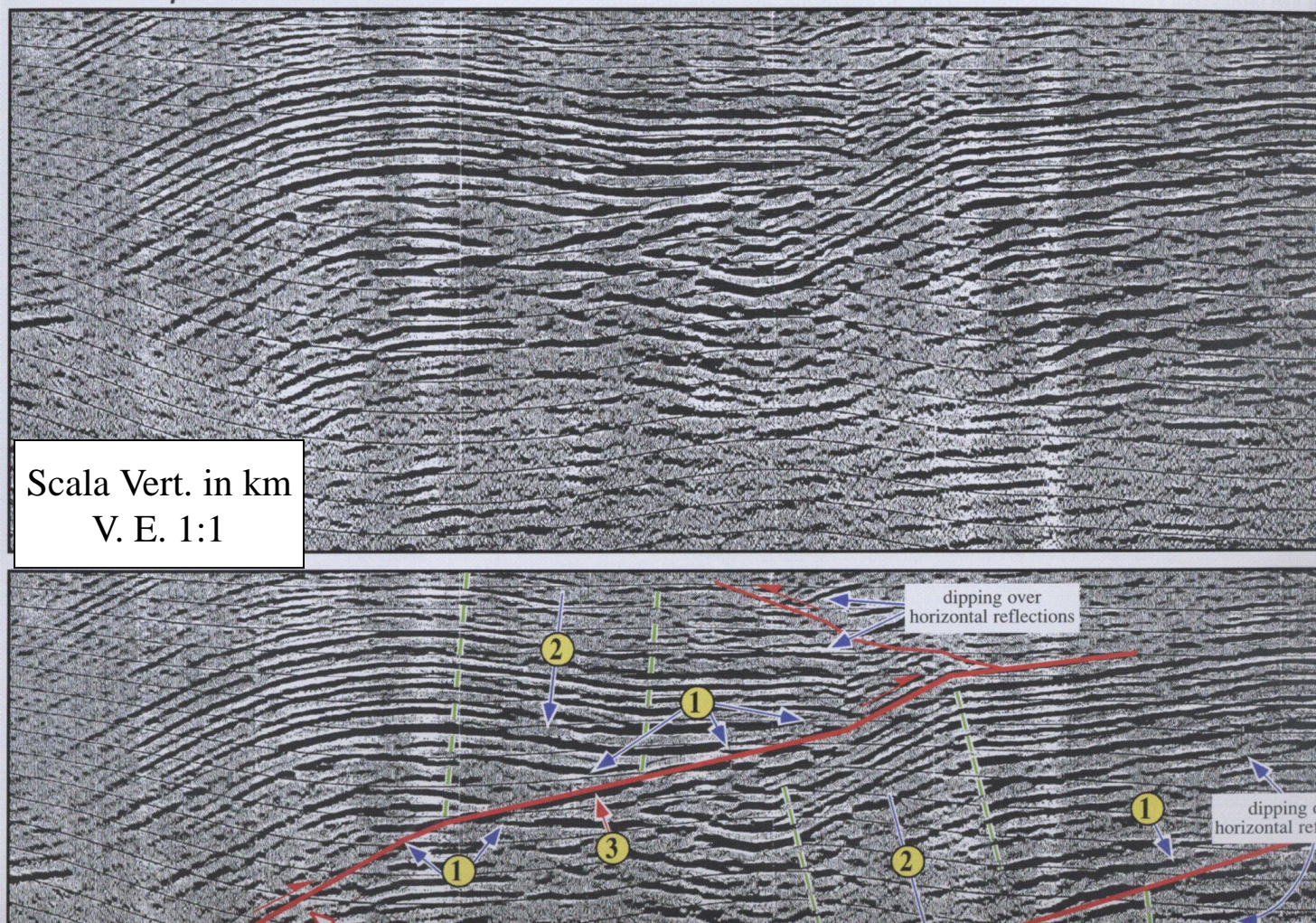


# *Fault-bend folds – esempio*

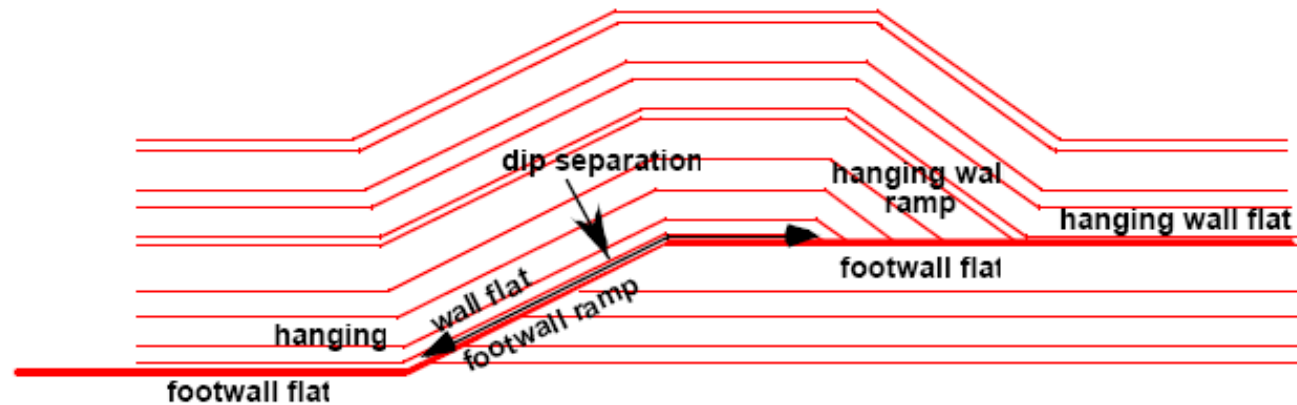




- Esempio di interpretazione di una faglia inversa basata sul riconoscimento di:
- 1 - *Fault cutoffs*: terminazione delle riflessioni o brusca variazione degli attributi
  - 2 - *Kink bands*: “piega a gomito” degli strati
  - 3 - Riflessione direttamente dal piano di faglia



## Geometria “*flat & ramp*”

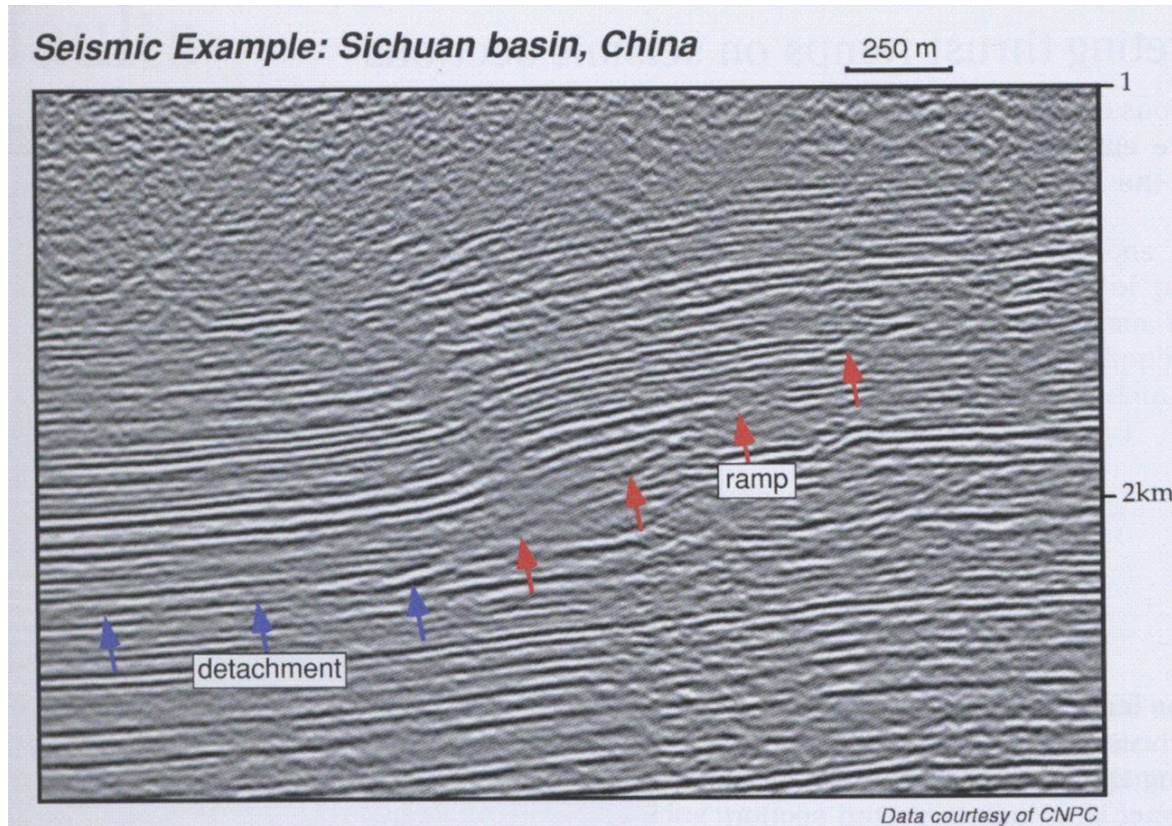


I piani di sovrascorrimento generalmente tendono a disporsi:

- parallelamente (*flat*) alla stratificazione nei sedimenti meno resistenti, quali evaporiti o argille
- tagliando (*ramp*) la stratificazione nei sedimenti più resistenti, quali calcari, arenarie, etc.

Questo determina spesso un’alternanza di tratti di faglia sub-orizzontali ed inclinati, per lunghezze variabili.

# Detachment Faults

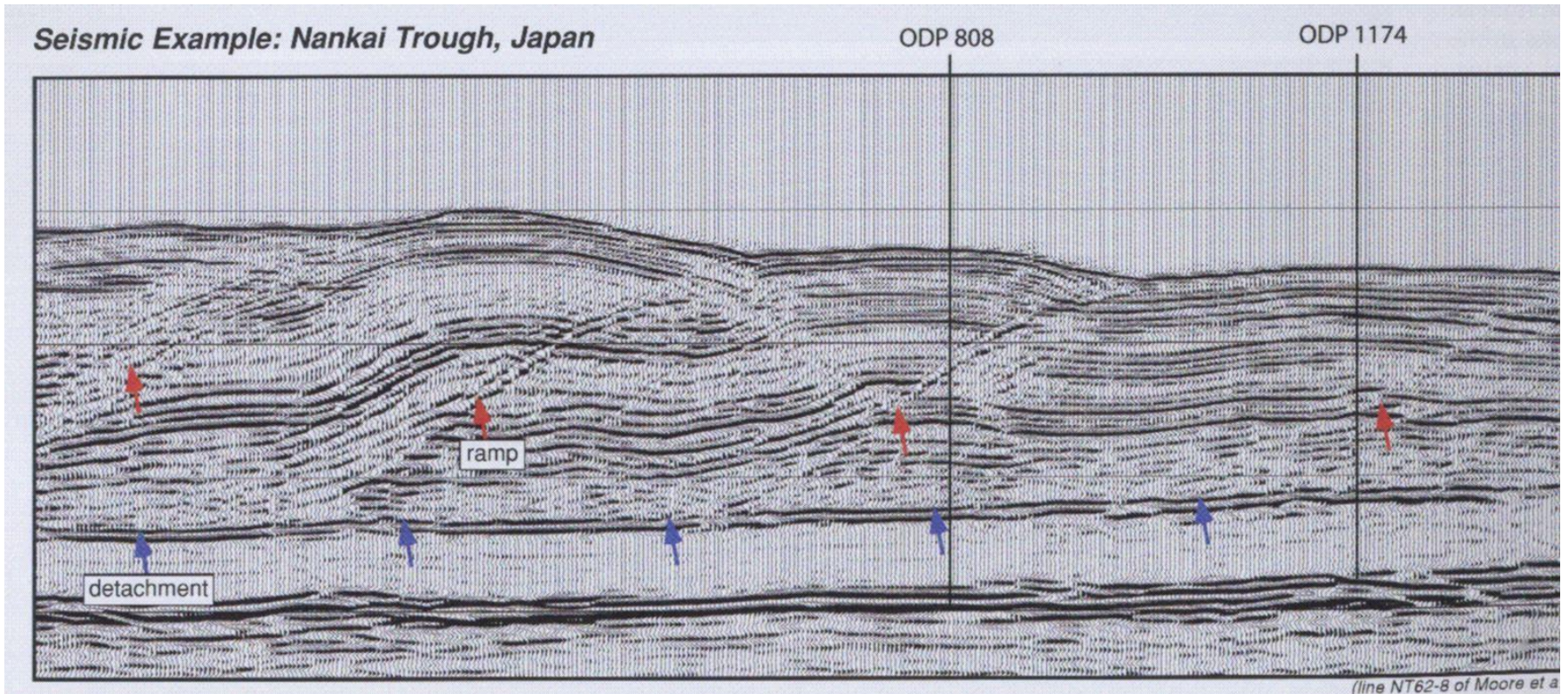


Si tratta di faglie che giacciono lungo uno o più orizzonti stratigrafici, con andamento quindi orizzontale o debolmente inclinato.

In catene a pieghe e *thrust*, vengono anche definite come “*decollement*”.

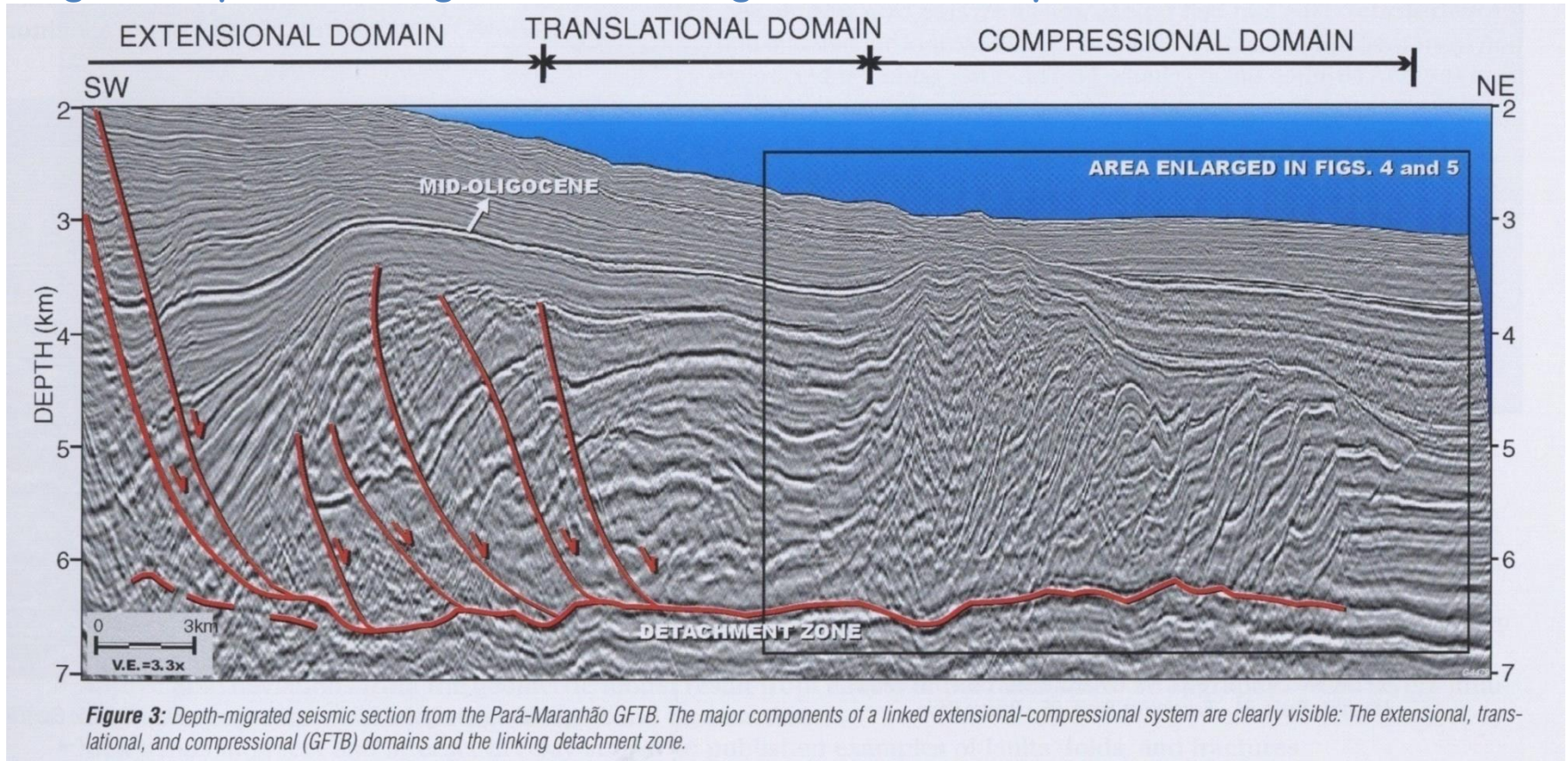
Non sono di solito direttamente interpretabili lungo un profilo sismico (coincidono con una discontinuità litologica), ma sono deducibili alla base e/o alla sommità dei *thrust ramps*.

# Esempio di *detachment* lungo un profilo sismico (riflettore indicato da frecce blu)



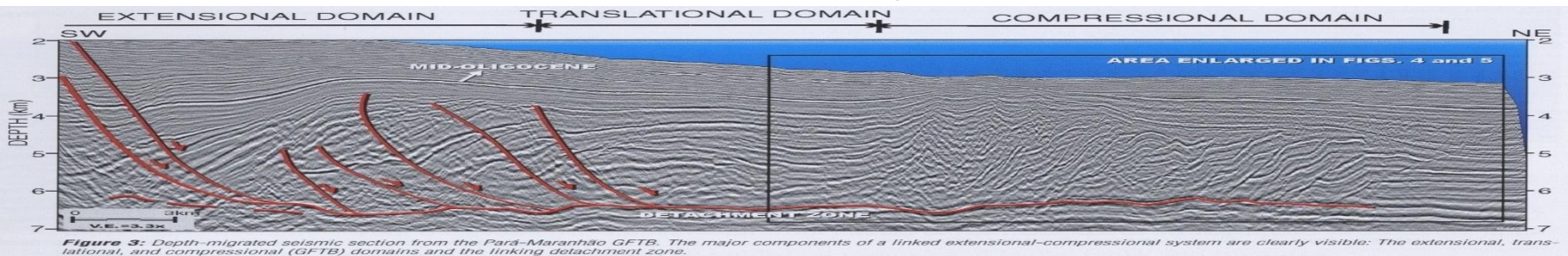
Le frecce rosse indicano i tratti “*ramp*”

## Faglie compressive originate da effetti gravitativi: esempio nell' *offshore* del Brasile

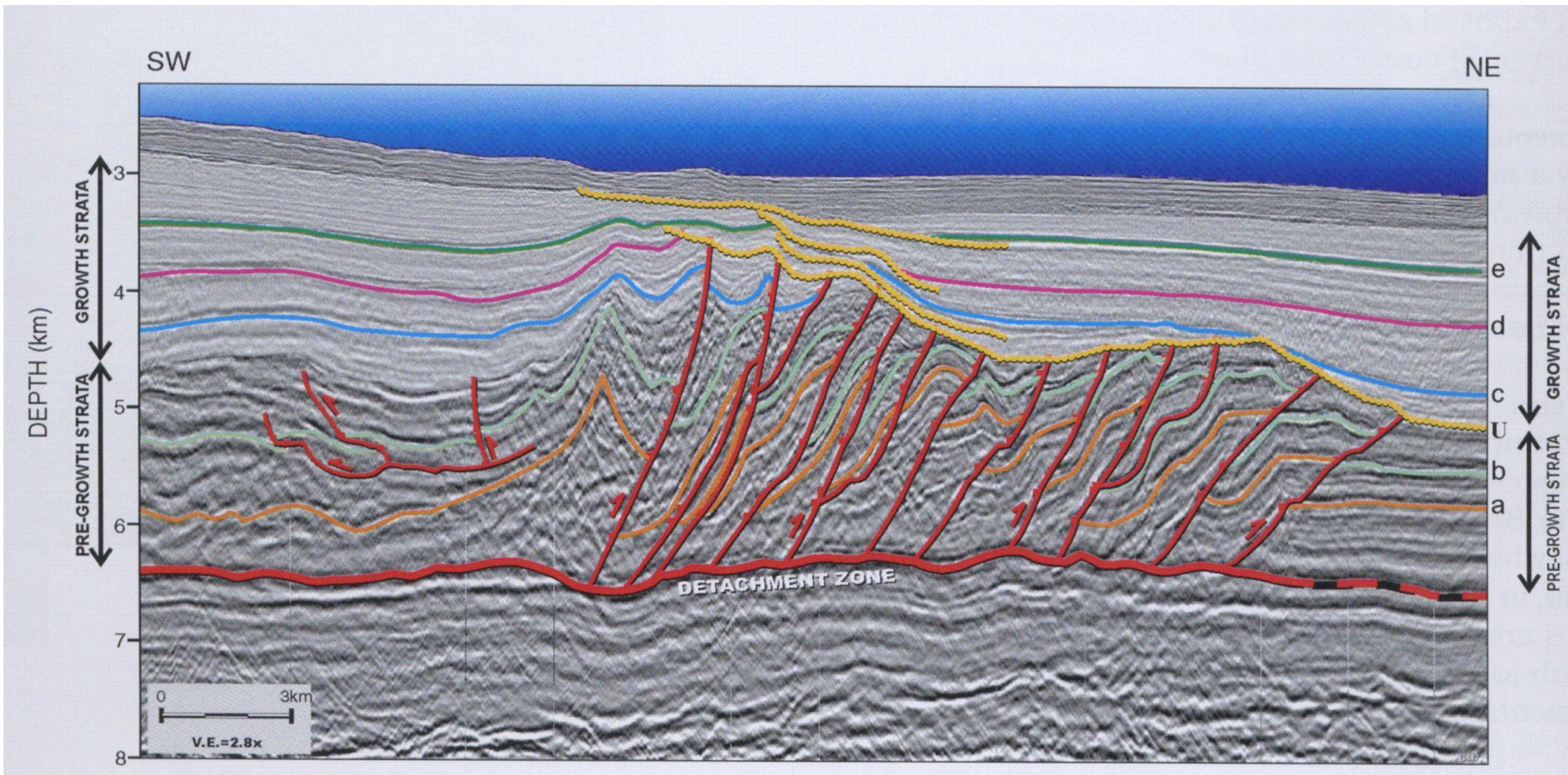


Il *detachment* funziona da superficie di scivolamento sia nell'ambito della tettonica distensiva/gravitativa (a sinistra) che compressiva (a destra).

Sotto: lo stesso profilo senza esagerazione verticale.

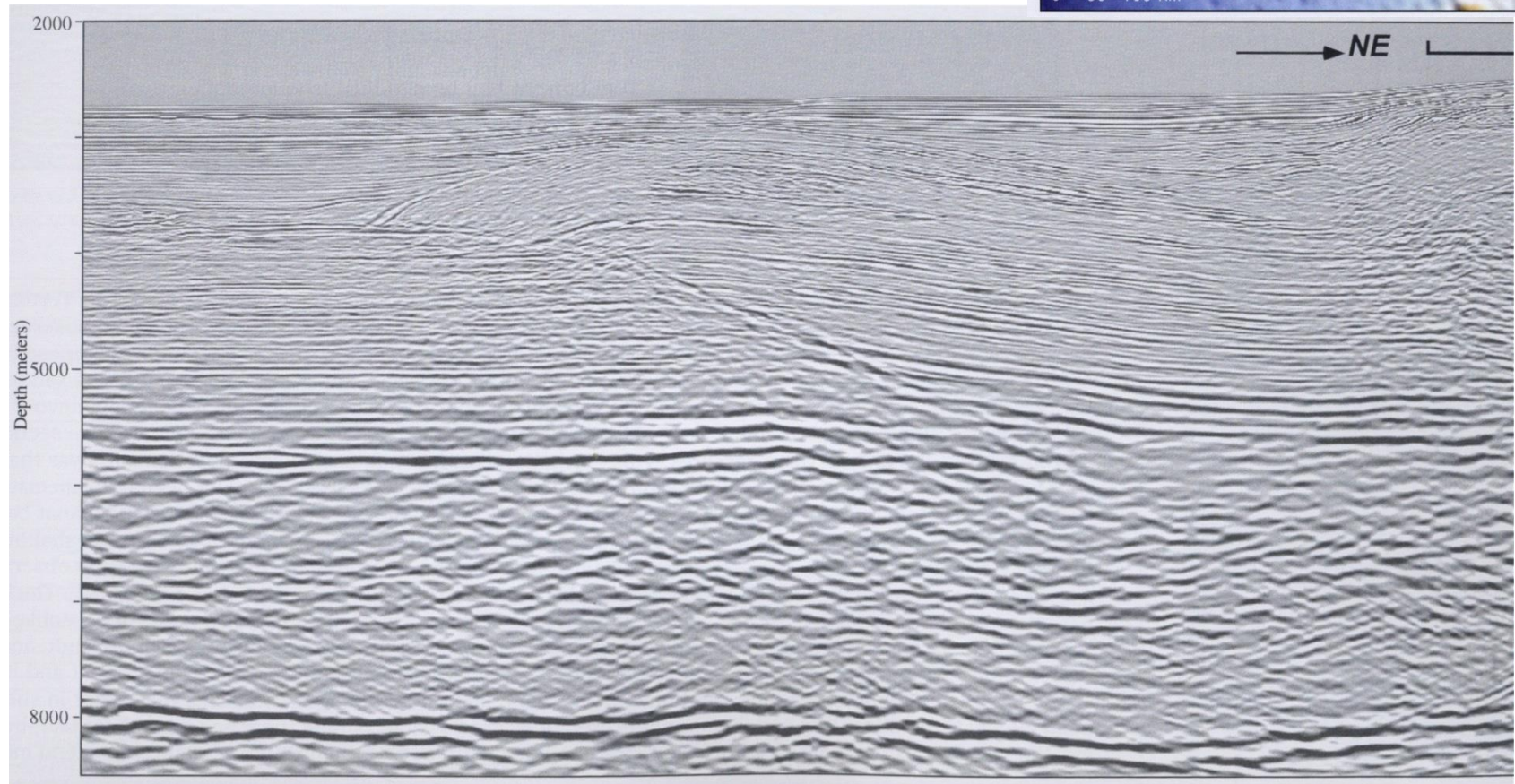
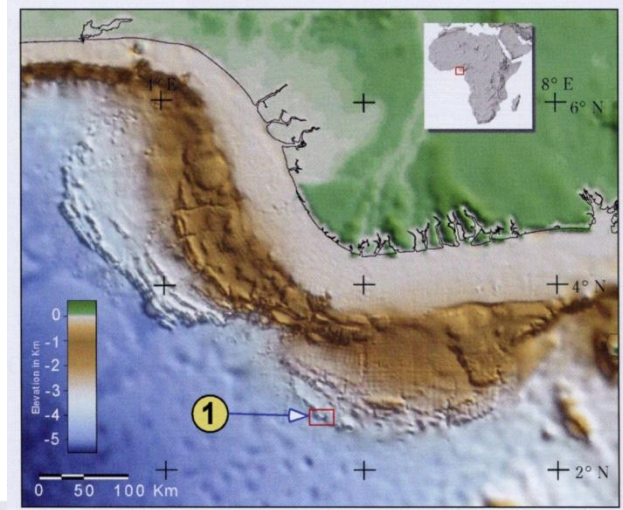


# Dettaglio del profilo sismico precedente: dominio compressivo



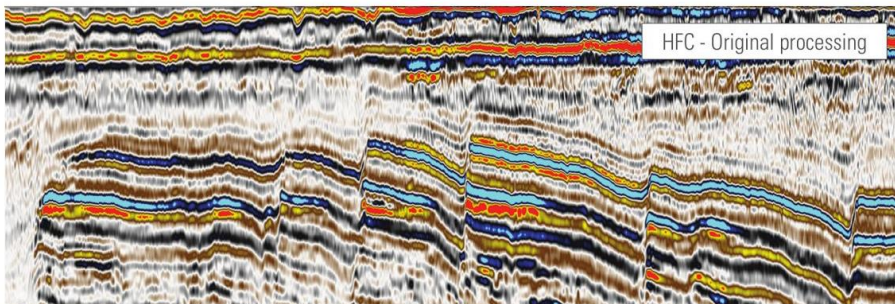
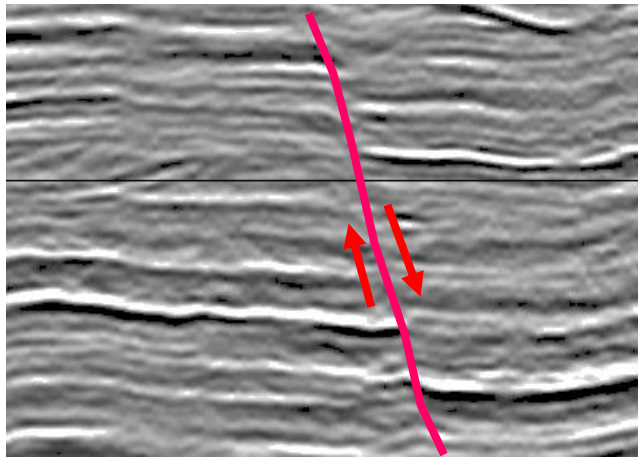
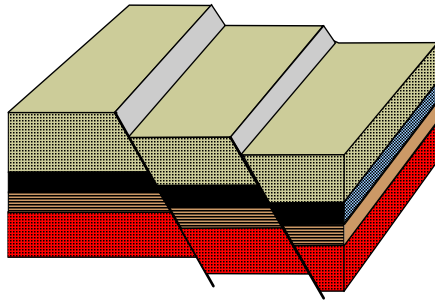
Faglie compressive originate da effetti gravitativi,  
esempio nel delta del Niger:

I depositi clastici marini, di età Cretacico-Attuale,  
giacciono su crosta oceanica o su frammenti di crosta  
continentale. Le strutture compressive sono dovute al  
collasso gravitativo attivo a monte,  
lungo la scarpata continentale.

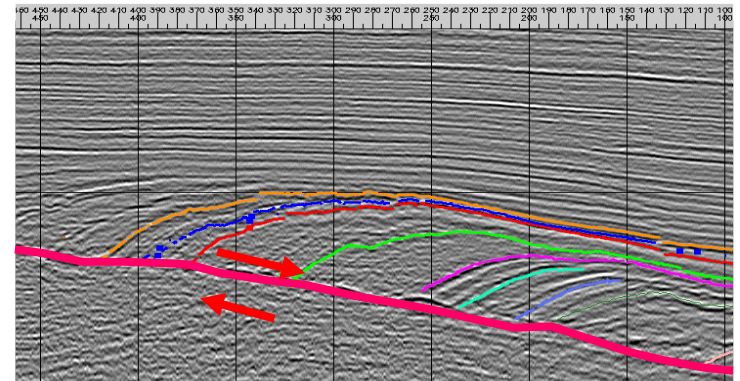
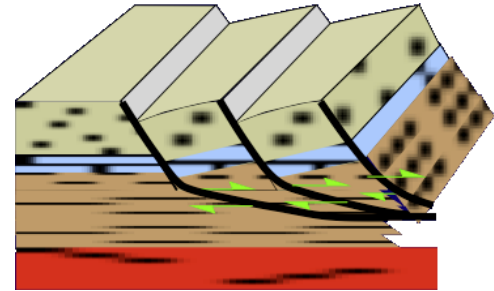


# Faglie normali

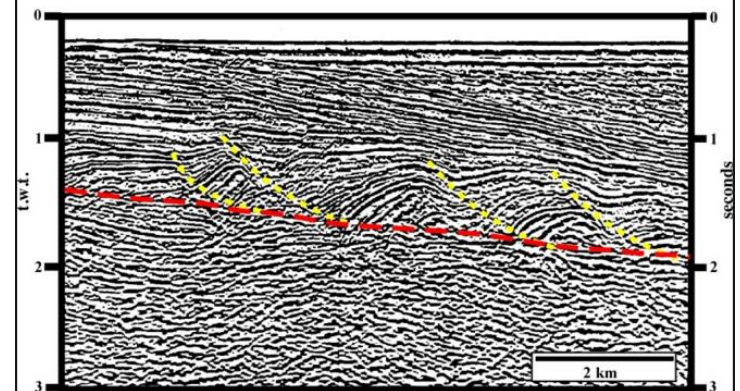
## Planari



## Listriche



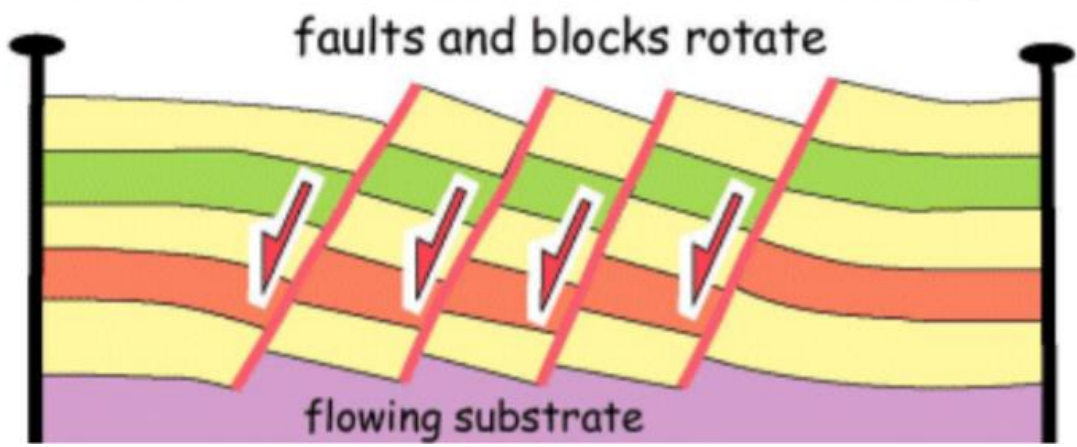
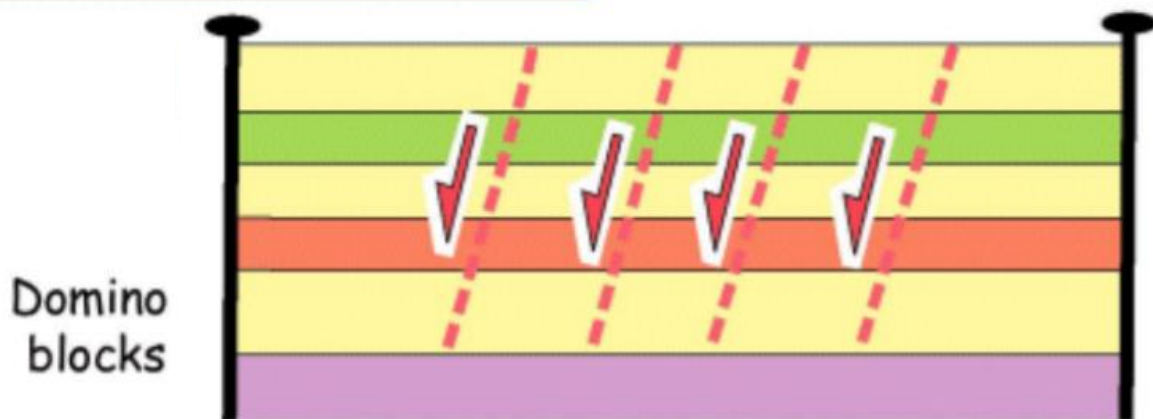
**Detachment Surface**





sistemi a domino

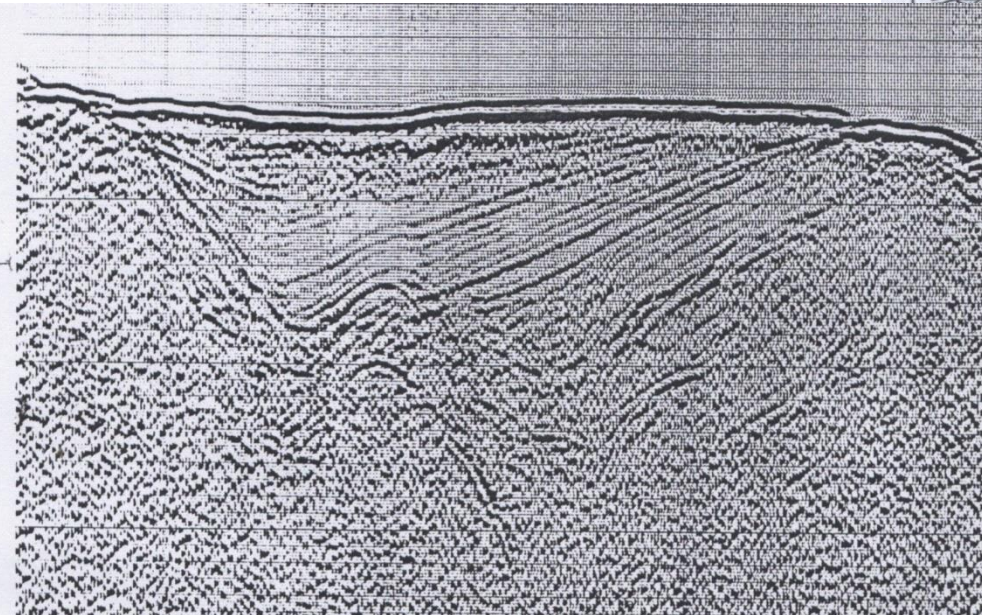
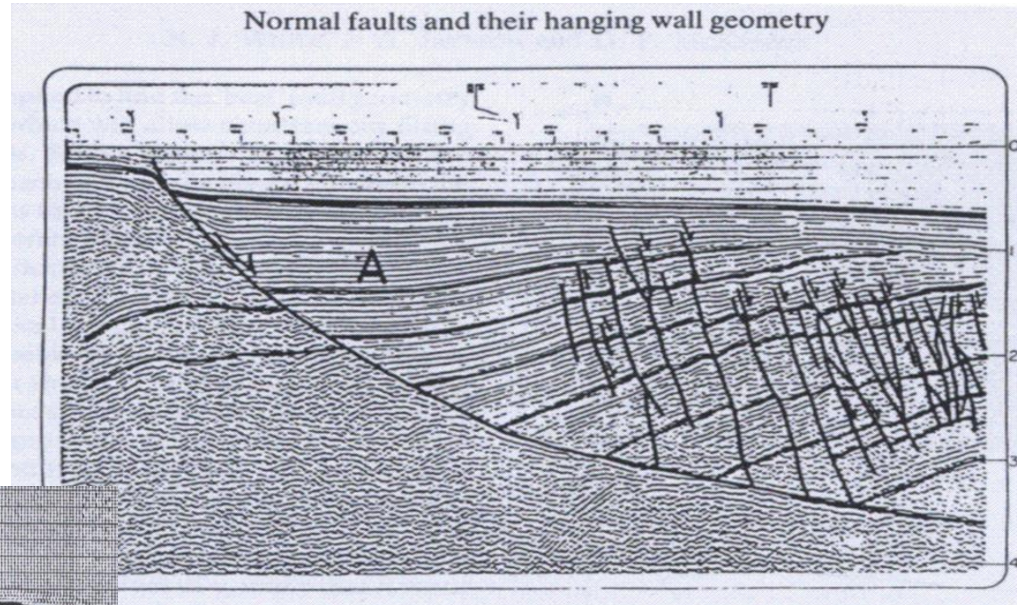
# Planar Normal Faults



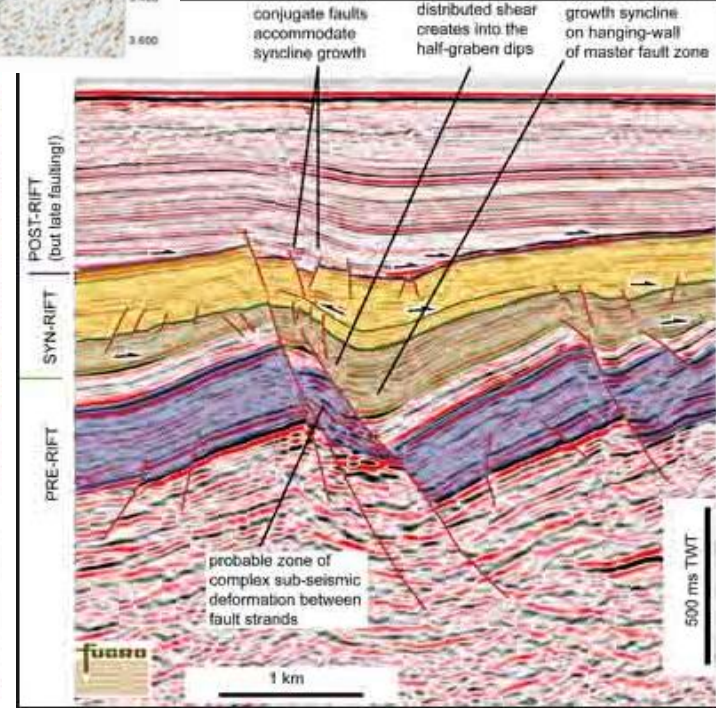
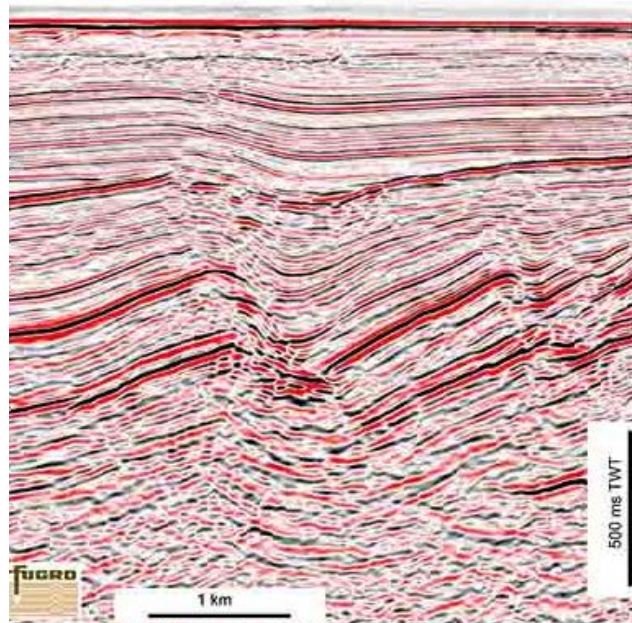
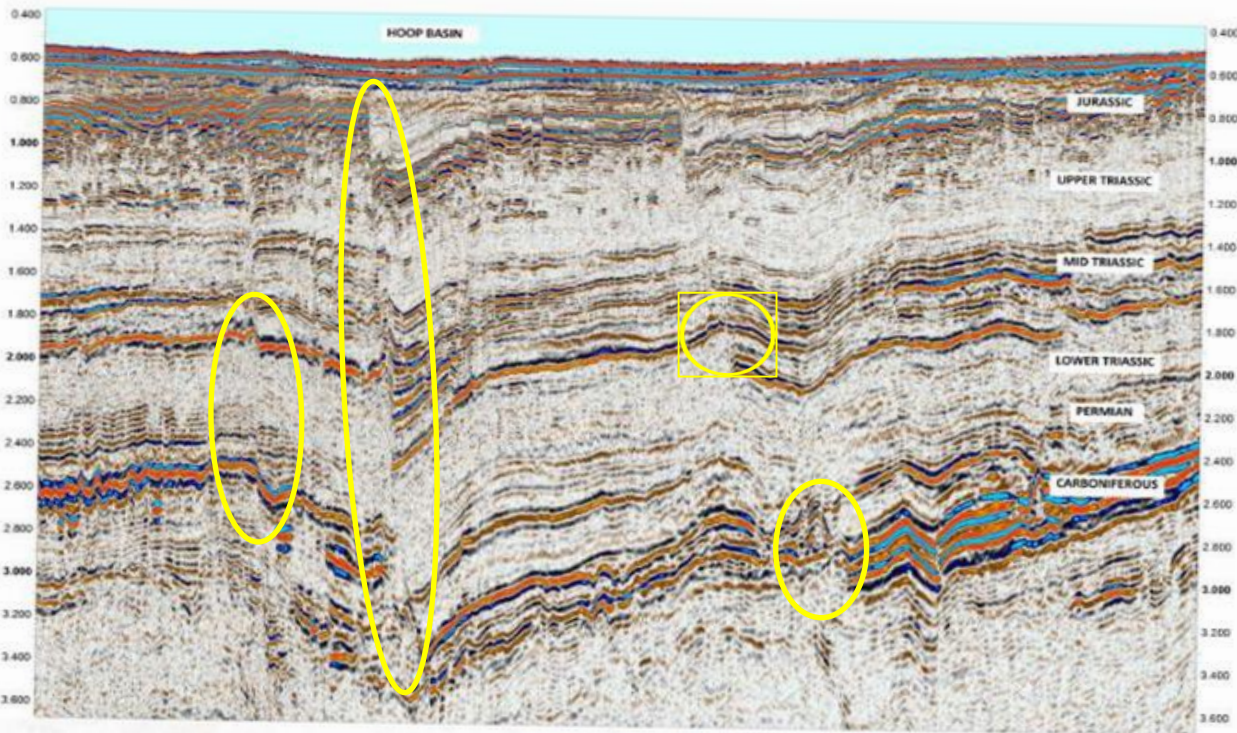
# *GROWTH (o SYNTECTONIC) STRATA*

Sono intervalli stratigrafici deposti durante la deformazione.  
La loro età definisce, quindi, l'età della deformazione.

In regime distensivo danno luogo ad un caratteristico cuneo sedimentario (*sedimentary wedge*): in tale contesto possono assumere notevole importanza i fenomeni di *tuning*.



A sn: cuneo sedimentario sintettonico nello Ionio occidentale, testimone di una deformazione a carattere distensivo



# Esempio di *Growth Stratum* in Appennino Meridionale

Il *growth stratum* è indicato dalla freccia gialla (sintettonico), con terminazioni a sn in *pinch-out*, a ds in *on-lap*. La sequenza soprastante, sub-orizzontale, con terminazioni in *on-lap* su entrambi i lati, è successiva alla deformazione tettonica

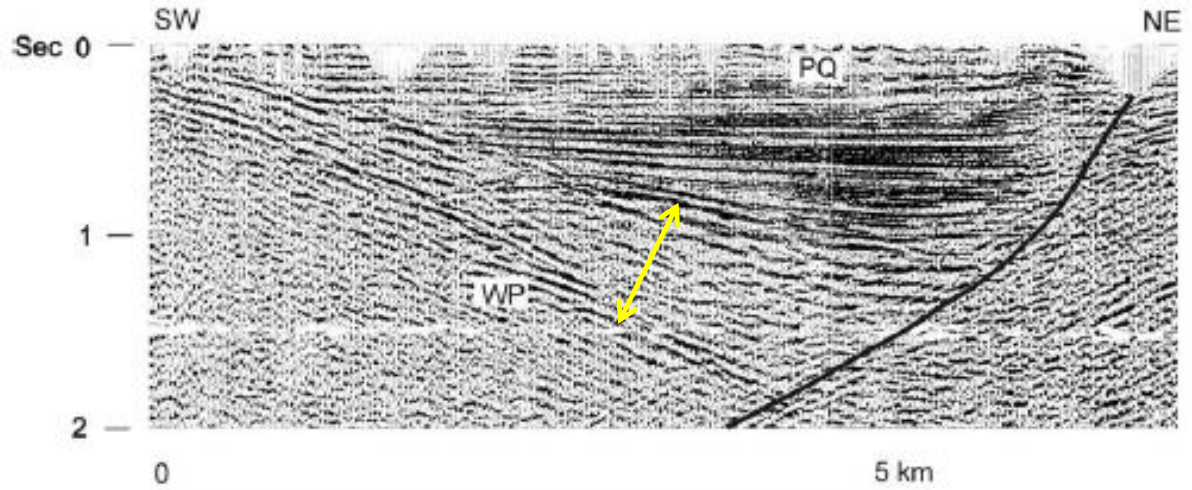
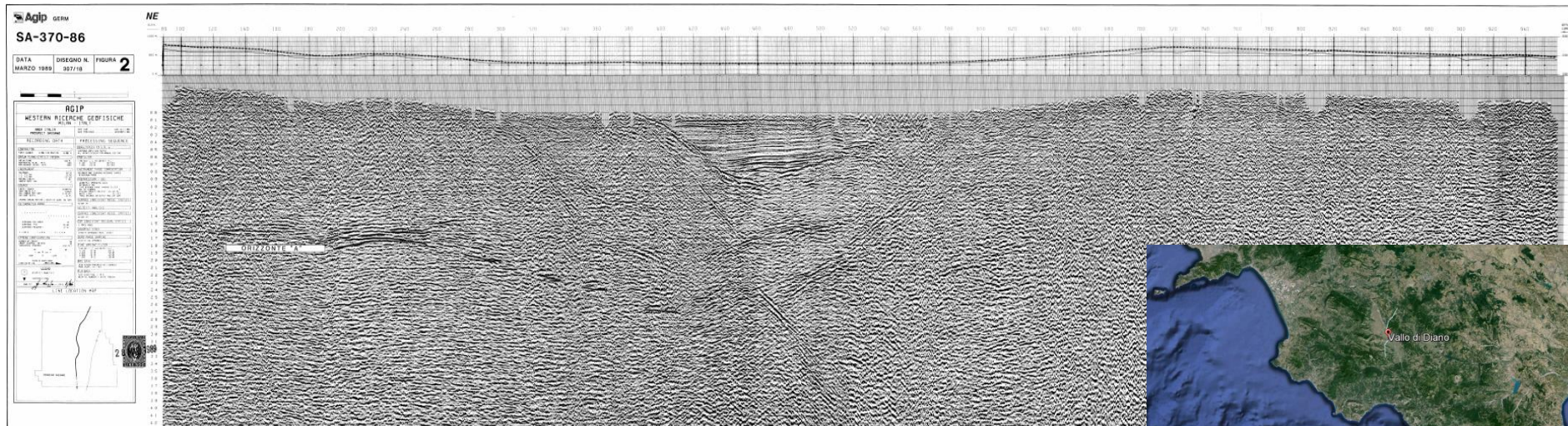


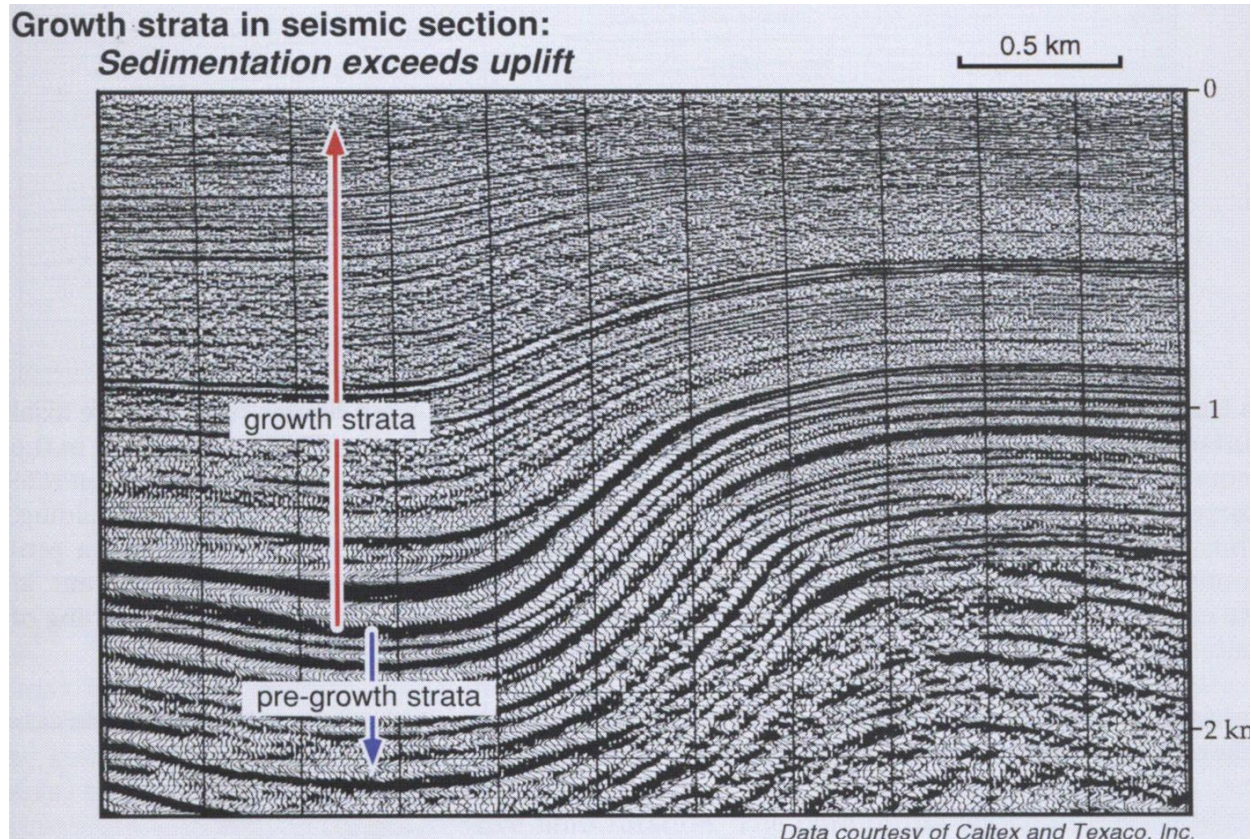
Figure 9. Seismic line over the Vallo di Diano Basin.



# GROWTH o SYNTECTONIC STRATA

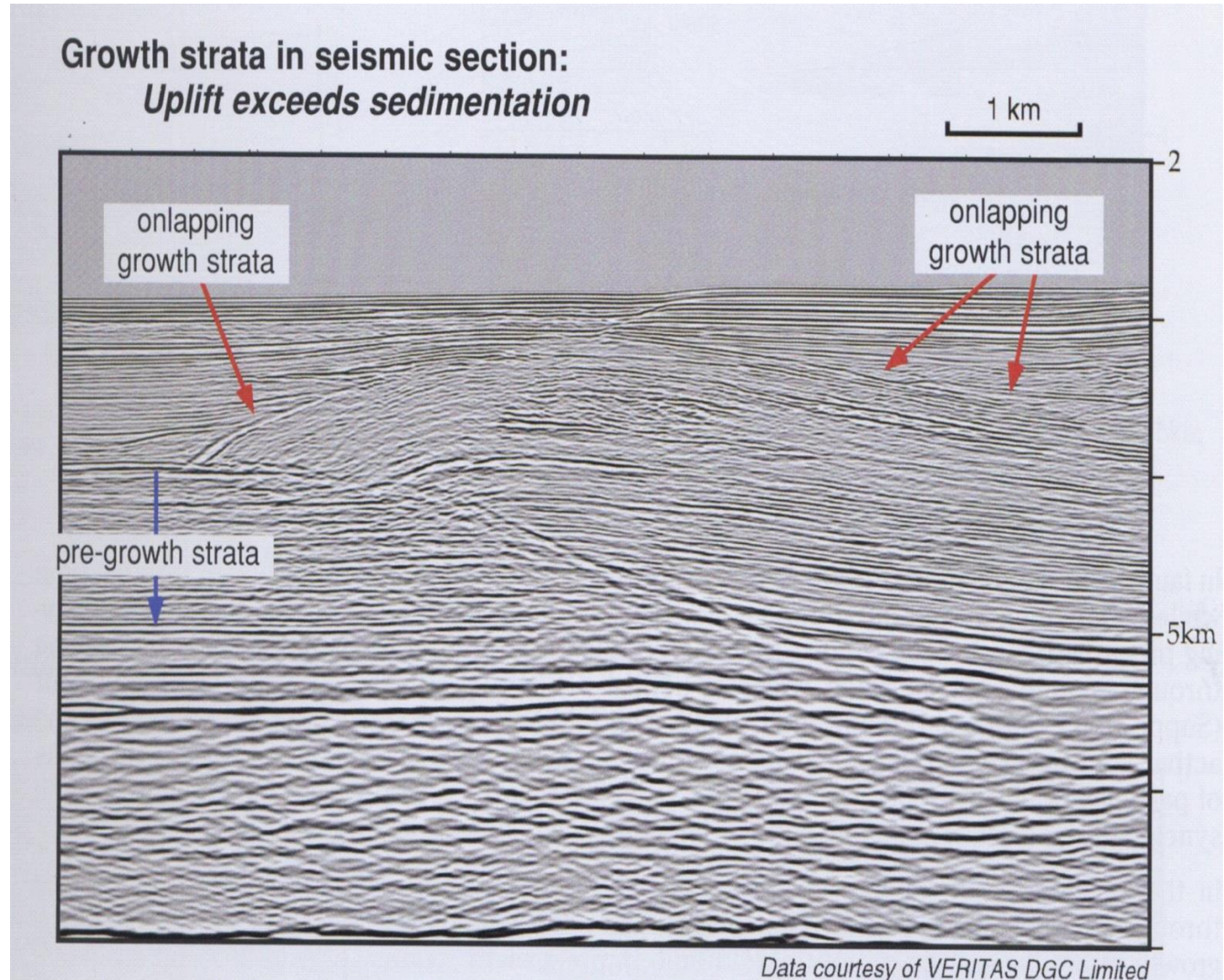
In regime compressivo i *growth strata* si assottigliano verso l'alto strutturale.

La variazione laterale di spessore denota la sedimentazione sintettonica.



# GROWTH STRATA - Esempio

In genere i *growth-strata* non sono presenti sopra il culmine della struttura piegata, ma accompagnano spesso il piegamento ai lati della struttura stessa, terminando in *on-lap* su di essa. Sono solitamente ricoperti da sedimenti post-tettonici (paralleli e orizzontali).

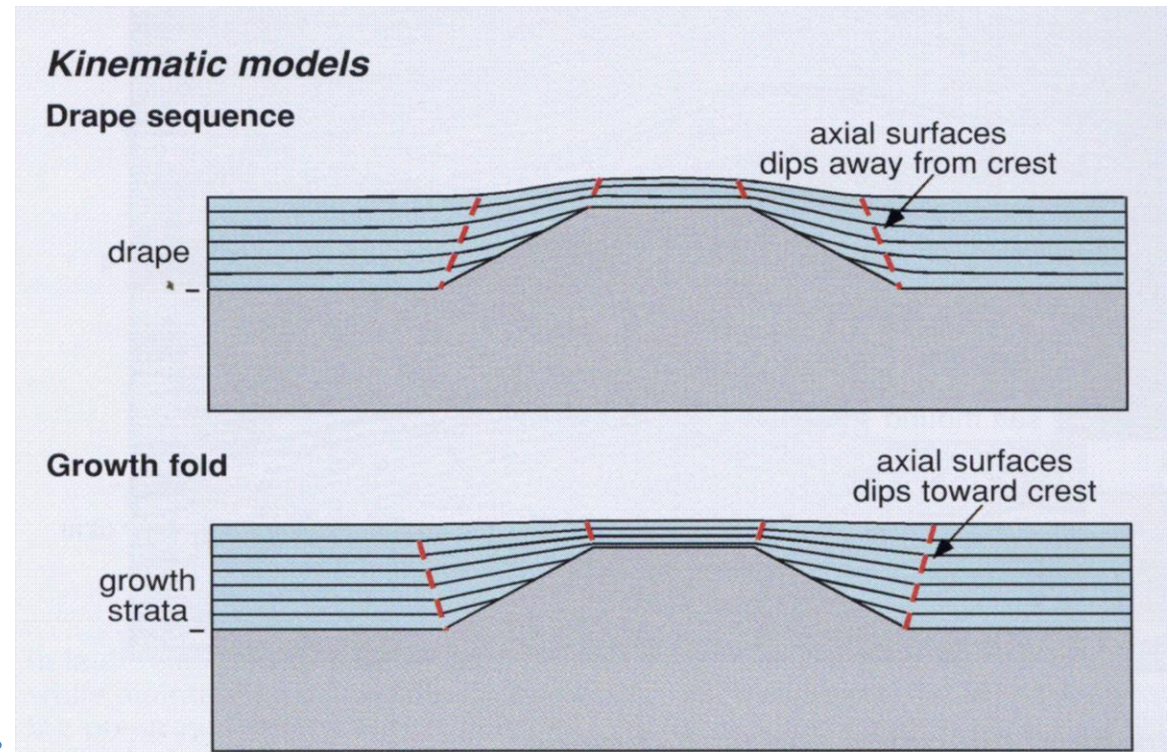


# Analogia tra “*growth folding*” e “*drape folding*”

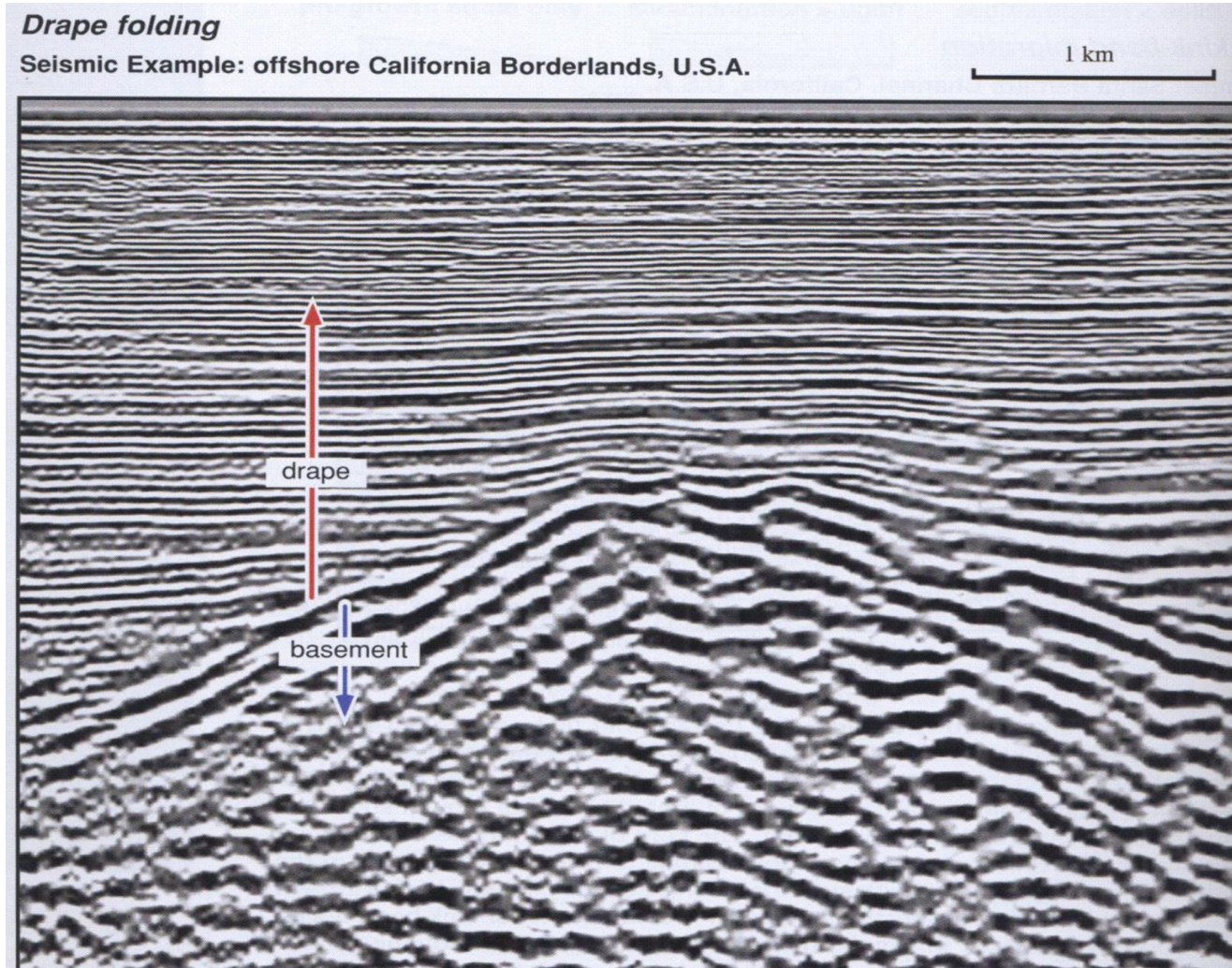
Una “*sedimentary drape sequence*” è un intervallo stratigrafico depositosi sopra una struttura dopo che la deformazione sia cessata. I sedimenti possono essere leggermente inclinati sia per deposizione primaria che per compattazione differenziata.

Talvolta tali sequenze possono assomigliare a dei *growth strata*, inducendo ad errori nella valutazione della datazione della deformazione.

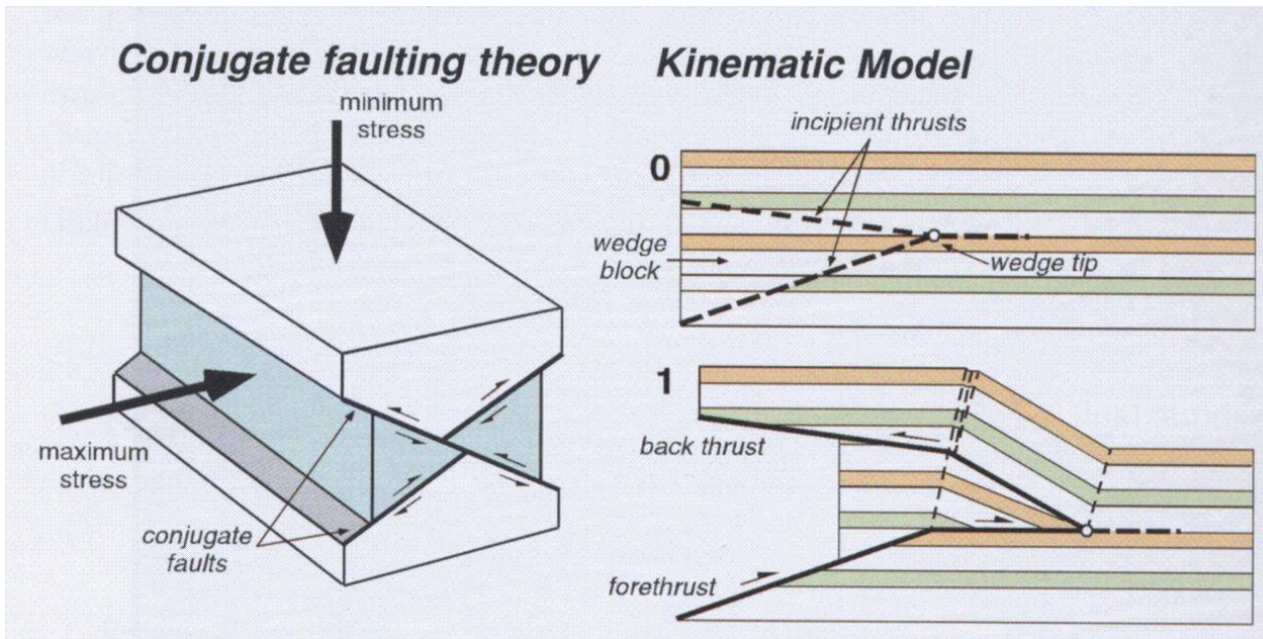
Anche se non sempre facili da distinguere tra loro, spesso gli assetti stratigrafici specifici permettono una corretta interpretazione: si notino le diverse vergenze delle superfici assiali.



Esempio di *drape sequence* silicoclastica in *on-lap* su un alto strutturale composto da rocce metamorfiche







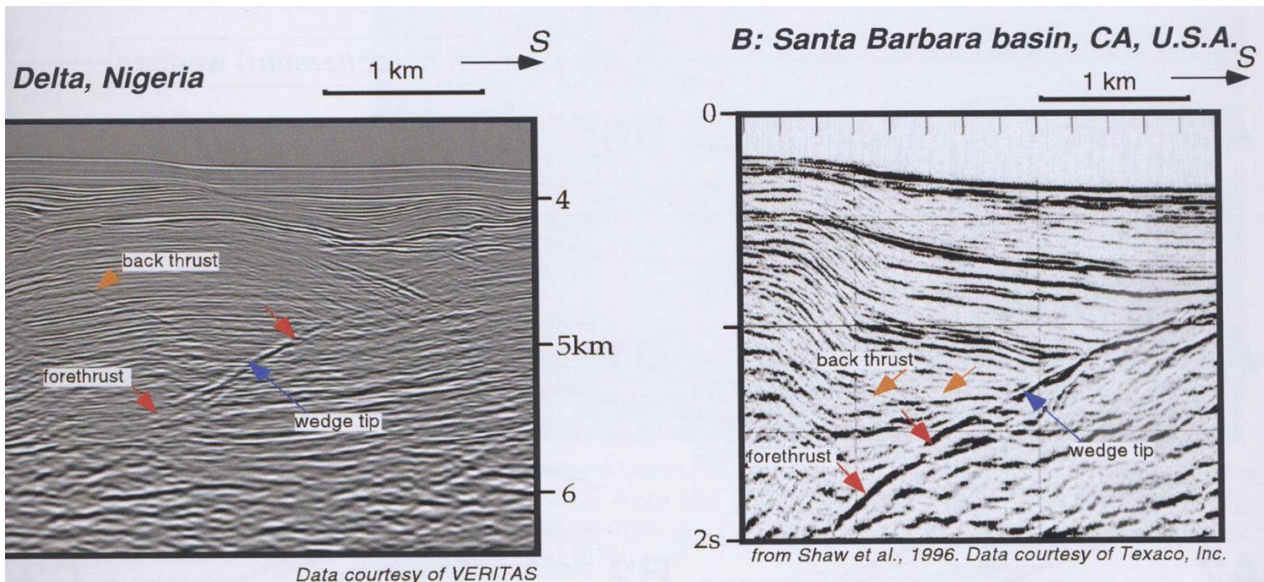
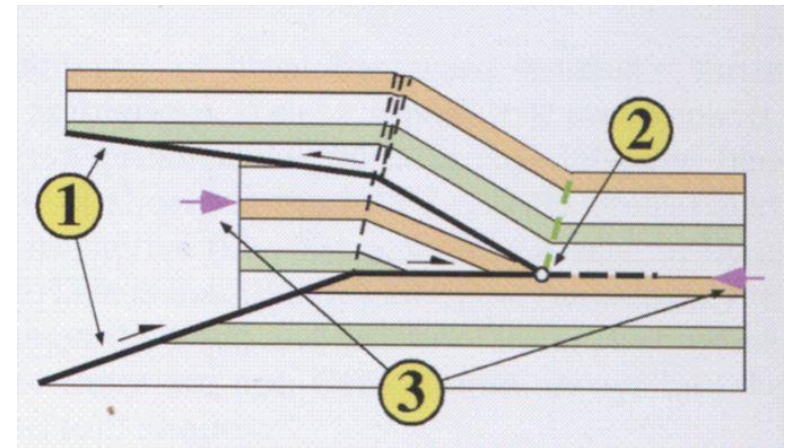
La fratturazione per compressione spesso porta allo sviluppo di due *thrust faults* coniugate con pendenze opposte. I piani di debolezza (per esempio superfici tra strati, ma anche antiche superfici di frattura), possono svilupparsi come piani di *detachment*.

I due *thrusts* coniugati limitano un *wedge-shaped block* e convergeranno nel *wedge tip*. Lo scivolamento lungo entrambe le faglie causa la propagazione del *wedge*.

Il *thrust* inferiore è generalmente definito *forethrust* o *sole thrust*, quello superiore *back* o *roof thrust*.

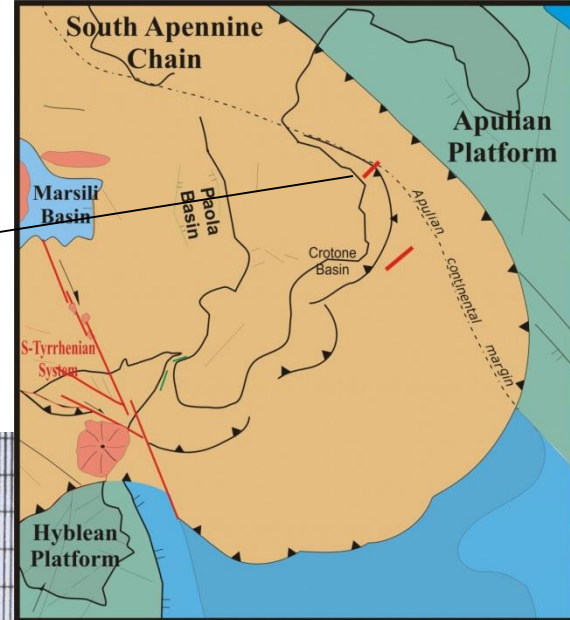
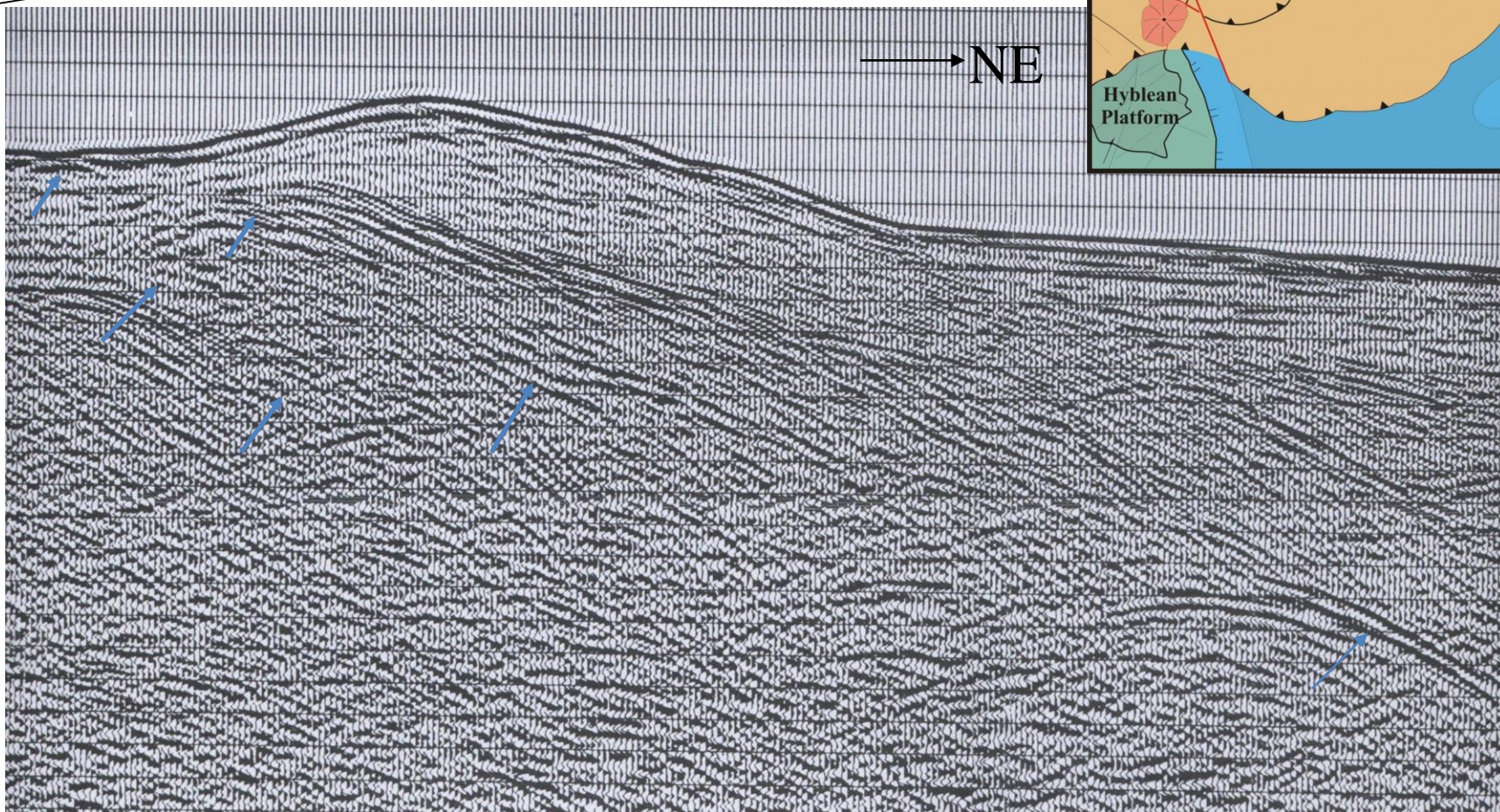
I *wedges* in regime compressivo possono assumere geometrie molto varie, comunque si possono riconoscere alcune caratteristiche comuni:

- 1 – presenza di *fore-thrust* e di *back-thrust* coevi
- 2 – piega localizzata lungo una superficie assiale attiva che parte dal *wedge tip*
- 3 – pieghe nel *footwall* del *back-thrust* che producono un rilievo.

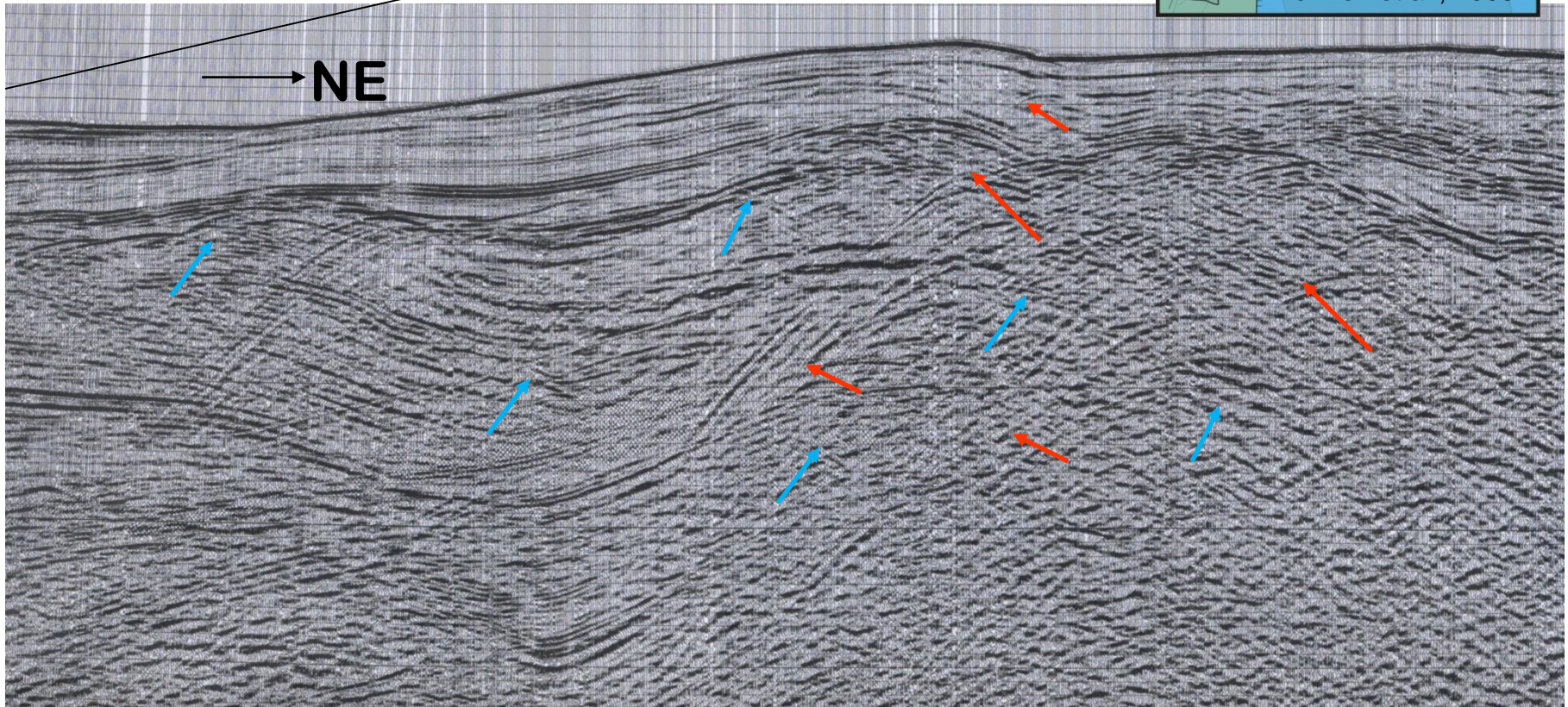
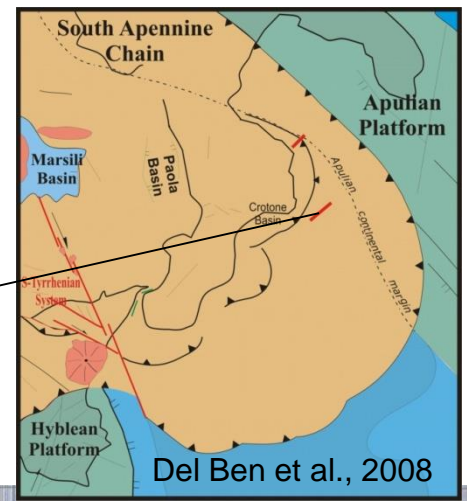


*Fault-bend folds e back-thrust: esempi*

# *Back-thrust nell'offshore Calabro*

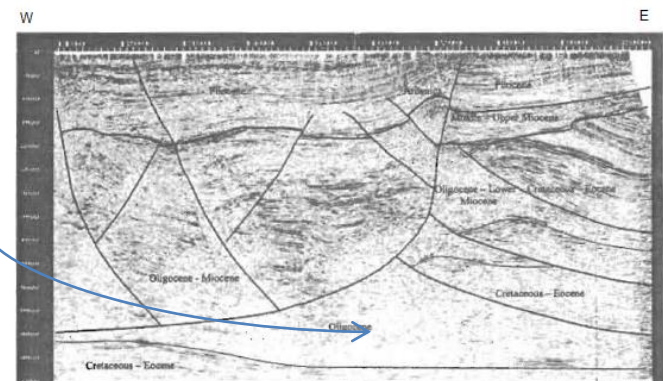
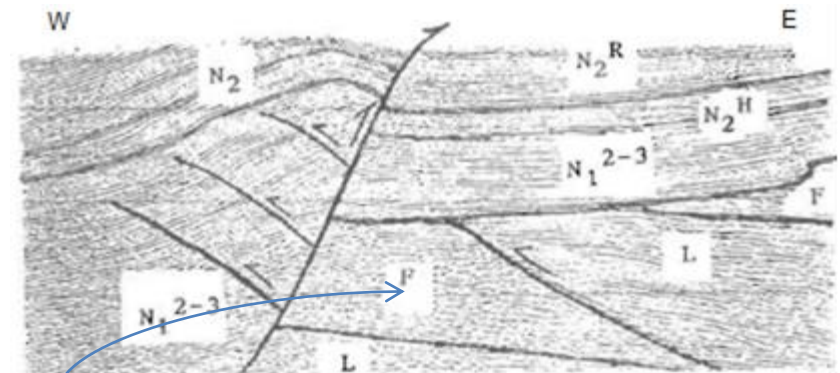
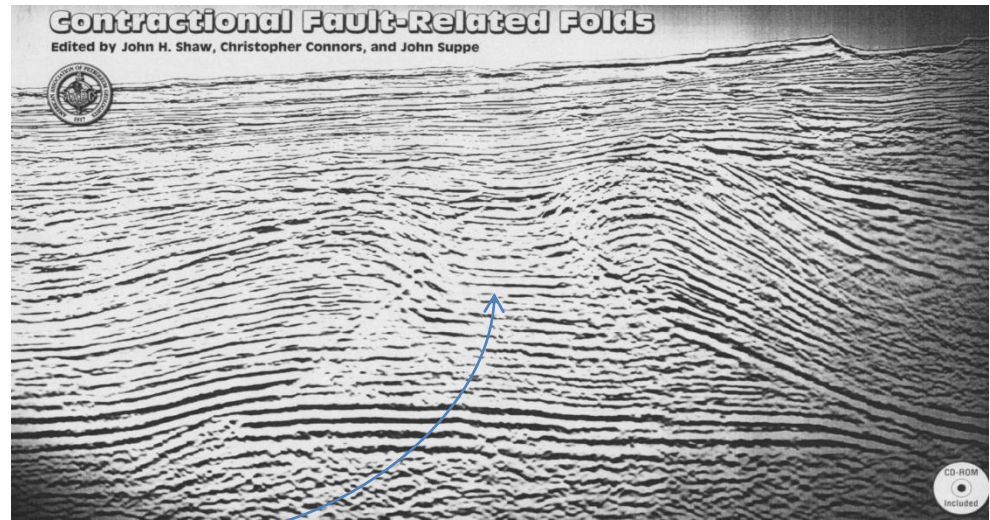


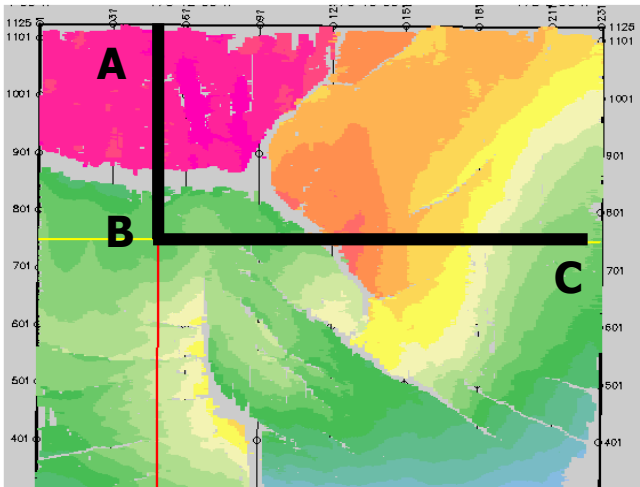
*Thrust* \ e *Back-thrust* /  
nell'offshore Calabro



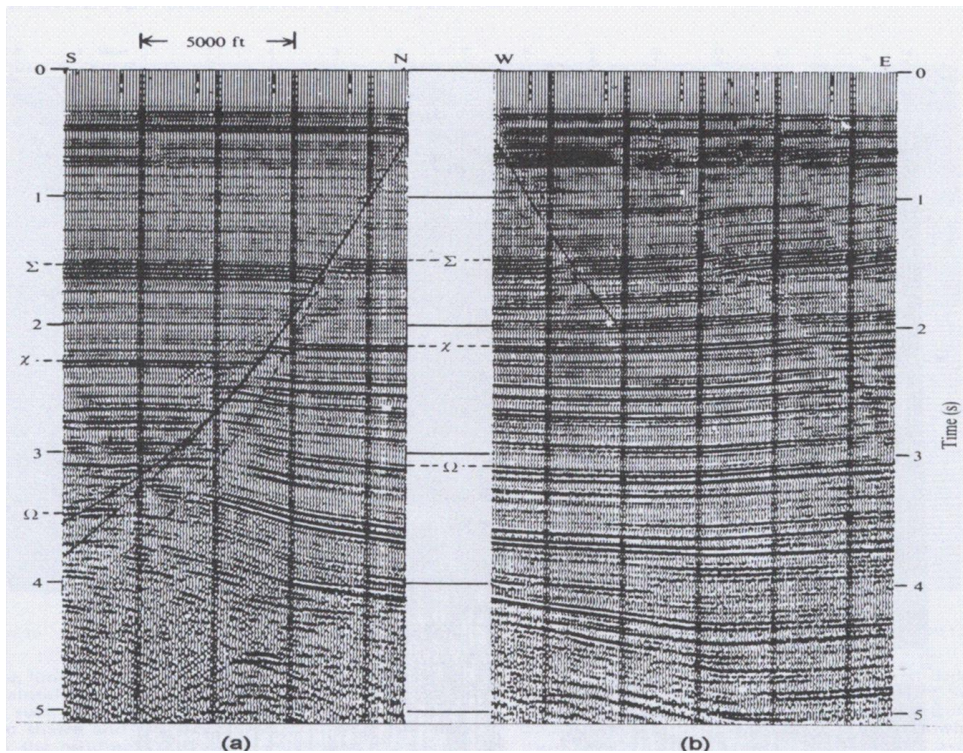
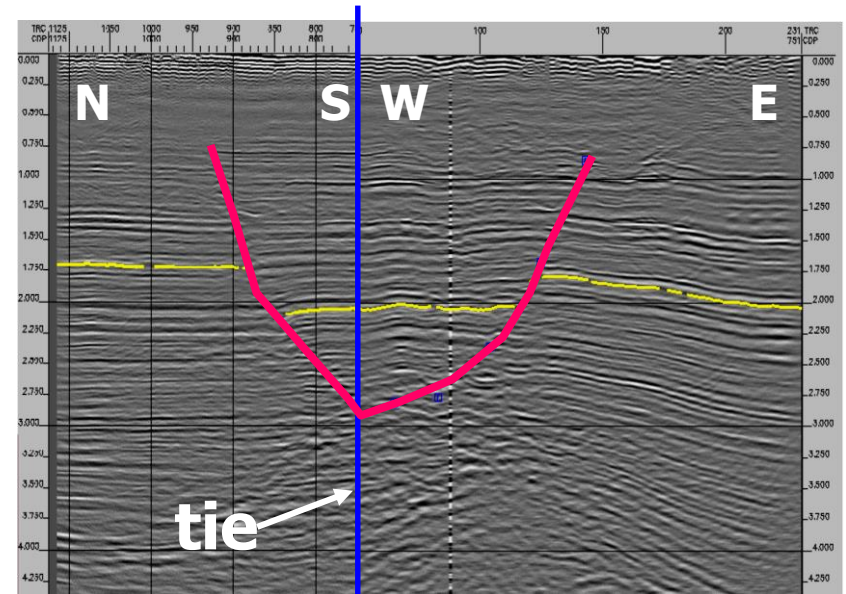
## Triangle Zone

Una combinazione data da *thrust* e *back-thrust* associati allo stesso piano di scollamento, può definire una zona a forma triangolare interposta tra tali faglie, dando luogo a tipiche strutture definite come “*triangle zones*”





Faults must tie on lines that intersect or the interpretation is not internally **consistent**

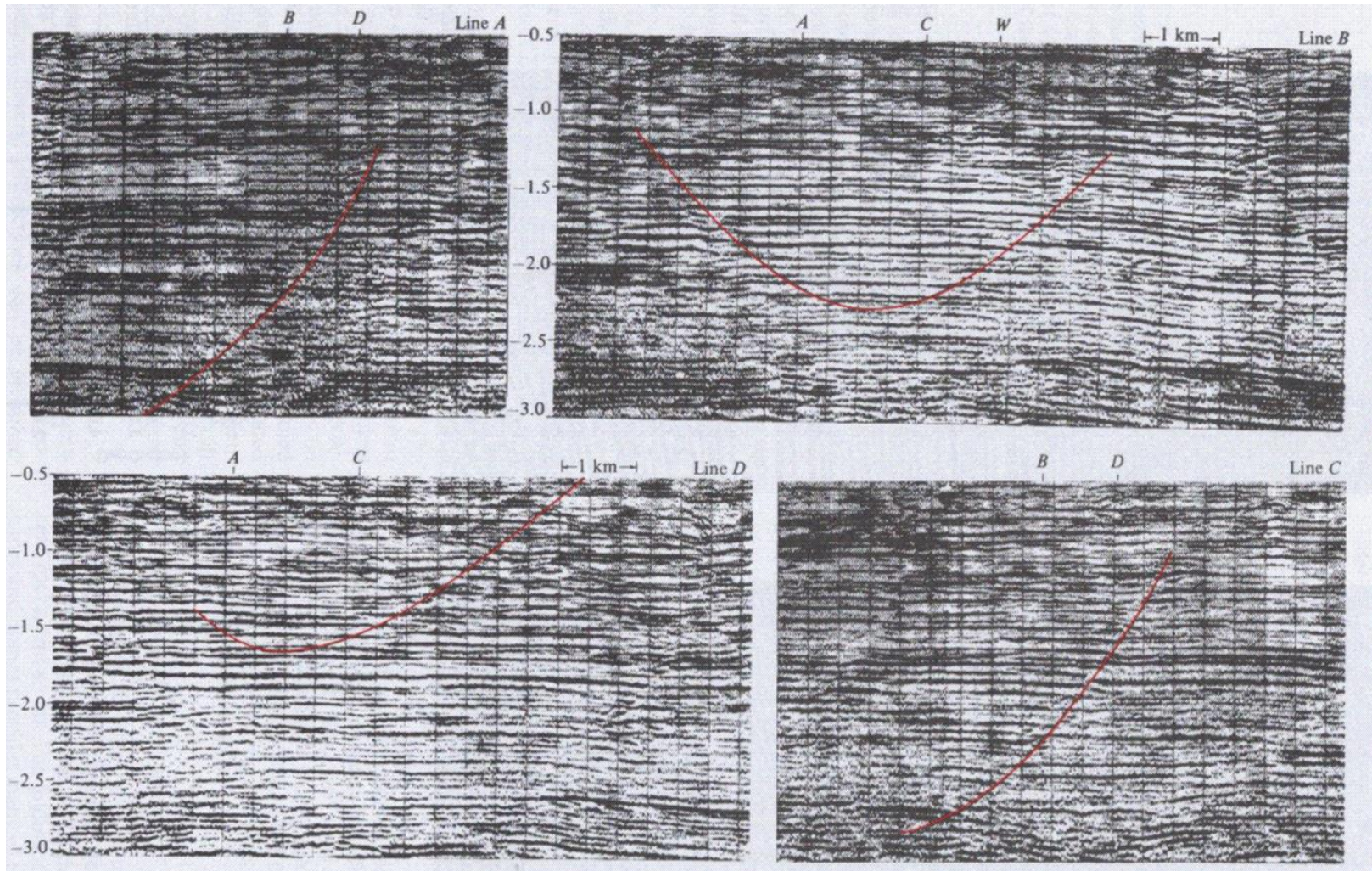
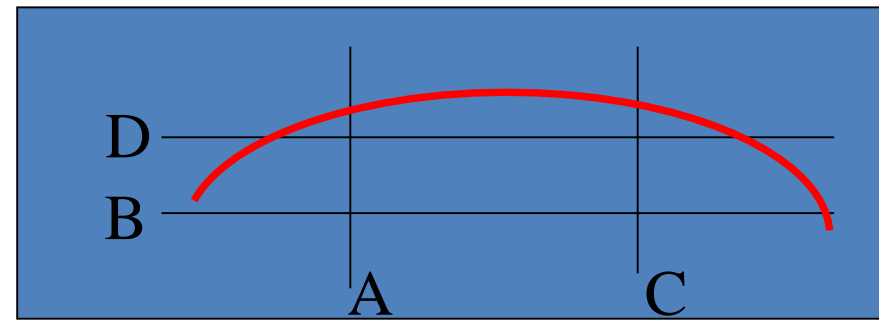


If a fault cuts a seismic profile, the fault plane should be recognized by cutoffs, king-bands and (eventually) reflection from the plane.

A crossing profile has to see the same fault at the same depth...

...you have to consider if you are interpreting stack or migrated profiles!!

# Evidenze di faglia distensiva su più profili



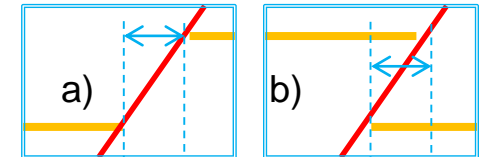
# Mappatura di una faglia

Le faglie sono generalmente rappresentate da un piano inclinato che occupa quindi una certa estensione areale sulla mappa.

faglia normale faglia compressiva

Innanzitutto bisogna distinguere tra i diversi tipi di faglie:

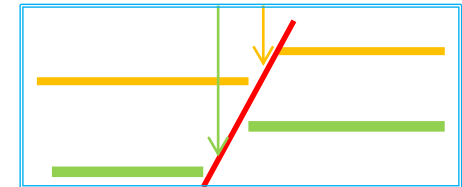
- le faglie distensive sono caratterizzate da “non-esistenza” del riflettore lungo una fascia corrispondente al rigetto orizzontale;
- le faglie compressive sono caratterizzate da sovrascorrimento, quindi da fasce di presenza doppia (a diverse profondità) del riflettore;
- le faglie di *strike-slip* sono associate a delle superfici verticali con rigetti orizzontali lungo il piano di faglia → le situazioni di “non-esistenza” o di raddoppio del riflettore possono eventualmente essere associate a componenti secondarie, cioè a transtensione o transpressione.



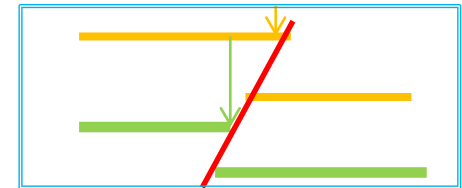
posizione delle faglie in mappa

→ Come e dove indicare quindi una faglia in mappa?

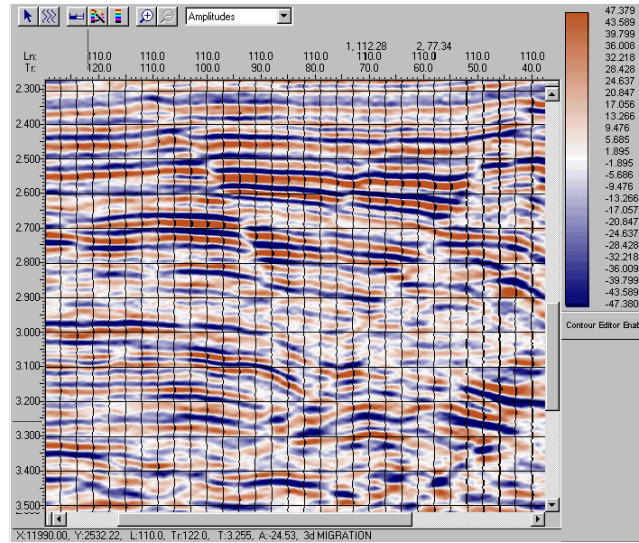
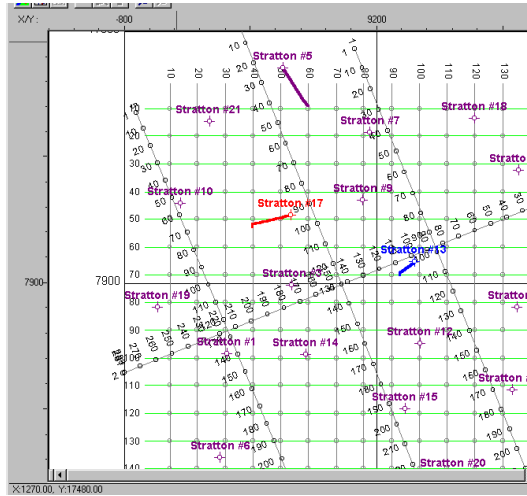
La faglia in pianta andrà indicata come una linea (retta per faglia planare o curva per faglia listrica, ma consideriamo sempre le deformazioni su scala 2wt!) ubicata in corrispondenza del *cutoff* dell'orizzonte mappato; la posizione della faglia dipenderà quindi dal riflettore considerato.



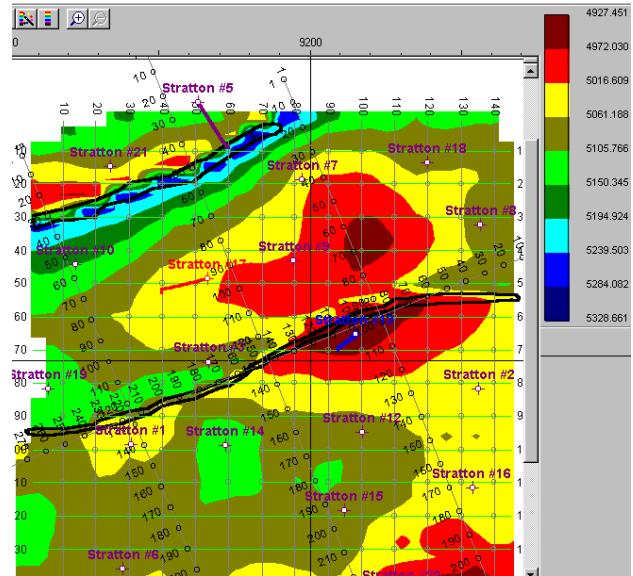
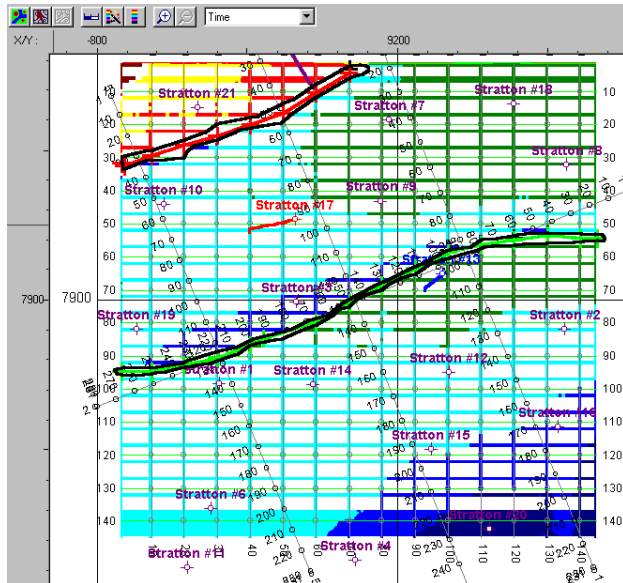
Per le faglie compressive si considera generalmente il *cutoff* dell'*hanging wall*.



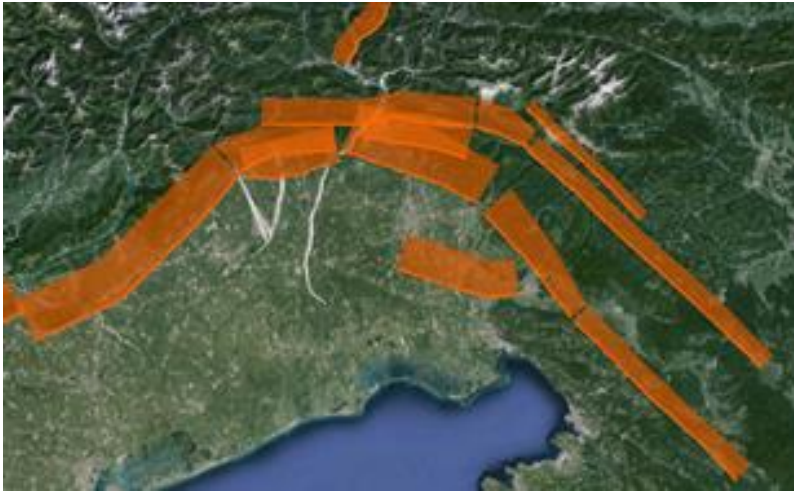




Una faglia distensiva potrà eventualmente diventare una fascia più o meno larga a rappresentare il rigetto orizzontale.



# Faults position on maps: DISS



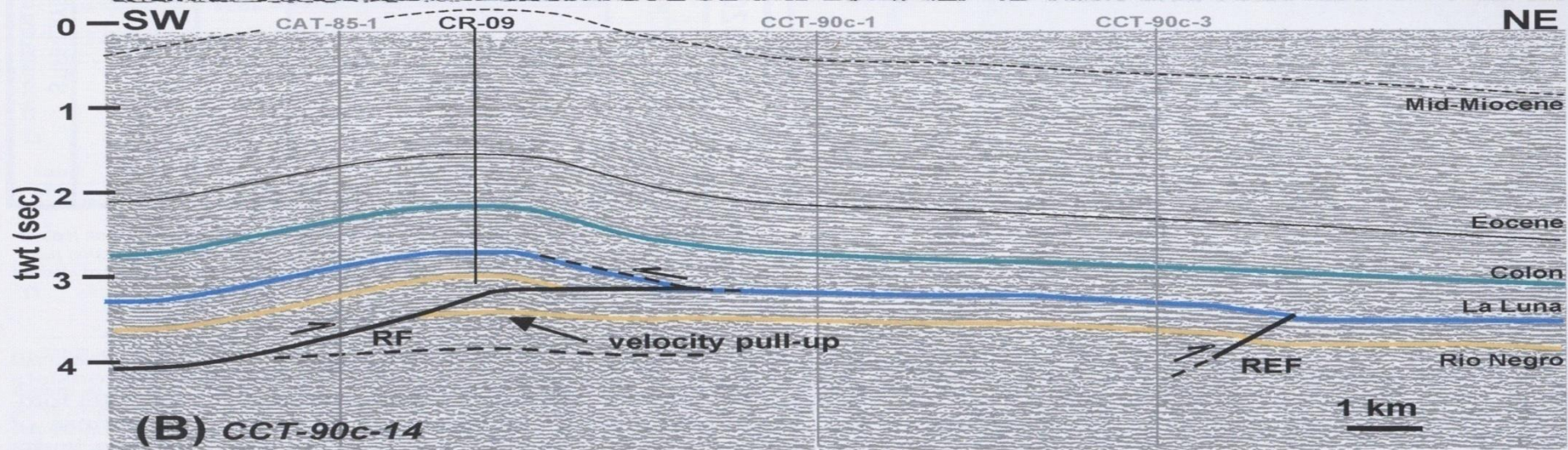
DISS: Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0:  
A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in  
Italy and surrounding areas.

<http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2015 - Istituto Nazionale di Geofisica  
e Vulcanologia

Il DISS ha lo scopo di definire i piani di faglia lungo cui potrebbero  
generare importanti terremoti: per questo motivo, oltre all'emersione  
superficiale delle faglie (linea arancione) vengono rappresentate anche le  
loro superfici in profondità.

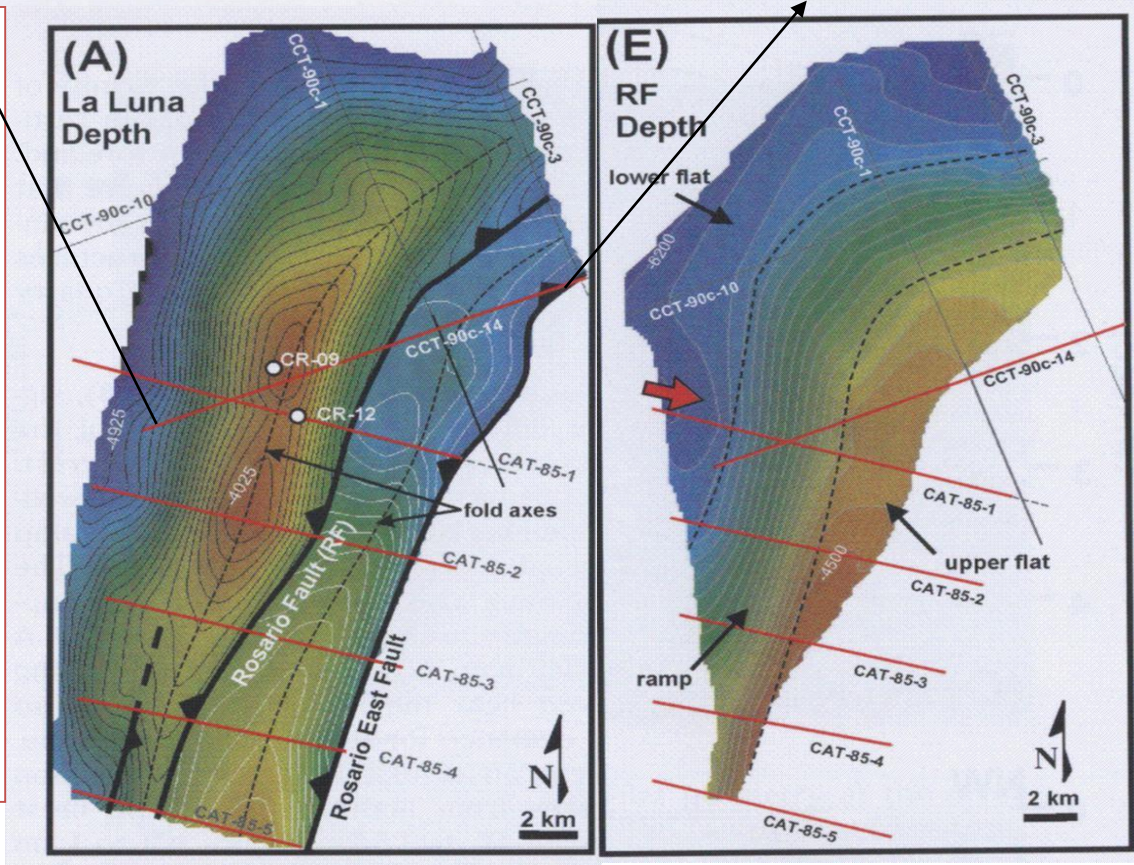


Le faglie compressive avranno una maggiore larghezza (maggiore  
pendenza) rispetto alle  
faglie distensive; le faglie trascorrenti, essendo dei piani di faglia sub-  
verticali, saranno generalmente molto più ristrette arealmente (teoricamente  
delle linee)



Esempio di geometria "flat & ramp" nel Rosario Field del Maracaibo Basin in Venezuela.

La Rosario Fault, a geometria "flat & ramp", è stata mappata in (E) come si trattasse di una discontinuità litologica: in tal modo si evidenziano i tratti "flat" (linee di contour diradate) e "ramp" (linee più fitte)



# Effetto di una faglia inversa in un profilo sismico a riflessione. Esempio con graduale aumento di velocità intervallare

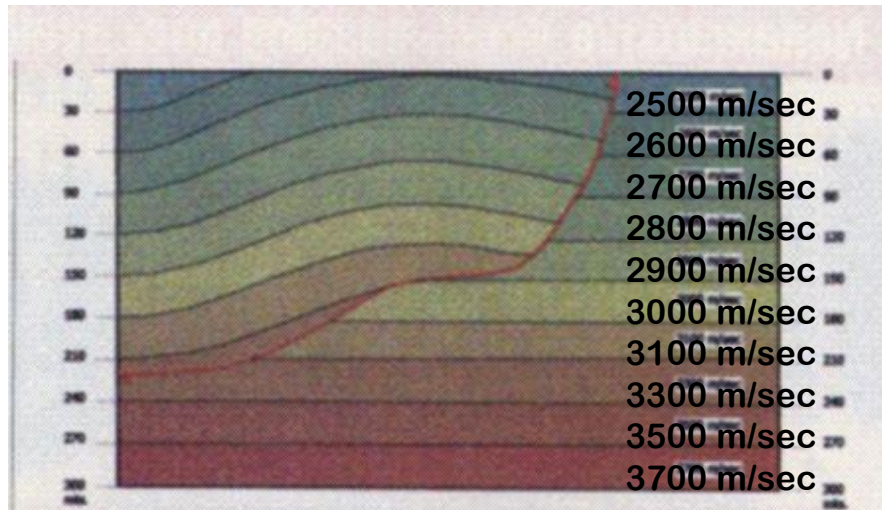


Figure 9. Geologic model (reverse fault) (depth).

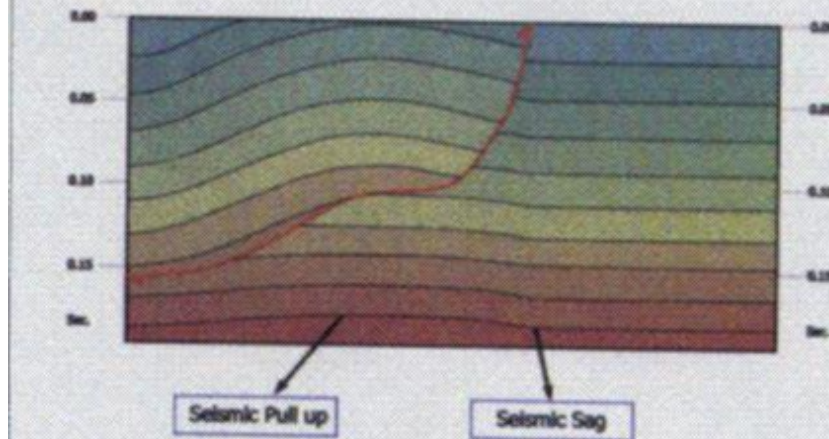


Figure 10. Geologic model (reverse fault) (time).

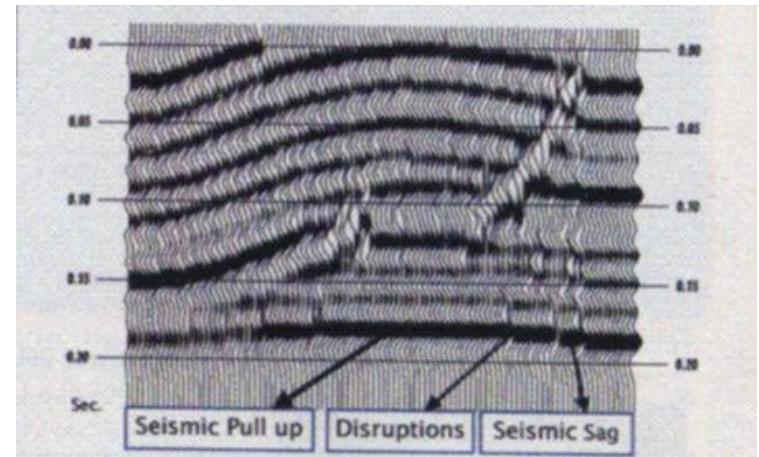


Figure 11. Normal incidence fault propagation fold model (reverse fault) (wiggle trace).

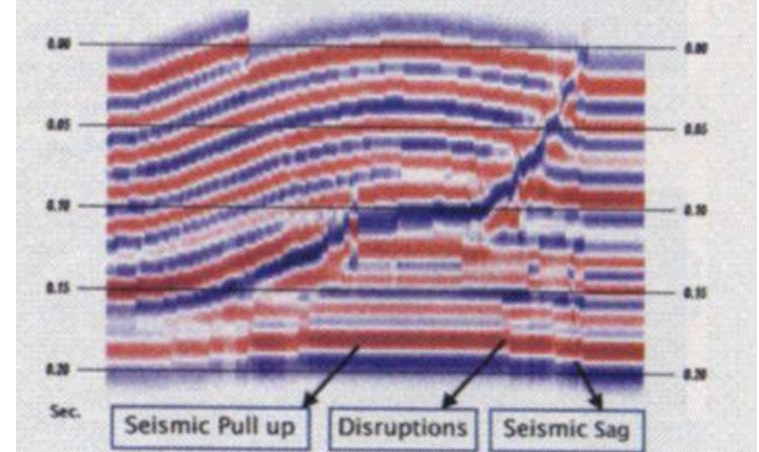


Figure 12. Normal incidence fault propagation fold model (reverse fault) (variable density).

Una faglia compressiva genera solitamente un *pull-up velocity*; localmente si possono avere avvallamenti (*sag*) con generale deterioramento del segnale

# Effetto di una faglia normale in un profilo sismico a riflessione. Esempio con strato ad alta velocità intervallare

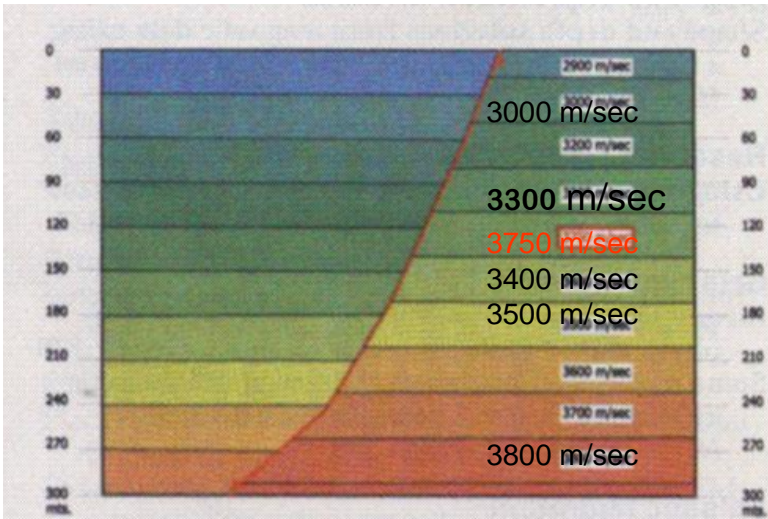


Figure 1. Geologic model (normal fault) (depth).

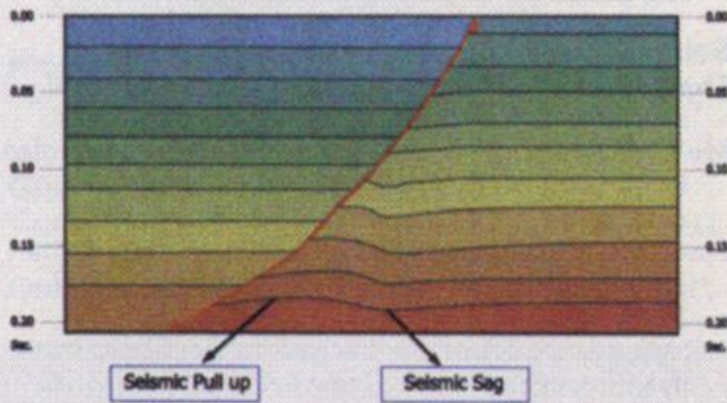


Figure 2. Geologic model (normal fault) (time).

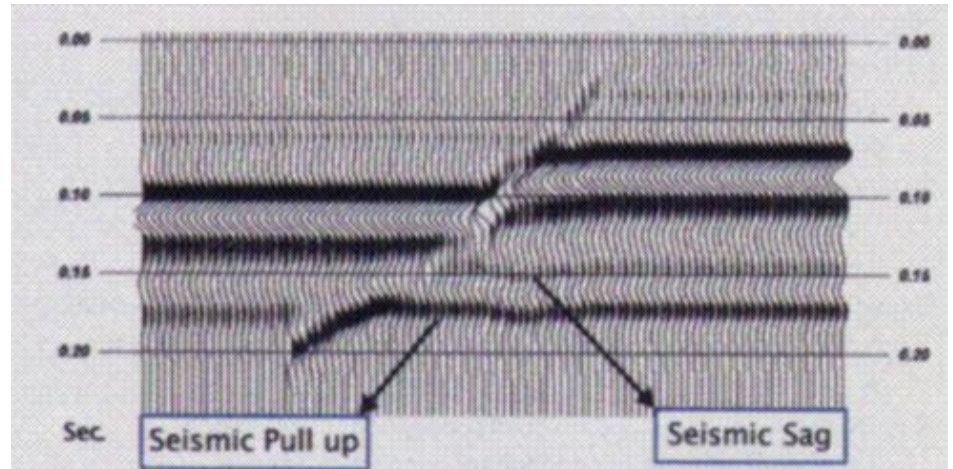


Figure 3. Normal incidence wiggle-trace model.

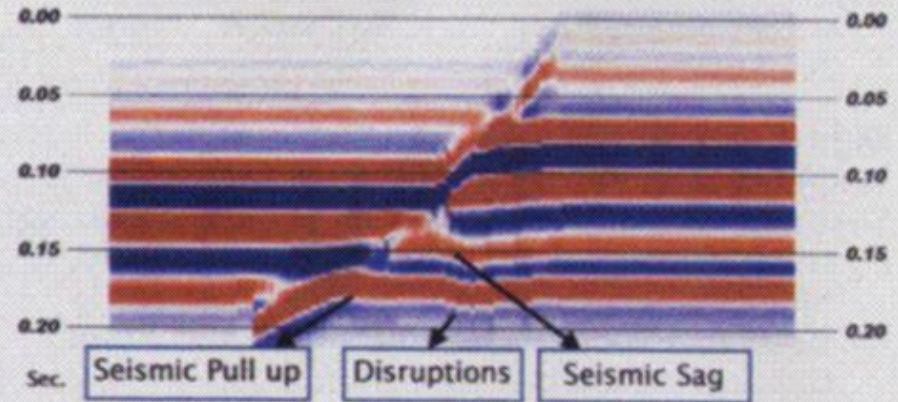


Figure 4. Normal incidence variable density model.

# Effetto di una faglia normale in un profilo sismico. Esempio con strato a bassa velocità intervallare

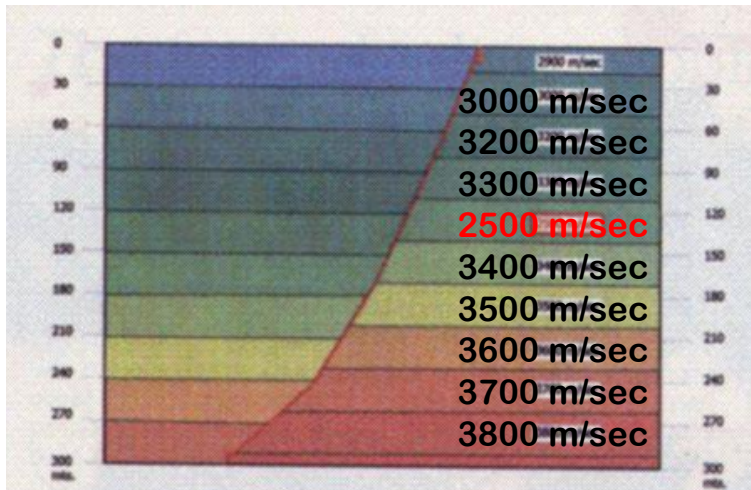


Figure 5. Geologic model 2 (normal fault) (depth).

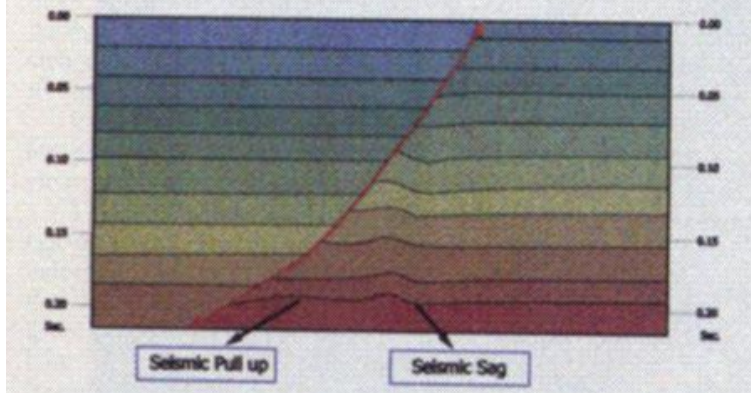


Figure 6. Geologic model 2 (normal fault) (time).

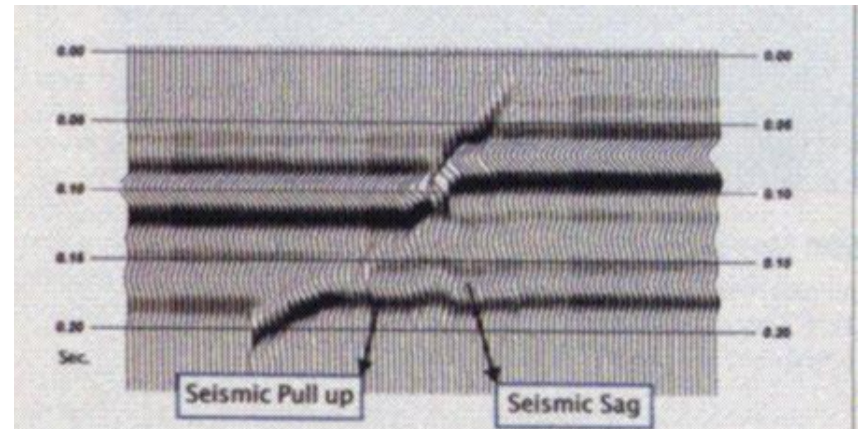


Figure 7. Normal incidence seismic model 2 (normal fault) (wiggle trace).

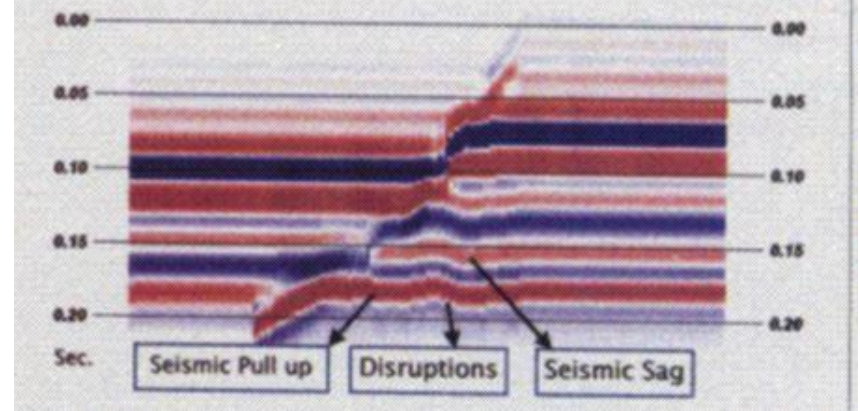
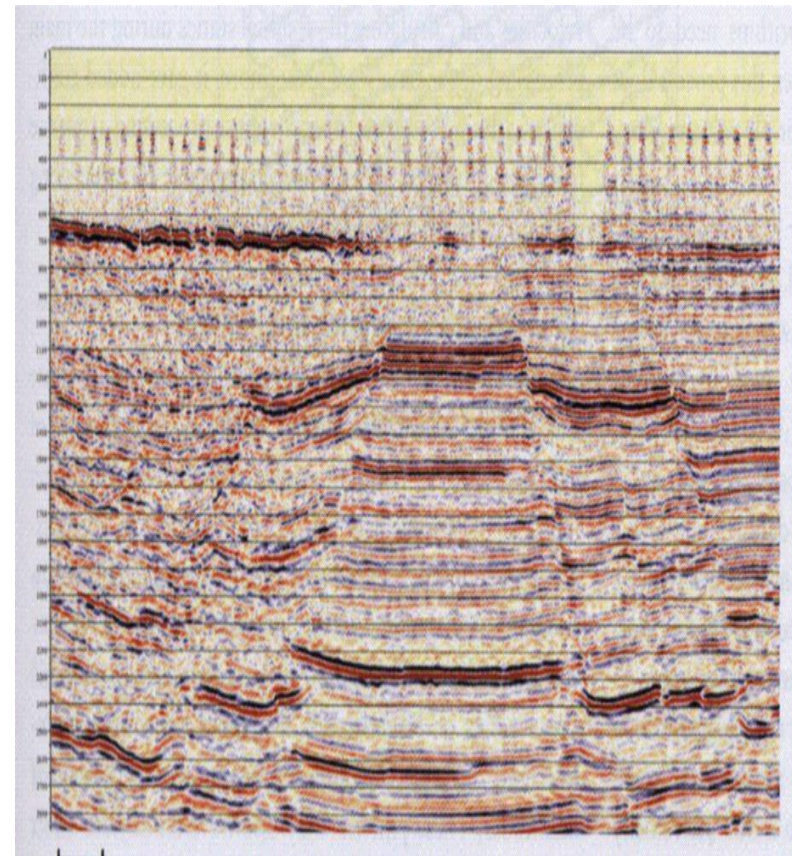
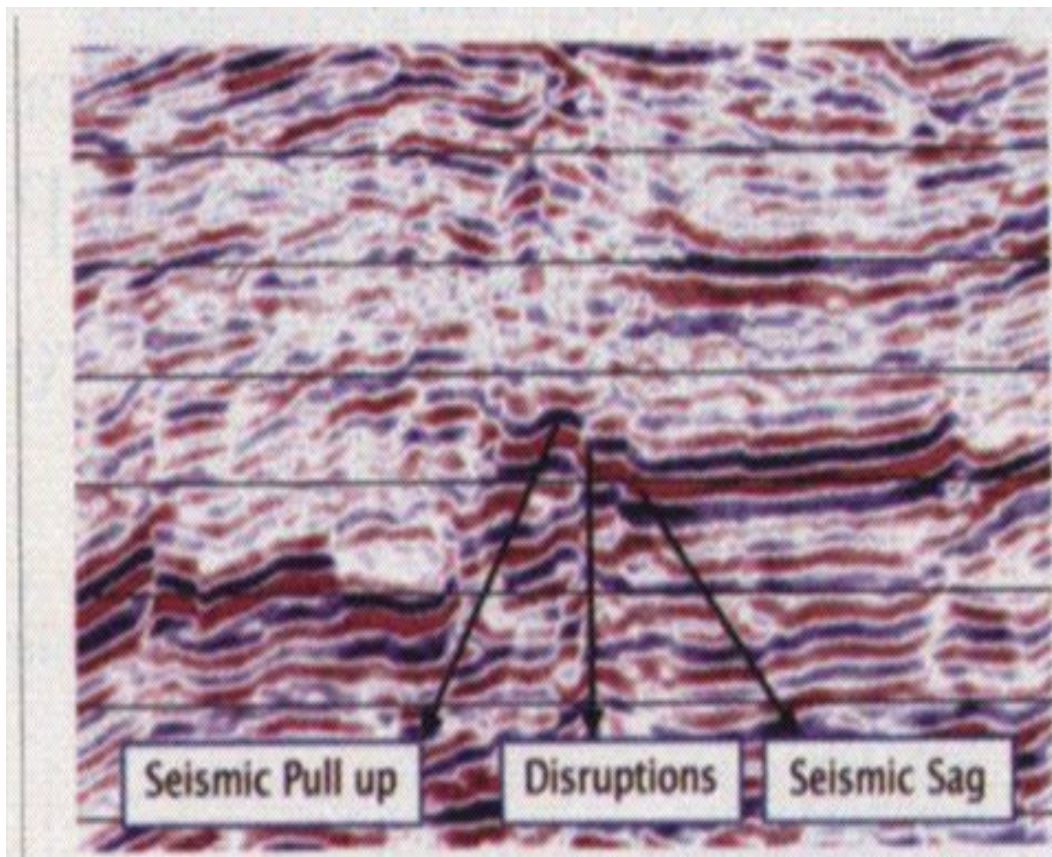


Figure 8. Normal incidence seismic model 2 (normal fault) (variable density).



Talvolta il piano di faglia può originare un riflettore continuo, ma in genere è troppo verticale per dare riflessioni utili: la sua ubicazione sarà data dall'allineamento dei *cut-off* dei riflettori

**Fault Shadow** : i contrasti di velocità lungo il piano variano notevolmente: ciò genera distorsioni tali da determinare spesso una zona d'ombra, di difficile interpretazione, sotto la faglia stessa.

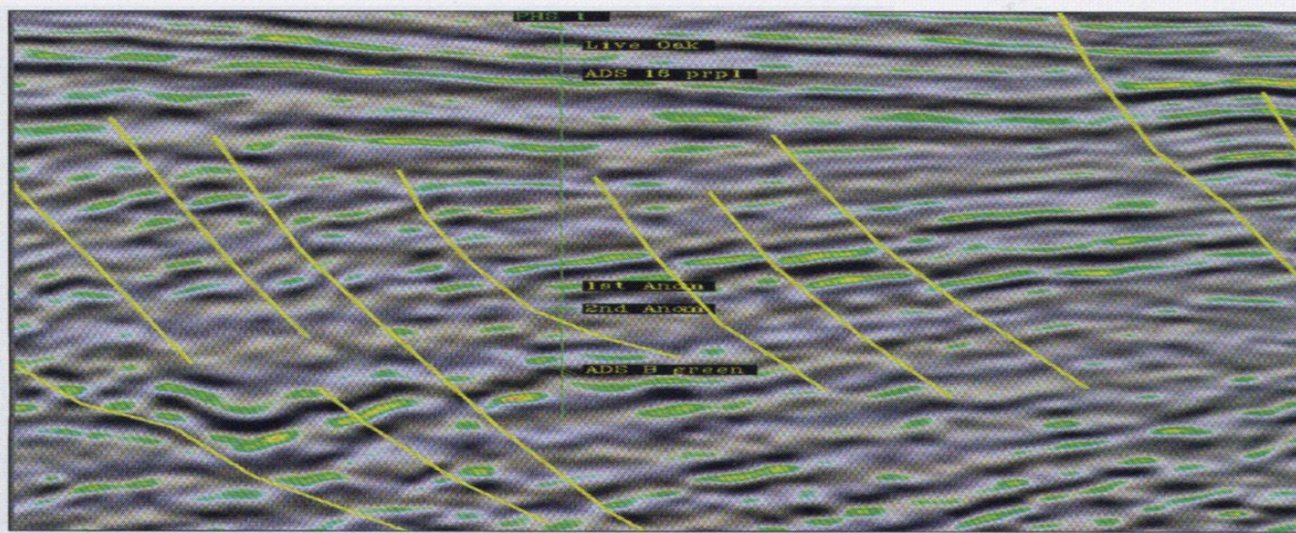
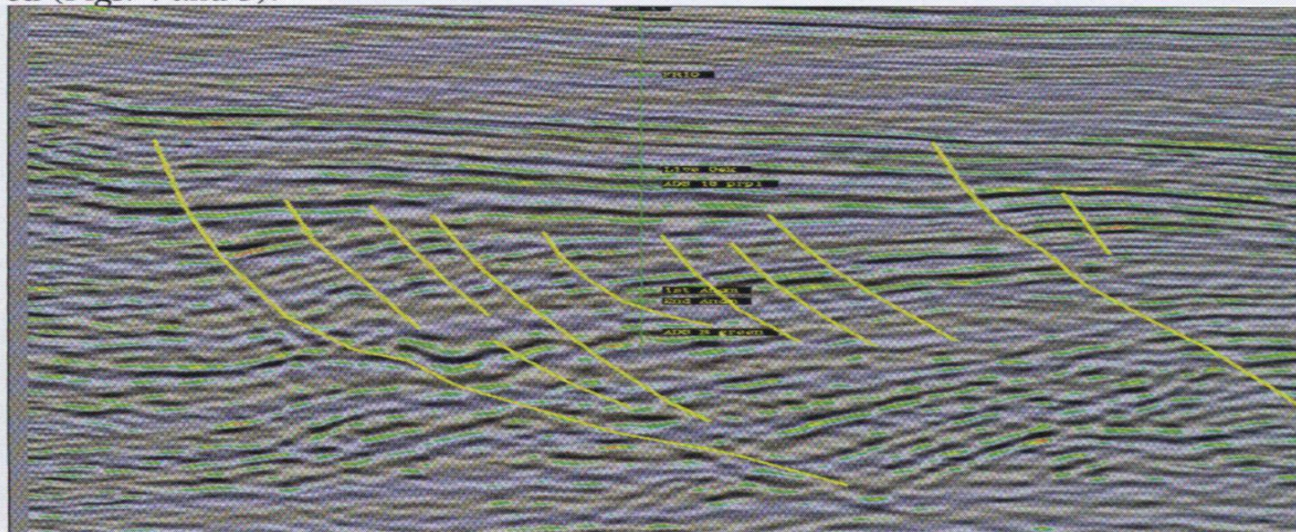
**Sistema di fratture diffuse nel volume di sedimenti.**

**L'interpretazione del sistema di faglie deve partire dalle fratture principali, il dettaglio dipende dagli obiettivi specifici dell'interpretazione.**

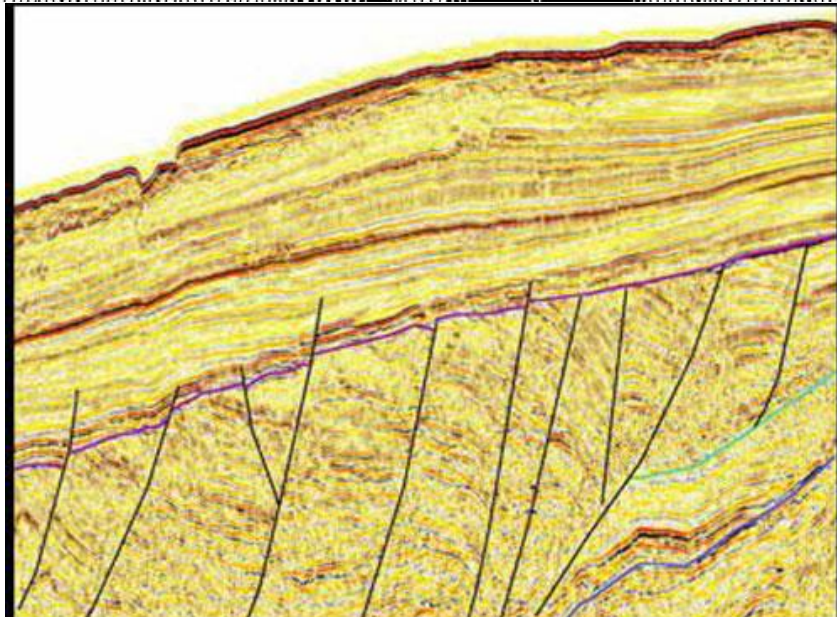
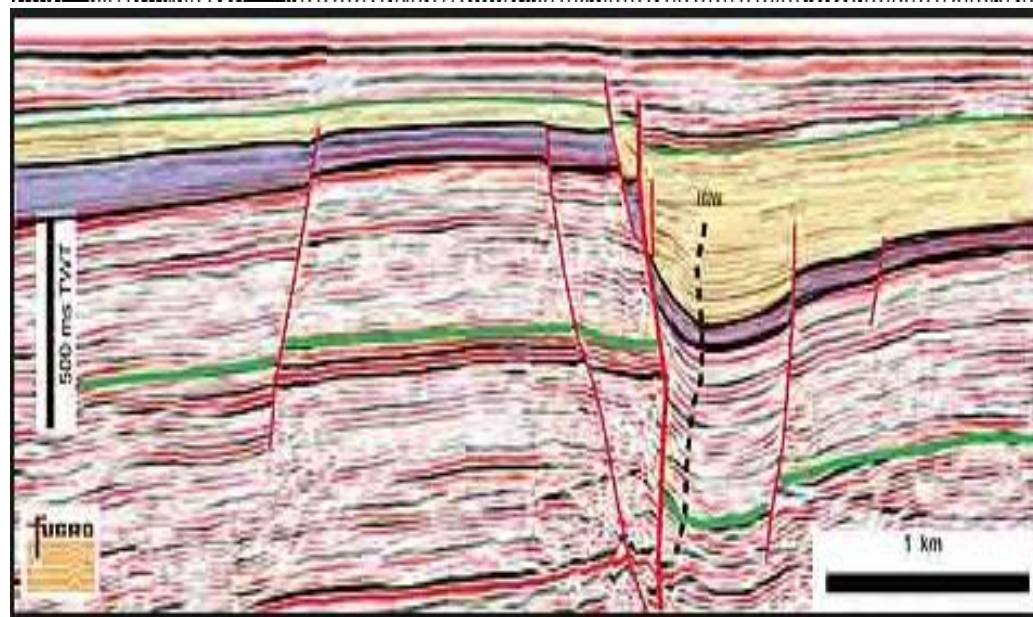
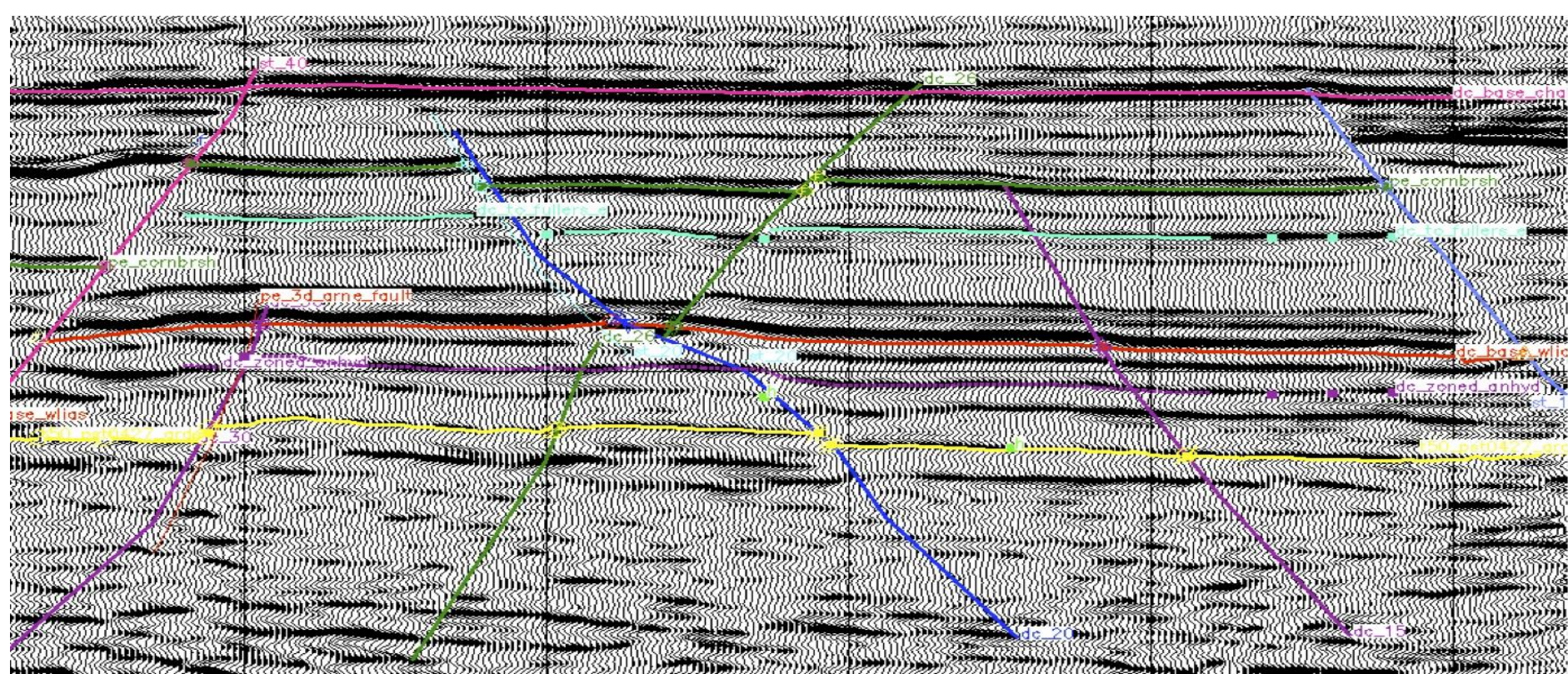


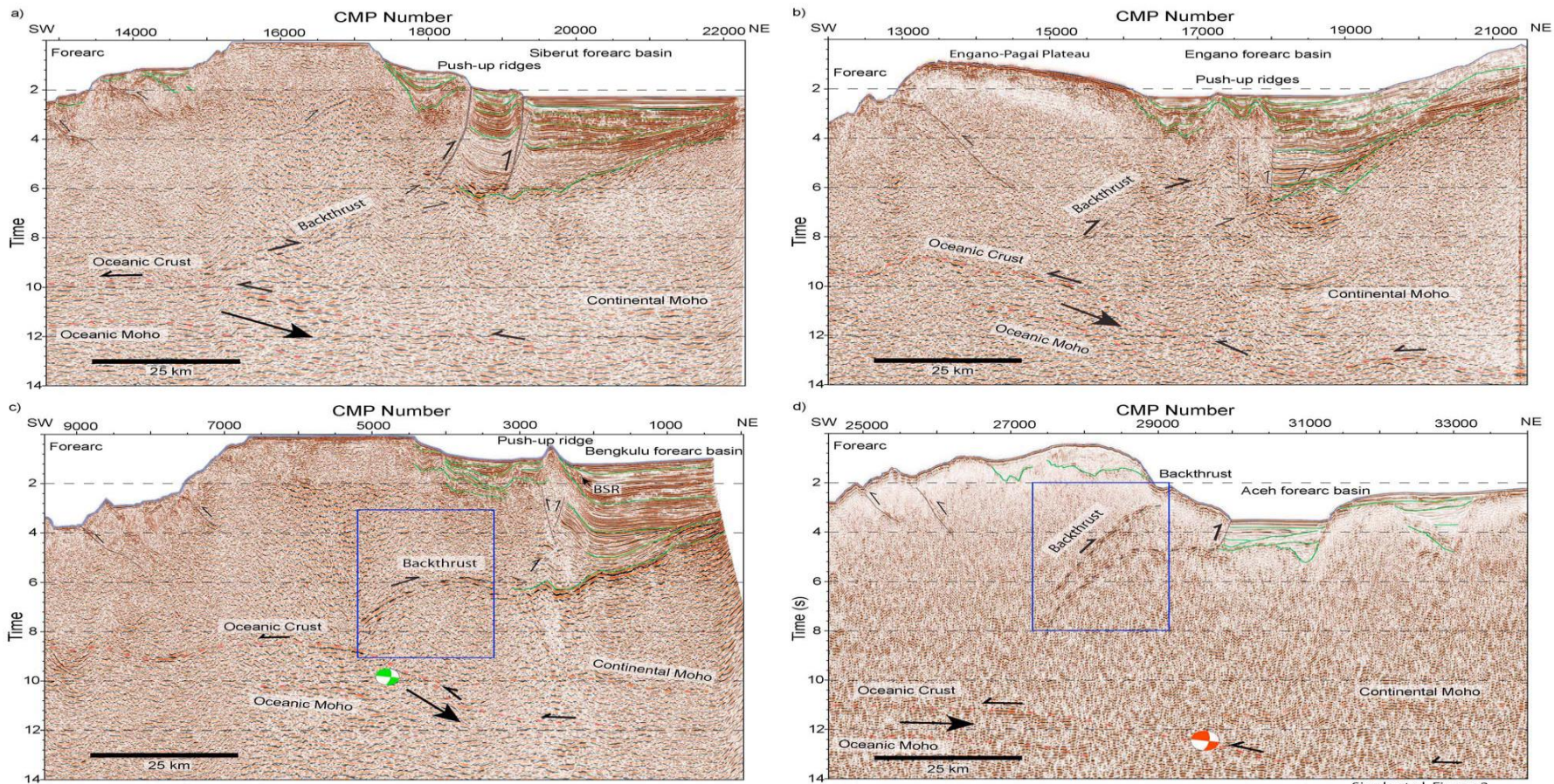


The target of the exploration activity was the second Anomalina Formation within the lower Frio. This formation was known to be productive in the Frio trend (Fig. 3), and heavy faulting in the area generated isolated fault blocks with virgin pressure. The problem was to confidently map the multiple fault blocks and productive zones, since the expected reservoir compartments would be relatively small and hydraulically isolated (Figs. 4 and 5).

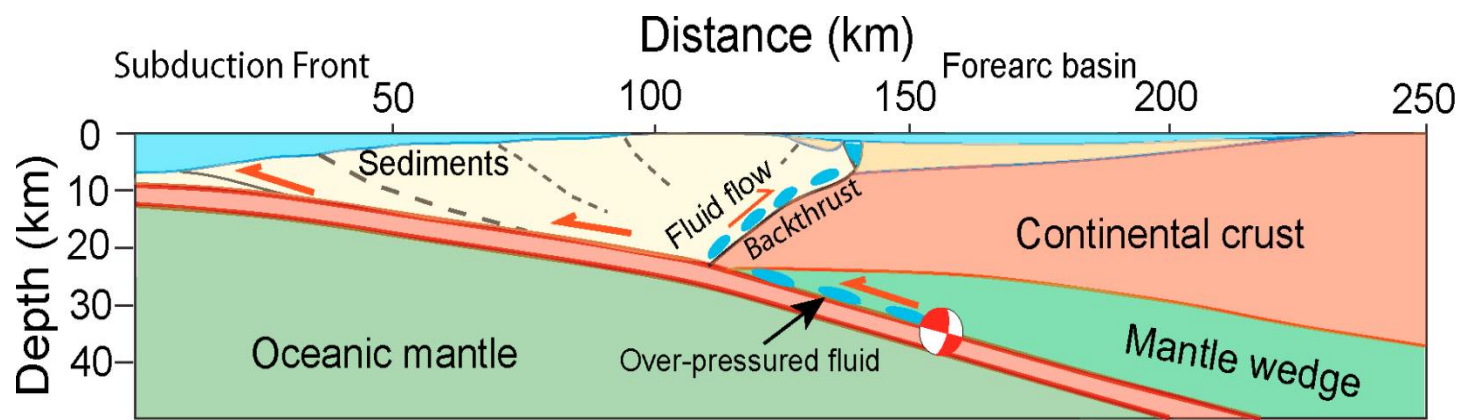
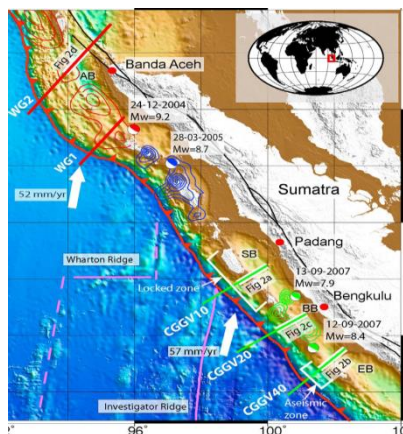


In alcune situazioni (per es. per analisi di migrazione dei fluidi) può essere di fondamentale importanza riconoscere tutte le faglie presenti, la loro corretta posizione ed estensione, il loro rigetto verticale ed orizzontale.





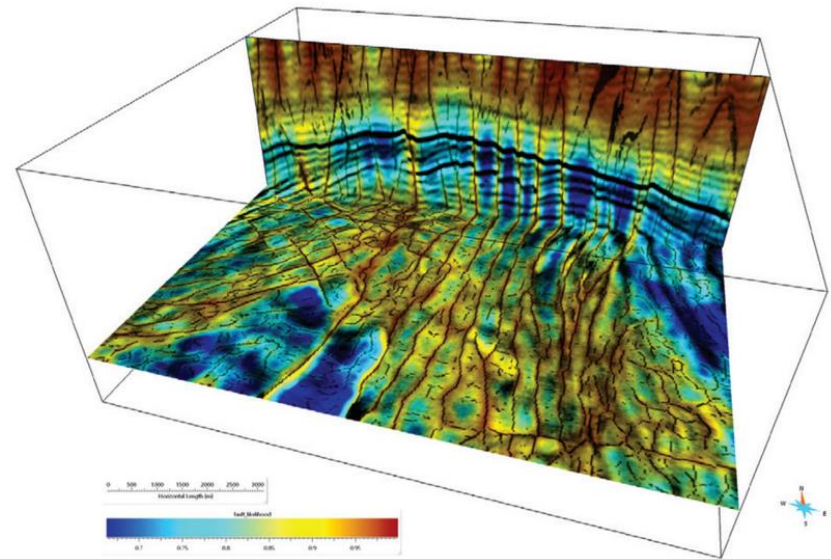
Singh et al. Figure 2



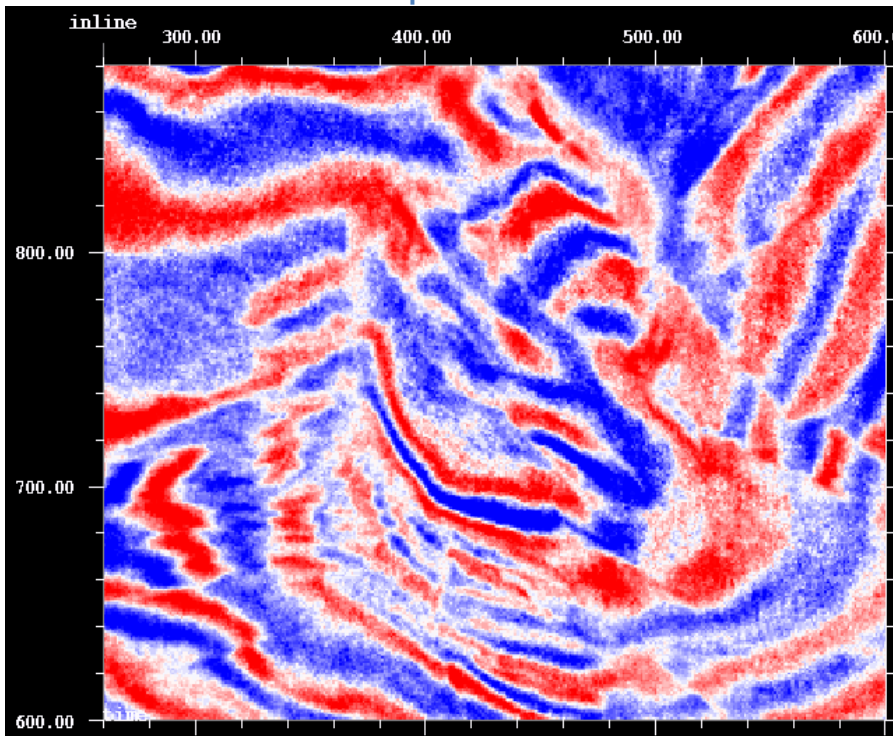
# CRUSTAL SEISMIC INTERPRETATION

ATTRIBUTI SISMICI per interpretare le faglie  
*3D volume interpretation of faults by seismic  
attribute Coherency, also known as  
Discontinuity or Variance, is a derivative data  
volume based on trace-to-trace correlation.*

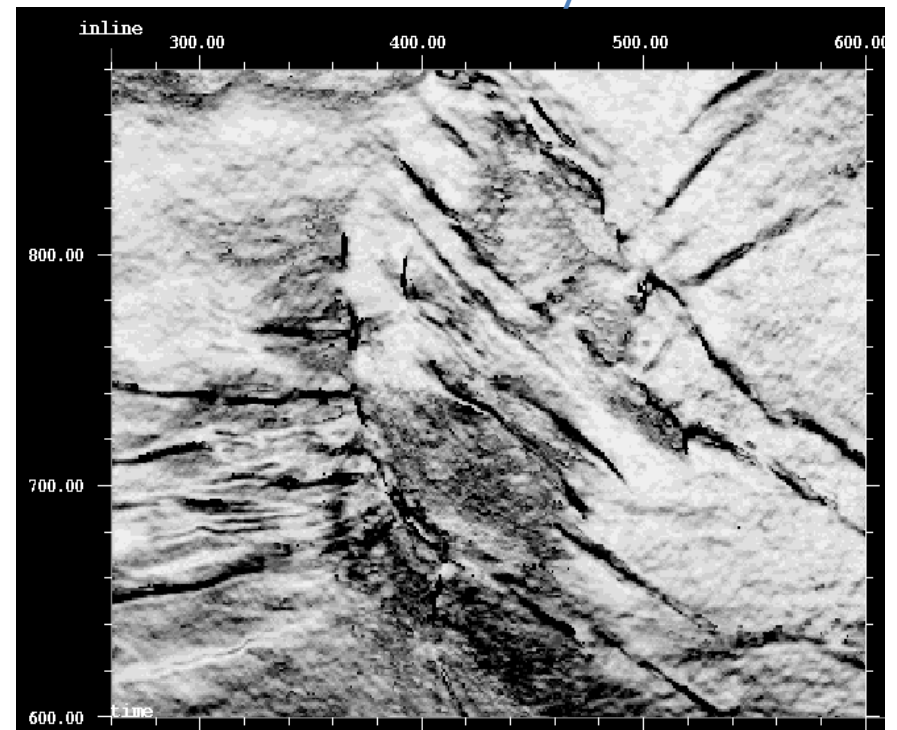
*Data range from 0 to 1,  
(1 = neighboring traces are identical*

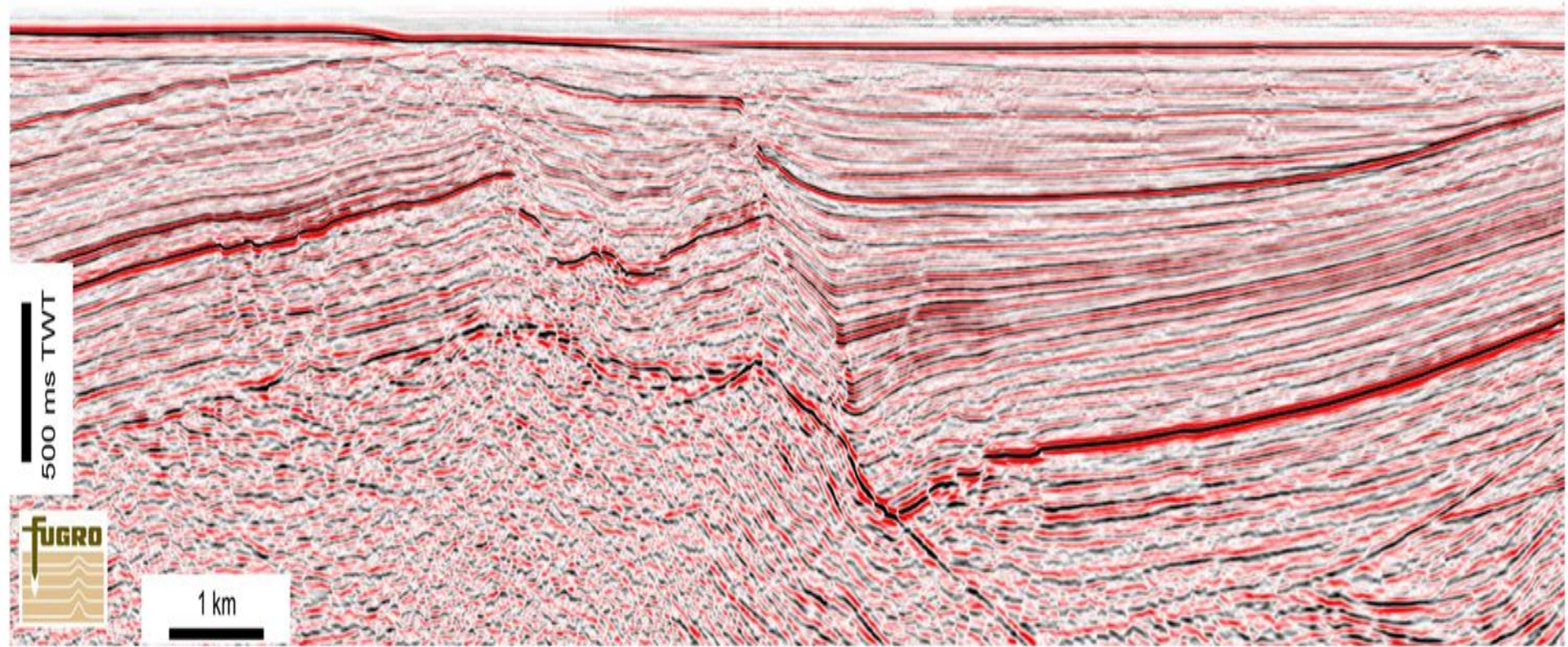


Amplitude Data



Coherency Data





DOMINIO APPENNINICO ORIENTALE  
Sez. 2

