

Sequence Stratigraphy

La ***Sequence Stratigraphy*** (SS) è una sottodisciplina della Stratigrafia, e può essere definita come l'analisi dei bacini sedimentari attraverso la suddivisione del riempimento in 'pacchetti genetici' limitati da unconformities e dalle loro corrispondenti conformities

Tali pacchetti sono definiti come systems tract.

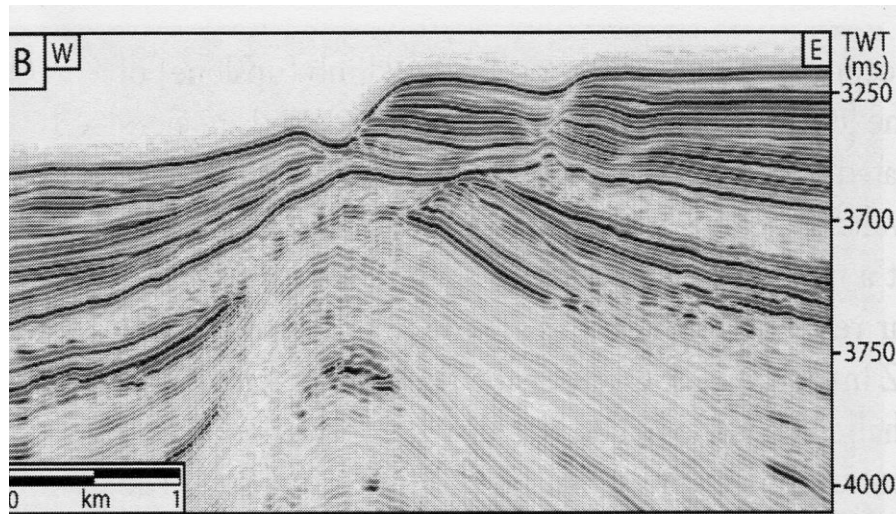
La SS è utile per fornire un quadro crono-stratigrafico per la correlazione e la mappatura delle facies sedimentarie e per predizioni di tipo stratigrafico.

Diverse discipline geologiche concorrono alla SS (bio-stratigrafia, cronostratigrafia, litostratigrafia, etc.), una di queste è la

Sismostratigrafia

Sequence stratigraphy

Fin dalle prime analisi stratigrafiche fu notato che la deposizione in un bacino non era uniforme continua, ma avveniva attraverso una serie di "pacchetti" (systems tract).



Come espressione sismica
essi corrispondono a

*"seismic sequences o
"seismo-stratigraphic units" o
"seismic packages",*

e sono limitati da terminazioni
dei riflettori.

Sequence stratigraphy

Galloway (2004) definisce i systems tracts (st) come

«genetic stratigraphic units that incorporate strata deposited within a synchronous sediment dispersal unit»

quindi i «st» non implicano relazioni con gli spessori e con i loro rapporti temporali, ma riguardano solo la loro posizione e il tipo di terminazioni all'interno di una sequenze di strati.

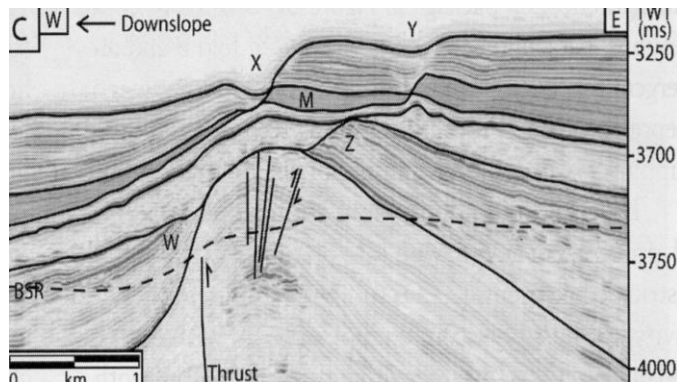
Ordini di cicli Tettono-Eustatici ed Eustatici	Unità Stratigrafiche Sequenziali	Durata (milioni di anni)	Escursioni Relative del l.d.m. (metri)	Tassi Relativi di Risalita/Caduta del l.d.m. (cm/1.000 anni)
Primo Ordine		>100		<1
Secondo Ordine	Supersequenze	10-100	50-100	1-3
Terzo Ordine	Sequenze Deposizionali e Sequenze Composite	1-10	50-100	1-10
Quarto Ordine	Sequenze ad 'alta energia' (High Energy Sequence) Parasequenze e Set di Cicli	0.1-1	1-150	40-500
Quinto Ordine	Parasequenze e Cicli ad alta frequenza	0.01-0.1	1-150	60-700

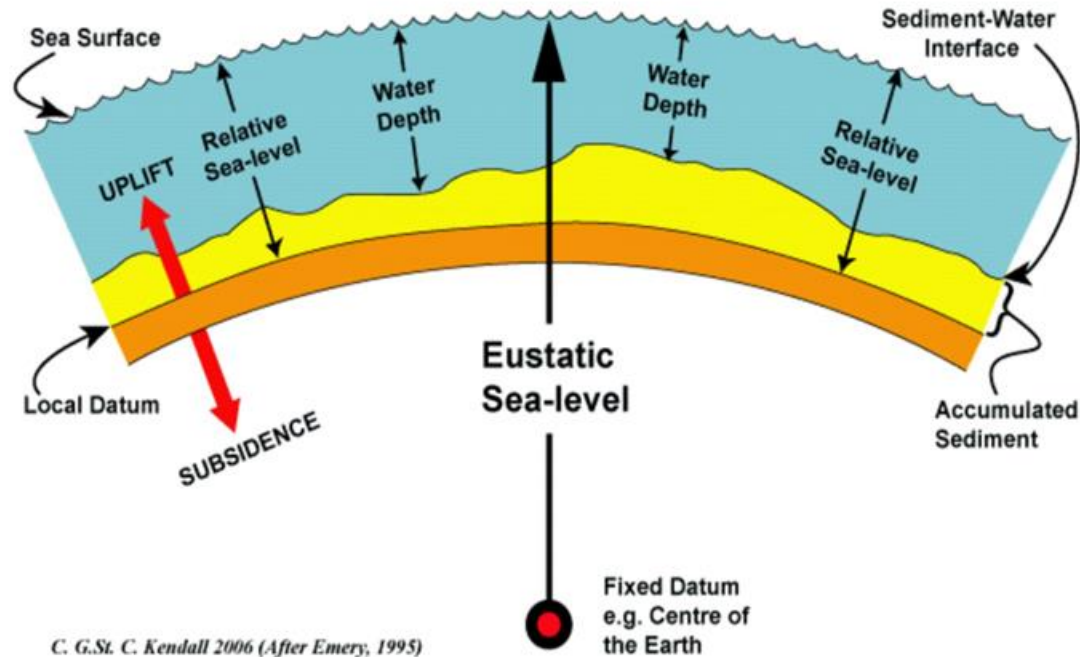
(da SEPM # 40)

Le variazioni deposizionali avvengono ai limiti dei st (top e base), che corrispondono ad uno degli eventi dei cicli tettono-eustatici.

I *systems tracts* sono quindi definiti da:

- natura dei loro limiti
- geometrie interne

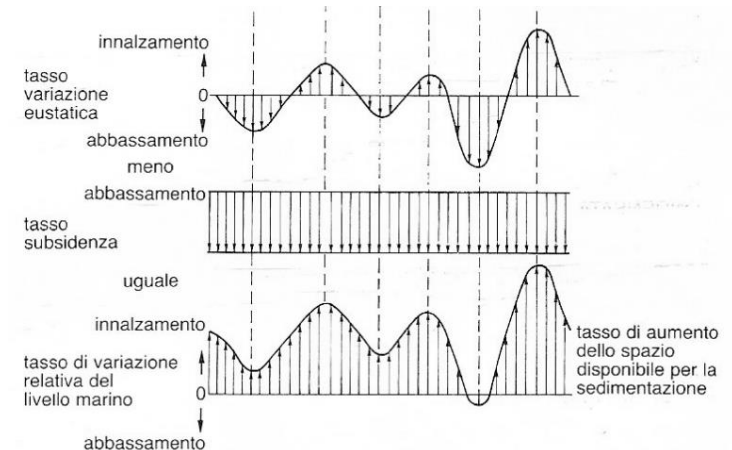




Tettonica ed Eustatismo controllano l'ammontare di spazio disponibile per l'accumulo di sedimenti (*accomodation*) oltre che l'apporto dei sedimenti stessi.

La subsidenza tettonica è il risultato di:

- estensione
- carico flessurale della litosfera.



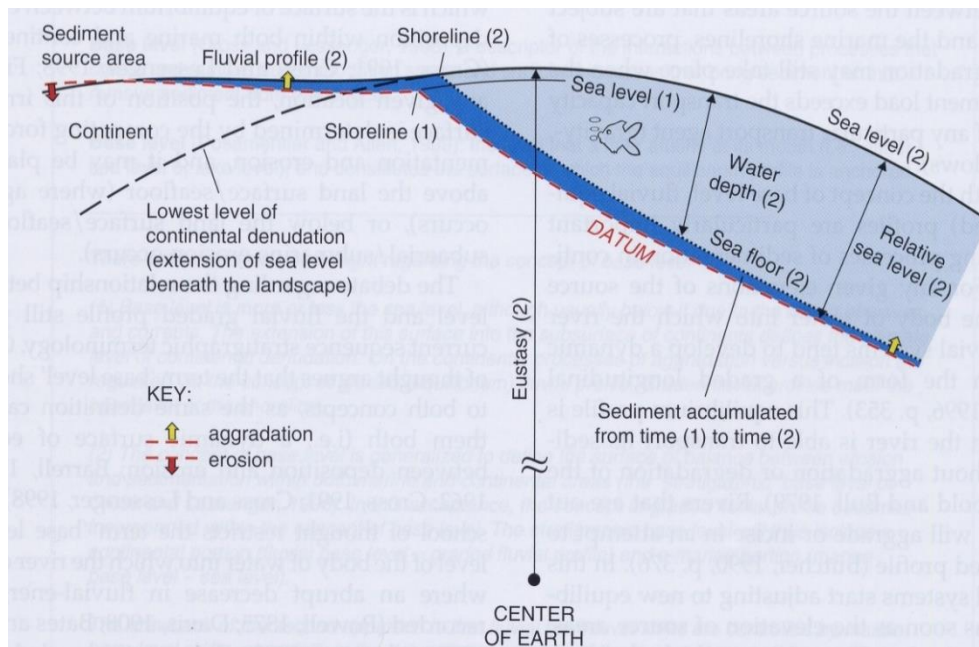


FIGURE 3.12 Eustasy, relative sea level, and water depth as a function of sea level, seafloor, and datum reference surfaces (modified from Posamentier *et al.*, 1988). The datum is a subsurface reference horizon that monitors the amount of total subsidence or uplift relative to the center of Earth. In this diagram, the datum corresponds to the ground surface (subaerial and subaqueous) at time (1). Sedimentation (from time 1 to time 2 in this diagram) buries the datum, which, at any particular location, may be visualized as a G.P.S. that monitors changes in elevation through time (i.e., distance relative to the center of Earth).

Catuneanu, 2006
modificato da Posamentier *et al.*, 1988

Per livello mare relativo si intende la distanza tra la superficie del mare e un elemento locale in movimento come il basamento o una superficie interna alla serie sedimentaria.

La variazione del livello mare relativo può essere determinata da:

- subsidenza o *uplift* tettonici
- compattazione dei sedimenti
- movimenti eustatici verticali del l.m.

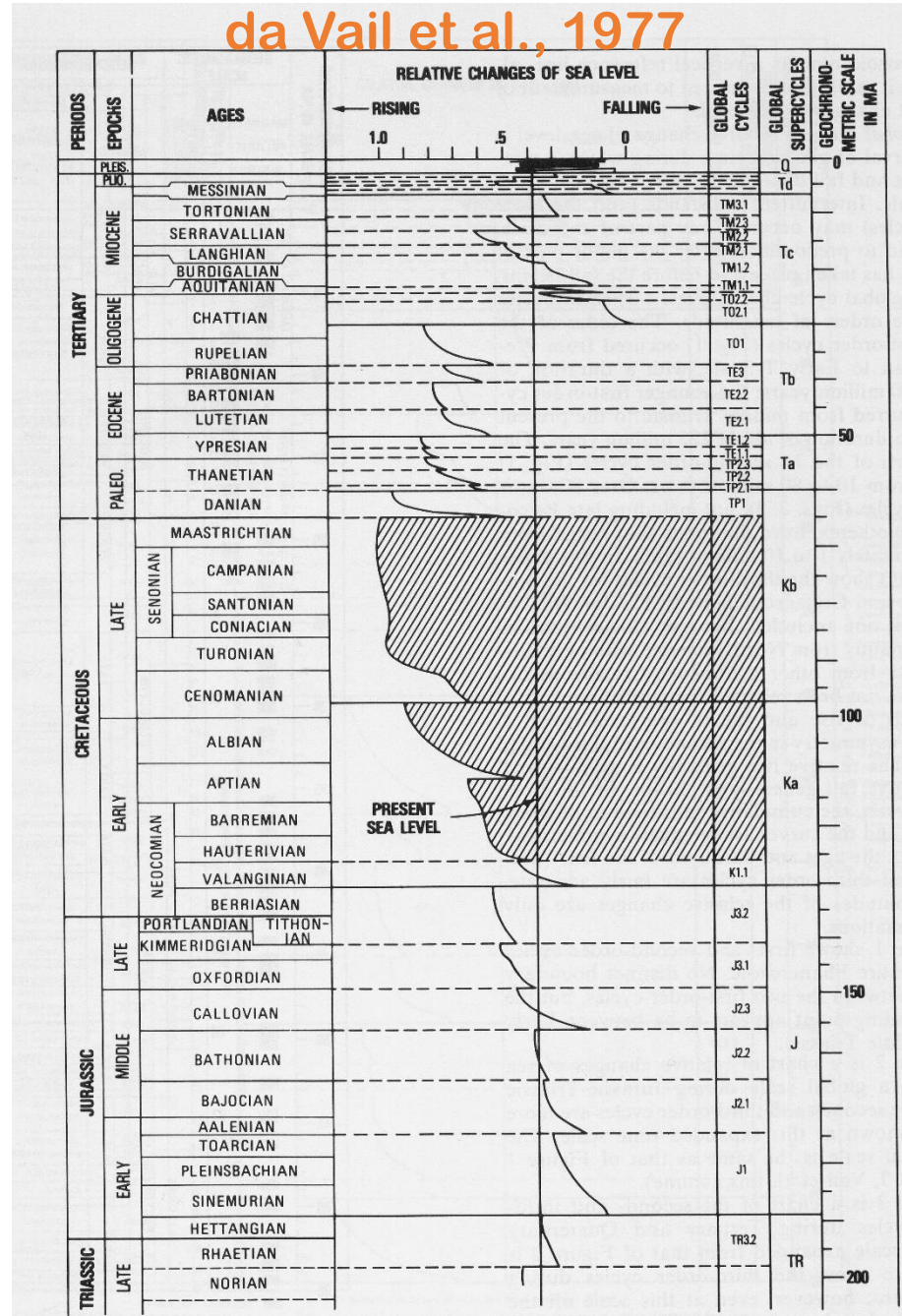
Il livello mare relativo non va confuso con la profondità d'acqua, che misura la distanza tra livello mare e fondo mare in un punto e in un preciso momento.

Cicli di variazione del *relative sea level*

a scala globale sono evidenti dal
Phanerozoico al Presente, evidenziati dal fatto
che molti cicli regionali su diversi margini
continentali sono simultanei con grandezze
comparabili.

Un ciclo globale di variazione di *rs/* rappresenta
un periodo geologico durante il quale si ha
risalita e rapida caduta del *rs/* a scala globale.

Le rapide cadute di *rs/* per centinaia di metri
avvenute periodicamente nei tempi geologici
non sono ancora spiegate, probabilmente
connesse a rapide glaciazioni seguite da più
lente fusioni dei ghiacci.



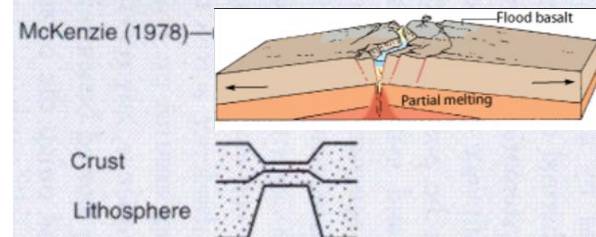
Nei bacini distensivi si ha generalmente una rapida subsidenza per *stretching* litosferico, seguito da una subsidenza termica (60-100 Ma), via via minore, per raffreddamento dell'astenosfera.

La grande variabilità della subsidenza ha molta influenza sulle geometrie di riempimento.

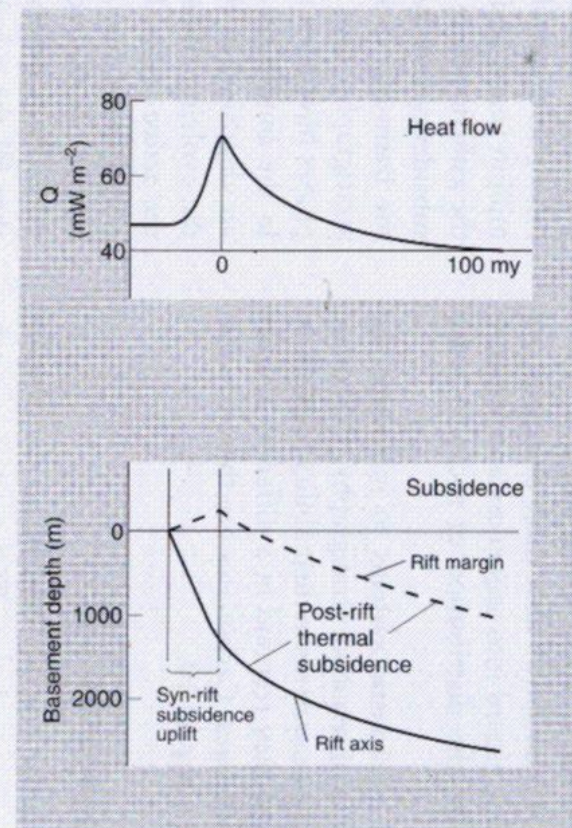
Ciò permette di riconoscere megasequenze *pre-*, *post-* e *syn-rift*.

Tassi di subsidenza differenziale tra i diversi blocchi delimitati dalle faglie esercitano inoltre un importante controllo sulla distribuzione delle *facies*.

EXTENSIONAL (RIFT)



(a) Tectonic model



(b) Heat flow and subsidence
(single point, rift axis)

I bacini di avampaese si sviluppano in risposta al carico sulla litosfera che sta sotto una catena.

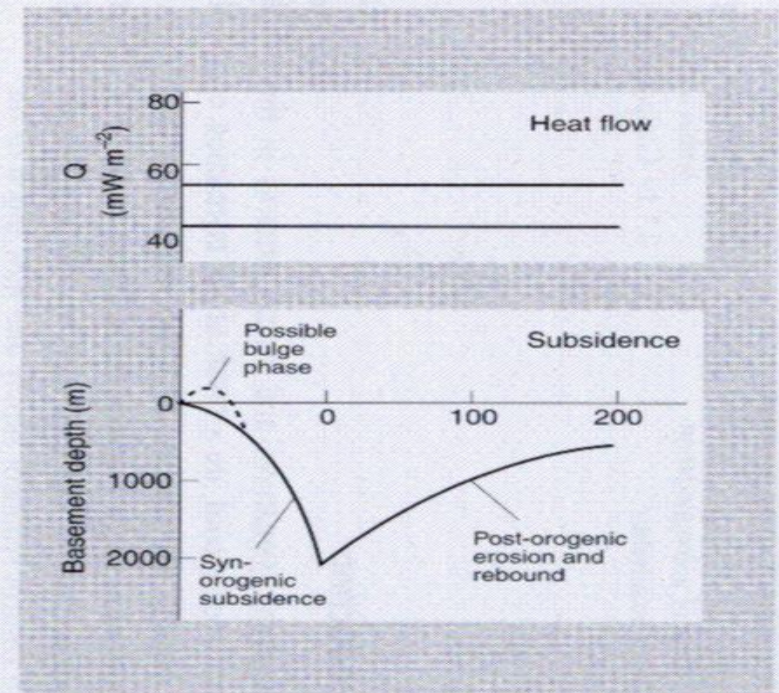
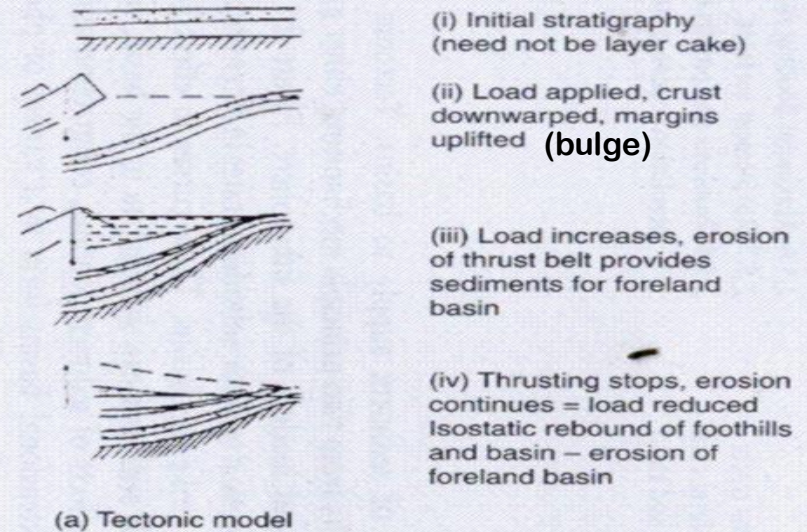
Il riempimento sedimentario tipico di questi “*foreland basin*” è quello a forma di cuneo (*wedge*)

→ *foreland basin megasequence*

la cui larghezza è proporzionale alla rigidità della litosfera e la cui profondità dipende dal carico.

L'erosione della catena nella fase post-compressiva porta a perdita del carico e successivo *uplift*.

COMPRESSIONAL (FORELAND)

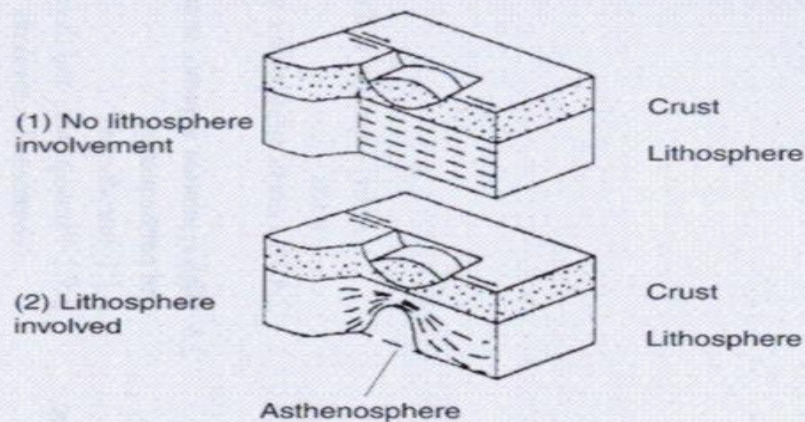


(b) Heat flow and subsidence

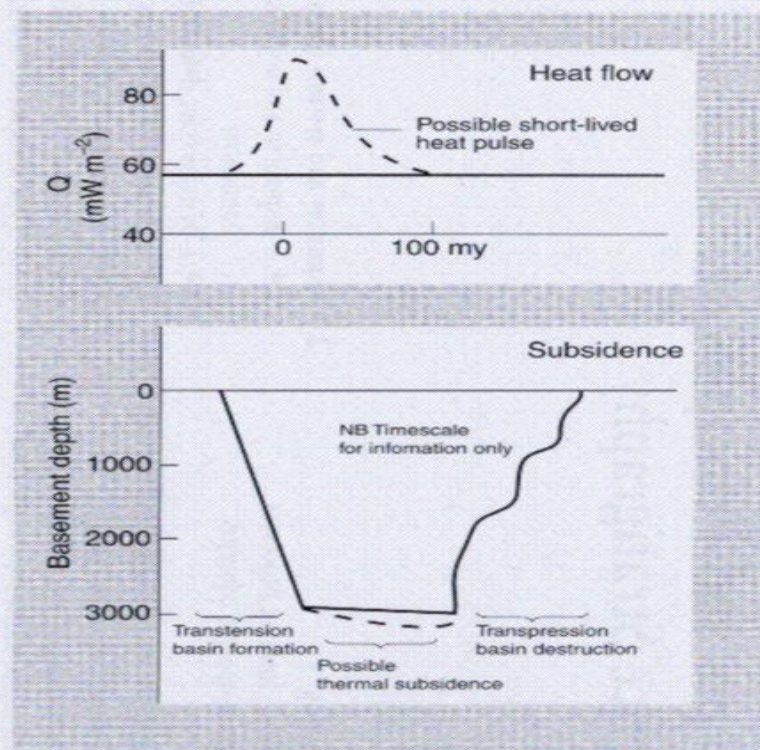
I bacini di *strike-slip* non sono interessati da un caratteristico *trend* di subsidenza, benchè la subsidenza e/o l'*uplift* siano generalmente rapidi.

La subsidenza, e quindi la possibilità di sedimentazione di una serie sedimentaria, è comunque strettamente correlata alle componenti distensiva (bacino di *pull-apart*) o compressiva, che generalmente si sviluppano lungo il sistema di *strike-slip*

STRIKE-SLIP



(a) Tectonic models



(b) Heat flow and subsidence

Molti dei concetti della Sequence Stratigraphy si basano sulle osservazioni dei dati sismici che interessano sistemi progradanti sui margini di bacini, spesso caratterizzati da geometrie deposizionali tipiche.

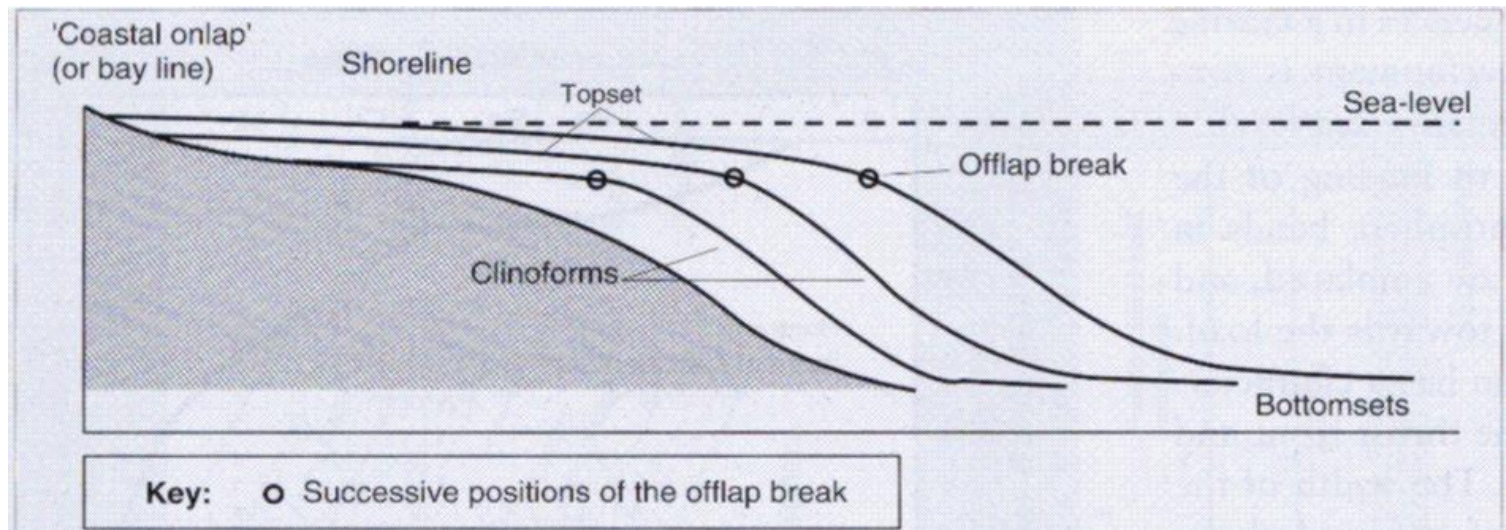
Topset indica la porzione prossimale del profilo del bacino marginale, caratterizzato da basso gradiente ($<0.1^\circ$). Lungo i profili sismici appare piatto, contiene depositi alluvionali, deltaici e di mare basso.

La linea di costa (shoreline) è interna al *topset*

Cliniform descrive la porzione più pendente del profilo bacinale ($\text{gen} > 1^\circ$), contiene depositi di mare più profondo, generalmente risolvibile sismicamente.

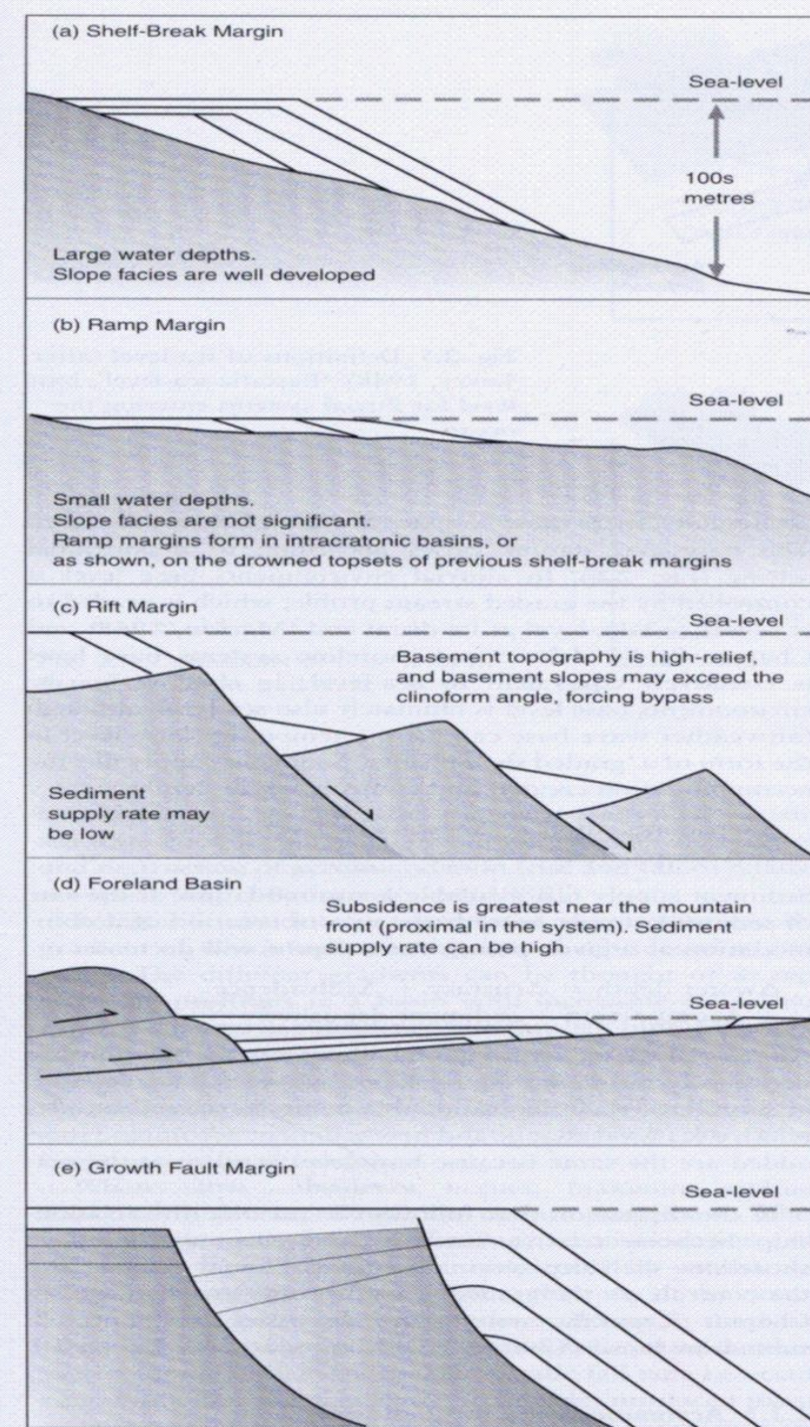
Offlap break definisce la rottura di pendenza principale. La sua importanza diventa fondamentale durante l'abbassamento del livello mare relativo.

Bottomset è la porzione profonda suborizzontale, alla base del *cliniform*.

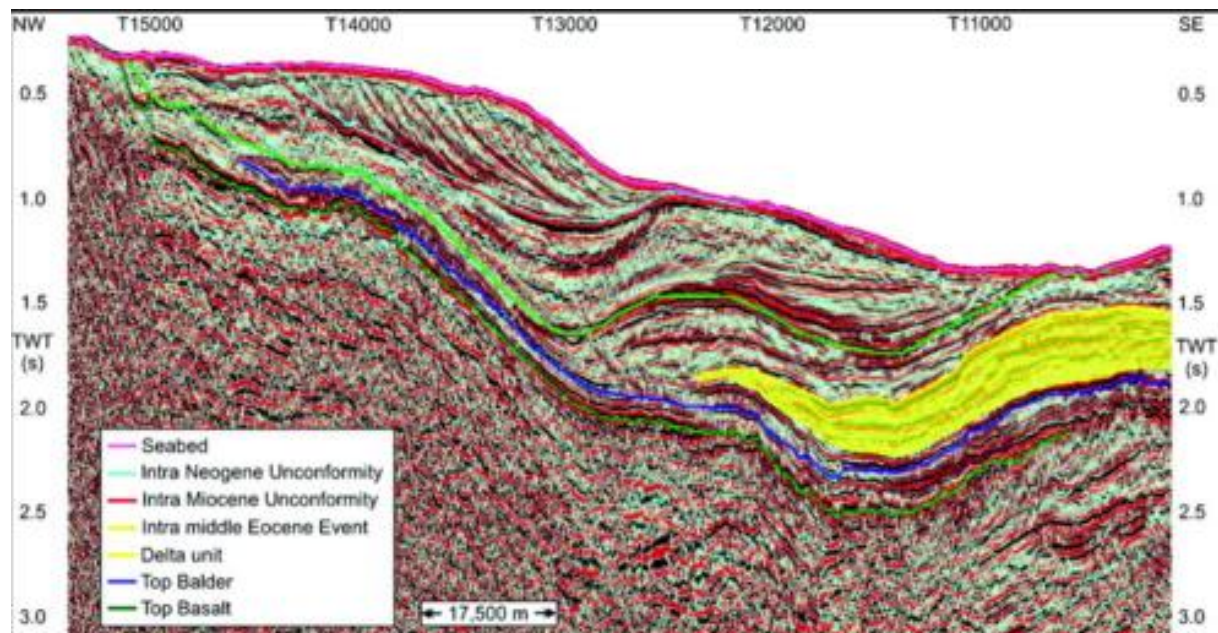
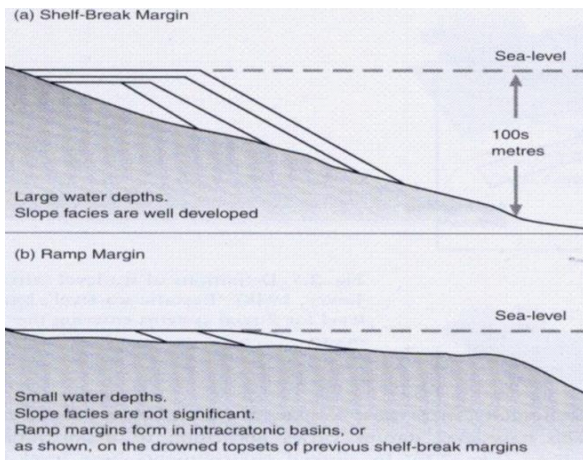


La risposta dei sistemi deposizionali all'abbassamento del livello mare relativo dipenderà dalla natura dei margini di bacino.

- *Shelf break margins*: i *clinoforms* sono ben sviluppati. Tipicamente sui margini passivi, su cui si sviluppano dei depositi di delta progradanti e talvolta anche forti correnti di torbida.
- *Ramp margins*: relativamente s.w., forti effetti per correnti e tempeste. Molti degli attuali sistemi deltizi progradano sopra il *topset* di un precedente *shelf-break margin*.
- *Rift margins* (continentali o marini): pesantemente influenzati dal sistema di faglie
- *Foreland basins*: influenzati da direzione e quantità dell'apporto sedimentario.
- *Growth fault margins*: connessi a faglie sin-sedimentarie prodotte per gravità.

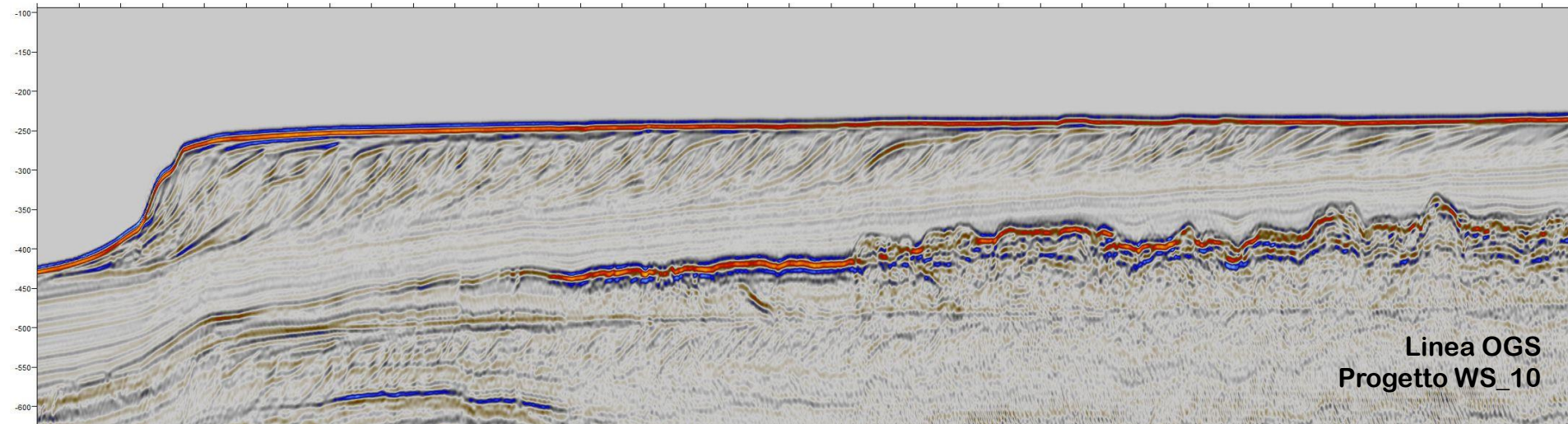


Esempi di *clinoforms*



Shelf break margin ↑

Ramp margin ↓

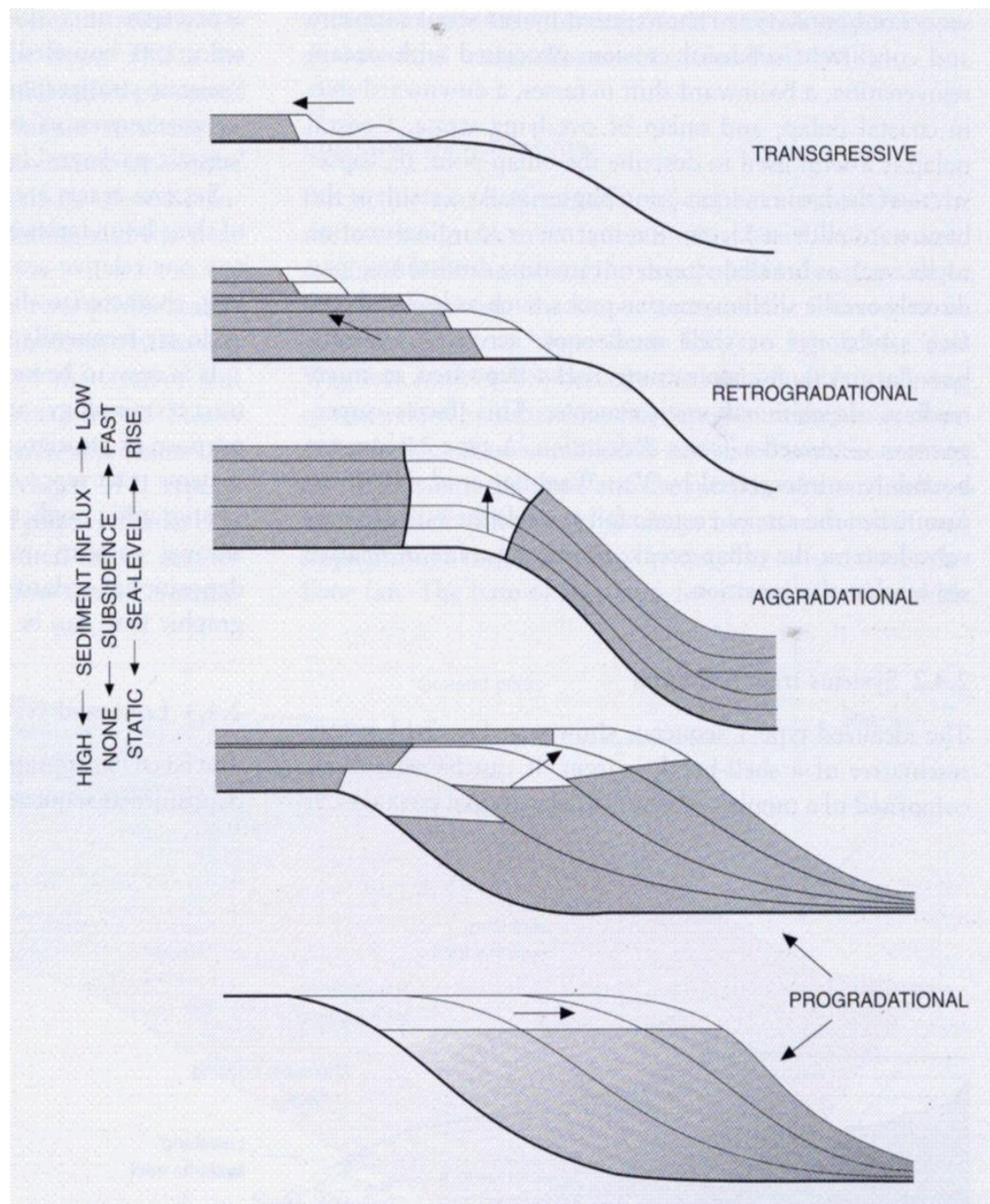


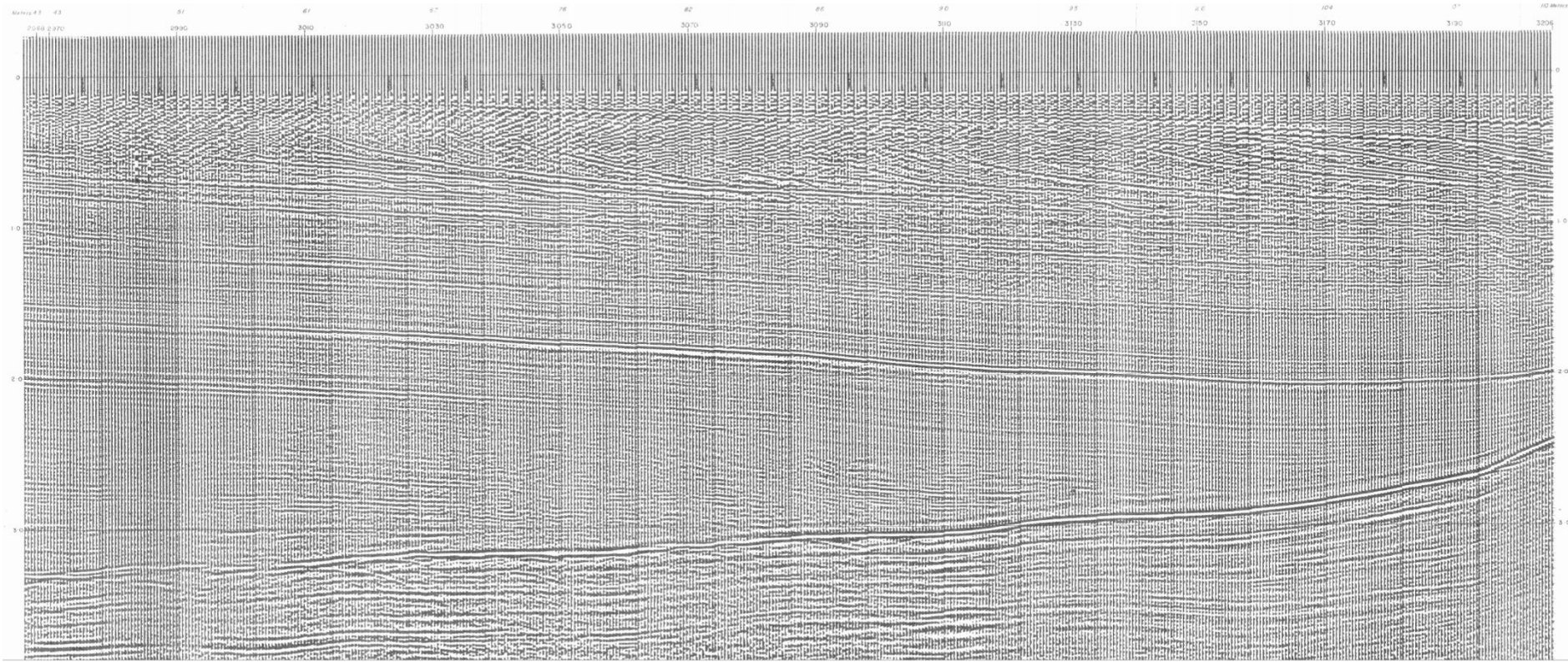
Le geometrie delle sequenze depostesi lungo un margine dipenderanno dal bilanciamento tra apporto sedimentario e creazione dell'*accomodation*.

Si avranno diversi possibili spostamenti di *offlap break* e di *shoreline* in funzione di questi diversi parametri.

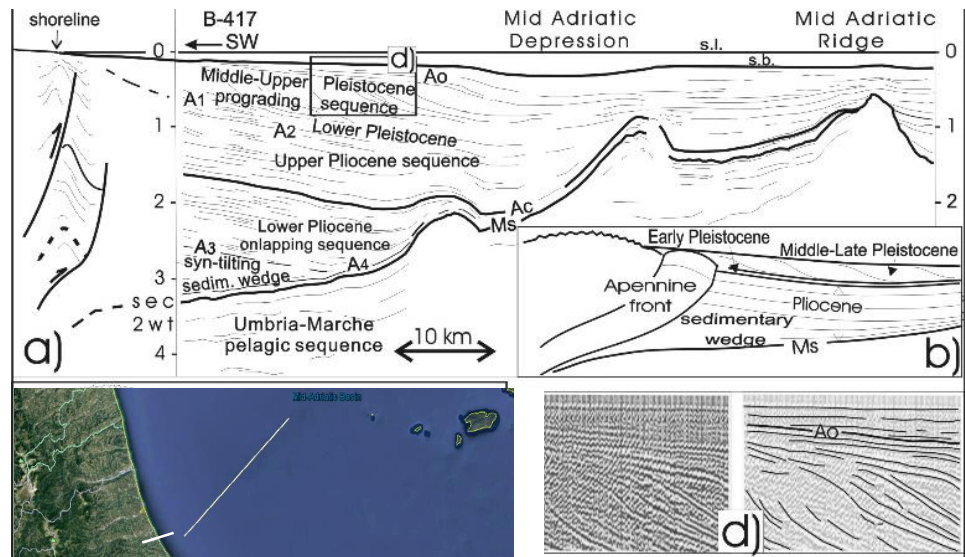
Le diverse fasi di progradazione, aggradazione e retrogradazione non sono continue ma avvengono in piccola scala (sub-sismica) producendo delle unità chiamate parasequenze.

Più parasequenze insieme danno i parasequence sets osservabili nei dati sismici.



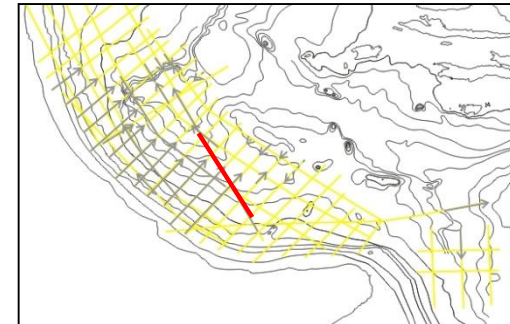
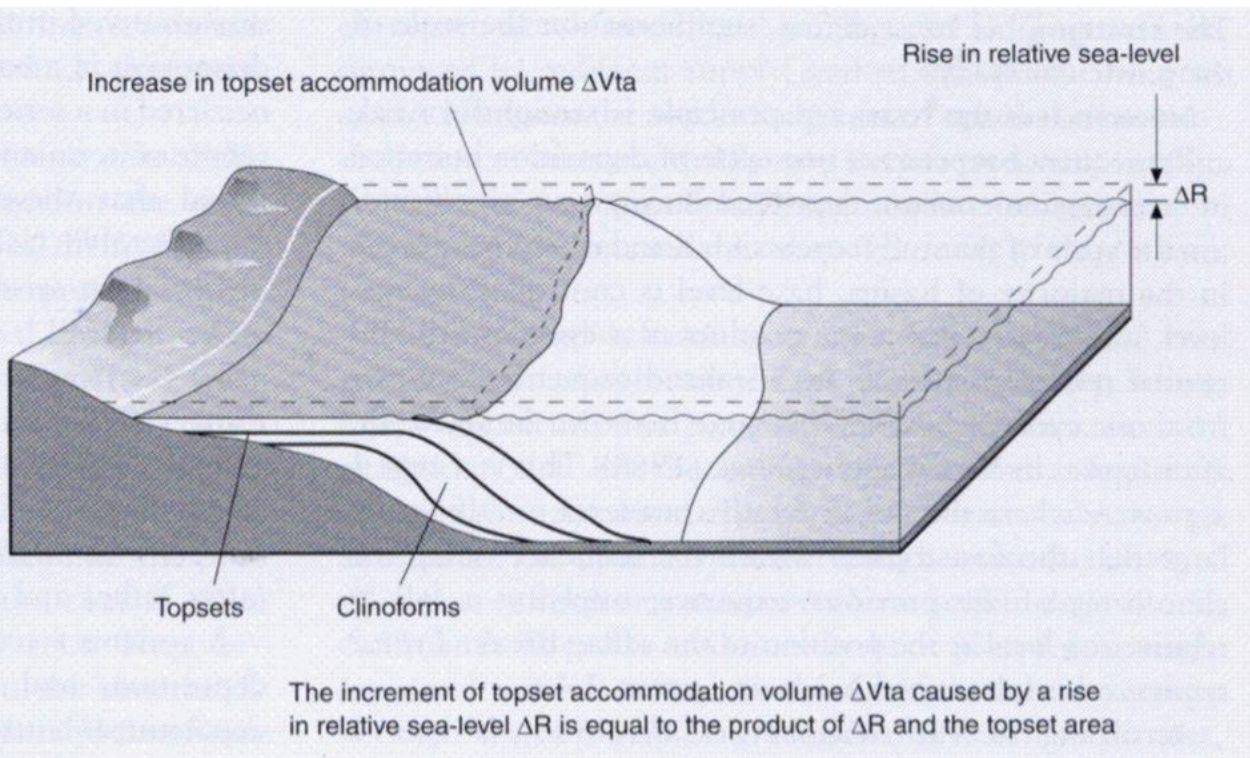
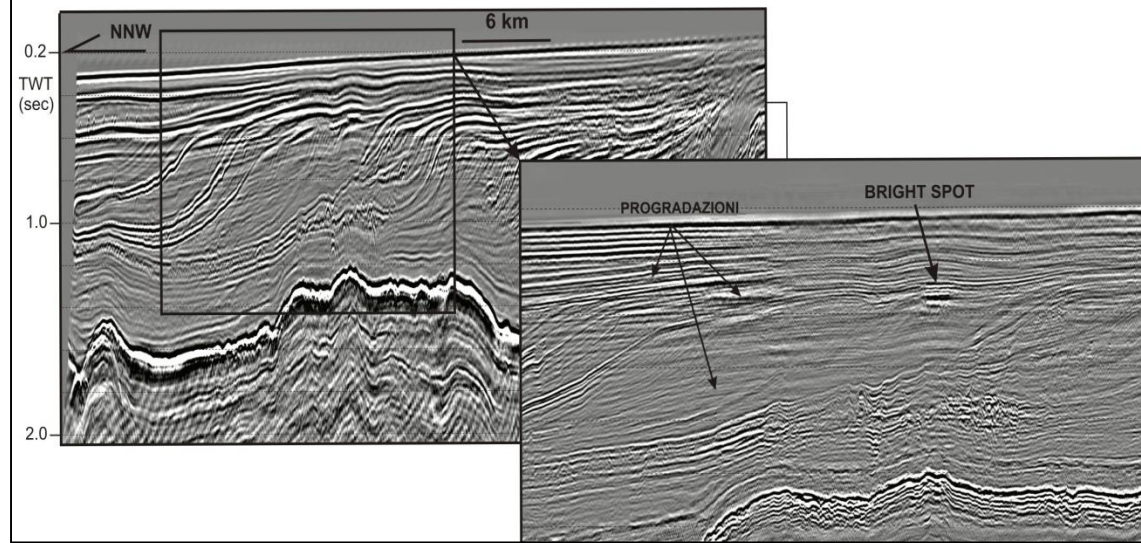


Sequenza progradante del Pleistocene Medio-Superiore in Adriatico ...



Topset accommodation volume :

l'aumento del livello mare
relativo determina un
incremento di tale volume



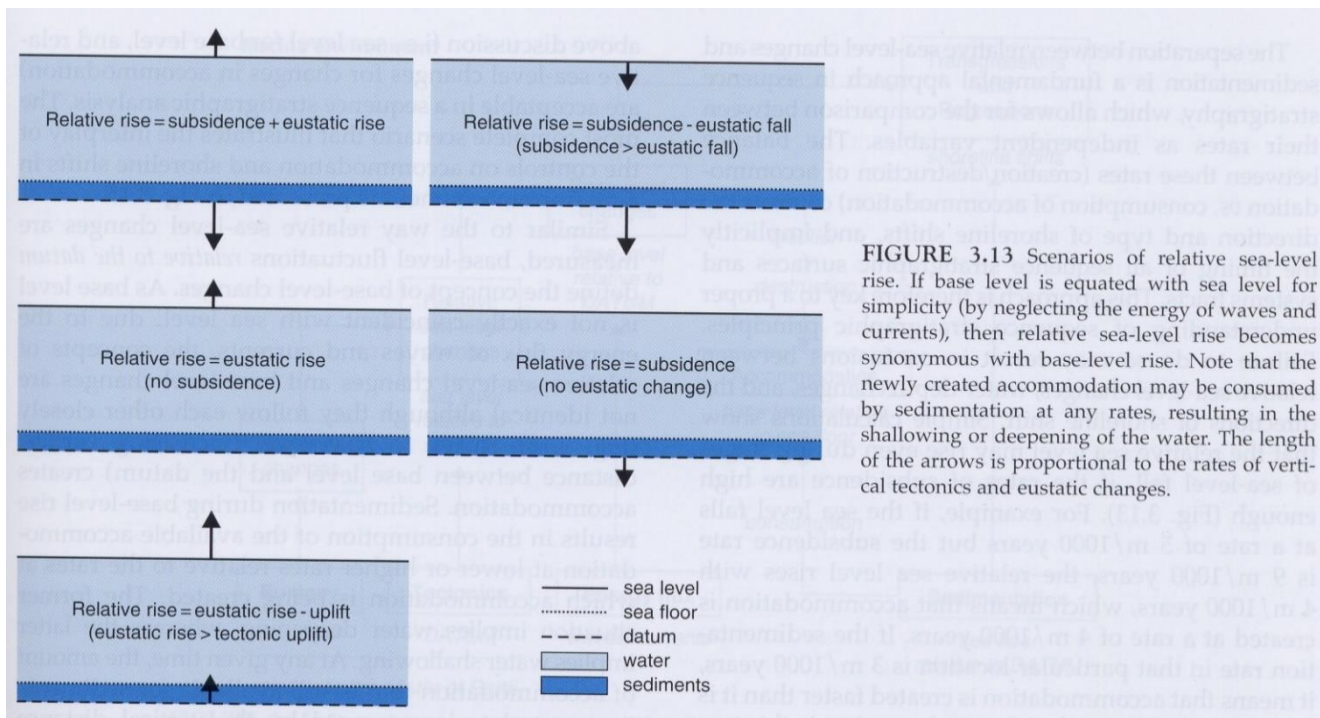


FIGURE 3.13 Scenarios of relative sea-level rise. If base level is equated with sea level for simplicity (by neglecting the energy of waves and currents), then relative sea-level rise becomes synonymous with base-level rise. Note that the newly created accommodation may be consumed by sedimentation at any rates, resulting in the shallowing or deepening of the water. The length of the arrows is proportional to the rates of vertical tectonics and eustatic changes.

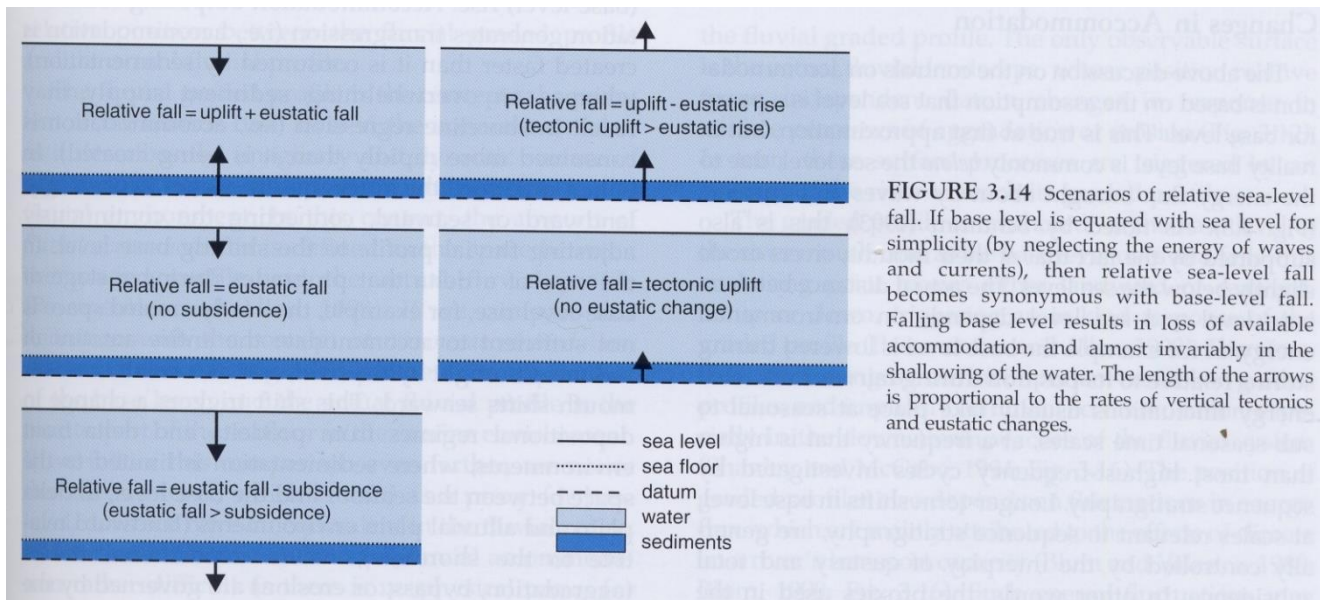


FIGURE 3.14 Scenarios of relative sea-level fall. If base level is equated with sea level for simplicity (by neglecting the energy of waves and currents), then relative sea-level fall becomes synonymous with base-level fall. Falling base level results in loss of available accommodation, and almost invariably in the shallowing of the water. The length of the arrows is proportional to the rates of vertical tectonics and eustatic changes.

Sismostratigrafia

Il principio fondamentale della Stratigrafia

Sismica (o Sismostratigrafia) è che, entro la risoluzione del metodo, le riflessioni sismiche seguono le stratificazioni

principali approssimando le linee del tempo.

Il contrasto di impedenza rappresentato sulla sezione sismica è prodotto dalle interfacce tra gli strati e non dalle variazioni laterali di facies.

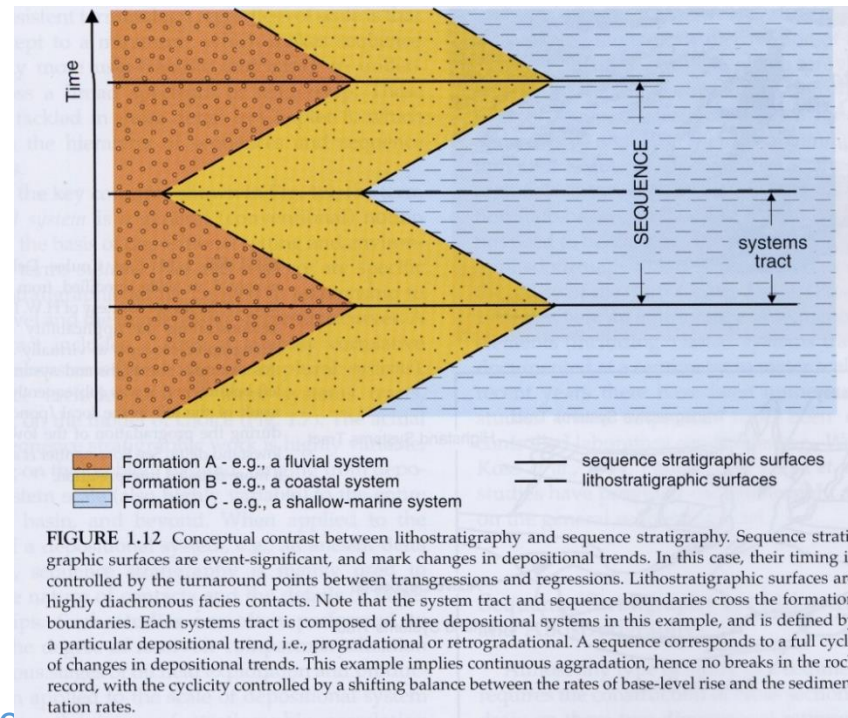
Alla scala della risoluzione sismica si può assumere che la facies cambia all'interno di strati tempo-equivalenti in modo graduale senza generare riflessioni sismiche.

Quindi le riflessioni rappresentano superfici tempo in 3 dimensioni, e separano rocce più antiche da rocce più giovani.

Alcune eccezioni, già note: contatti tra fluidi diversi, variazioni diagenetiche, *bottom simulating reflector*, fenomeni di *tuning*, etc.

Possiamo quindi dire che le riflessioni sismiche forniscono una informazione di tipo

cronostratigrafico, mentre le informazioni litologiche possono essere analizzate sulla base di caratteristiche del segnale e delle geometrie.



Sismostratigrafia

Sequenza: unità stratigrafica composta da una successione relativamente conforme di strati geneticamente correlati, limitata alla sommità e alla base da *unconformities* o dalle loro corrispondenti *conformities*.

Tale definizione non specifica la scala o la durata della sequenza, e non implica nessuna condizione per la formazione delle *unconformities*

Unconformity: superficie che separa uno strato più giovane da uno più antico, lungo la quale si ha evidenza

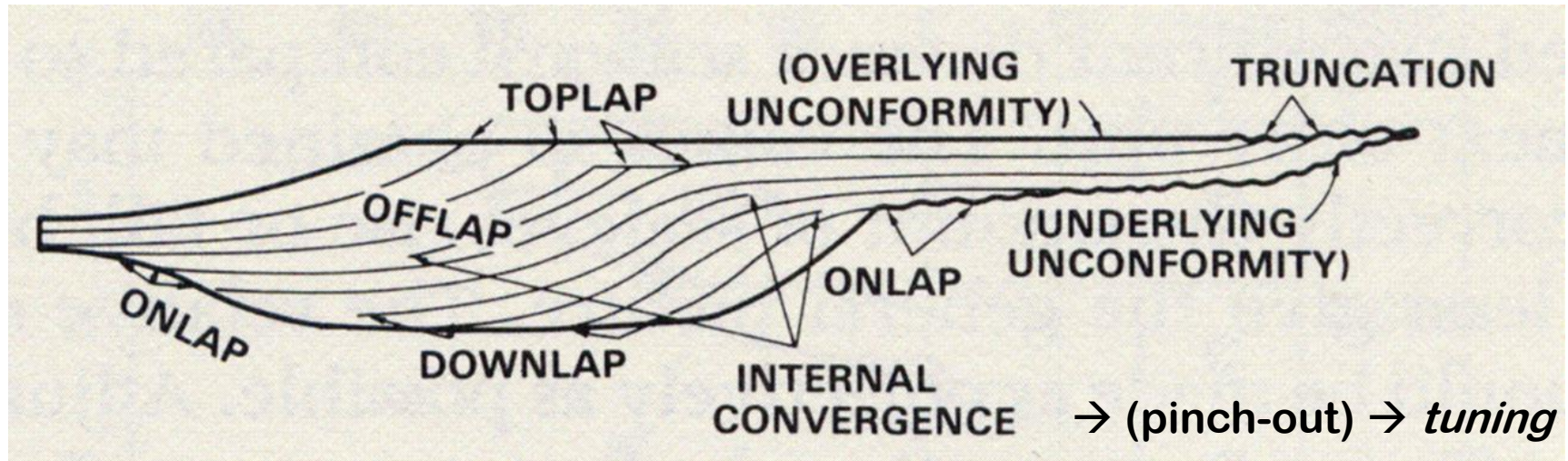
- di erosione

- di troncamento

- di esposizione subaerea

e lungo la quale si abbia un significativo *hiatus*.

Sismostratigrafia



Mitchum et al. (1977) coniarono alcune definizioni relative alle geometrie che talvolta caratterizzano le sezioni sismiche, in particolare i rapporti tra le riflessioni e la superficie sismica contro cui tali riflessioni terminano.

Alcune di tali definizioni si basano esclusivamente sulle geometrie (ies.: toplap, downlap, etc), altre considerano anche altri aspetti interpretativi (es: truncation).

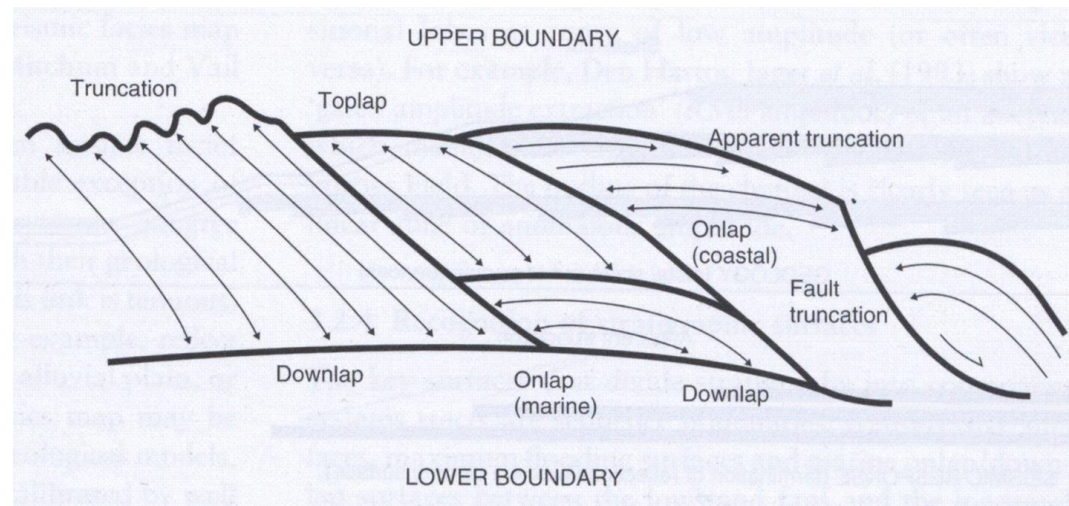
Graduale assottigliamento fino ad annullamento di spessori sedimentari porta ai cosiddetti «*pinch-out*», che possono facilmente produrre fenomeni di *tuning*

Sismostratigrafia

Lapout: terminazione laterale di un riflettore al suo limite deposizionale.

Baselap lapout di una riflessione contro una superficie sottostante, base della sequenza.

- **Downlap**: **baselap** in cui la superficie di base ha pendenza minore dei riflettori soprastanti, spesso alla base dei '*clinoforms*'. Rari in sedimenti subaerei.
- **Onlap**: **baselap** in cui la superficie di base ha pendenza maggiore dei riflettori soprastanti. Si distinguono in **Marine onlap** e **Coastal onlap**.
- **Toplap**: terminazione di riflessioni inclinate (*clinoforms*) contro una superficie soprastante a minor inclinazione (limite della deposizione proximale).
- **Truncation**: il riflettore originariamente si estendeva oltre, ma eventi quali erosione, faglia, superficie di *slump*, domo salino o d'argilla, intrusione ignea, lo hanno troncato.



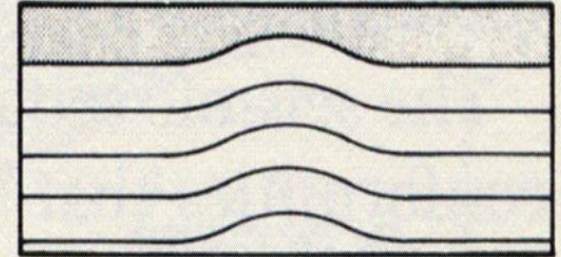
Limiti di Sequenze Sismostratigrafiche



EROSIONAL TRUNCATION



2. TOPLAP



3. CONCORDANCE

Relazioni tra riflessioni interne ad una sequenza sismostratigrafica ed il limite superiore della sequenza stessa

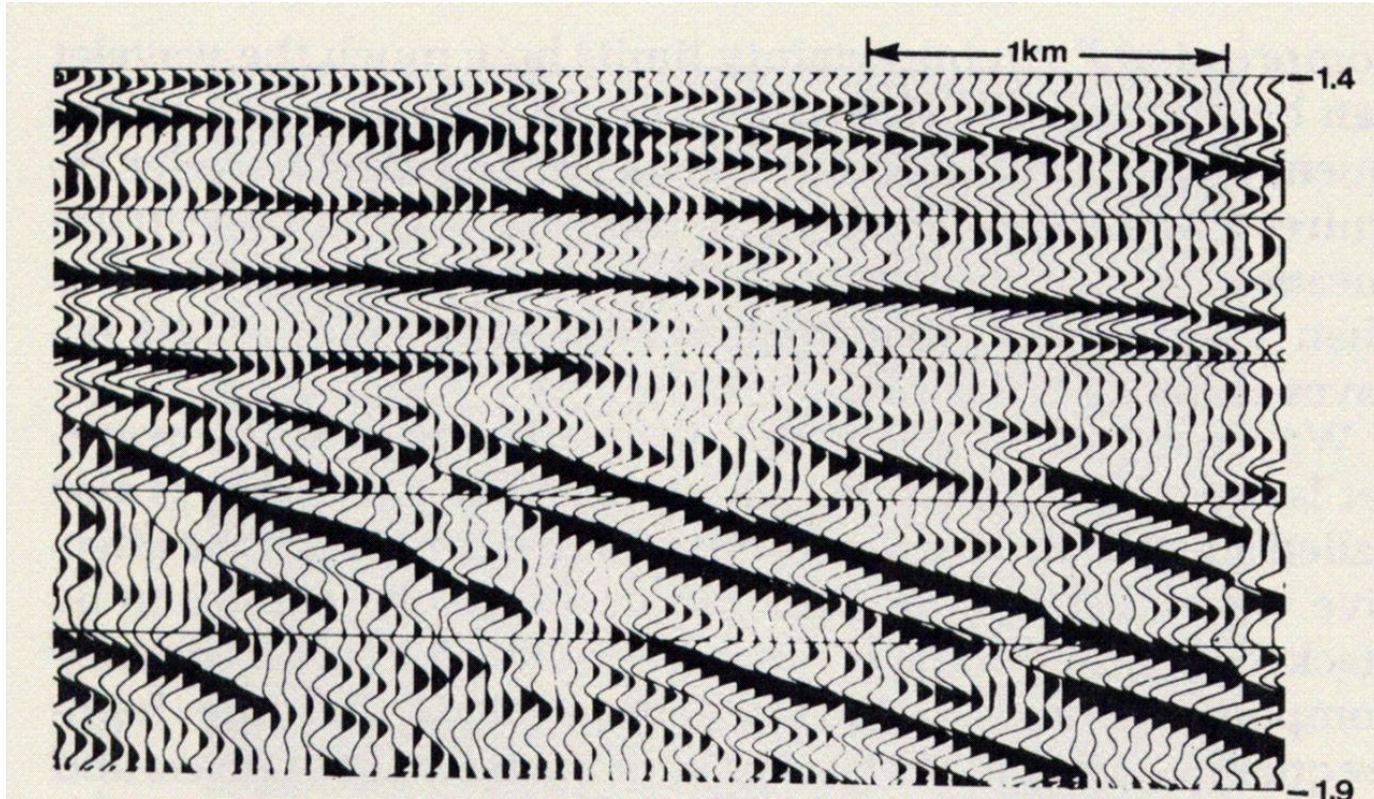
Si possono avere diversi tipi di '*truncation*' :

-**Erosional truncation**: per erosione degli strati

-**Apparent truncation**: terminazione di riflessioni a basso angolo di pendenza sotto una superficie sismica pendente, relativa a sedimentazione marina condensata; dipende dalla risoluzione sismica.

-**Fault truncation**: terminazione delle riflessioni contro una faglia, o *slump*, o intrusione, sin- o post-sedimentario

Limiti di Sequenze Sismostratigrafiche



Esempi di
terminazione
in *Toplap*



Esempio dal Mare del Nord:

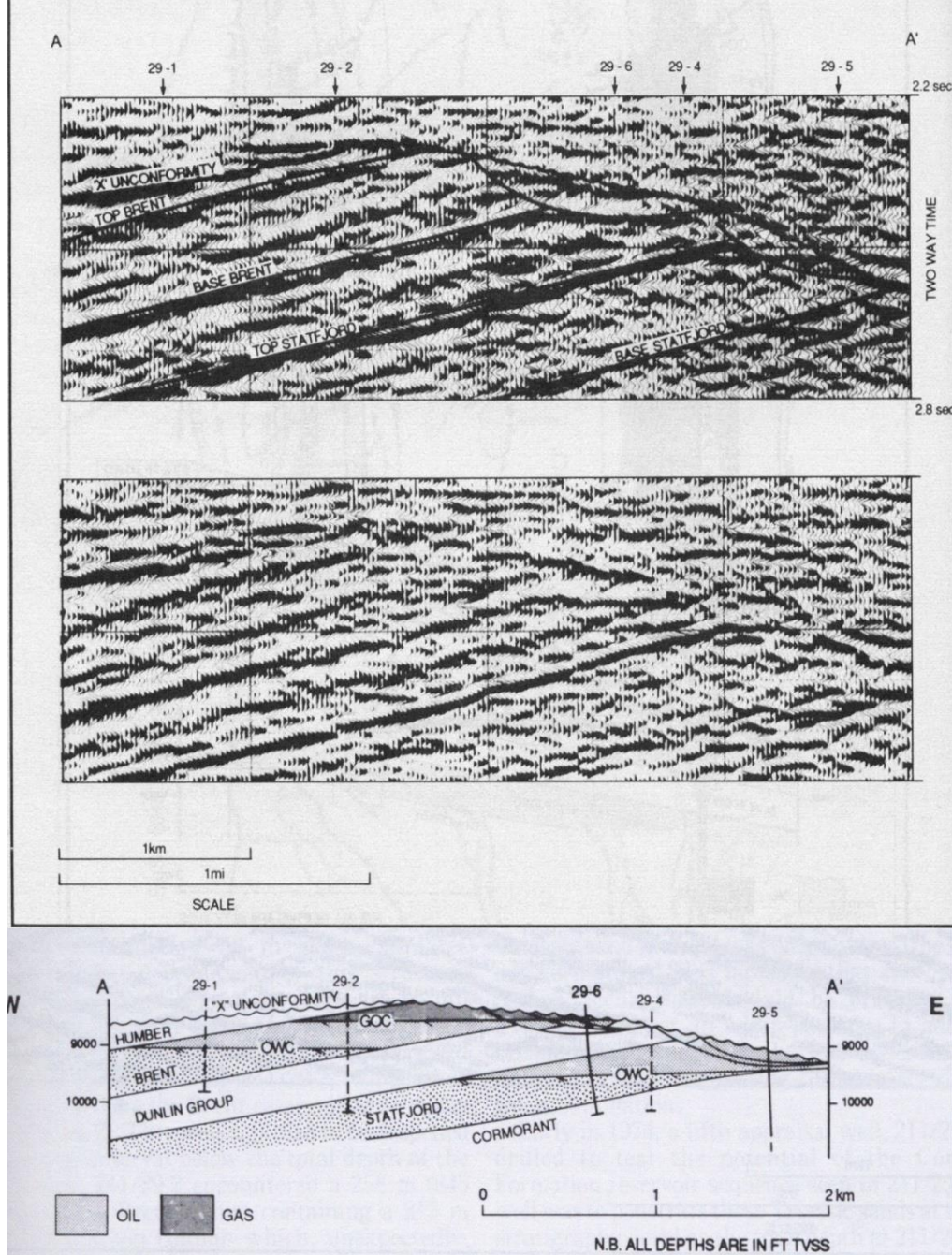
Brent Field

Troncamento per Erosione

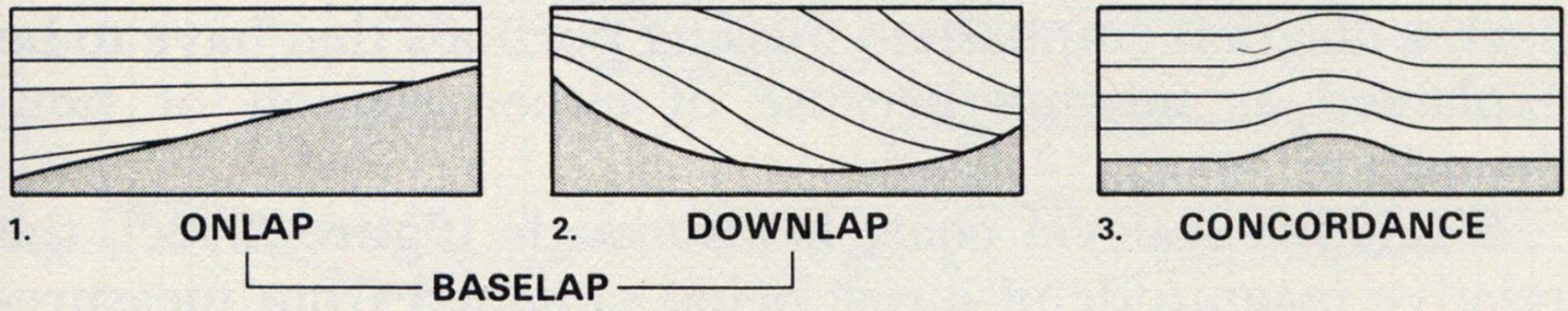
Nel Mare del Nord il *rifting*

Mesozoico ha prodotto la rotazione
dei blocchi fagliati e conseguente
erosione dei settori sollevati durante il
Cretacico Inferiore.

Ciò ha determinato le condizioni per
l'accumulo di idrocarburi all'interno
delle sequenze di arenarie del
Giurassico medio (*Brent Group*) e del
Triassico/Giurassico Inferiore
(*Stratfjord Fm.*) ricoperte da marne e
argille del Cretacico Sup./ Cenozoico.



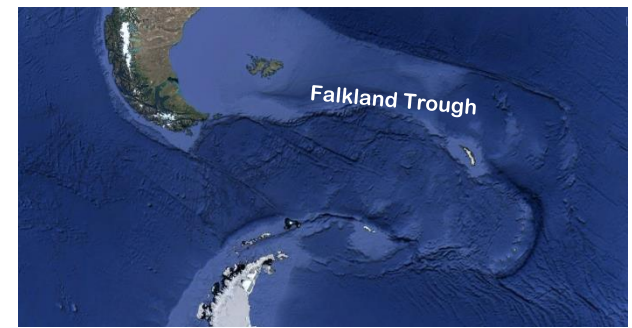
Limiti di Sequenze Sismostratigrafiche



Relazioni tra riflessioni interne ed il limite inferiore di una sequenza sismostratigrafica

Terminazione in *onlap*, esempio nel *Falkland Trough*.

L'andamento non orizzontale dei riflettori relativi al riempimento del bacino a sinistra è dovuto non tanto a tettonica sin-sedimentaria, quanto ad effetti erosivi e deposizionali delle correnti di fondo mare (contouriti)



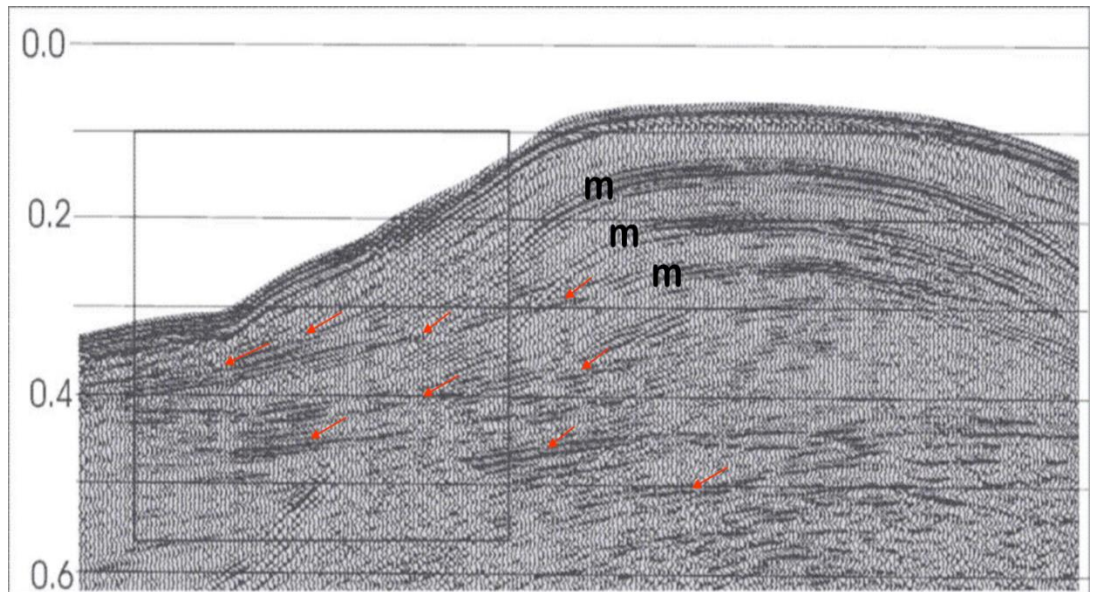
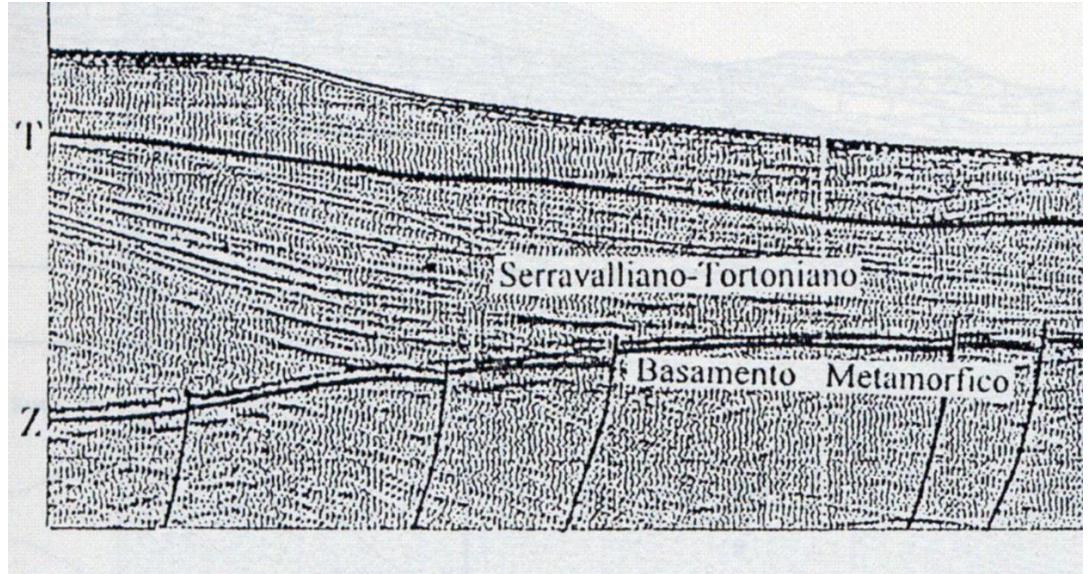
Limiti di Sequenze Sismo-stratigrafiche

esempi dallo Stretto di Messina

Esempio di terminazione in *down-lap* dei sedimenti Serravalliano-Tortoniani sul Basamento.

Esempio dal Tirreno Meridionale, offshore Siciliano.

Terminazioni in *down-lap*: esempio nell'offshore di Messina, dove la Formazione deltizia delle Ghiaie di Messina giace sulla successione del Pliocene superiore-Pleistocene inferiore, costituita da sabbie, calcari a coralli, calcareniti ed argille. Le multiple del fondo mare (m), pur presenti, permettono comunque di riconoscere i principali riflettori sismici presenti nel profilo.



Es. dal Tirreno meridionale: Bacino di Cefalù. Terminazioni in *down-lap* o in *onlap* poi ruotato ?!

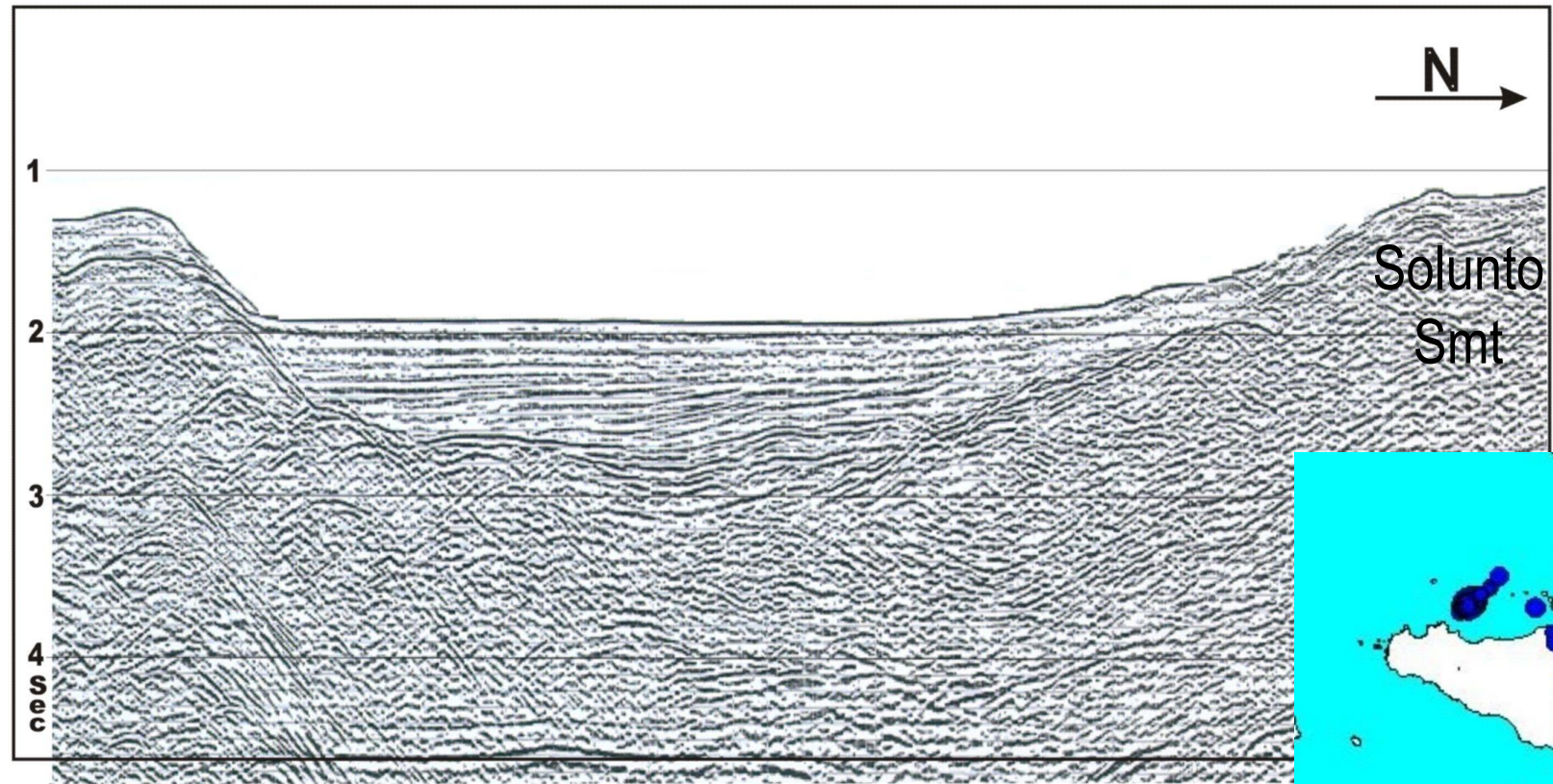
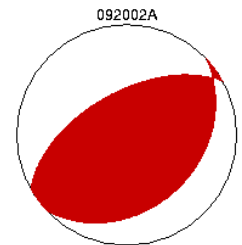
Sulla base dei dati di sismicità si può supporre che la struttura a N (Solunto Smt) si sia sollevata in epoca successiva alla sedimentazione della sequenza, oggi apparentemente in *downlap*, ma originariamente in *onlap*.

Date 09/20/02 Region SICILY MI 4.5 Mw 4.7
Centroid Location:
Or. Time23: 6: 7.1 Lat. 38.31 N Long. 13.62 E Dep 16.

Best Double Couple M0: 1.5*10**23
P1 str: 46 dip: 33 slip: 77
P2 241 58 99

Moment Tensor (10**23 dyn-cm)
mrr: 1.36 mtt: -0.91 mff: -0.46
mrt: -0.63 mrf: -0.21 mtf: -0.72

Principal Axes
T val: 1.53 plg: 76 az: 177
N 0.05 7 57
P -1.57 12 325



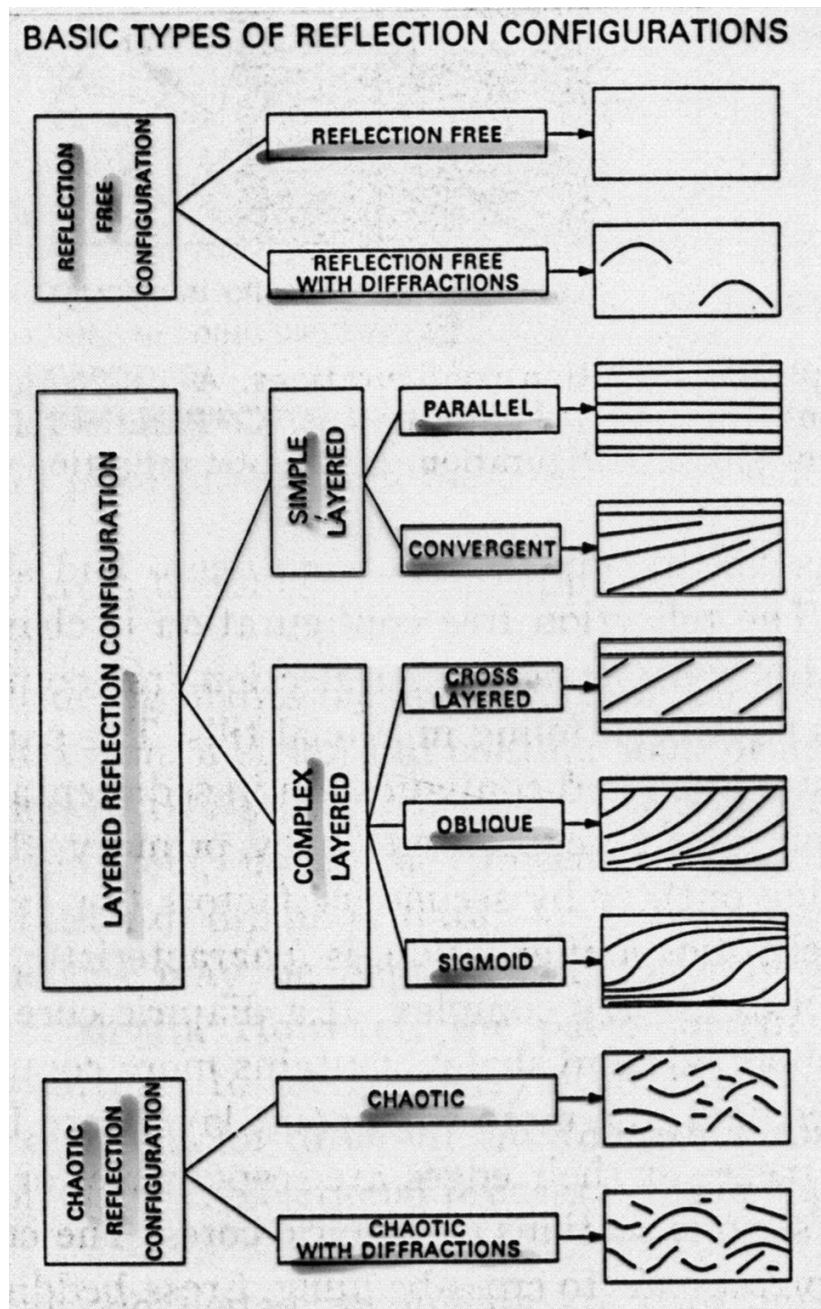
Facies

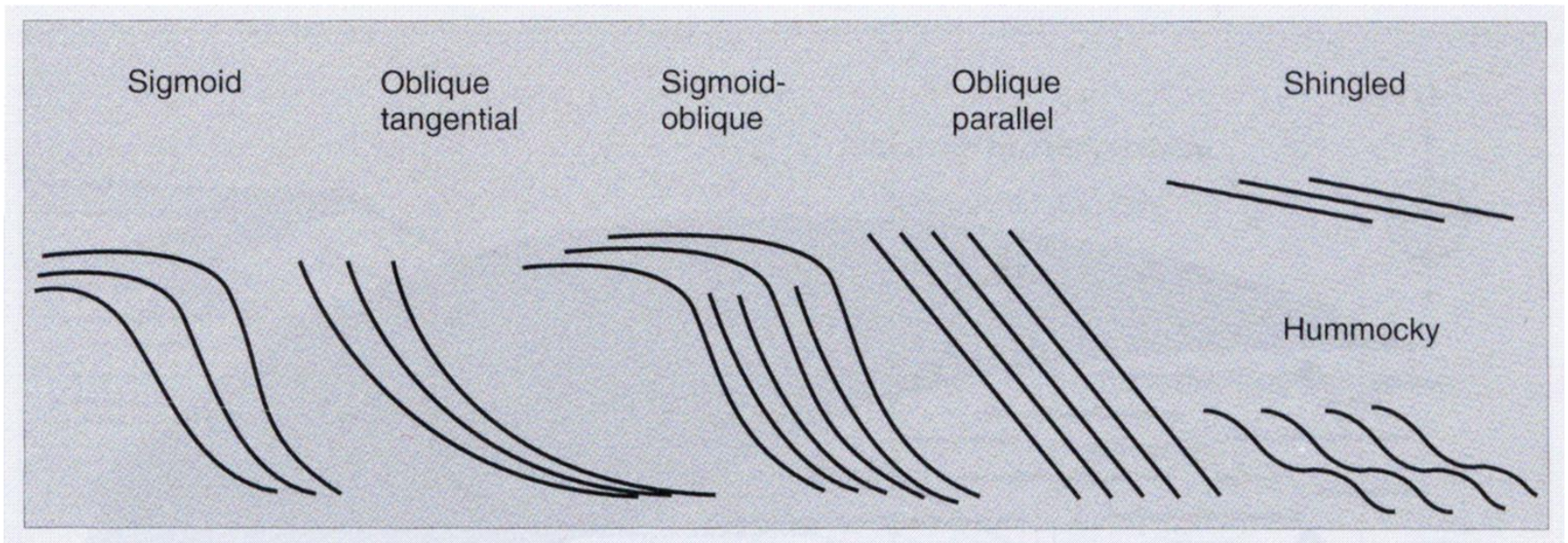
Sismostratigrafiche

Una volta individuate le principali sequenze sismiche presenti sui profili da interpretare, si passa all'analisi delle *facies* sismiche, cioè delle riflessioni interne alla sequenza.

Ci si basa sull'analisi di: geometria, continuità, ampiezza, frequenza, velocità intervallare, forma esterna e associazione tri-dimensionale dei gruppi di riflessioni.

Ognuno di questi parametri contiene informazioni di tipo stratigrafico.



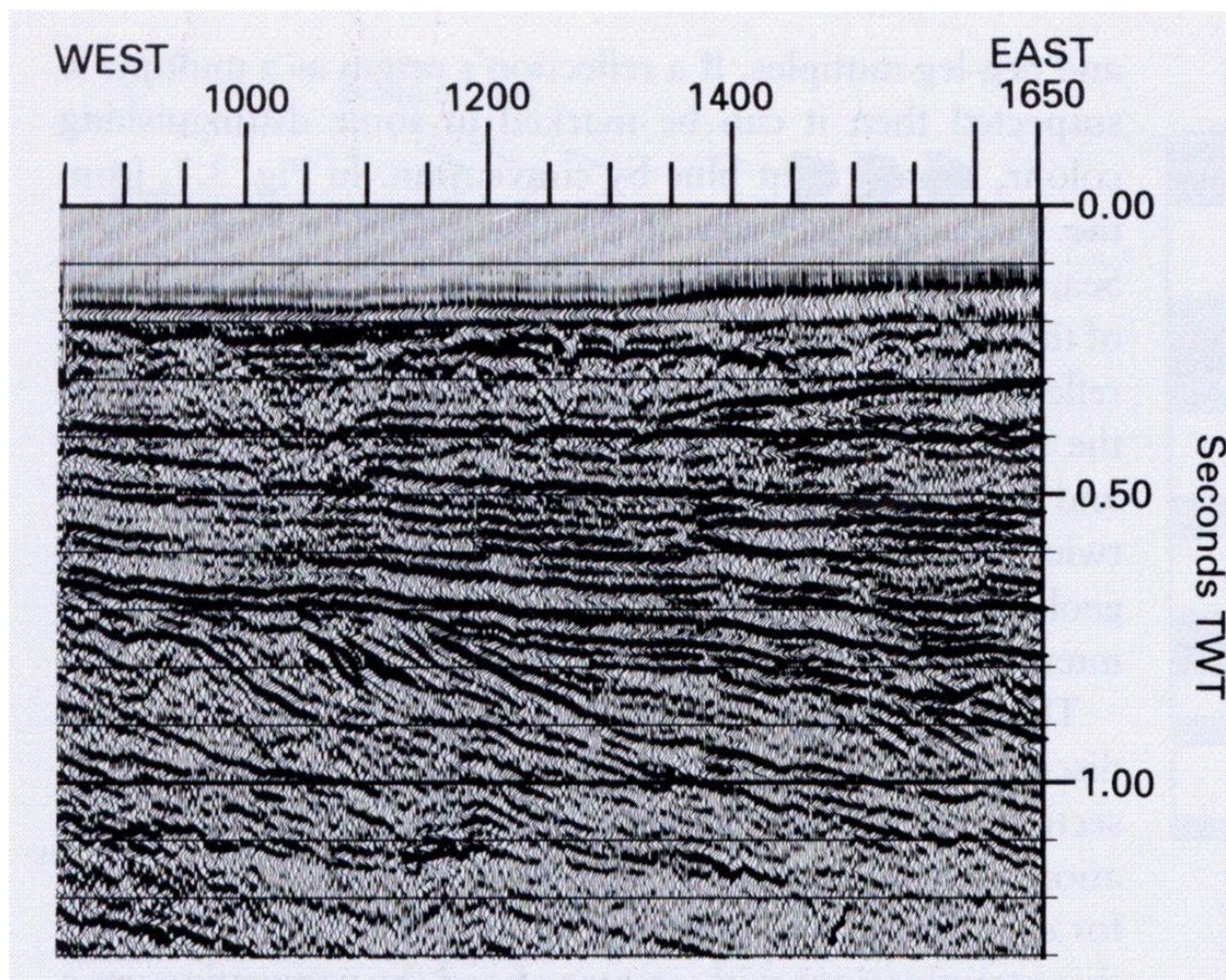


Esempi di facies sismiche di *clinoform*

Le unità progradanti lungo i margini di bacino sono talvolta ben individuabili sui profili sismici. In questa figura sono facilmente interpretabili sia il *topset* (variabile nel tempo) che i *clinoforms*

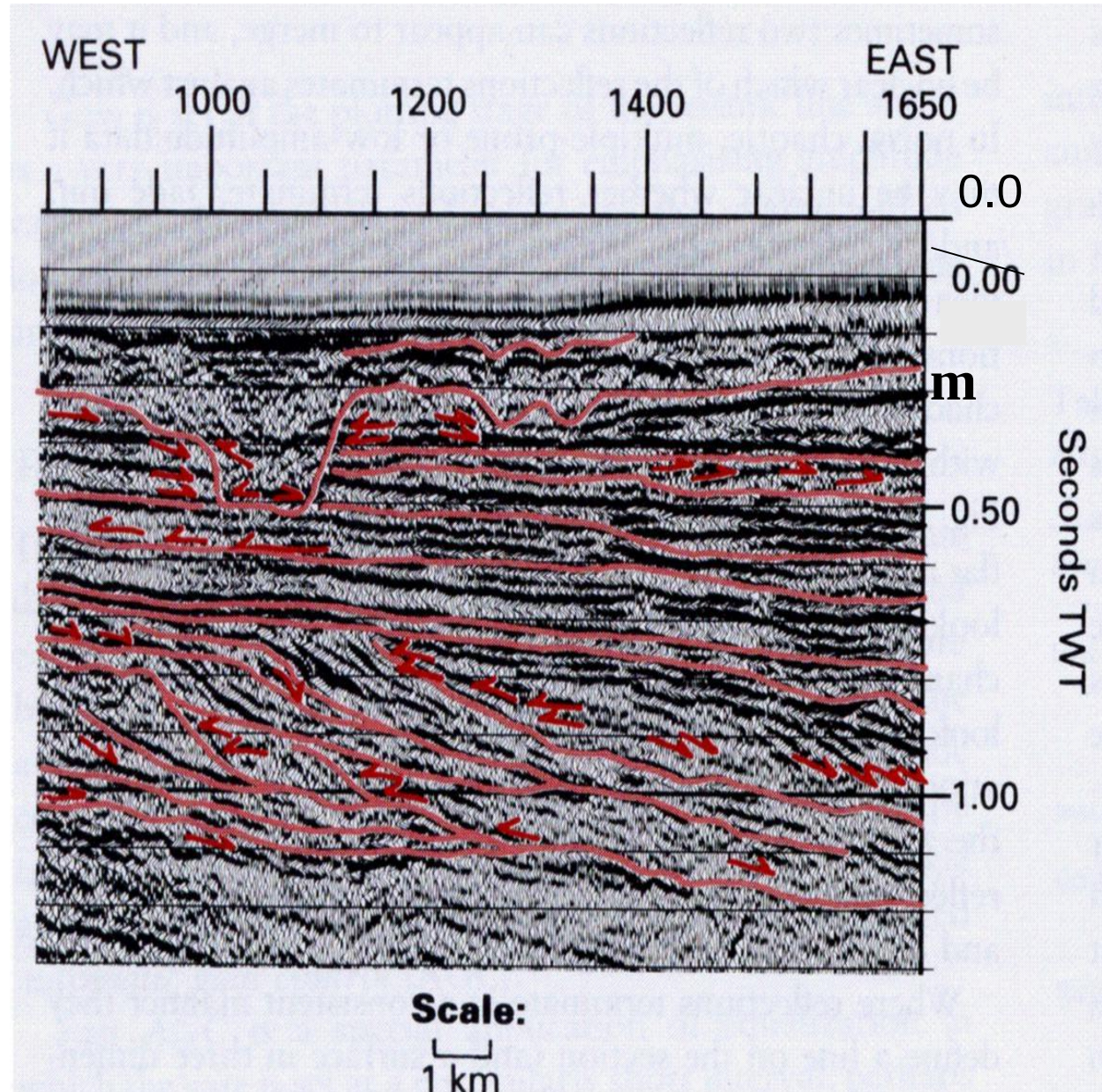
I criteri migliori per riconoscere un vero sistema *topset* /*clinoform* sono:

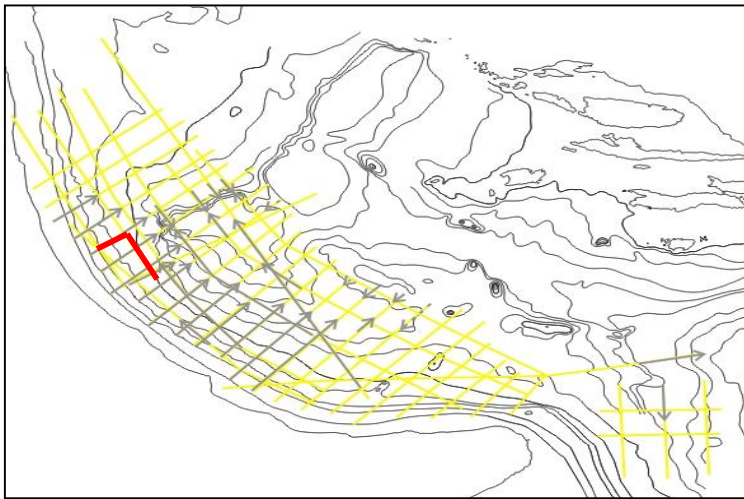
- individuare gli *offlap breaks*
- verificare concordanza e parallelismo tra i riflettori del *topset*



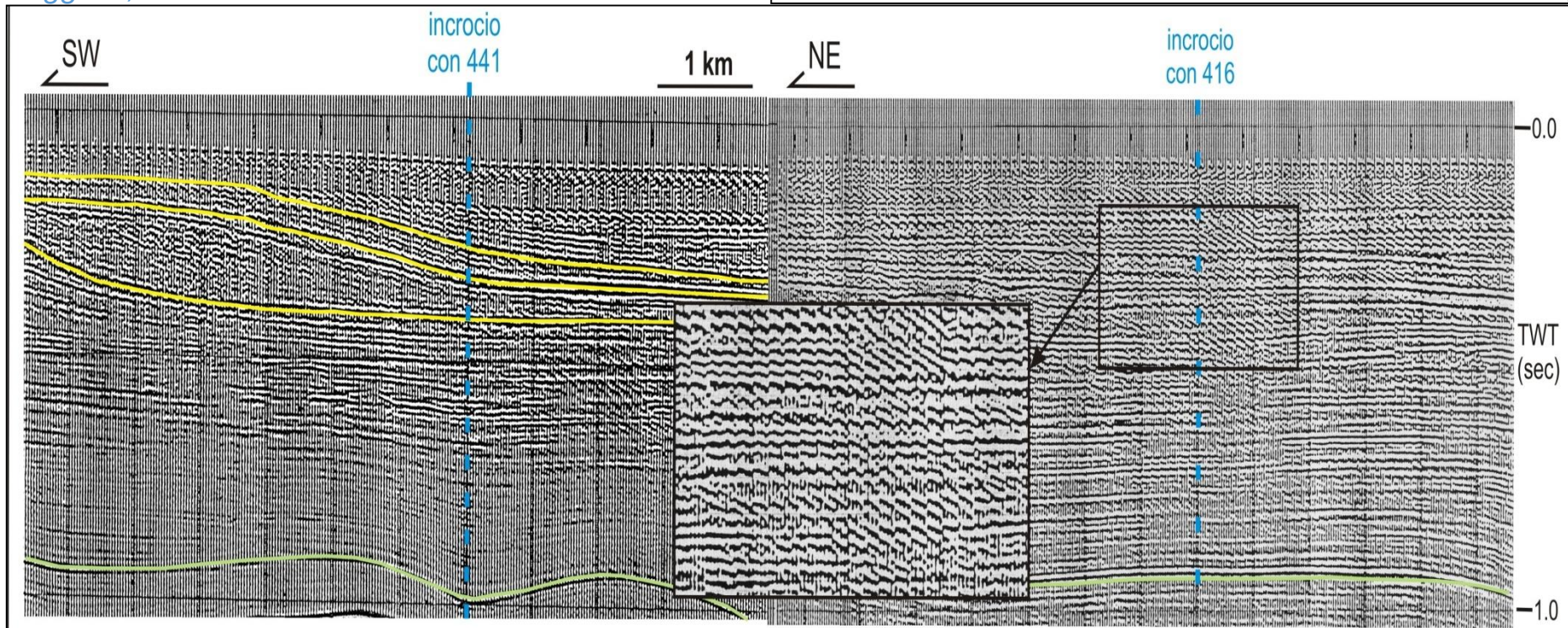
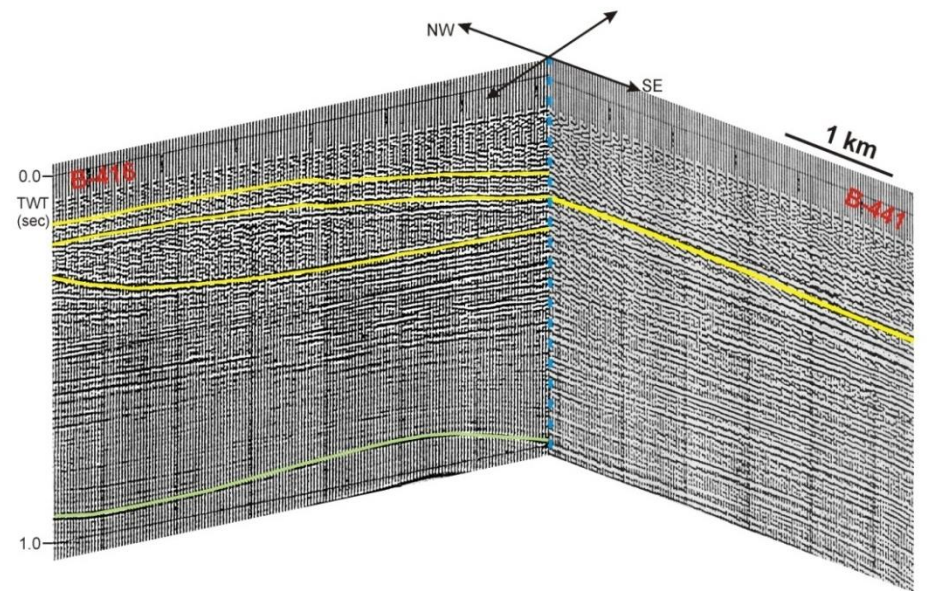
Nel profilo della figura precedente vengono qui interpretate le principali superfici sismiche che delimitano le sequenze. Per fare ciò prima si evidenziano le multiple (m) e poi, con le frecce, le terminazioni delle riflessioni.

Le superfici sismiche potranno avere terminazioni più o meno consistenti, dando luogo all'interpretazione di riflettori più o meno ben definiti.

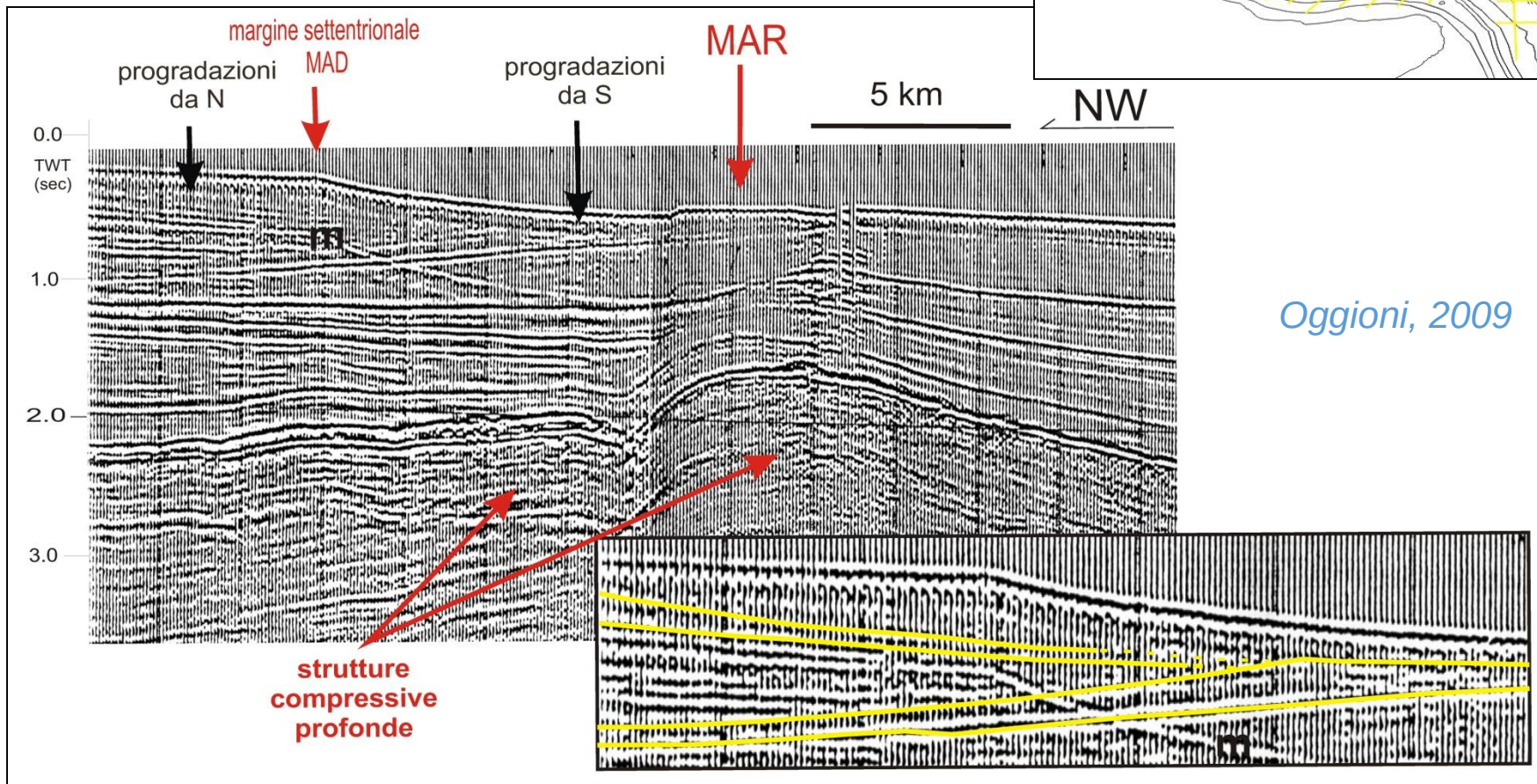
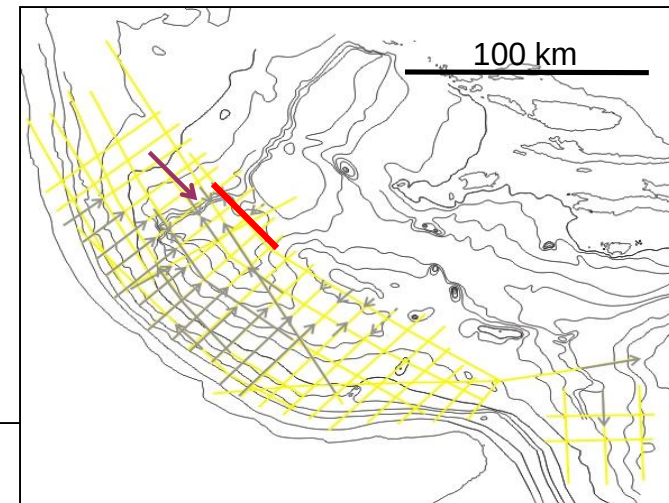


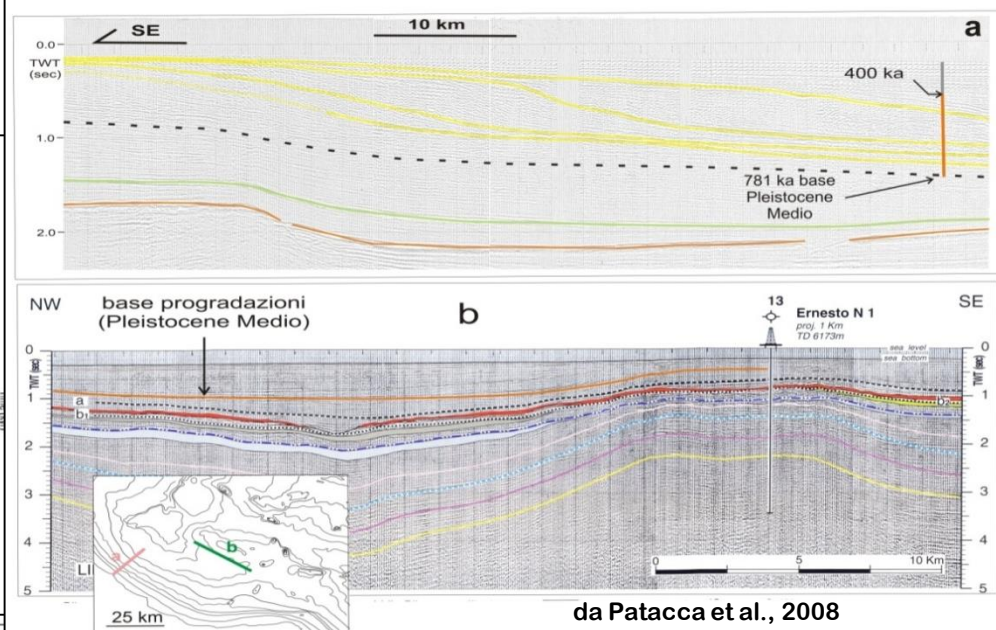
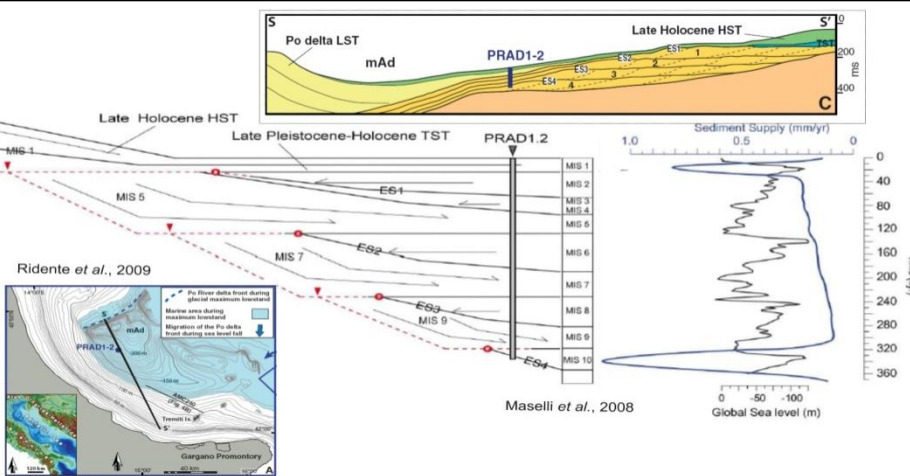


*Direzioni dei clinoform da due profili ortogonali
Oggioni, 2009*



Adriatico Centrale: progradazioni Pliostoceniche
ricoperte dalle progradazioni successive
all'ultimo ciclo glaciale

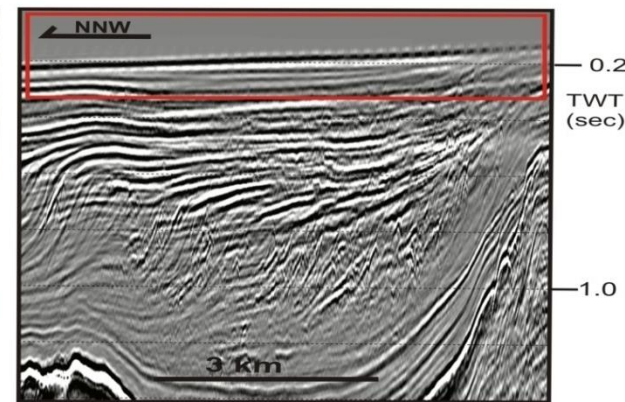
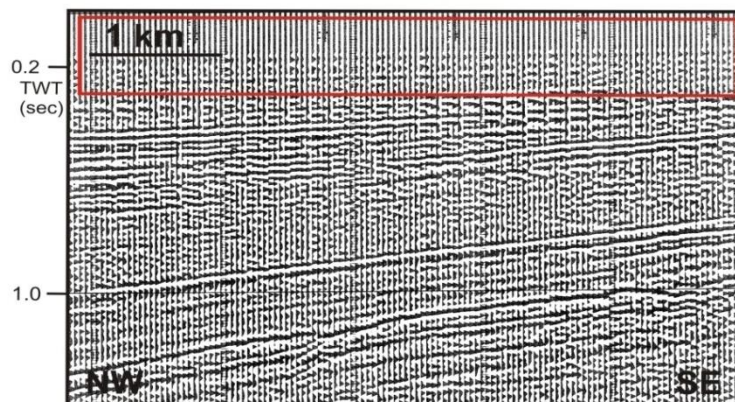
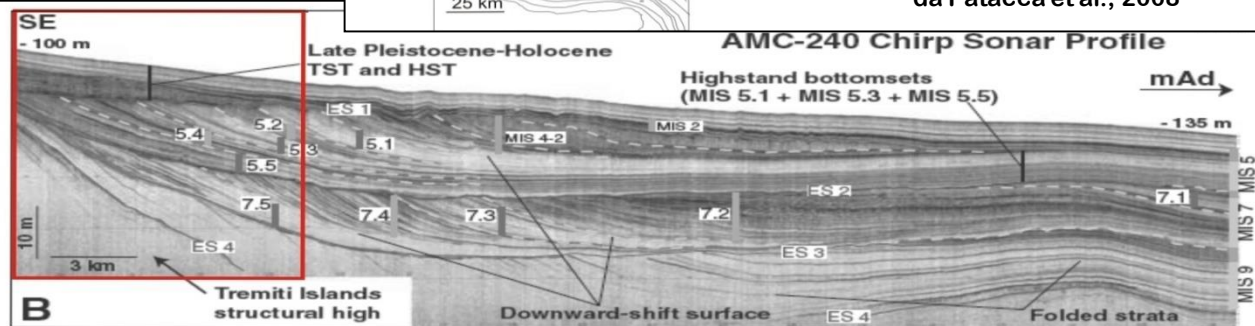


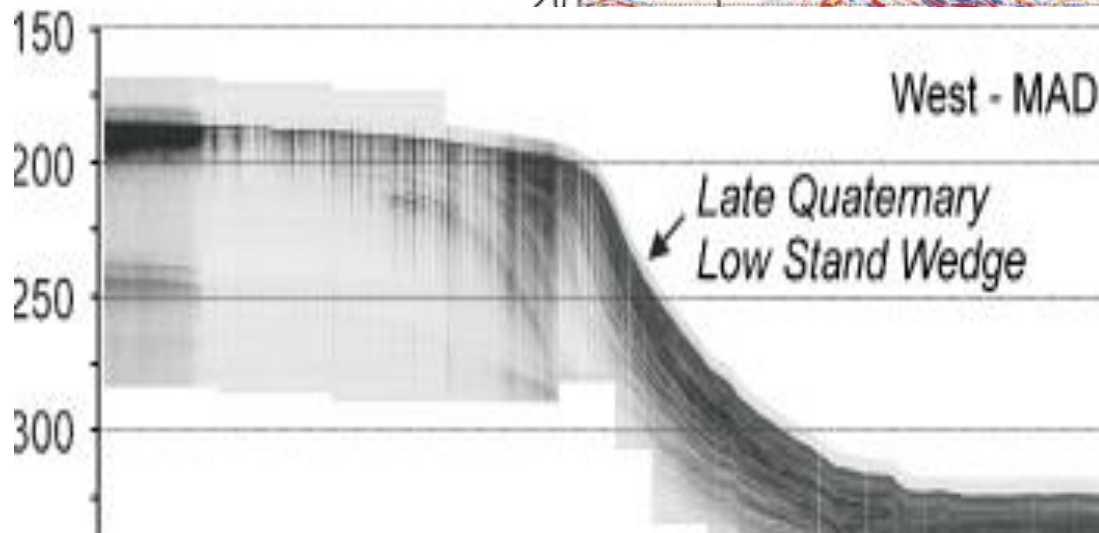
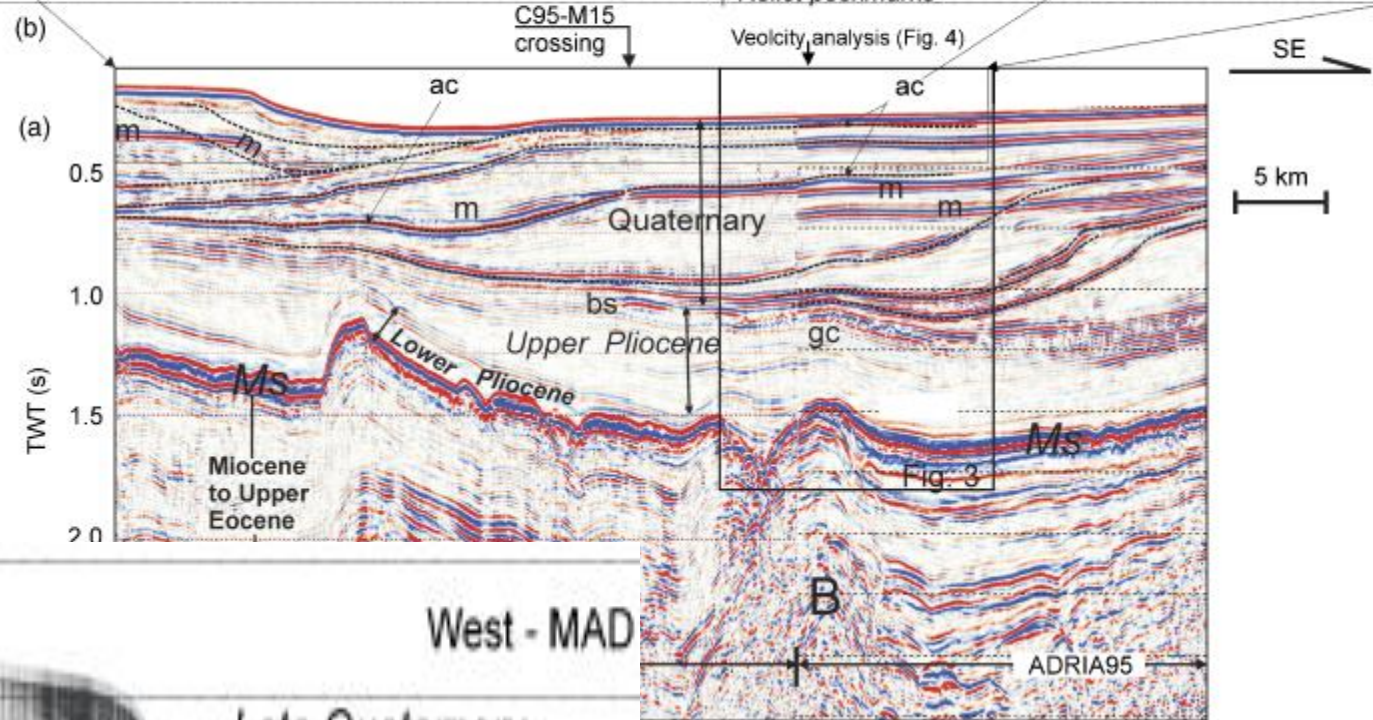
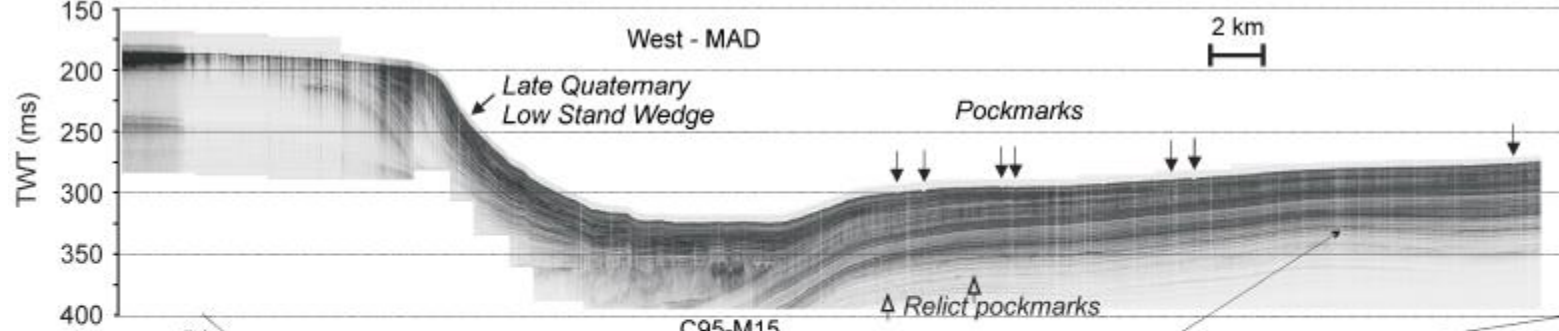


Progradazioni

e risoluzione

sismica:



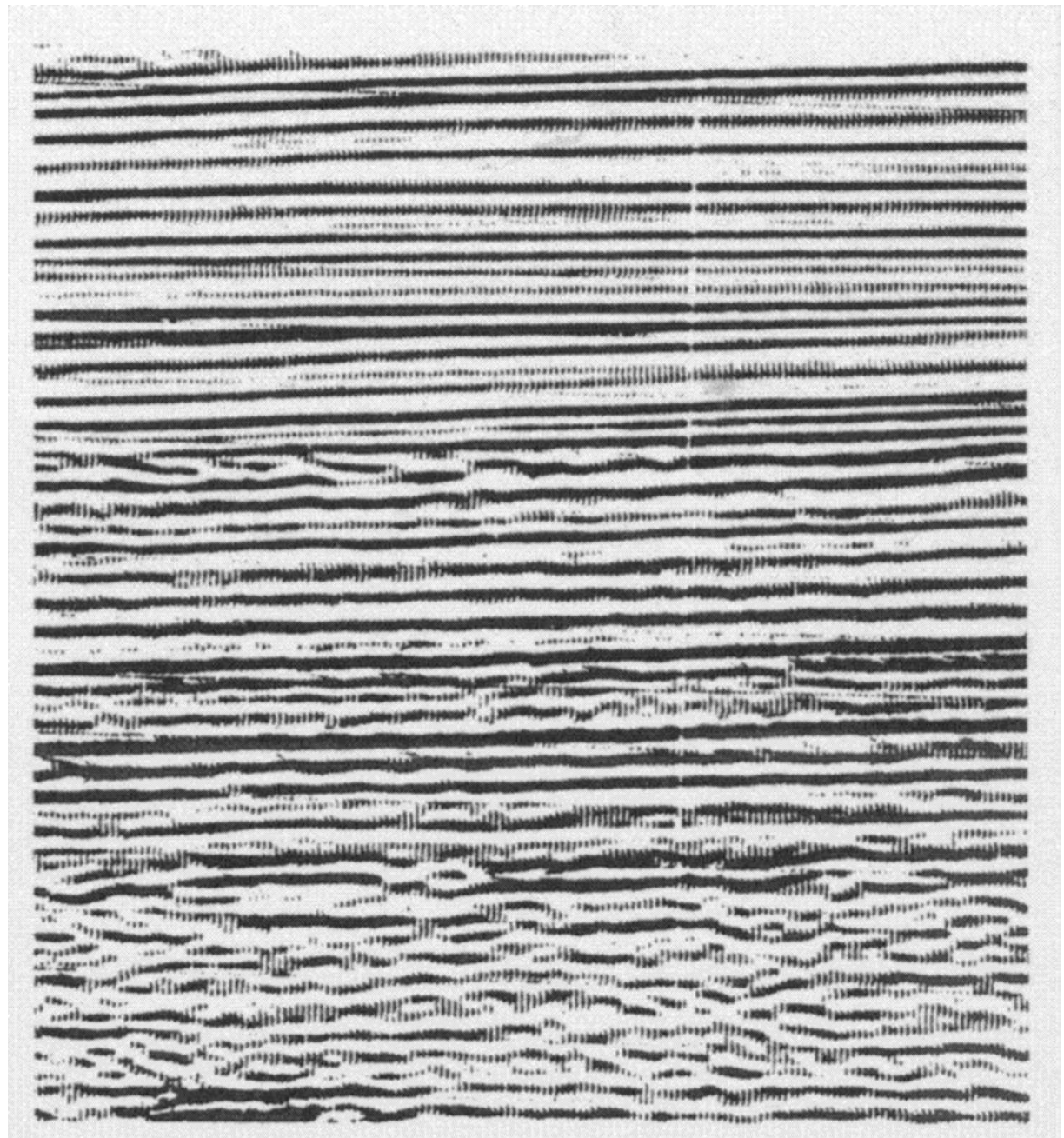


Adriatico Centrale

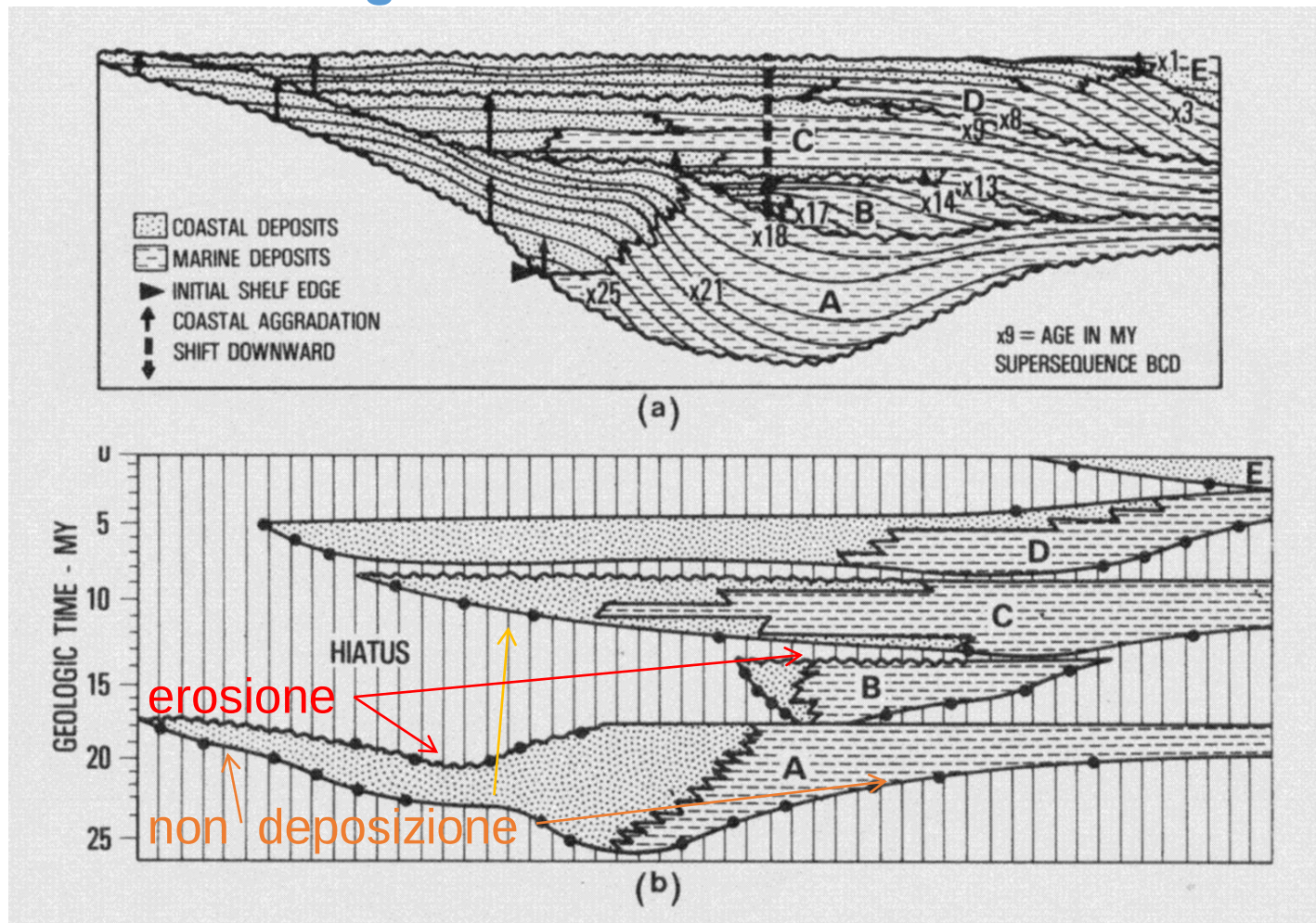
Facies marina di
deposizione tranquilla

Facies di deposizione
marina alternata a
deposizioni di mare
poco profondo

Facies di deposizione
non marina



Sezione crono-stratigrafica



La sezione crono-stratigrafica illustra le relazioni temporali dei sistemi deposizionali e le loro relazioni con le superfici di non-deposizione o erosione. Tali superfici possono così venir meglio valutate nella loro dimensione temporale.

Costruzione di una sezione crono-stratigrafica da dati sismici:

a) Schema dedotto dalla sezione sismica

b) Riconoscimento delle principali
sequenze sismiche

c) Numerazione delle riflessioni

d) trasferimento delle riflessioni nell'asse
dei tempi

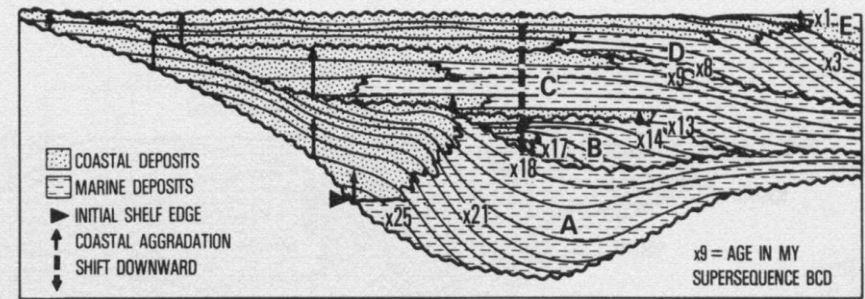
e) interpretazione cronostratigrafica del
dato sismico



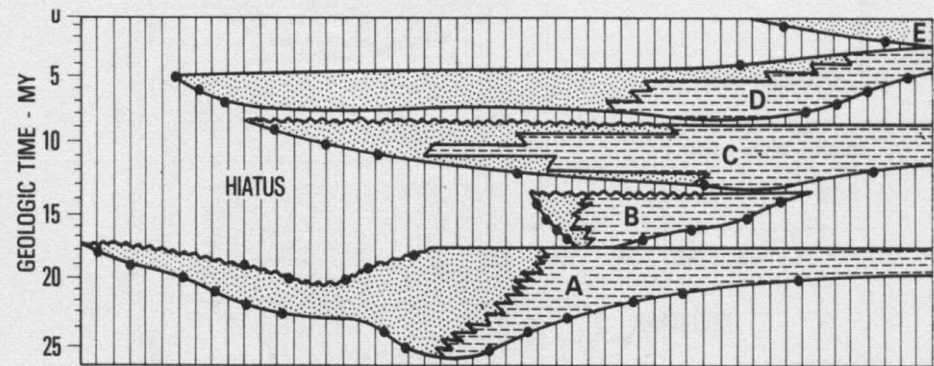
La sezione crono-stratigrafica, assicurando la coerenza nella distribuzione sia spaziale che temporale delle sequenze sedimentarie, fornisce un controllo sulla correttezza dell'interpretazione.

Fornisce inoltre un modello temporale per la misura di variabili quali flusso dei sedimenti, subsidenza, etc.

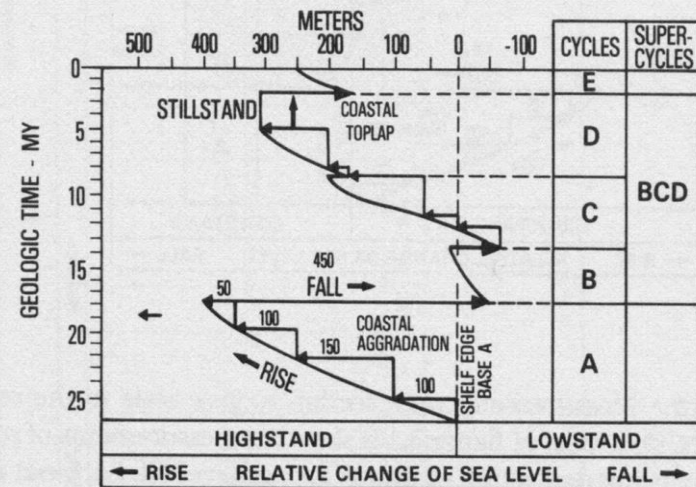
Ancora, la deposizione nel limite prossimale del *topset* (*coastal onlap*) da la misura diretta della frequenza (ma non della magnitudo) delle variazioni del livello mare relativo.



(a)

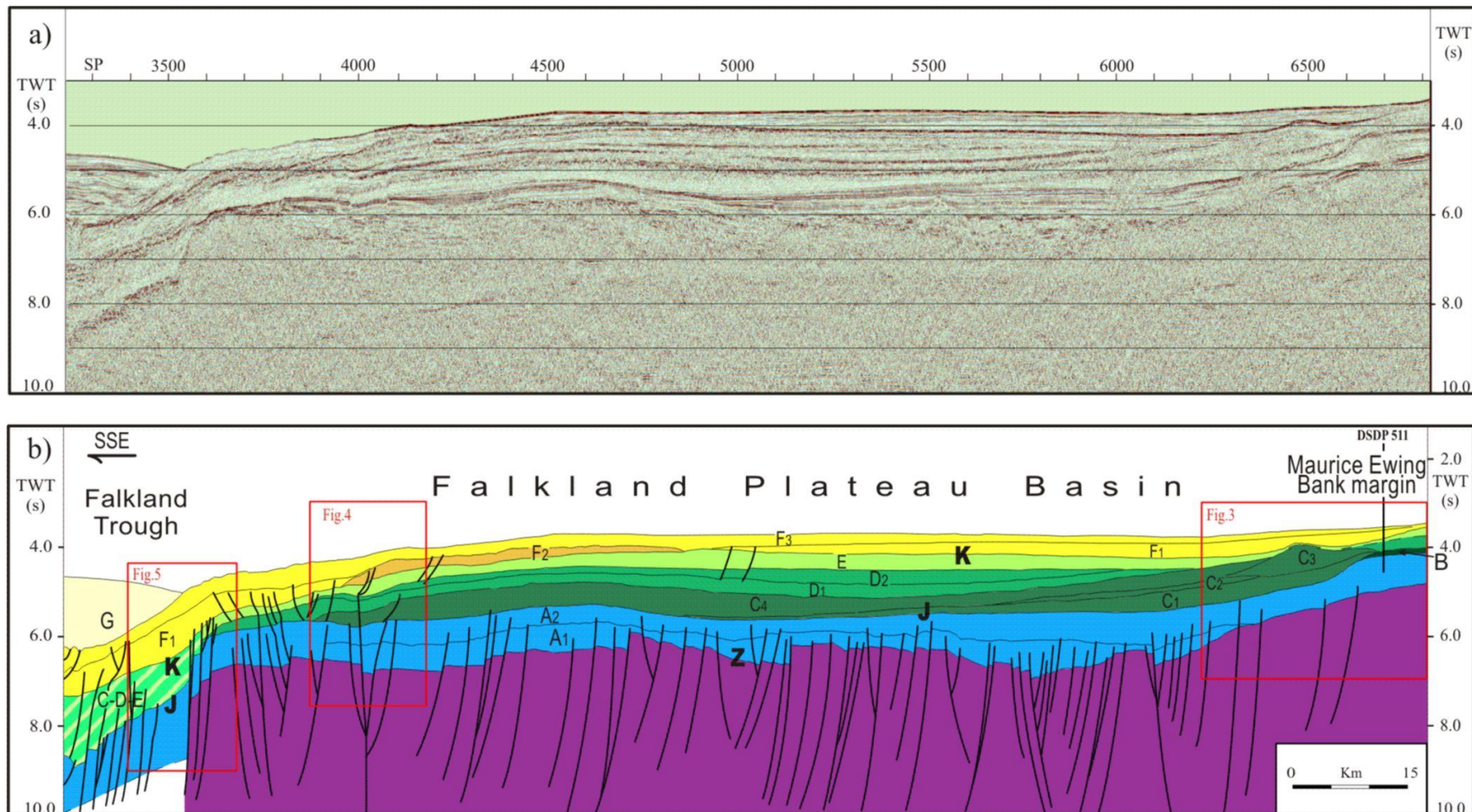


(b)



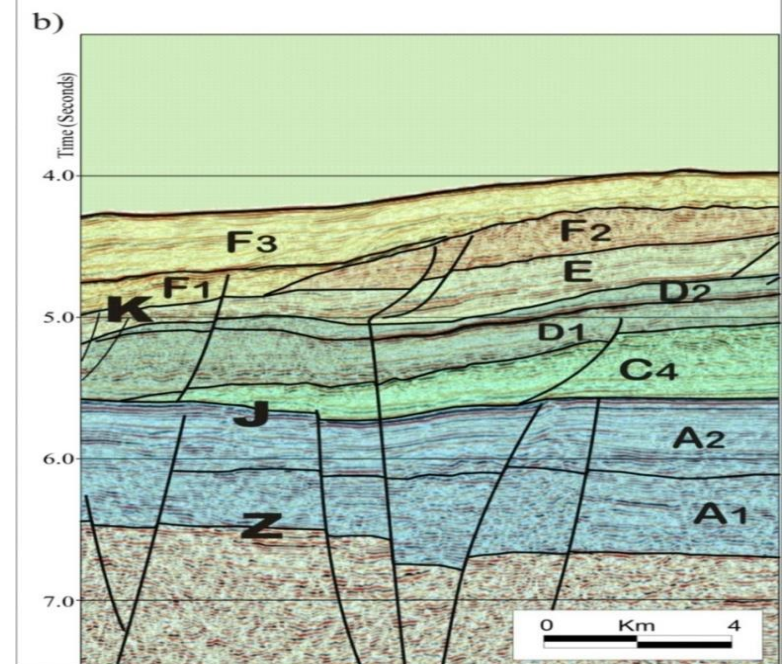
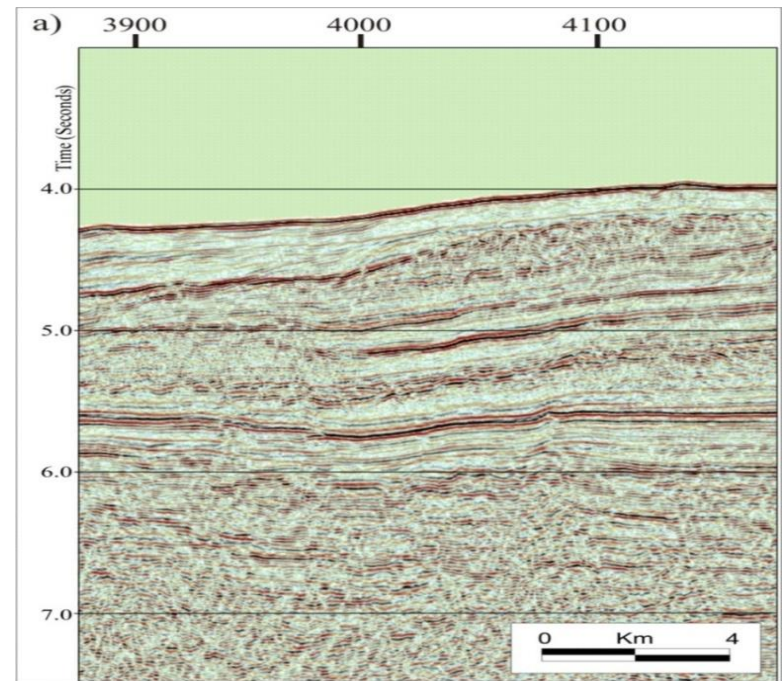
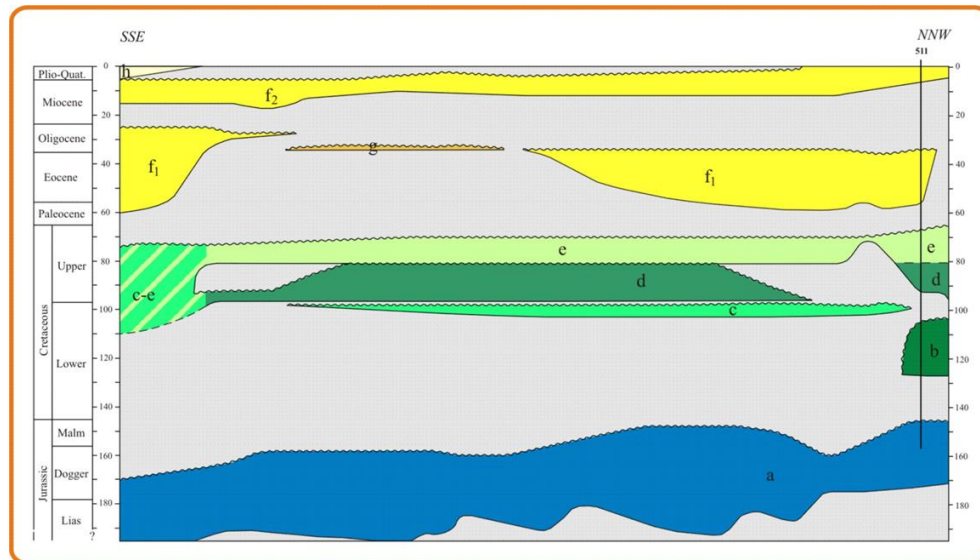
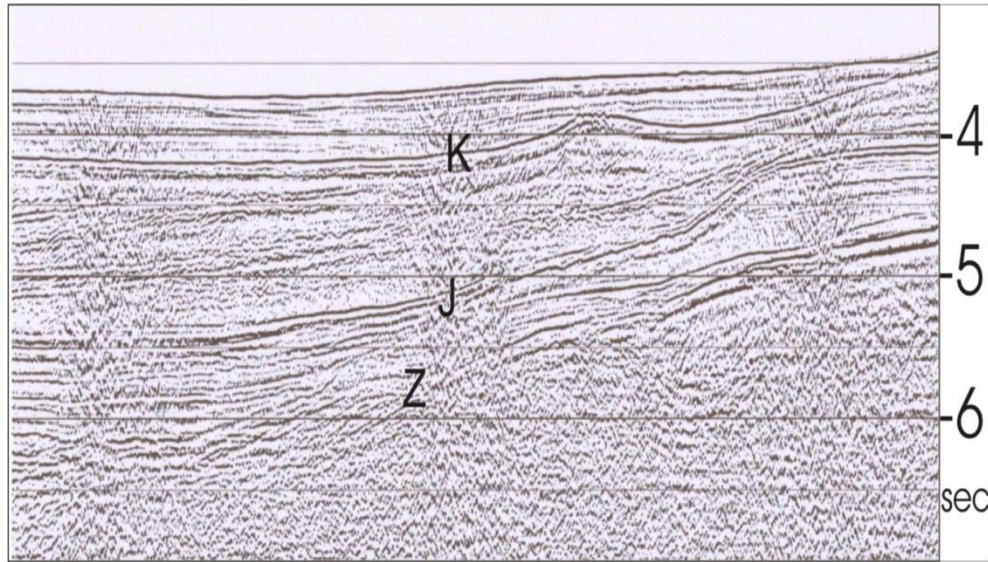
(c)

Ricostruzione di una sezione crono-stratigrafica nel Falkland Plateau, Atlantico sud-Occidentale



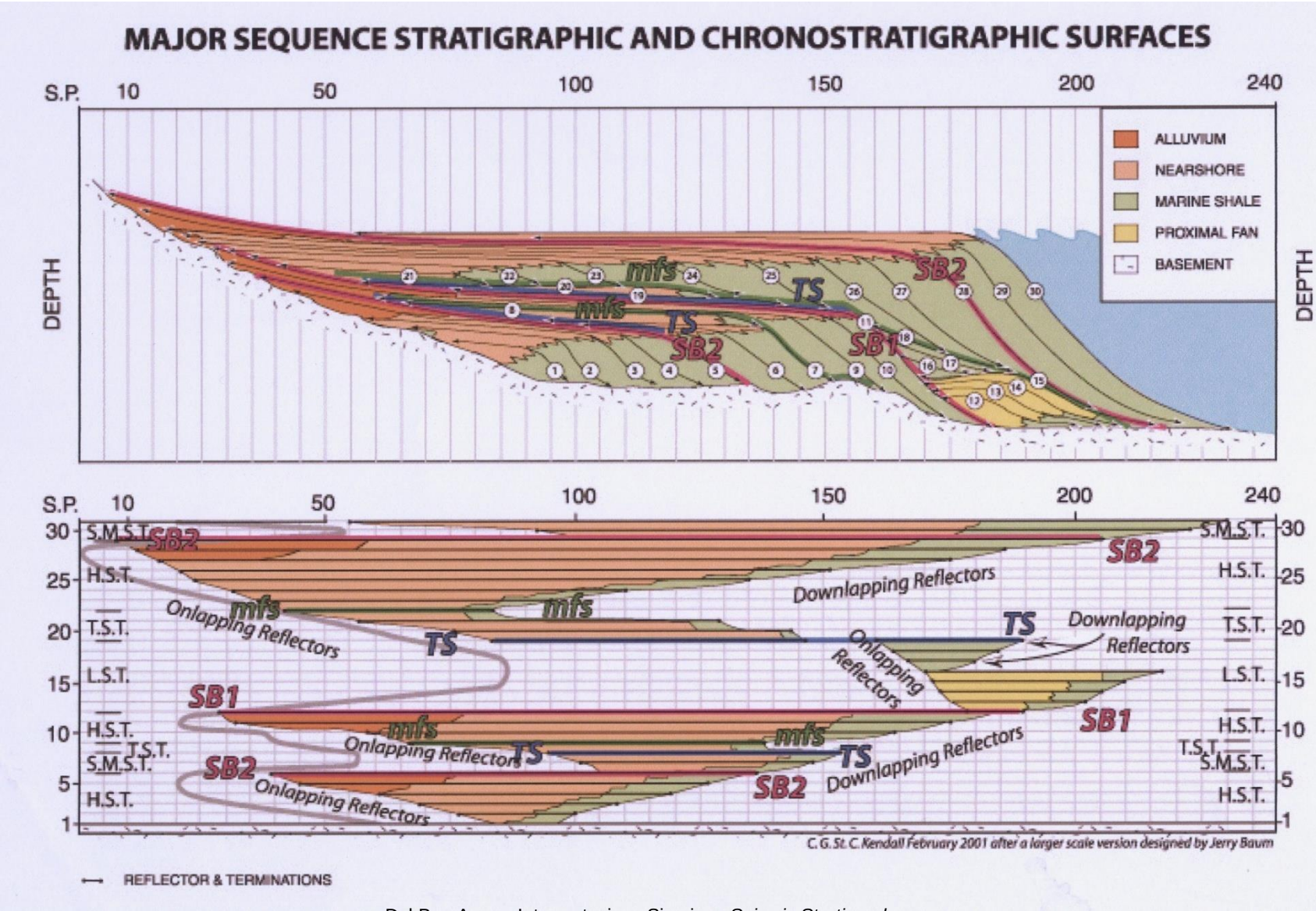
Ricostruzione di una sezione crono-stratigrafica nel Falkland Plateau, Atlantico sud-Occidentale

Dettagli dal profilo sismico



SB: Sequence Boundary, TS: Transgressive Surface, mfs: maximum flooding surface, segna un brusco aumento della profondità d'acqua, separa HST da TST

<http://strata.geol.sc.edu/movies/ChronoMovie.Mov>



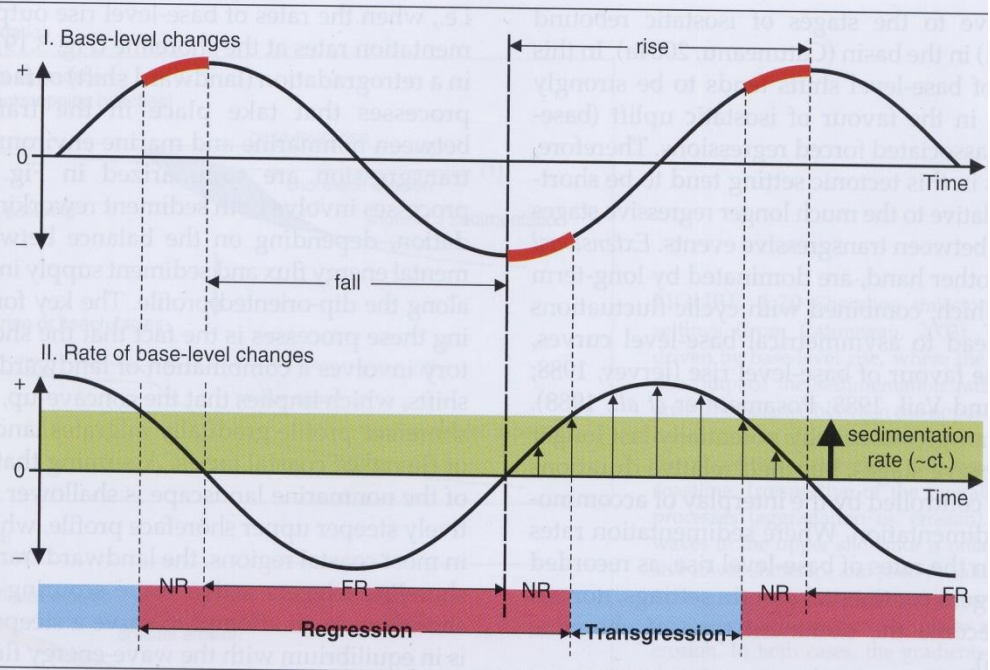
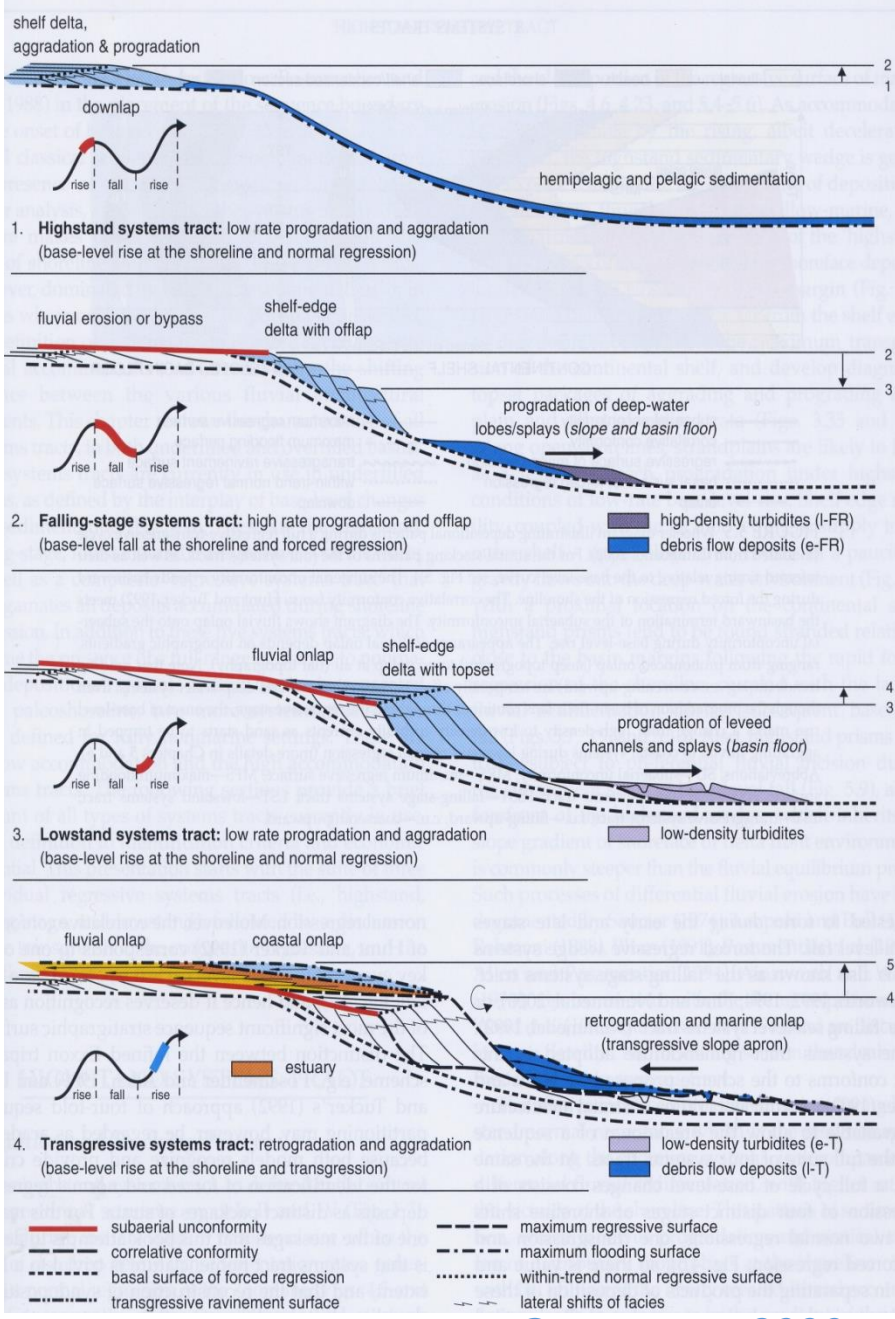
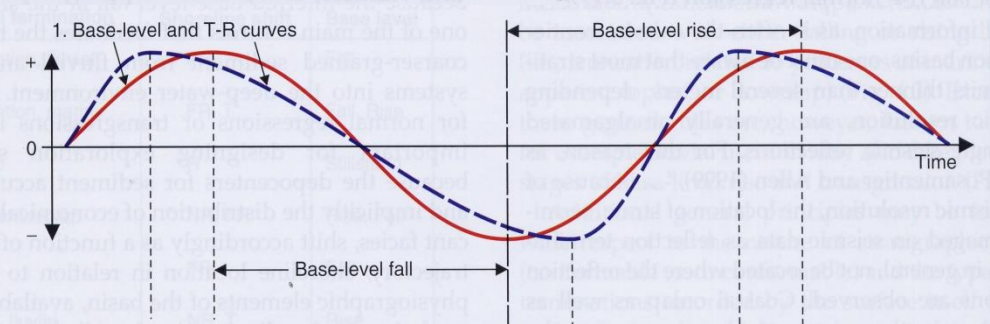
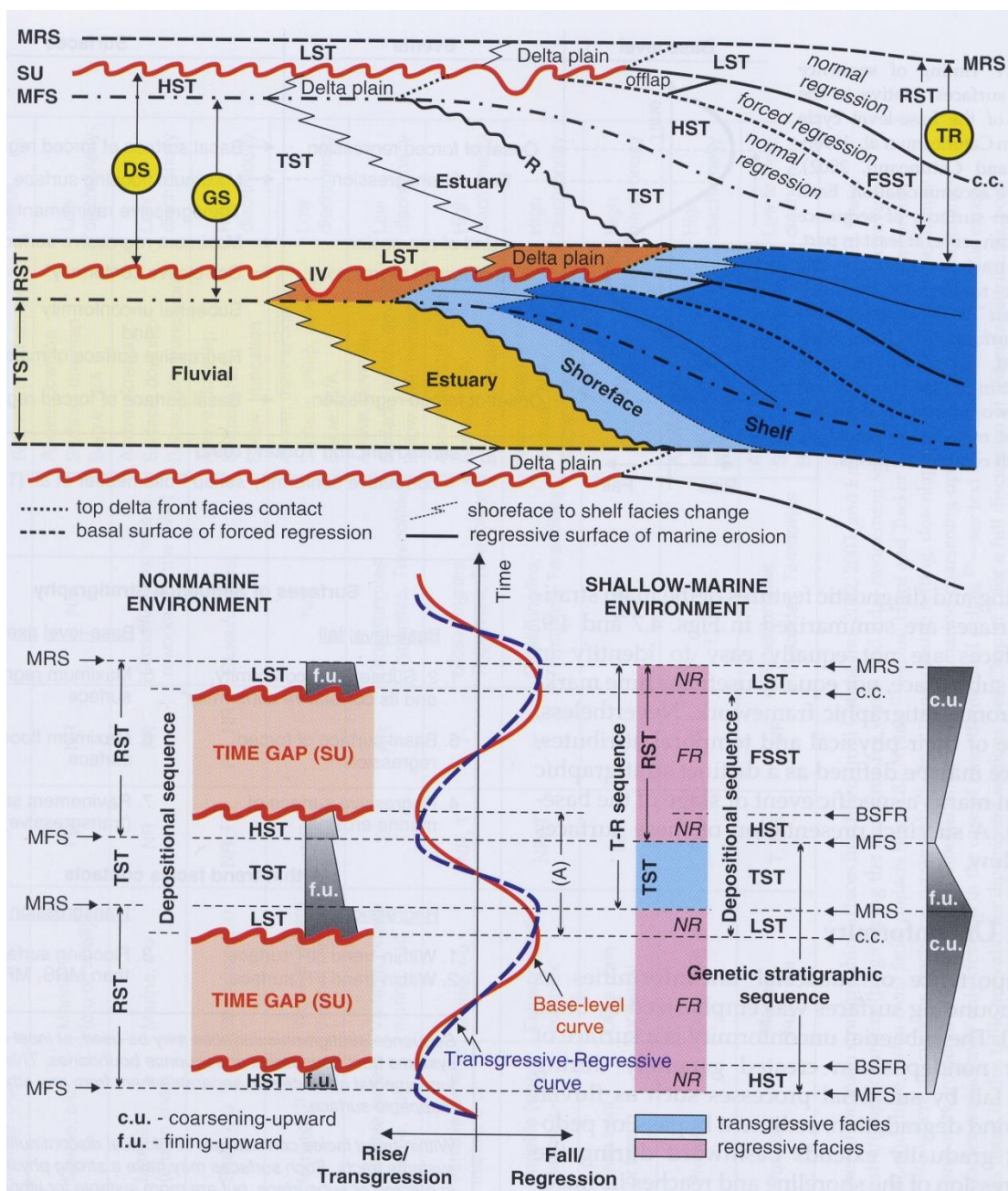


FIGURE 3.19 Concepts of transgression, normal regression, and forced regression, as defined by the interplay between base-level changes and sedimentation. The top sine curve shows the magnitude of base-level changes through time. The thicker portions on this curve indicate early and late stages of base-level rise, when the rates of base-level rise (increasing from zero and decreasing to zero, respectively) are outpaced by sedimentation rates. The sine curve below shows the rates of base-level changes. Note that the rates of base-level change are zero at the end of base-level rise and base-level fall stages (the change from rise to fall and from fall to rise requires the motion to cease). The rates of base-level change are the highest at the inflection points on the top curve. For simplicity, the sedimentation rates are kept constant during the cycle of base-level shifts. The reference base-level curve is shown as a symmetrical sine curve for simplicity, but no inference is made that this should be the case in the geological record. In fact, asymmetrical shapes are more likely, as a function of particular circumstances in each case study (e.g., glacio-eustatic cycles are strongly asymmetrical, as ice melts quicker than it builds up), but this does not change the fundamental principles illustrated in this diagram. Abbreviations: FR—forced regression; NR—normal regression.



Catuneanu, 2006



Sequenze, system tracts e superfici stratigrafiche definite in relazione alla curva di variazioni del livello di base e alla curva TR

SU= Subaerial unconformity

c.c.=conformity correlata

BSFR = Basal Surface of Forced Regression

MRS = Maximum Regressive Surface

MFS= Maximum Flooding Surface

R= Transgressive wave ravinement surf.

IV= incised valley

(A)= positive accommodation (base level rise)

NR= Normal Regression

FR= Forced Regression

LST= Lowstand System Tract

TST=Transgressive System Tract

HST= Highstand System Tract

FSST= Falling-Stage System Tract

RST= Regressive System Tract

DS0 Depositional Sequence

GS= Genetic Stratigrafic Sequence

TR= Transgreve-regressive sequence