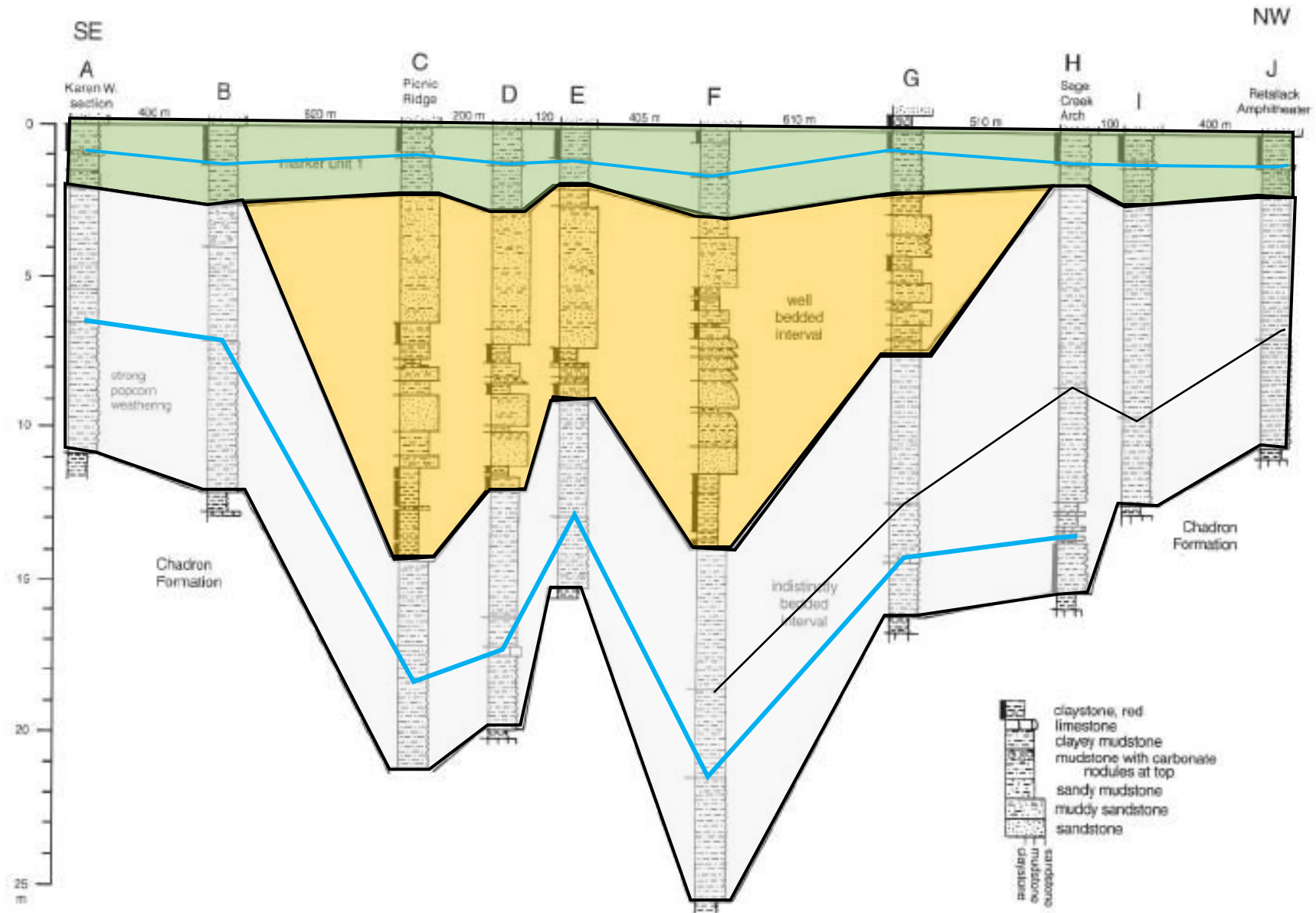


Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών

Σύγχρονες Στρωματογραφικές Μέθοδοι

Τι είναι η Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών;

- Η Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών (Sequence Stratigraphy) είναι η ανάλυση των ιζηματογενών στρωμάτων με βάση:
 - τις **στρωματογραφικές επιφάνειες**,
 - τις **μεταβολές διαθέσιμου χώρου**
 - και τη **μετανάστευση της ακτογραμμής**.
- Στόχος:
 - 👉 Η συσχέτιση ιζημάτων σε χρόνο και χώρο.
 - 👉 Η πρόβλεψη της γεωμετρίας των στρωμάτων.



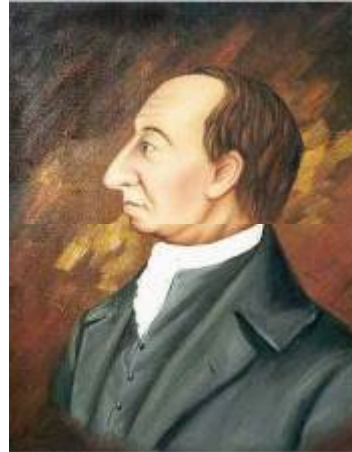
Τί είναι Στρωματογραφία Ακολουθιών;

«Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών (ή Στρωματογραφία Ακολουθιών – Sequence Stratigraphy) είναι η υποδιαίρεση των ιζημάτων μιας λεκάνης σε πακέτα της ίδιας γενετικής προέλευσης που οριοθετούνται από ασυμφωνίες και τις σχετικές τους προεκτάσεις σε συμφωνία»

Η Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών είναι ένας τύπος στρωματογραφίας που ασχολείται με την περιγραφή, την ερμηνεία, την ταξινόμηση και την ονοματολογία των ιζηματογενών πετρωμάτων με βάση τον τρόπο στοίβαξης των στρωμάτων και τις στρωματογραφικές τους σχέσεις.

Ιστορικό υπόβαθρο - ασυμφωνίες

- **James Hutton (1726-1797):** Πατέρας της σύγχρονης Γεωλογίας
- Πρώτος περιέγραψε ασυμφωνία στη Βόρεια Σκωτία (Siccar Point)
- Στο έργο του “Η Θεωρία της Γης” (1785) αναγνώρισε την σημασία της ασυμφωνίας
- Σύνδεση με παγκόσμιες αλλαγές στο ευστατικό επίπεδο θάλασσας και κύκλους υπερηπείρων (~500 εκ. χρόνια).



Οι Πρωτοπόροι της Στρωματογραφίας Ακολουθιών (1900s)

Eliot Blackwelder

- Αναγνώρισε τοπικές διαφοροποιήσεις στη Στρωματογραφία.
- Επηρέασε τις κρατονικές mega-ακολουθίες του Larry Sloss.

Amadeus Grabau

- Εφάρμοσε τον νόμο του Walther στις φάσεις.
- Εισήγαγε τον όρο "hiatus" για χρονικά κενά.

Joseph Barrell

- Επινόησε τον όρο "επίπεδο βάσης".
- Εισήγαγε τους όρους "διάστημα" (diastem) και "ασυνέχειες".

John L. Rich

- Εισήγαγε τις κλινομορφές (clinoforms).
- Θεμελίωσε τη γεωμετρία συστημάτων απόθεσης.

Harry Wheeler

- Χρησιμοποίησε πρώτος τον όρο "ακολουθία".
- Δημιούργησε το διάγραμμα Wheeler για τη χωροχρονική απεικόνιση στρωμάτων.

Joseph Barrell (1869–1919)

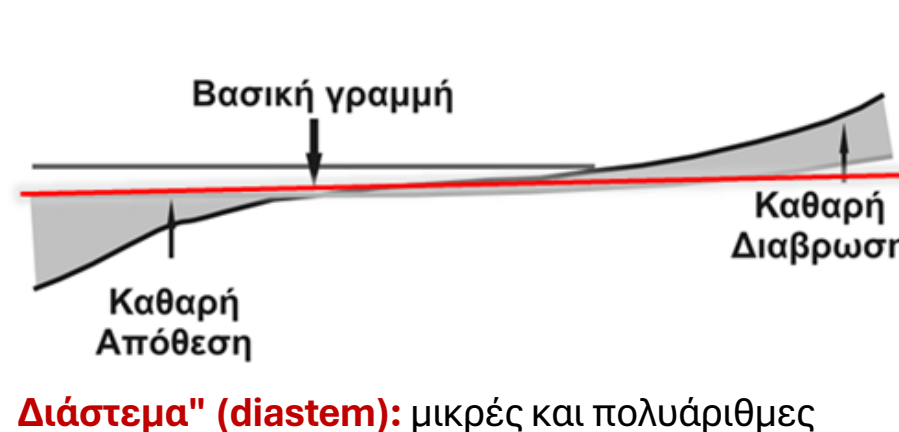
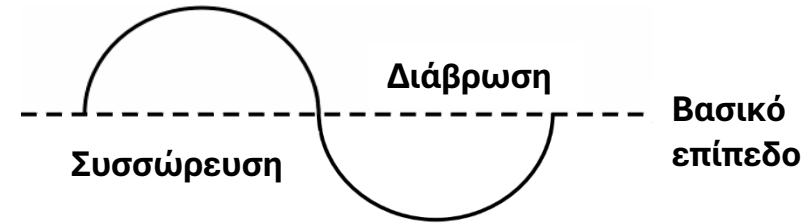
Ο “πρόδρομος” της Sequence Stratigraphy

- Ο Joseph Barrell ήταν Αμερικανός γεωλόγος και ένας από τους **πιο διορατικούς επιστήμονες της γεωλογίας του 20ού αιώνα**.
- Υπήρξε ο **πρώτος** που διατύπωσε με ξεκάθαρο τρόπο ότι: **η στρωματογραφία δεν ελέγχεται μόνο από το κλίμα ή την ιζηματογένεση, αλλά κυρίως από τις μεταβολές της σχετικής στάθμης της θάλασσας**.
- Ανέπτυξε την έννοια των:
 - διακυμάνσεων της σχετικής στάθμης
 - κύκλων επίκλυσης–οπισθοδρόμησης
 - διακοπών (gaps) στην ιζηματογένεση και ασυμφωνιών
- Ήταν ο πρώτος που κατάλαβε ότι **η διάβρωση και οι ασυμφωνίες είναι φυσικά όρια** που “κόβουν” τη στρωματογραφία σε **γενετικά πακέτα** — ιδέα που σήμερα αποτελεί τον πυρήνα της Στρωματογραφίας Ακολουθιών.
- Εισήγαγε τον όρο **"base level" (επίπεδο βάσης)** με την έννοια της δυναμικής επιφάνειας όπου ισορροπούν απόθεση και διάβρωση.
- Τα έργα του θεωρούνται **πνευματικοί πρόδρομοι** των μοντέλων του Peter Vail και της Exxon 50 χρόνια αργότερα.

Η Έννοια του «Επιπέδου Βάσης» του Joseph Barrell

Ο **Joseph Barrell** εισήγαγε την έννοια του «**επιπέδου βάσης**» για να περιγράψει μια ιδεατή επιφάνεια που εξισορροπεί τις διαδικασίες διάβρωσης και ιζηματογένεσης. Πρόκειται για μια δυναμική επιφάνεια που καθορίζεται από την αλληλεπίδραση τεσσάρων βασικών παραγόντων:

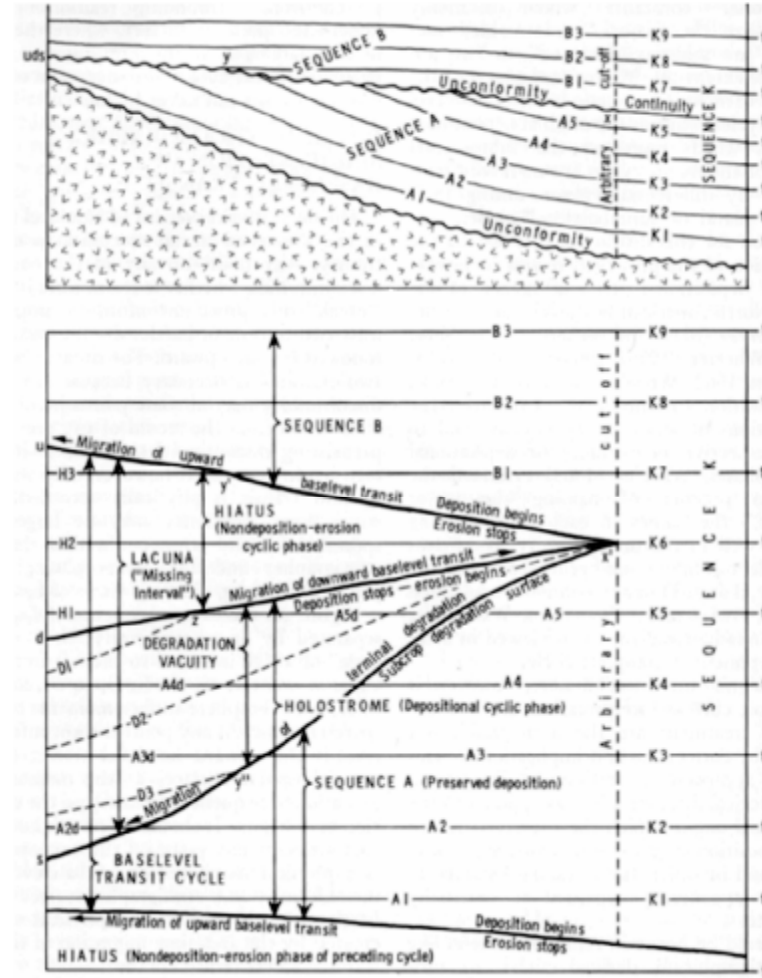
1. Διάβρωση.
2. Απόθεση ιζημάτων.
3. Τεκτονική κίνηση.
4. Ευστατισμός (αλλαγές στη στάθμη της θάλασσας).



Διάστημα" (diastem): μικρές και πολυάριθμες διακοπές ιζηματογένεσης

Ασυνέχεια (unconformity): Αναφέρεται σε μεγαλύτερες χρονικές διακοπές, που συχνά συνοδεύονται από σημαντικά γεωλογικά γεγονότα, όπως τεκτονικές κινήσεις ή μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας.

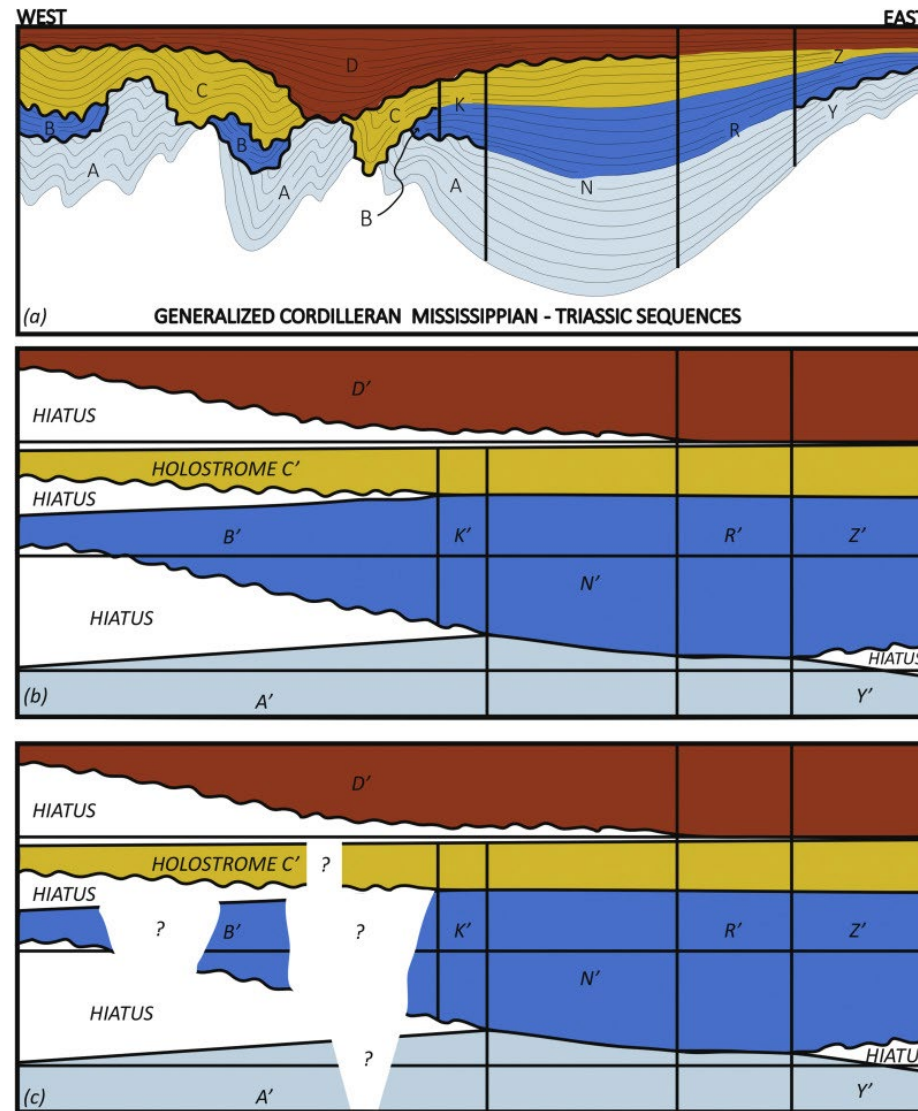
Harry E. Wheeler (1912–1980): Ο αρχιτέκτονας της χρονοστρωματογραφικής σκέψης



1958 Ο Harry Wheeler δημιουργεί τον πρώτο χρονοστρωματογραφικό χάρτη

Διάγραμμα Wheeler

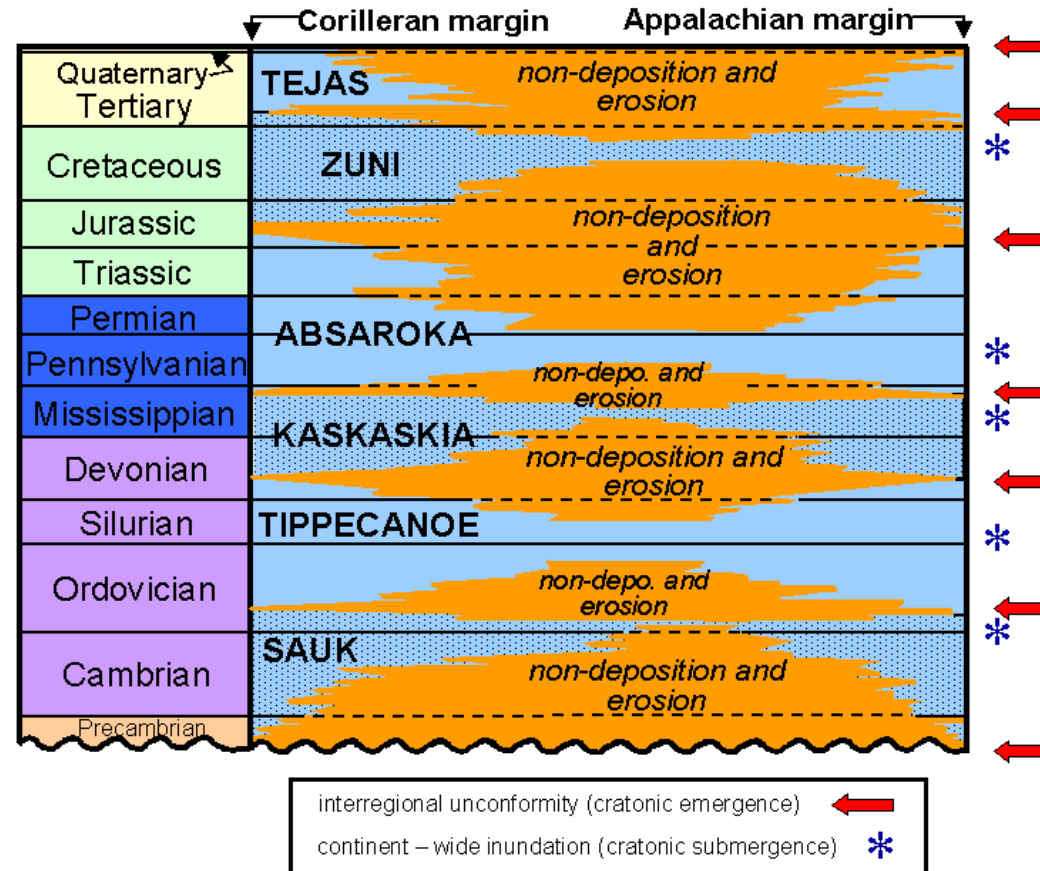
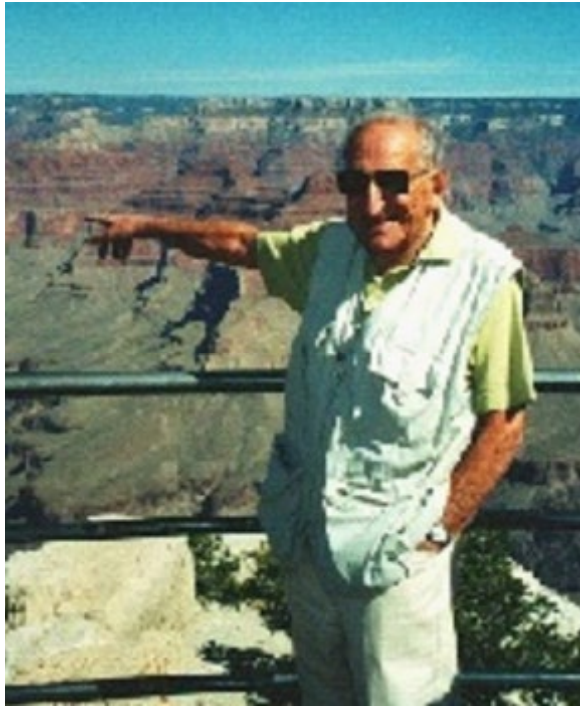
Γεωλογικός χρόνος



? - Missing sections (in a), which were not annotated in the original drawing (b).

Απόσταση

Lawrence Sloss και η επανάσταση της Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών



1963 Ο Lawrence Sloss αναγνώρισε 6 μεγάλες ακολουθίες στη Βόρεια Αμερική που ελέγχονται από τις ευστατικές μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης.

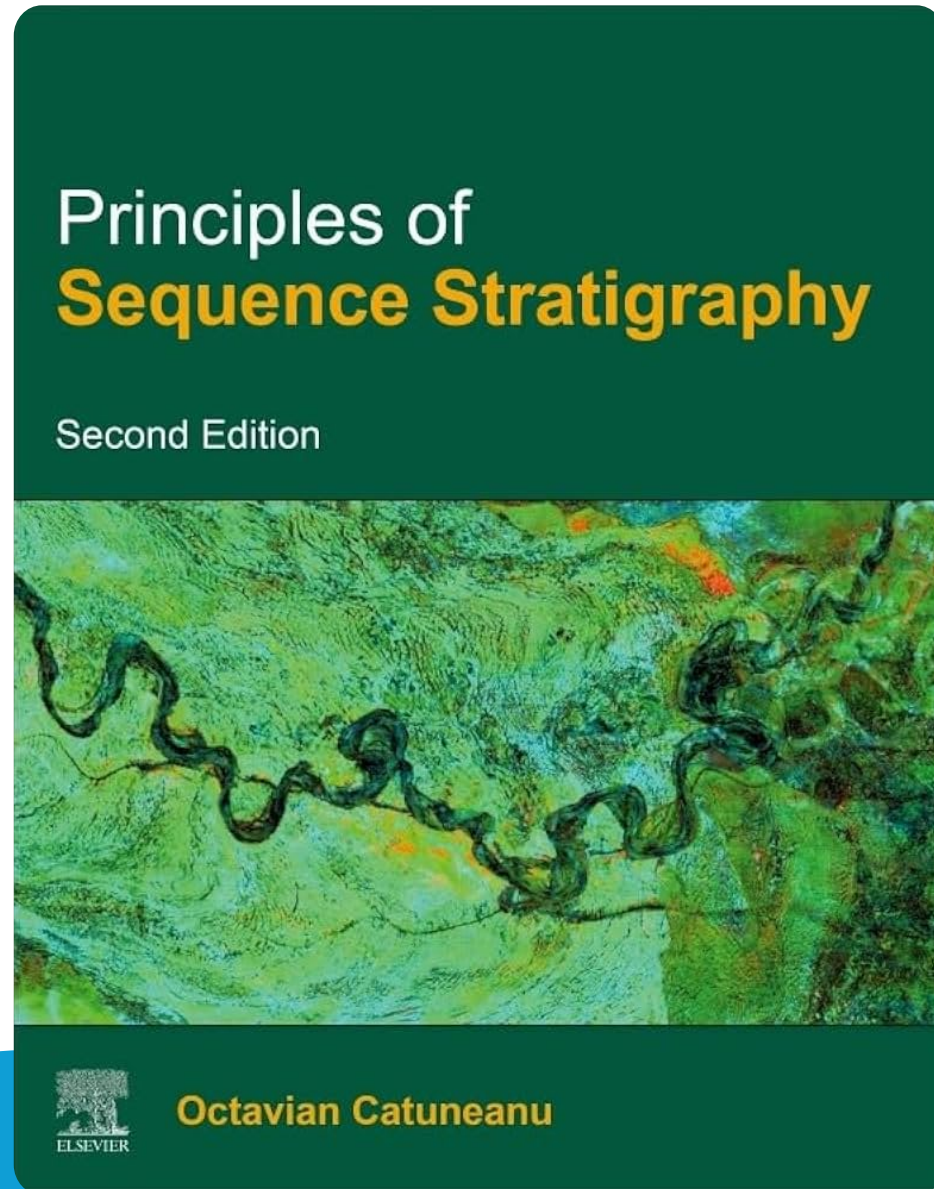
Peter Vail & Exxon Research Team – Η “επανάσταση” της σύγχρονης Sequence Stratigraphy

- Ο Peter R. Vail (Exxon Production Research Co.) θεωρείται ο «πατέρας» της σύγχρονης Sequence Stratigraphy.
- Με τους Mitchum, Todd, Sangree, Kendall & Hardenbol ανέπτυξαν το Exxon Model τη δεκαετία 1970–1980.
- Στην κλασική δημοσίευση των Vail et al., 1977 (AAPG Memoir 26) παρουσιάστηκε:
 - η έννοια της ακολουθίας (sequence)
 - οι στρωματογραφικές επιφάνειες-κλειδιά
 - η λογική της οργάνωσης των ιζημάτων με βάση τις μεταβολές σχετικής στάθμης θάλασσας
- Δημιούργησαν την πρώτη ολοκληρωμένη ευστατική καμπύλη (Vail eustatic curve).
- Εισήγαγαν την Σεισμική Στρωματογραφία
- Επανάσταση στην πετρελαϊκή γεωλογική έρευνα, παλαιογεωγραφία & ανακατασκευή λεκανών.
- Η Exxon Group έθεσε τη βάση της «γενετικής» προσέγγισης στη στρωματογραφία.

Geologic Column Systems	Relative Sea Level		Megasequences
	← Rising	Falling →	
Neogene			Tejas
Paleogene			
Cretaceous			Zuni
Jurassic			
Triassic			
Permian			Absaroka
Pennsylvanian			
Mississippian			
Devonian			Kaskaskia
Silurian			
Ordovician			Tippecanoe
Cambrian			
Precambrian			Sauk



Octavian Catuneanu (2000s–σήμερα)



- **Ενοποίηση των σχολών sequence stratigraphy**
 - Δημιούργησε το πρώτο πραγματικά παγκόσμιο, τυποποιημένο μοντέλο.
- **Τυποποίηση επιφανειών & ορολογίας**
 - Σαφείς, παγκόσμια αποδεκτές ερμηνείες και διαγνωστικά κριτήρια.
- **Ιεραρχικός ορισμός μονάδων**
 - Έκανε τη στρωματογραφική ανάλυση αναπαραγώγιμη και διδακτική.
- **Ανάπτυξη των Principles of Sequence Stratigraphy–**
 - Αποτελεί παγκόσμια σταθερά– Χρησιμοποιείται σε εκατοντάδες πανεπιστήμια.
- **Σύγχρονη εφαρμογή σε λεκάνες, παλαιοπεριβάλλοντα και γεωμορφολογία–**
 - Ενσωμάτωσε παλαιογεωγραφικές, γεωδυναμικές και ιζηματικές διεργασίες.

Βασική Αρχή – Επίπεδο Βάσης & Διαθέσιμος χώρος

- **Επίπεδο βάσης**

- Η θεωρητική επιφάνεια όπου εξισορροπείται διάβρωση–απόθεση.

- **Διαθέσιμος χώρος**

- Ο διαθέσιμος χώρος για να συσσωρευτούν ιζήματα, καθοριζόμενος από:
 - ευστατικές μεταβολές
 - τεκτονική βύθιση/ανύψωση
 - ρυθμό ιζηματογένεσης
- Το ισοζύγιο **S (Sediment Supply) / A (Accommodation)** ορίζει:

S/A

$S > A$

$S = A$

$S < A$

Στρωματογραφία

Προέλαση ιζηματογένεσης

Επισώρευση ή κατακόρυφη ανάπτυξη

Αναδρομή ή Οπισθοδρόμηση

Παρακολουθίες – Βασική Μονάδα

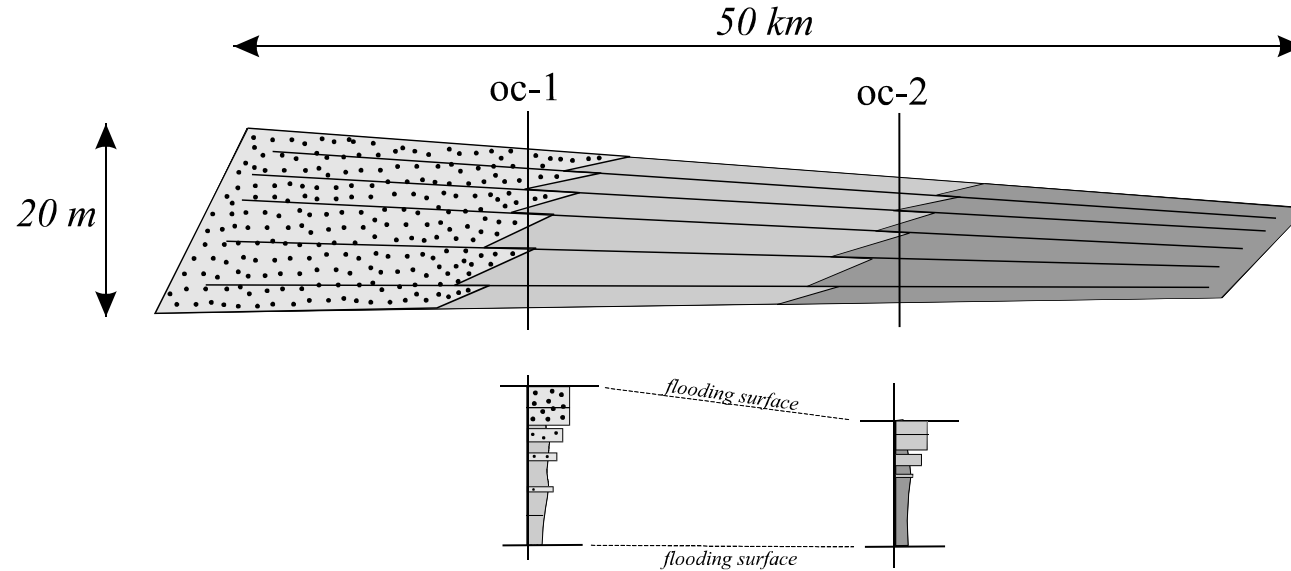
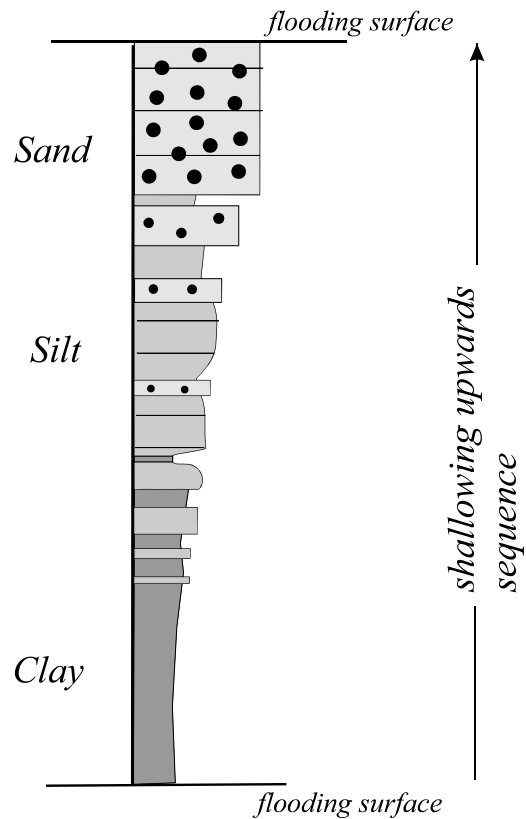
- **Ορισμός**

- Σύνολο στρωμάτων με τάση να γίνονται **πιο χονδρόκοκκα προς την κορυφή ή πιο λεπτόκοκκα προς την κορυφή**, οριοθετημένο από θαλάσσιες επιφάνειες πλημμύρας (**marine flooding surfaces**).
- Αποτελεί το “δομικό στοιχείο” των μεγαλύτερων ακολουθιών.

- **Ομάδες Παρακολουθιών**

- Ομαδοποιήσεις των παρακολουθιών με χαρακτηριστικό πρότυπο διάταξης:
 - **Προελαύνουσες** (συνολική ρήχευση – απόσυρση)
 - **Οπισθοδρομικές** (συνολική εμβάθυνση – επίκλυση)
 - **Επισωρευτικές** (σταθερή θέση shoreline)
- Το πρότυπο διάταξης είναι η κύρια ένδειξη του συστήματος υποακολουθιών.

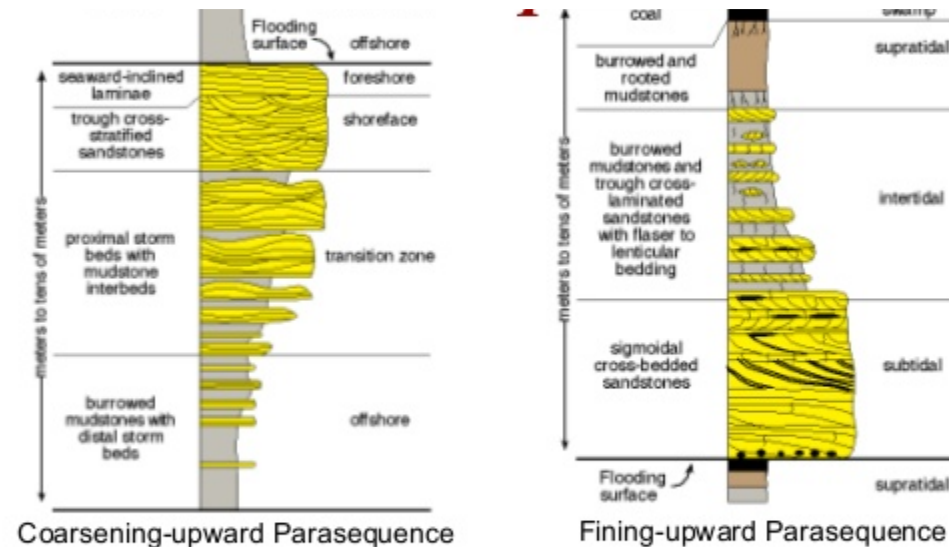
Παρακολουθία



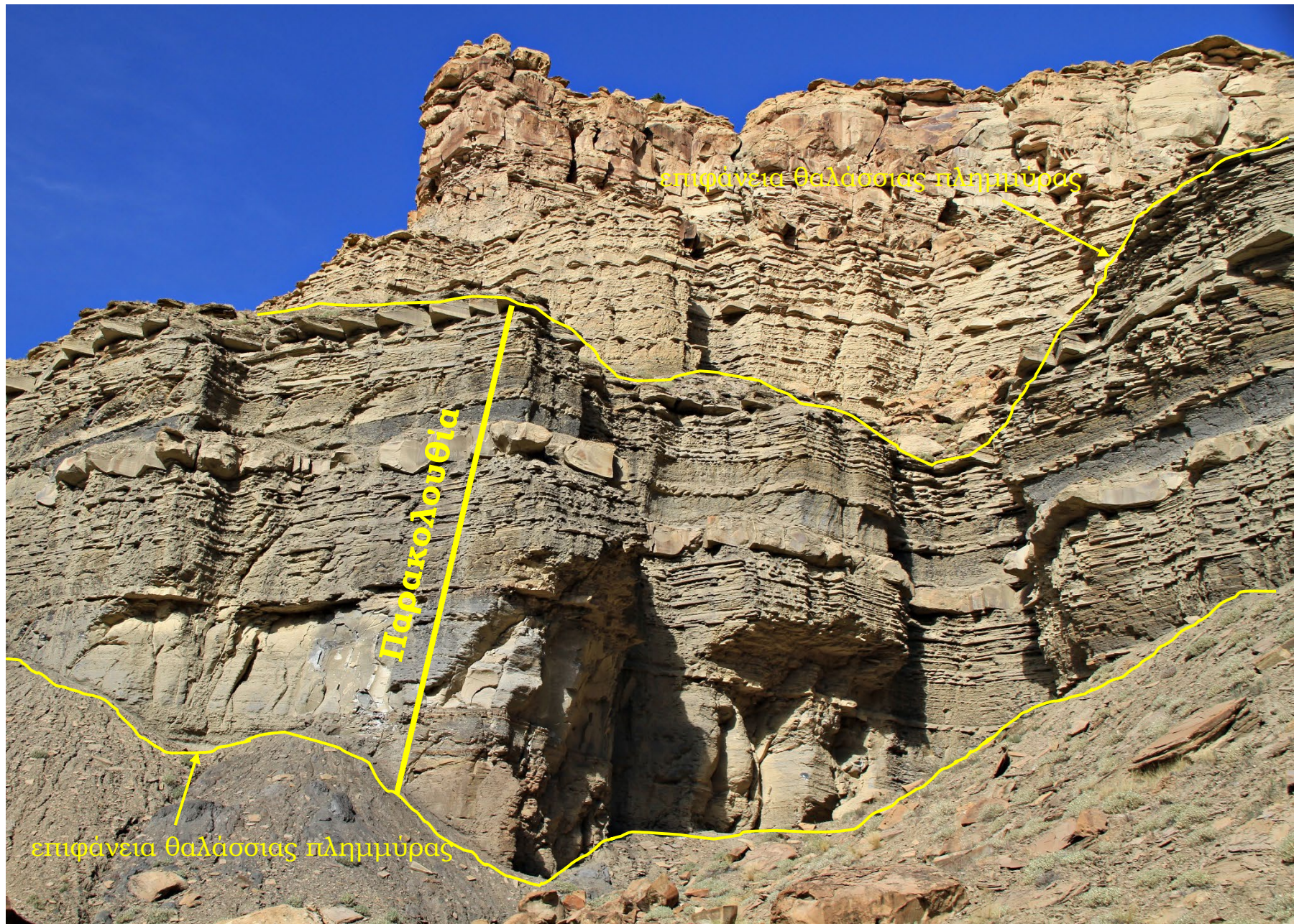
Βασική μονάδα της Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών.

Ισχύει ο νόμος του **Walther**.

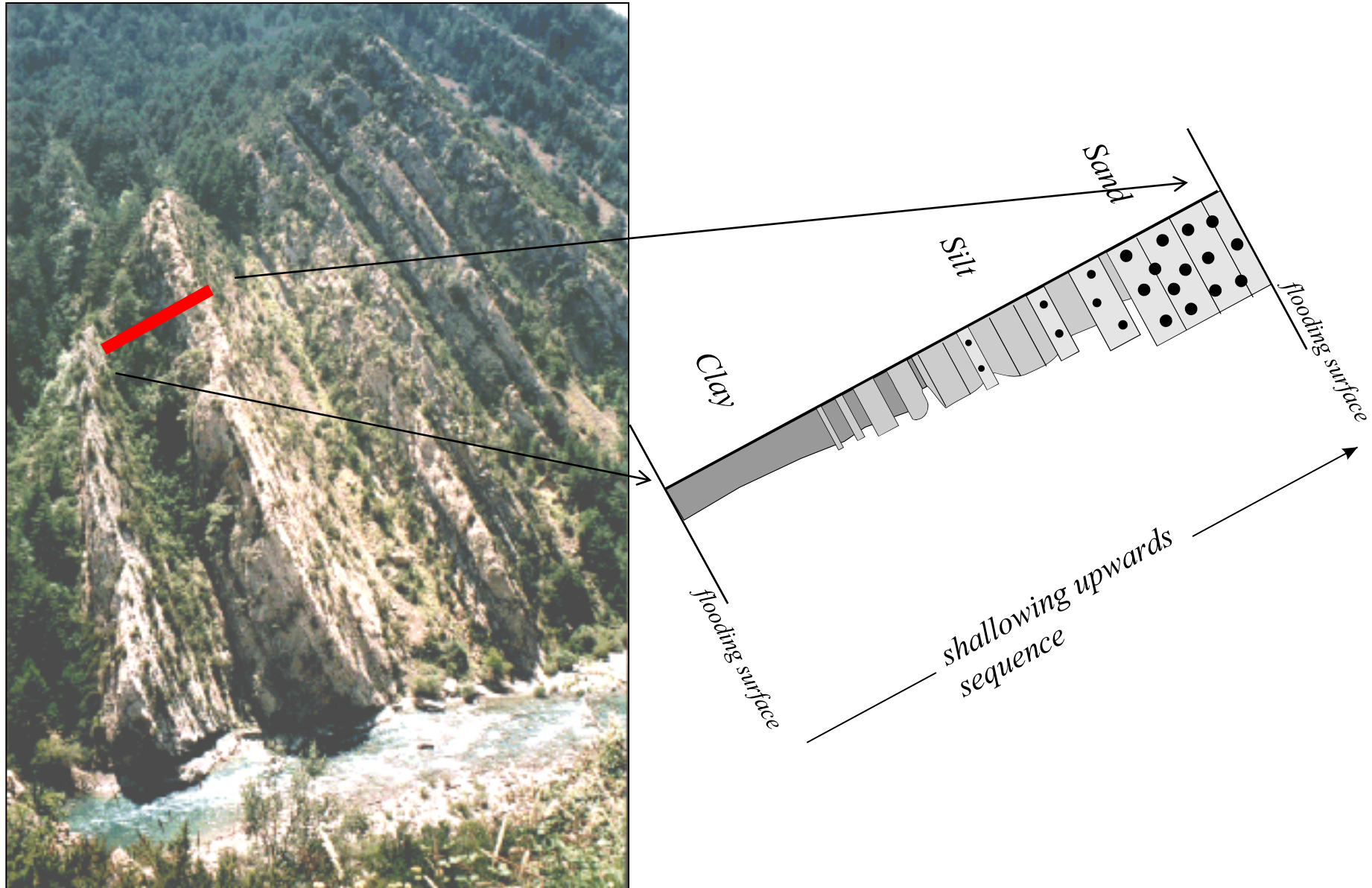
Κάθετη οργάνωση των παρακολουθιών



Αν και οι παρακολουθίες αντιπροσωπεύουν παλμούς προώθησης της ιζηματογένεσης, εσωτερικά μπορούν είτε να γίνονται αδρομερέστερες είτε λεπτομερέστερες ως προς το μέγεθος των κόκκων, ανάλογα με το αποθετικό σύστημα μέσα στο οποίο σχηματίζονται.



Οι παρακολουθίες εμφανίζονται σε «σύνολα»



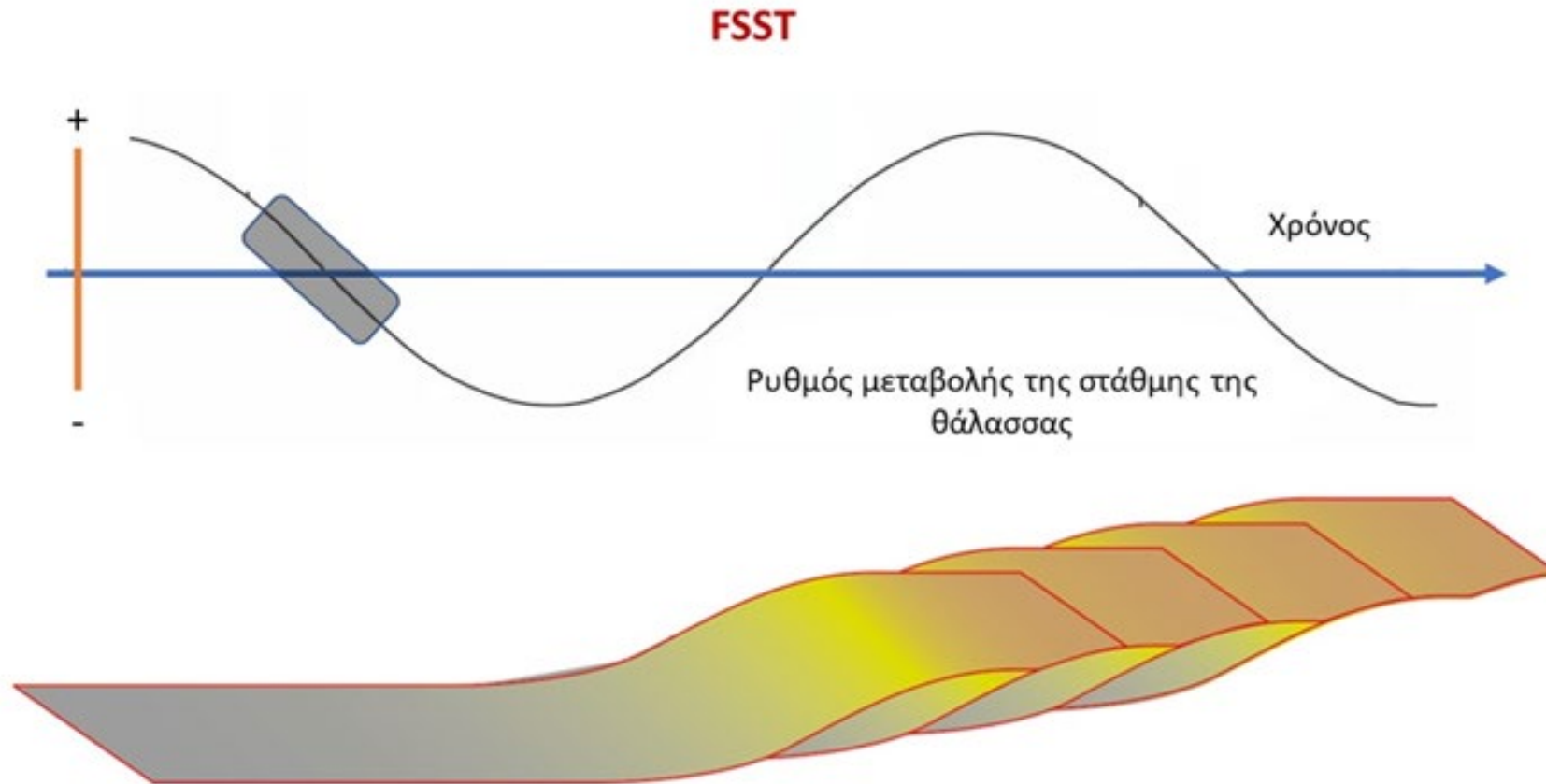
Κρίσιμες Επιφάνειες

- Οι θεμελιώδεις επιφάνειες είναι:
 - **Επιφάνεια πλημμύρας (FS)**
 - ☐ Αποτυπώνουν απότομη αύξηση βάθους.
 - ☐ Οριοθετούν τις παρακολουθίες.
 - **Όριο ακολουθίας (SB)**
 - ☐ Διαβρωτική επιφάνεια που σχηματίζεται στην πτώση της στάθμης.
 - ☐ Κάτω: απόσυρση & διάβρωση.
 - ☐ Πάνω: έναρξη νέου αποθετικού συστήματος.
 - ☐ Η σημαντικότερη επιφάνεια της sequence stratigraphy.
 - **Επικλυσigenής επιφάνεια (TS)**
 - ☐ Σηματοδοτεί την αρχή της επίκλυσης.
 - ☐ Αντανακλά μετατόπιση της ακτογραμμής προς την ξηρά.
 - **Μέγιστη επιφάνεια πλημμύρας (MFS)**
 - ☐ Σημείο μέγιστης εμβάθυνσης.
 - ☐ Συνήθως με λεπτόκοκκα υλικά, πλούσιο σε ιχνοαπολιθώματα.
 - ☐ Κορυφή του TST.
 - **Μέγιστη αποσυρσιγενής επιφάνεια (MRS)**
 - Έναρξη συνολικής απόσυρσης.
 - Οριοθετεί την κορυφή του HST

Υποακολουθίες Στρωματογραφικών Ακολουθιών

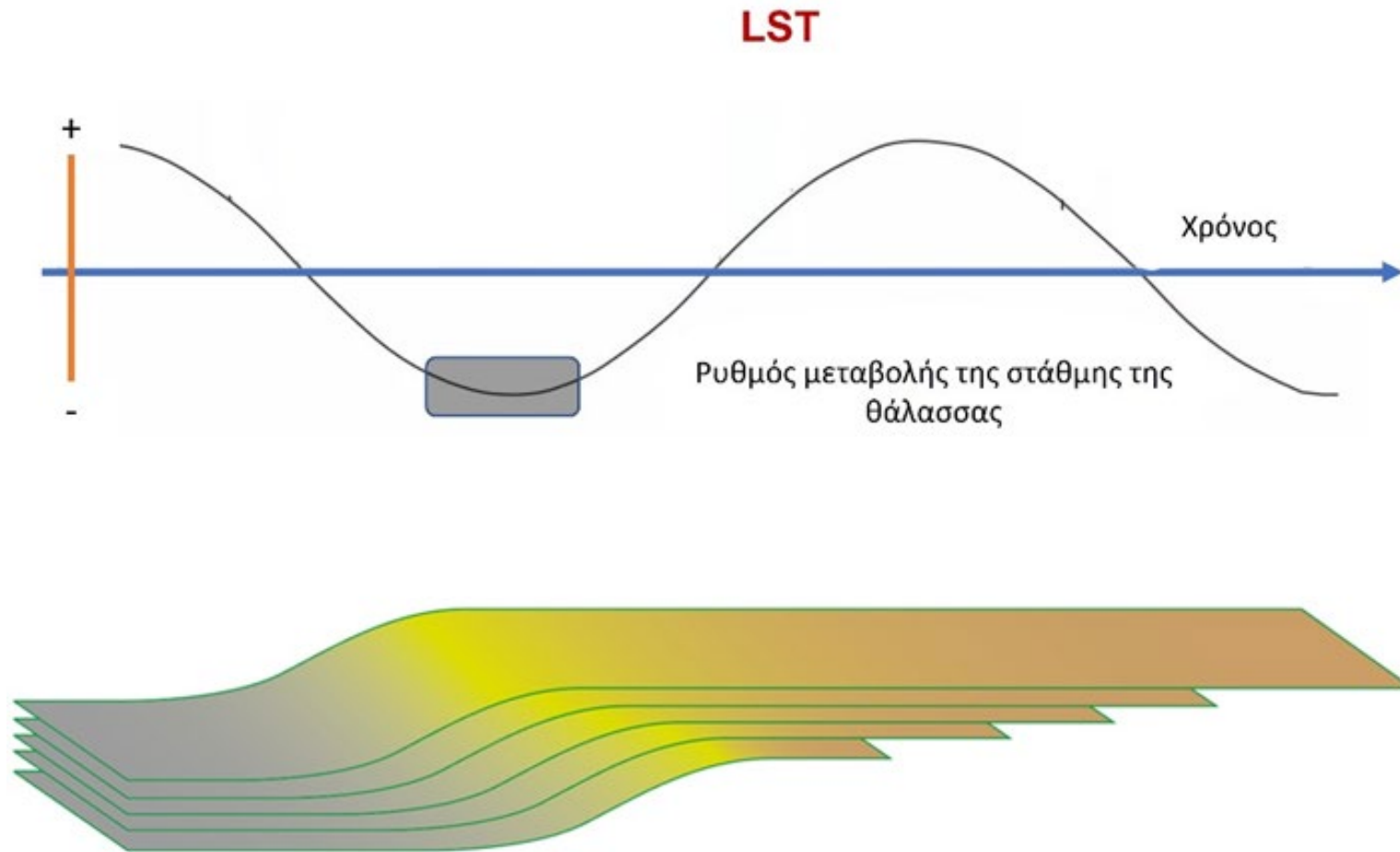
- Κάθε ακολουθία αποτελείται από 4 κύριες υποακολουθίες (Systems Tracts):
 - **FSST**: Υποακολουθία πτωτικής στάθμης θάλασσας - Σχηματισμός ορίων ακολουθίας.
 - **LST**: Υποακολουθία χαμηλής στάθμης.
 - **TST**: Επικλυσιγενής υποακολουθία.
 - **HST**: Υποακολουθία υψηλής στάθμης.

Υποακολουθία πτωτικής στάθμης της θάλασσας και σχηματισμού ορίων ακολουθίας (Falling Stage Systems Tract and Sequence Boundary Formation-FSST)



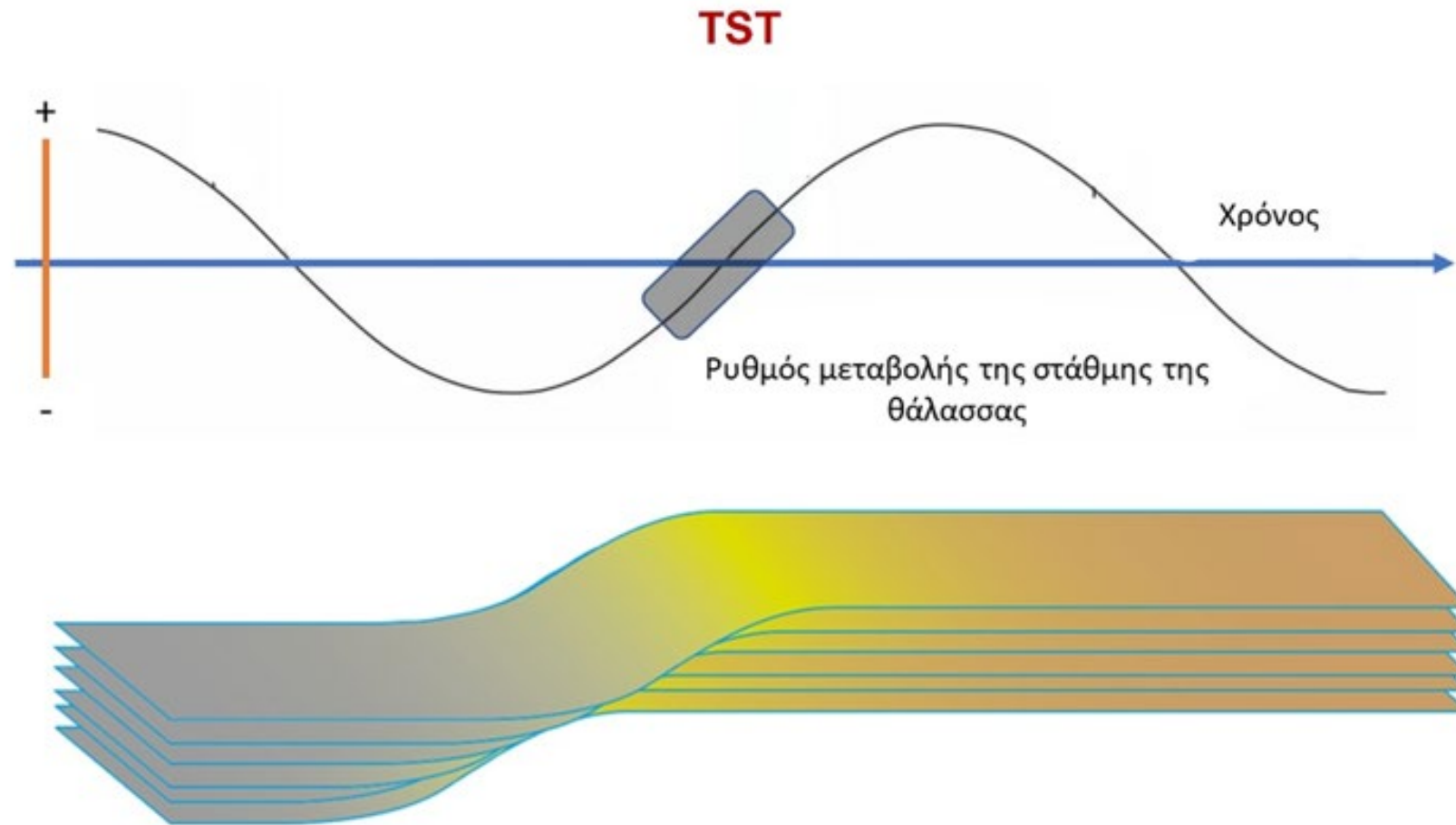
Σχηματίζεται κατά την **πτώση** της στάθμης της θάλασσας

Υποακολουθία χαμηλής στάθμης (Lowstand Systems Tracts-LST)



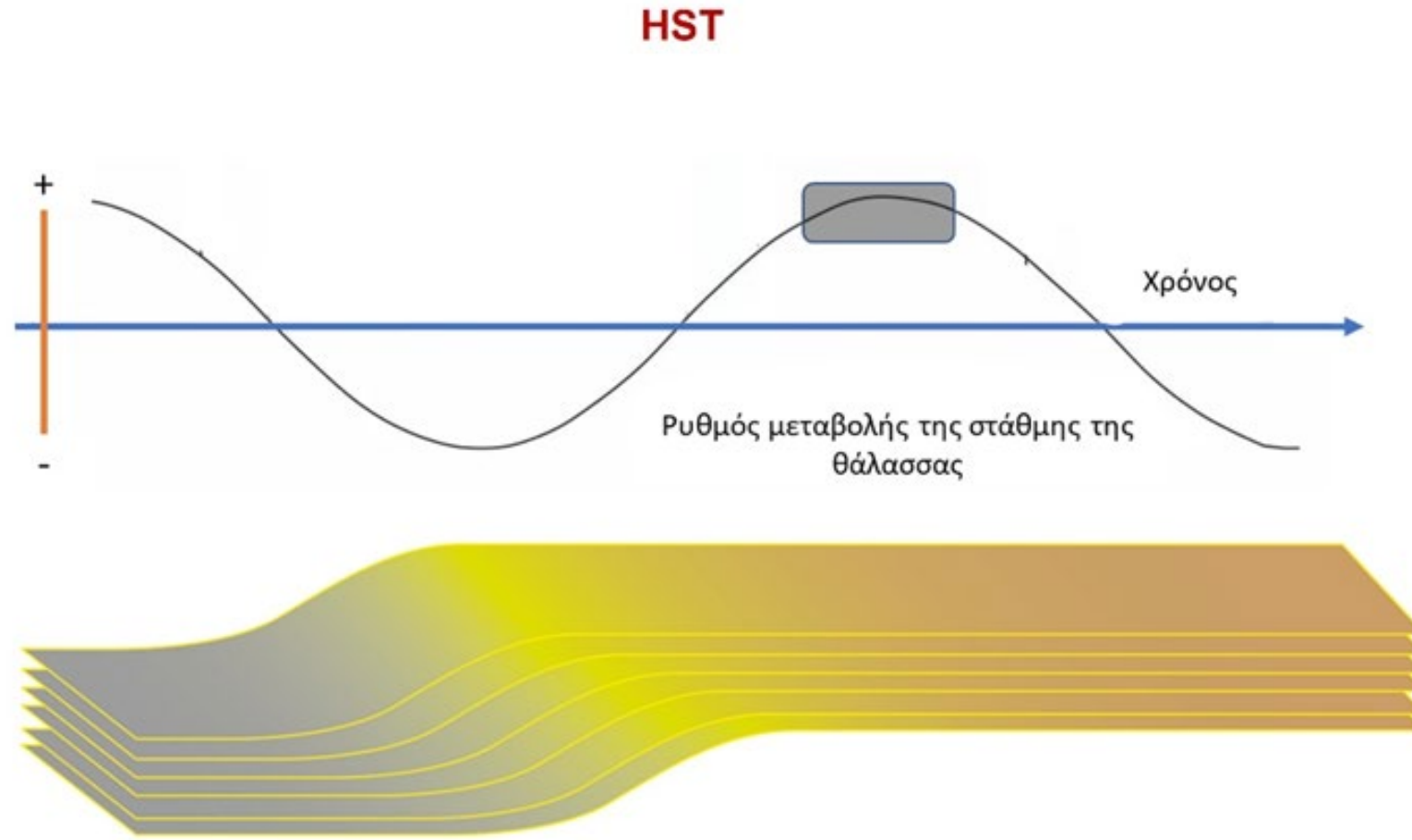
Σχηματίζεται στο **ελάχιστο** της στάθμης της θάλασσας

Επικλυσιγενής υποακολουθία (Transgressive systems tracts-TST)



Σχηματίζεται κατά την **άνοδο** της στάθμης της **θάλασσας**

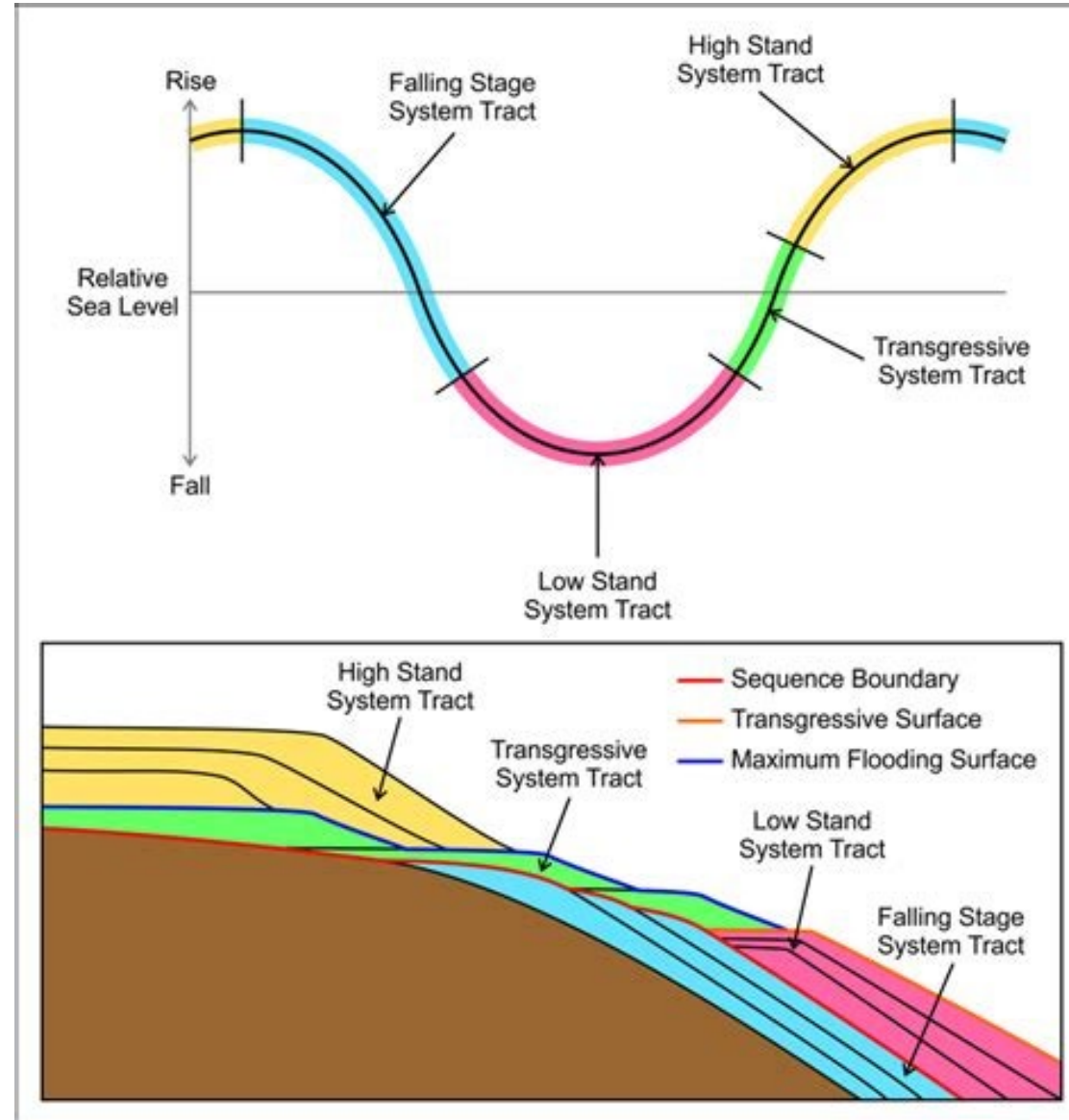
Υποακολουθία υψηλής στάθμης (Highstand Systems Tracts-HST)



Σχηματίζεται όταν η θάλασσα έχει φτάσει σε υψηλή στάθμη και σταθεροποιείται.

Ο Πλήρης Κύκλος Μιας Ακολουθίας

- **SB → FSST → LST → TS → TST → MFS → HST → MRS → νέο SB**
- Κάθε φάση έχει:
 - χαρακτηριστικά ιζήματα
 - διακριτή διαστρωμάτωση
 - συγκεκριμένη γεωμετρία
- Αυτή είναι η “γενετική” λογική της sequence stratigraphy.



Παρακολουθία vs Υποακολουθία

- **Παρακολουθία (Parasequence)**

- **Τι είναι:**

- Ένα **μικρό πακέτο στρωμάτων** με *μονοκατευθυντική τάση* (συνήθως coarsening-upward) που **οριοθετείται από flooding surfaces**.

- **Βασικά σημεία:**

- πάχος: μικρό (μέτρα έως δεκάδες μέτρα)
 - χρονική διάρκεια: σύντομη
 - όριο: **marine flooding surface**
 - ελέγχεται από *μικρές* μετακινήσεις ακτογραμμής
 - είναι το **δομικό στοιχείο** των υποακολουθιών

- **Πολύ απλά:**

- 👉 Μικρός “παλμός” ιζηματογένεσης.

- **Υποακολουθία (Systems Tract – FSST, LST, TST, HST)**

- **Τι είναι:**

- Μεγάλη **γενετική ενότητα** που περιέχει πολλές παρακολουθίες και συνδέεται με *μεγάλη* αλλαγή της στάθμης.

- **Βασικά σημεία:**

- πάχος: μεγάλο (δεκάδες – εκατοντάδες μέτρα)
 - χρονική διάρκεια: μεγαλύτερη
 - όρια: SB, TS, MFS, MRS (γενετικές επιφάνειες)
 - εκφράζει **φάση της σχετικής στάθμης** (πτώση–χαμηλή–επίκλυση–υψηλή)
 - αποτελεί τμήμα μιας **ακολουθίας**

- **Πολύ απλά:**

- 👉 Μεγάλο “κεφάλαιο” ιζηματογένεσης που περιέχει πολλά μικρά επεισόδια (παρακολουθίες).

Ακολουθία (Sequence)

- Μεγάλης κλίμακας **γενετικά συνεκτικός όγκος** ιζημάτων
- Οριοθετείται από τα όρια ακολουθιών (SB-διαβρωτικές επιφάνειες)
- Αντιπροσωπεύει έναν πλήρη κύκλο σχετικής στάθμης της θάλασσας (πτώση → χαμηλή στάθμη → επίκλυση → υψηλή στάθμη → νέα πτώση)
- οργανώνεται εσωτερικά σε υποακολουθίες (systems tracts)
 - **FSST** (πτωτική στάθμη)
 - **LST** (χαμηλή στάθμη)
 - **TST** (επίκλυση)
 - **HST** (υψηλή στάθμη)
- Διατηρεί προβλέψιμη αρχιτεκτονική ανάλογα με την πρακτική σχέση *παροχή ιζήματος / διαθέσιμος χώρος*.
 - Προέλαση
 - Οπισθοδρόμηση
 - Επισώρευση
- Χρησιμοποιείται για συσχέτιση σε τομές, γεωτρήσεις, σεισμικά

Sequence



Parasequence



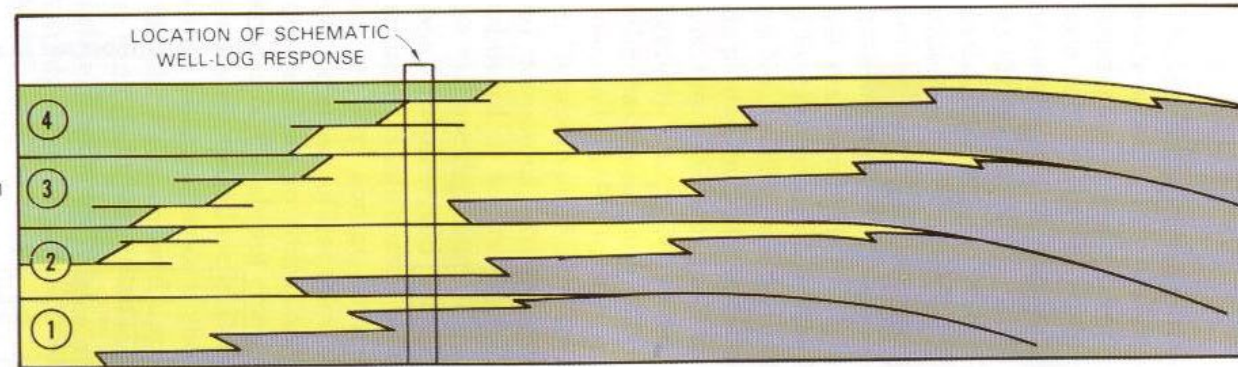
Systems tract

Στρωματογραφική αρχιτεκτονική

- Η **στρωματογραφική αρχιτεκτονική** είναι ο τρόπος με τον οποίο **τα ιζήματα οργανώνονται στον χώρο και στον χρόνο**, δημιουργώντας διακριτές γεωμετρικές δομές (σφηνοειδή σώματα, οριζόντιες ή κεκλιμένες επιφάνειες, στοίβαξη παρακολουθιών κ.λπ.).
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ:
 - του διαθέσιμου χώρου (Accommodation)
 - της παροχής ιζήματος (Sediment Supply)
 - της σχετικής στάθμης της θάλασσας
 - της τεκτονικής (βύθιση/ανύψωση)
 - της παλαιογεωγραφίας (π.χ. τύπος ακτογραμμής, υδρογραφικό δίκτυο)
- παράγει τα πρότυπα διάταξης των στρωμάτων.

Προελαύνοντα συστήματα

$$\frac{\text{RATE OF DEPOSITION}}{\text{RATE OF ACCOMMODATION}} > 1$$

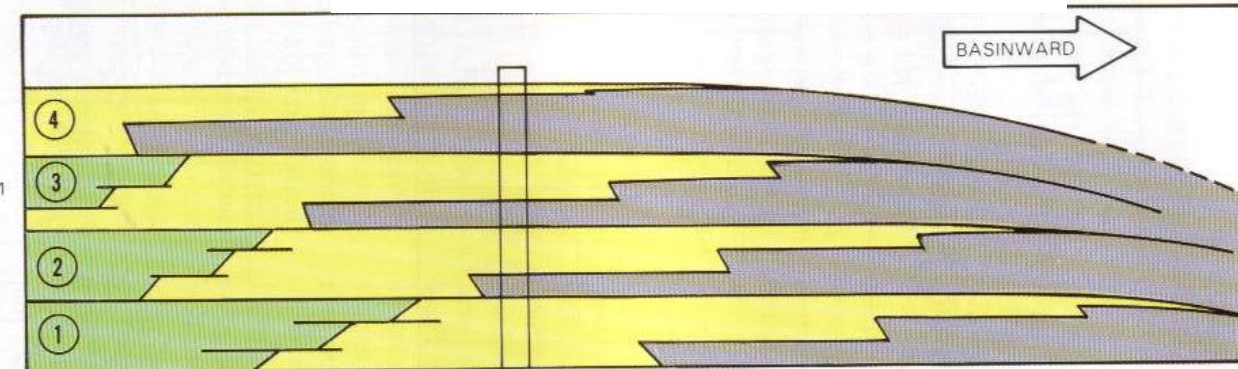


SCHEM
WELL-
RESPC

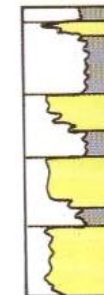


Αποσυρσιγενές ή ανάδρομο σύστημα

$$\frac{\text{RATE OF DEPOSITION}}{\text{RATE OF ACCOMMODATION}} < 1$$

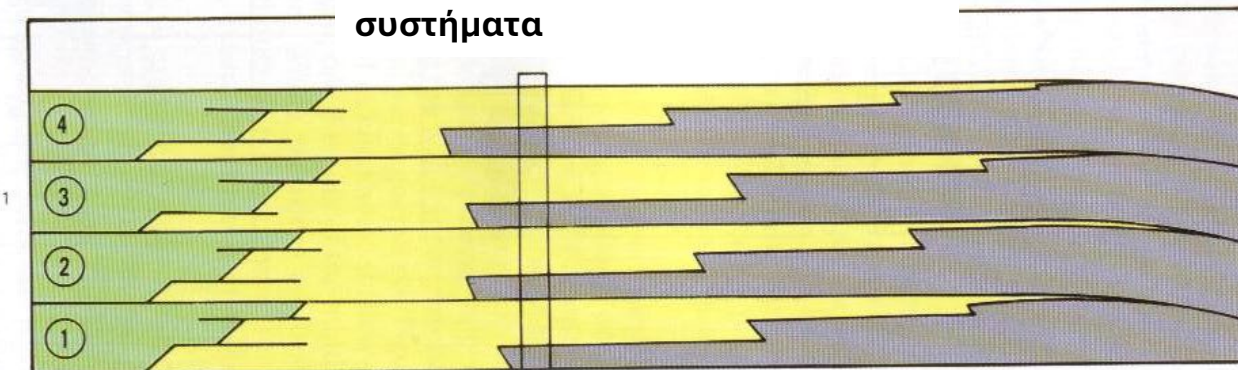


SP



Επισωρευτικά ή αυξητικά συστήματα

$$\frac{\text{RATE OF DEPOSITION}}{\text{RATE OF ACCOMMODATION}} = 1$$



SP



COASTAL-PLAIN SANDSTONES
AND MUDSTONES

SHALLOW-MARINE SANDSTONES

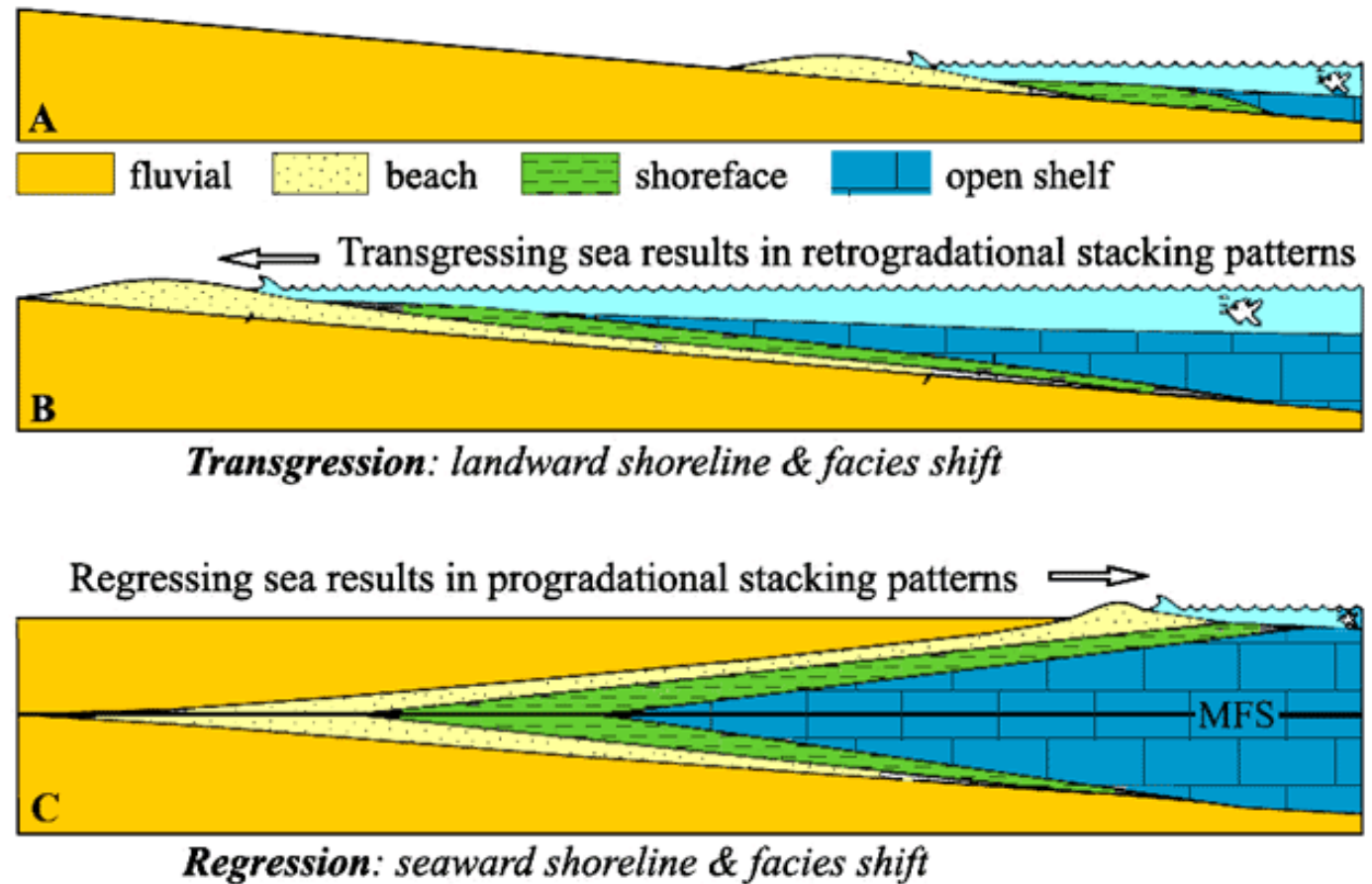
SHELF MUDSTONES

①

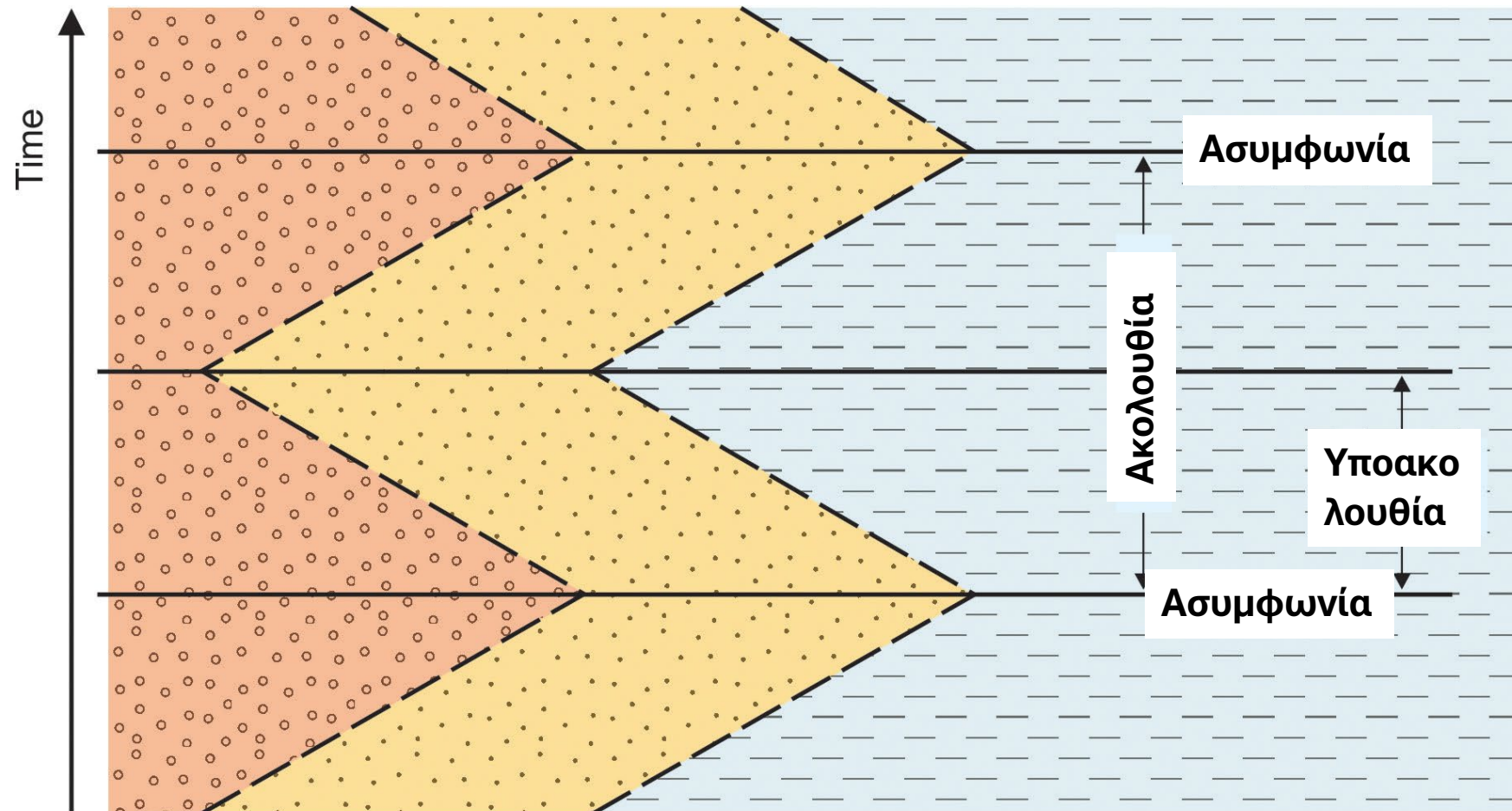
④

INDIVIDUAL PARASEQUENCES

Επίκλυση & Απόσυρση



After Catuneanu (2002)



- Formation A - e.g., a fluvial system
- Formation B - e.g., a coastal system
- Formation C - e.g., a shallow-marine system

- sequence stratigraphic surfaces
- lithostratigraphic surfaces

Εφαρμογές

- **Υδρογονάνθρακες**
 - εντοπισμός ταμειυτήρων (LST, HST)
 - εντοπισμός καλύμματος (TST, MFS shales)
 - ποσοτική εκτίμηση μετανάστευση ποταμού
- **Υδρογεωλογία**
 - πρόβλεψη υδροφορέων
 - κατανομή πορώδους/διαπερατότητας
 - ανασύσταση παλαιοκοίτης και θαμμένων κοιλάδων
- **Παράκτια Γεωμορφολογία & Κλιματική Μεταβλητότητα**
 - MIS κύκλοι
 - παλαιοακτογραμμές
 - εκτίμηση κινδύνου διάβρωσης
- **Αρχαιογεωλογία**
 - εντοπισμός θαμμένων παράκτιων οικισμών
 - συσχέτιση μεταβολών στάθμης με ανθρώπινη δραστηριότητα
- **Πεδία & Χαρτογράφηση**
 - σύνθεση δεδομένων: τομές – γεωτρήσεις – σεισμικά
 - χρήση MFS για μακρινές συσχετίσεις

Ελληνικά Παραδείγματα

- **Γαύδος – Μετόχια**

- Τέλειο παράδειγμα TST/HST με καθαρή MFS.

- **Κορινθιακός**

- Τεκτονική λεκάνη με έντονη μεταβλητότητα διαθέσιμου χώρου – ιδανικό για υποακολουθίες.

- **Λεκάνη Πτολεμαΐδας**

- Ανάλυση παρακολουθιών σε μη θαλάσσιο περιβάλλον.

- **Κρήτη (Ανατολική)**

- Παράκτιες αναβαθμίδες → μοντέλο ακολουθίας Πλειστόκαινου.



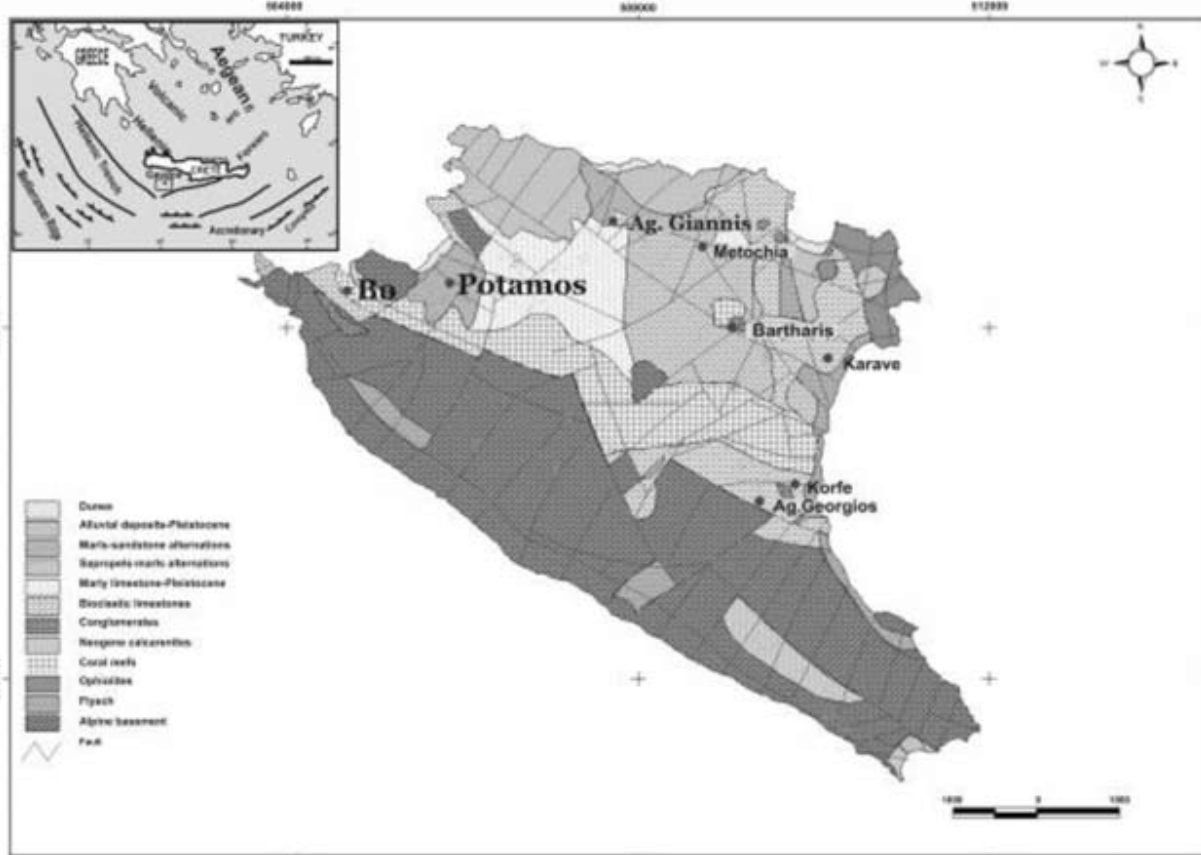
Παράκτιοι κρημνοί της Γαύδου (cliffed coast)



Άι-Γιάννης: Shoreface–Dune σύστημα



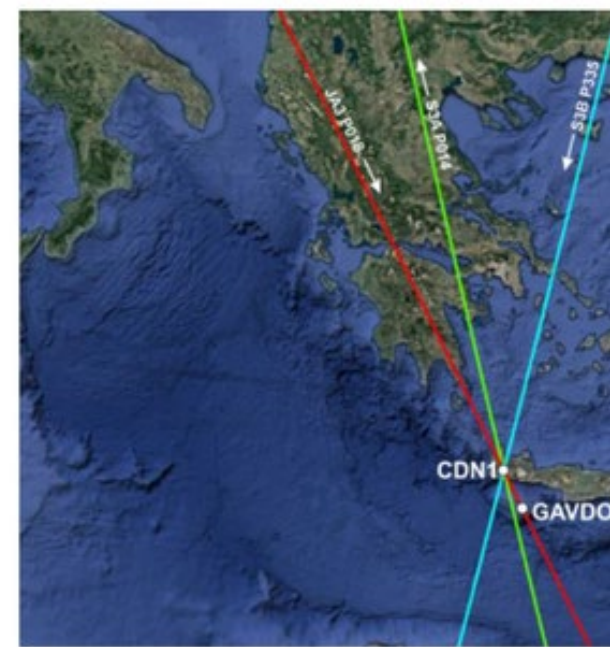
Κόρφος: Κλειστός κόλπος & μικρο-επικλύσεις



Ποταμός: Οριζόντιες στρώσεις & TST–MFS–HST πακέτα



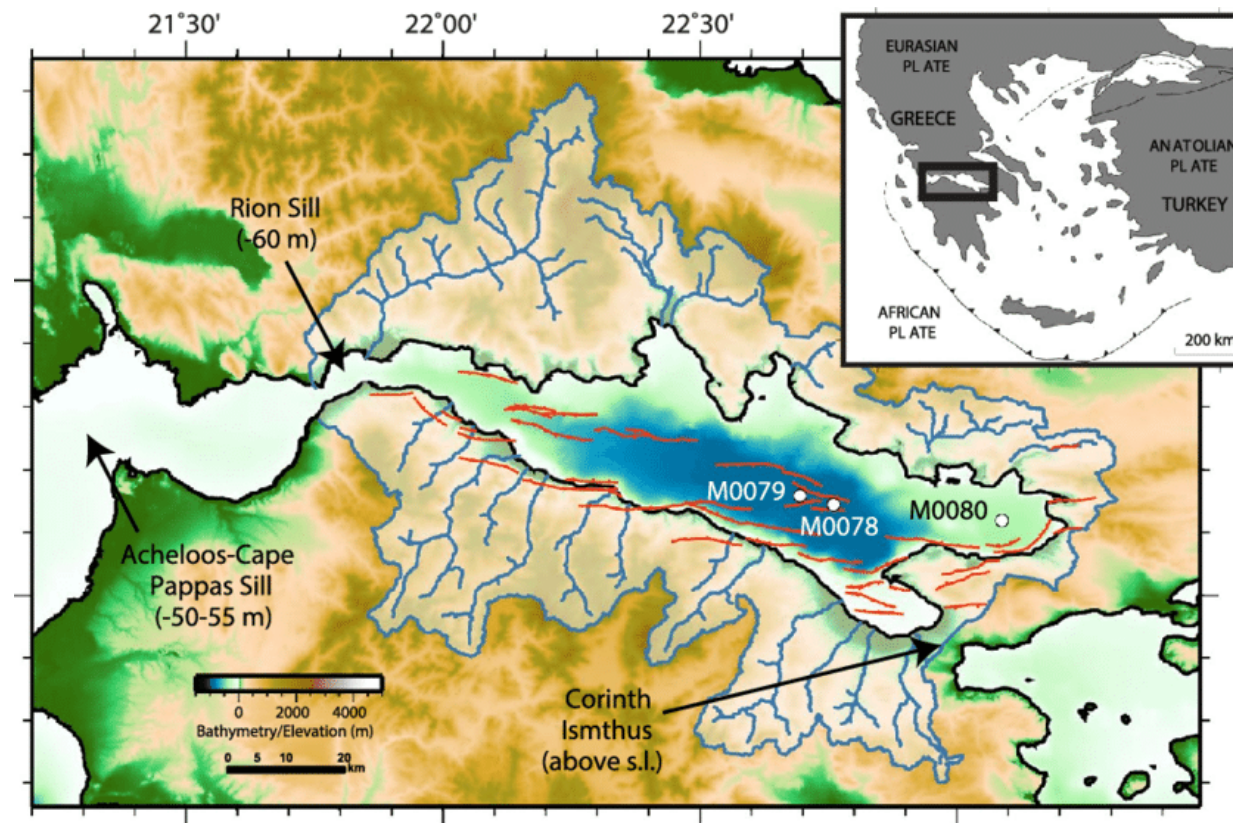
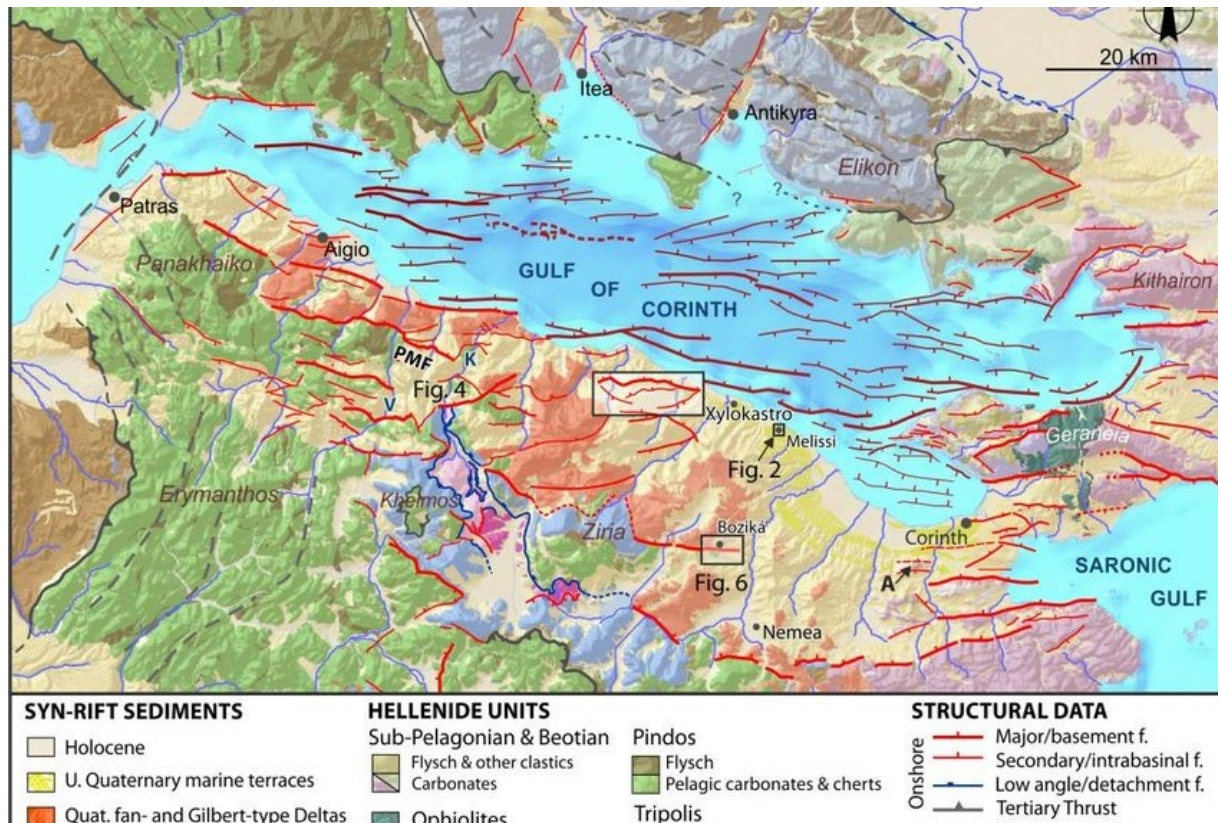
(a)



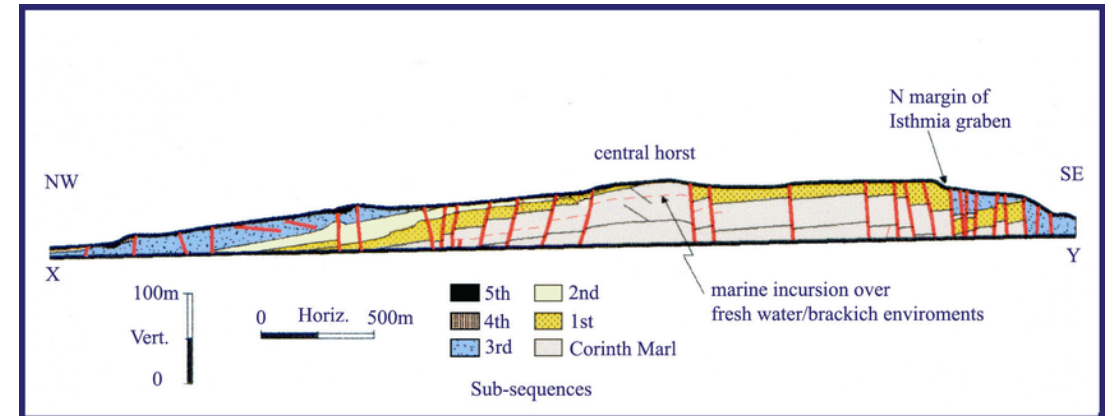
(b)

Παλαιοακτογραμμές
& MIS κύκλοι στη
Γαύδο

Ο Κορινθιακός Κόλπος ως ενεργή ρηξιγενής λεκάνη

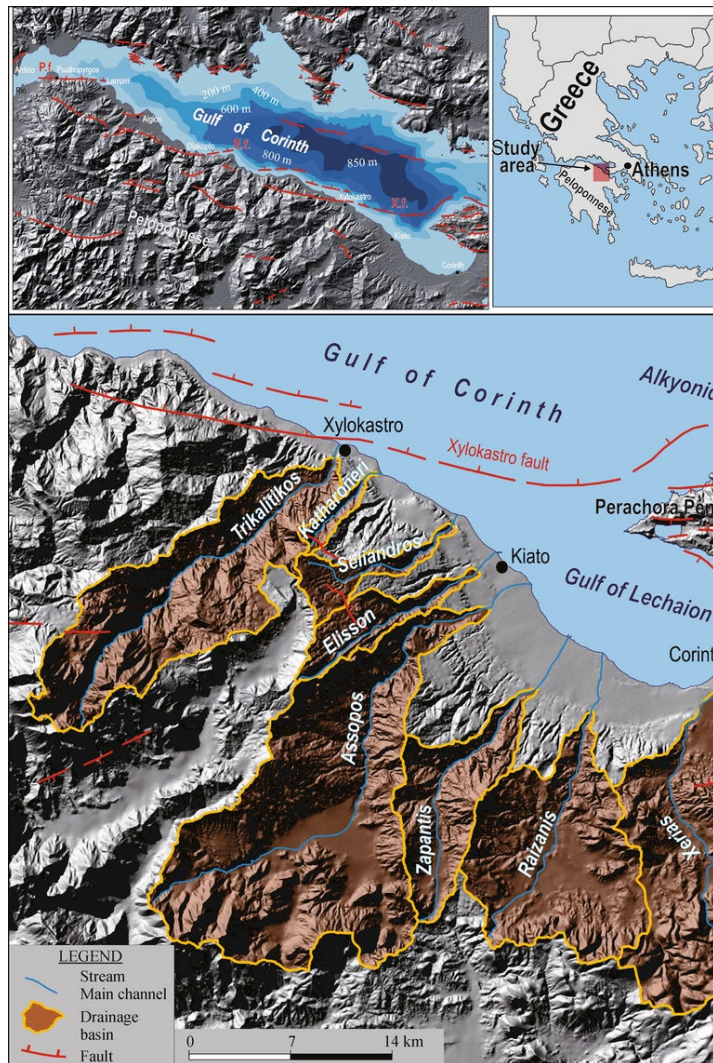


Κανάλι της Κορίνθου: Φυσική τομή σε ακολουθίες



Ακτογραμμές Περαχώρας & MIS terraces





Παράκτιοι κρημνοί τεκτονικού ελέγχου