



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Παράκτια κυματογενή ρεύματα

*Αντώνης Βελεγράκης
Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας*



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ 7
Παράκτια κυματογενή ρεύματα

Α.Φ. Βελεγράκης

7 Παράκτια κυματογενή ρεύματα

7.1 “Κυτταρική” κυκλοφορία (cell circulation)

7.2 Κυκλοφορία παράλληλη στην ακτή (longshore circulation)

7.3 Συνδυασμένη κυκλοφορία (combined coastal circulation)

Η κυκλοφορία της παράκτιας ζώνης

Τα κύματα στα βαθιά νερά ($h > L/2$) δεν μεταφέρουν μάζα, μόνο ενέργεια

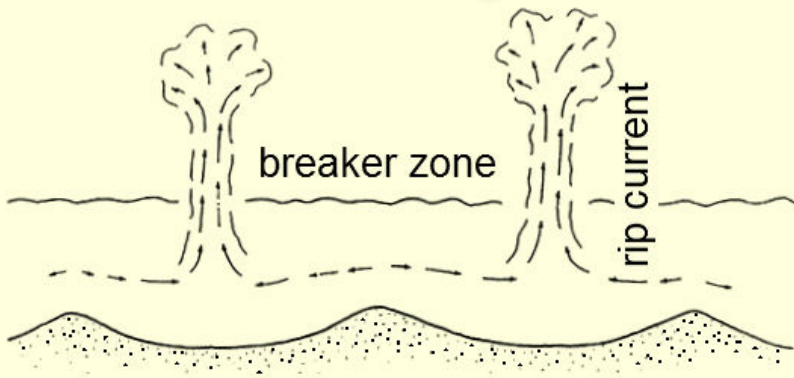
Κοντά στις ακτές όμως, τα κύματα μεταμορφώνονται, γίνονται ασύμμετρα και θραύονται (η ταχύτητα του υδάτινων σωματιδίων στη κορυφή του κύματος $>$ από την ταχύτητα φάσης του κύματος ($C = L/T$))

Οι διεργασίες αυτές δημιουργούν ροές (μεταφορά μάζας) στην ζώνη του σέρφ (surf zone), που οργανώνονται σε 3 βασικά συστήματα:

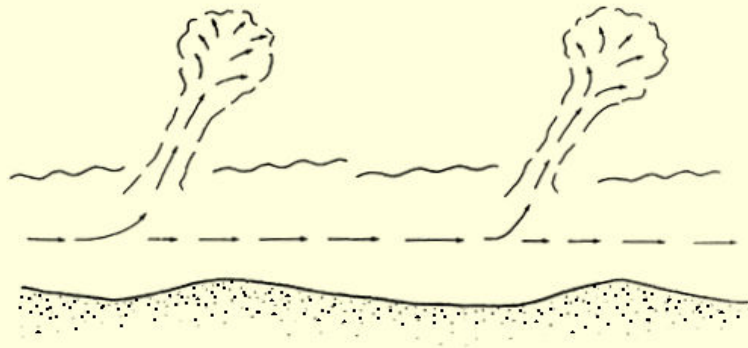
- Κυτταρική” κυκλοφορία (cell circulation) (στην κάθετη πρόπτωση) και
- Κυκλοφορία παράλληλη στην ακτή (σε πολύ πλάγια πρόπτωση) (longshore circulation) και
- γενική κυκλοφορία (σε πλάγια πρόπτωση)

Θυμηθείτε επίσης ότι στην ζώνη του σερφ και την ζώνη διάβροχης (swash zone) υπάρχουν επίσης ρεύματα κάθετα στην ακτή (πχ undertow) τα οποία όμως δεν οργανώνουν κυκλοφορία

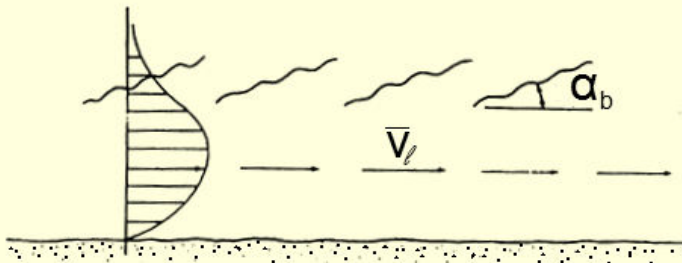
A CELL CIRCULATION ($\alpha_b \approx 0^\circ$)



B GENERAL CIRCULATION (small α_b)



C OBLIQUE WAVE APPROACH (large α_b)



Σχήμα 7.1 Είδη παράκτιας κυκλοφορίας. Βασισμένο στον Komar, 1998.

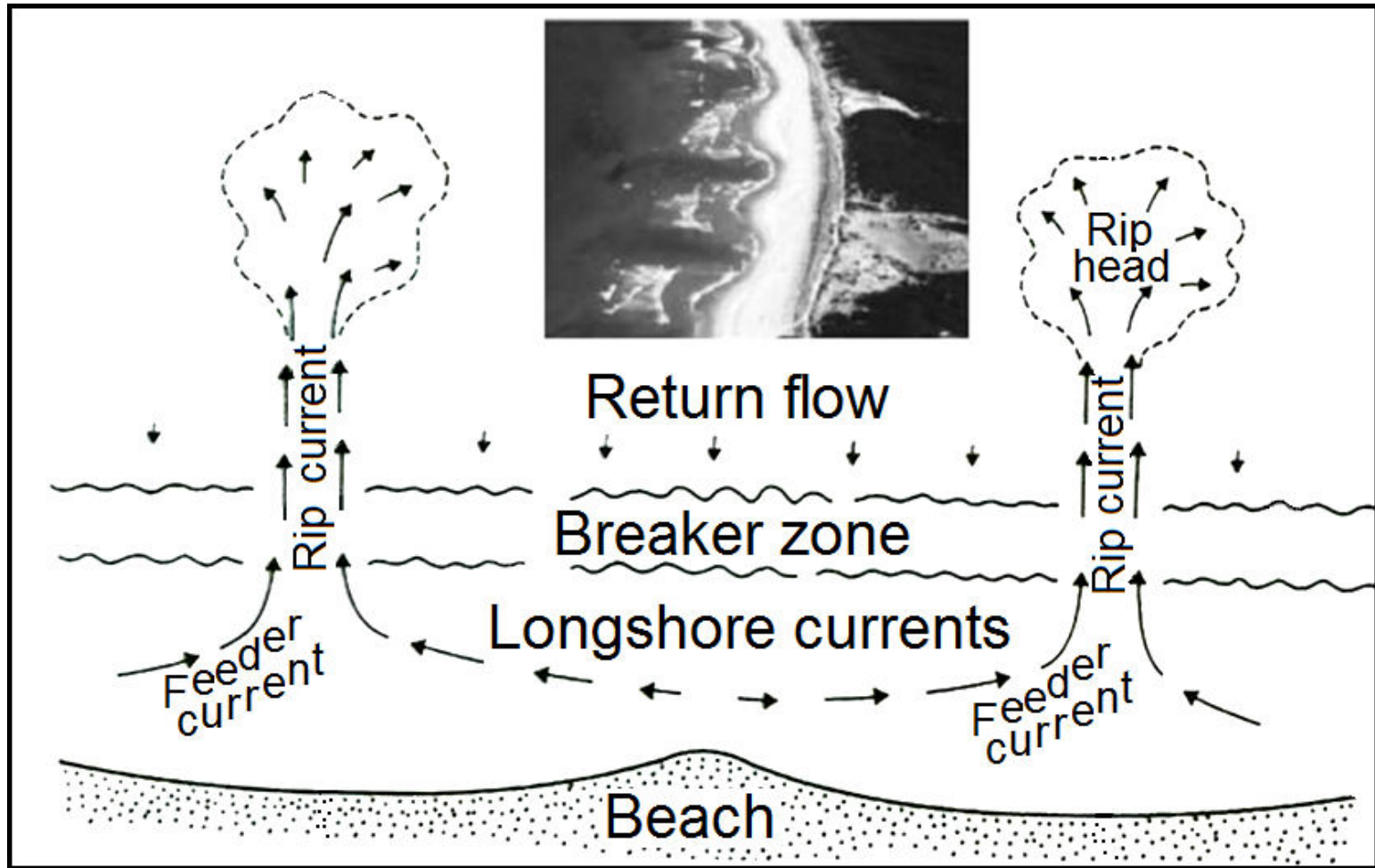
7.1 Κυτταρική κυκλοφορία (cell circulation)

Ένα από τα πλέον σημαντικά στοιχεία της παράκτιας κυτταρικής κυκλοφορίας είναι τα ρεύματα διαφυγής (rip currents).

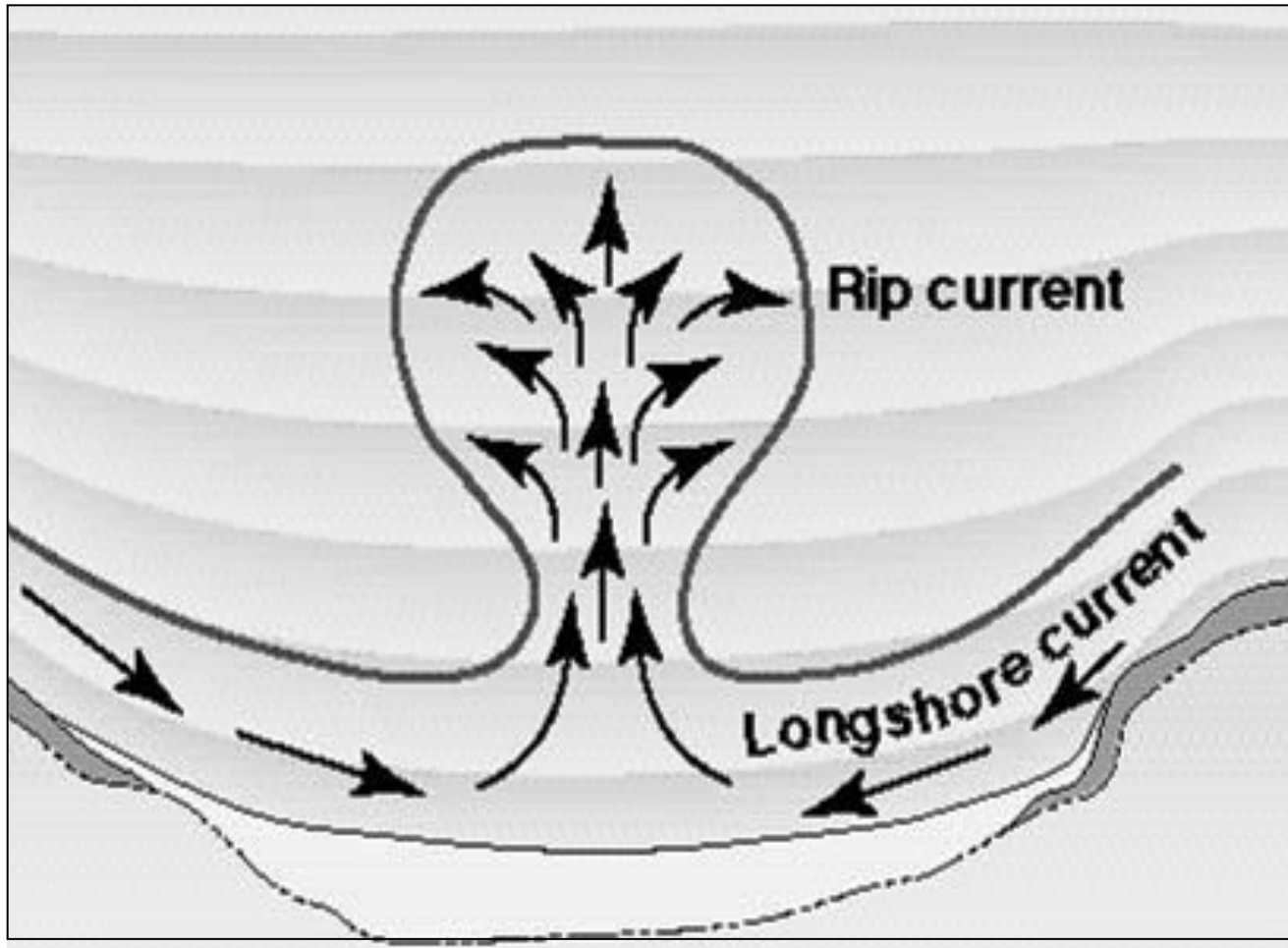
Αυτά είναι δυνατά, περιορισμένου εύρους ρεύματα τα οποία ρέουν προς τα ανοικτά δια μέσου της ζώνης του σερφ. Τα ρεύματα διαφυγής- rip currents- διακρίνονται εύκολα αφού

- (α) το νερό έχει διαφορετικό χρώμα λόγω της παρουσίας μεταφερόμενων ιζημάτων και
- (β) διακόπτουν την γραμμή θραύσης των κυμάτων.

Τα ρεύματα αυτά μπορούν να νικήσουν και τον καλύτερο κολυμβητή (1.25 m/s είναι το ανώτερο δυνατό όριο κολύμβησης ενάντια σε ρεύμα). Στην περίπτωση που βρεθείτε σε τέτοιο ρεύμα πρέπει να κολυμπήσετε παράλληλα στην ακτή



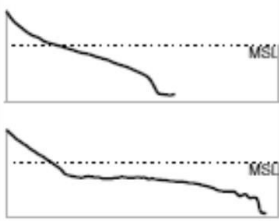
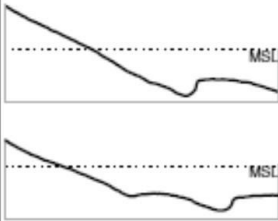
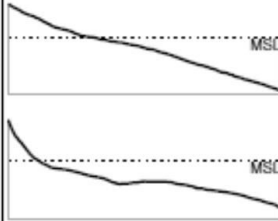


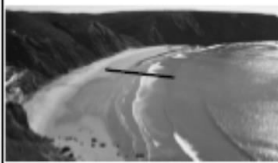

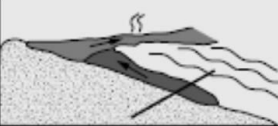


Σχήμα 7.2. Σχηματισμός rip current. (βασισμένο στον Komar, 1998). (Ένθετο από παραλία της Αυστραλίας)



Σχήμα 7.3 Σχηματισμός rip current σε παραλία τσέπης.
(Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 7.4. (α) Hatteras Lighthouse, N. Carolina. Θραύση κυμάτων σε υποθαλάσσιους ύφαλους που εμφανίζει πολλά συστήματα ρεύματα διαφυγής (currents) ((Τροποποιημένο από SEPM, 1996). (β) Μεγάλα ρεύματα διαφυγής (megarips) σε ακτή της Πορτογαλίας κατά τη διάρκεια θύελλας (βασισμένο στους Loureiro et al., 2012))

Profile and rip interaction Parameters	Profile intersected or immediately adjacent to rip-neck channel	Profile intersected or immediately adjacent to feeder channel	Profile without influence of rip-neck or feeder channels
Morphologic relief - description	- sharply inflected slope - abrupt deepening - cross-shore incision	- intertidal trough - bar seaward of trough - alongshore incision	- linear to concave slope - smooth deepening - no channel incision
Morphologic relief - cross-shore intertidal profile with (below) and without (above) terrace			
Visual signature - description	- cross-shore orientation - gaps in breaking line - foam seaward of breakers	- alongshore orientation - streaks of darker water - breaking in the bar seaward of trough	- along and cross-shore uniformity - homogenous bores - regular breaking line
Visual signature - photography			
Boundary diagram			
			
Flow direction	- offshore directed	- alongshore directed	- onshore directed

Σχήμα 7.5. Σύνθεση των μορφολογικών χαρακτηριστικών και της αλληλεπίδρασης τους με τα ρεύματα διαφυγής (rip currents). Τα βέλη δεν είναι ανάλογα της ταχύτητας της ροής (βασισμένο στους Loureiro et al., 2012)

Άλλα στοιχεία της κυτταρικής κυκλοφορίας

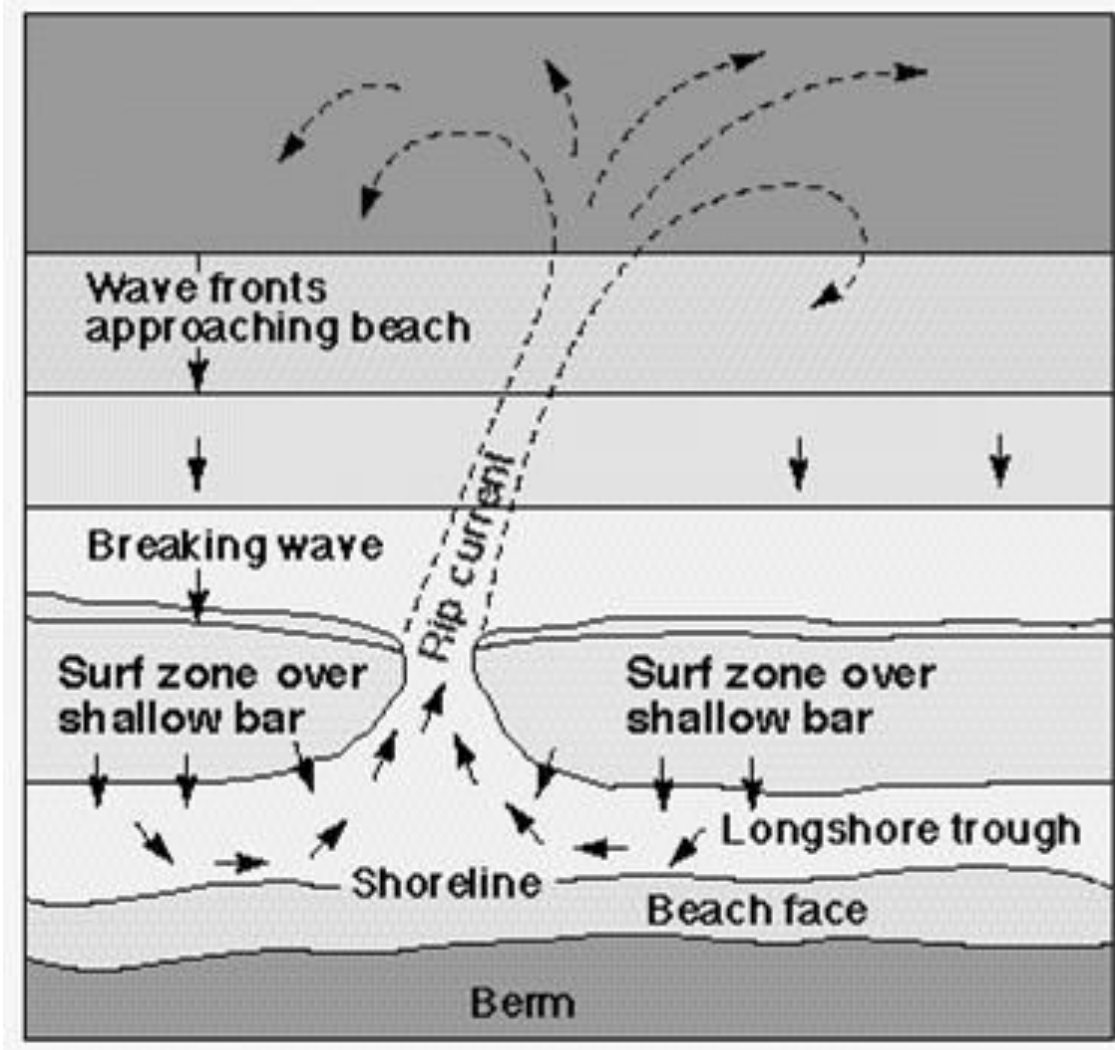
Τα ρεύματα διαφυγής τροφοδοτούνται από ρεύματα παράλληλα την ακτή (longshore currents), τα οποία δημιουργούνται μέσα στην ζώνη του σερφ.

Άλλο (τρίτο) στοιχείο της κυτταρικής κυκλοφορίας είναι η αργή ροή προς την ακτή που δημιουργείται για να αντικαταστήσει το νερό που φεύγει έξω από την ζώνη του σερφ.

Η πρώτη αναγνώριση της κυκλοφορίας αυτής έγινε στα 1950s από ερευνητές (Shepard and Inman, 1950, Transactions of AGU 31, 555-565) του Scripps Institution of Oceanography (California).

Οι πρώτες παρατηρήσεις έδειξαν ότι

- (α) η ταχύτητα των rip currents και η απόσταση τους από την ακτή εξαρτάται από το ύψος των προσπιπτόντων κυμάτων
- (β) η θέση των rip currents στην ακτή εξαρτάται από την τοπογραφία του πυθμένα (με τα ρεύματα να βρίσκονται στις περιοχές με τα μικρότερα (χαμηλότερα) κύματα) και
- (γ) το είδος και ταχύτητα της κυκλοφορίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των προσπιπτόντων κυμάτων (H, T γωνία πρόσπτωσης)



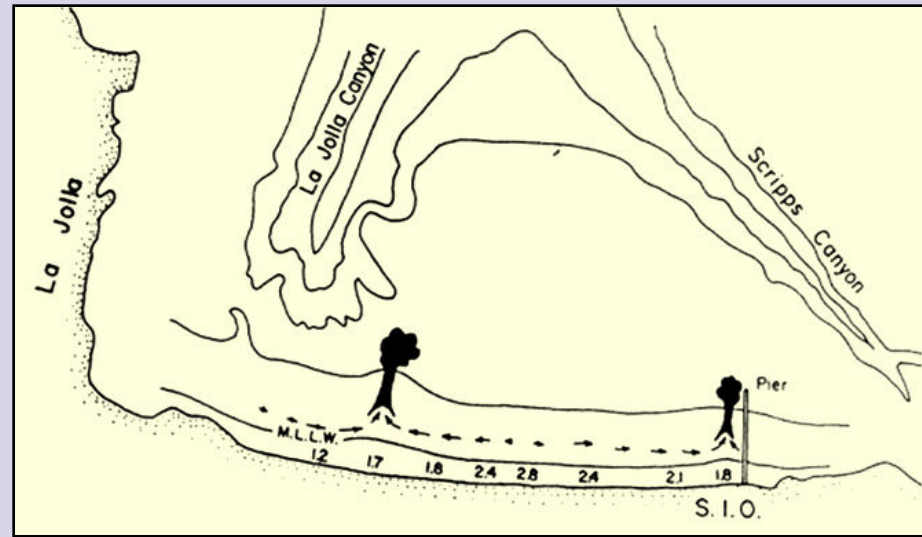
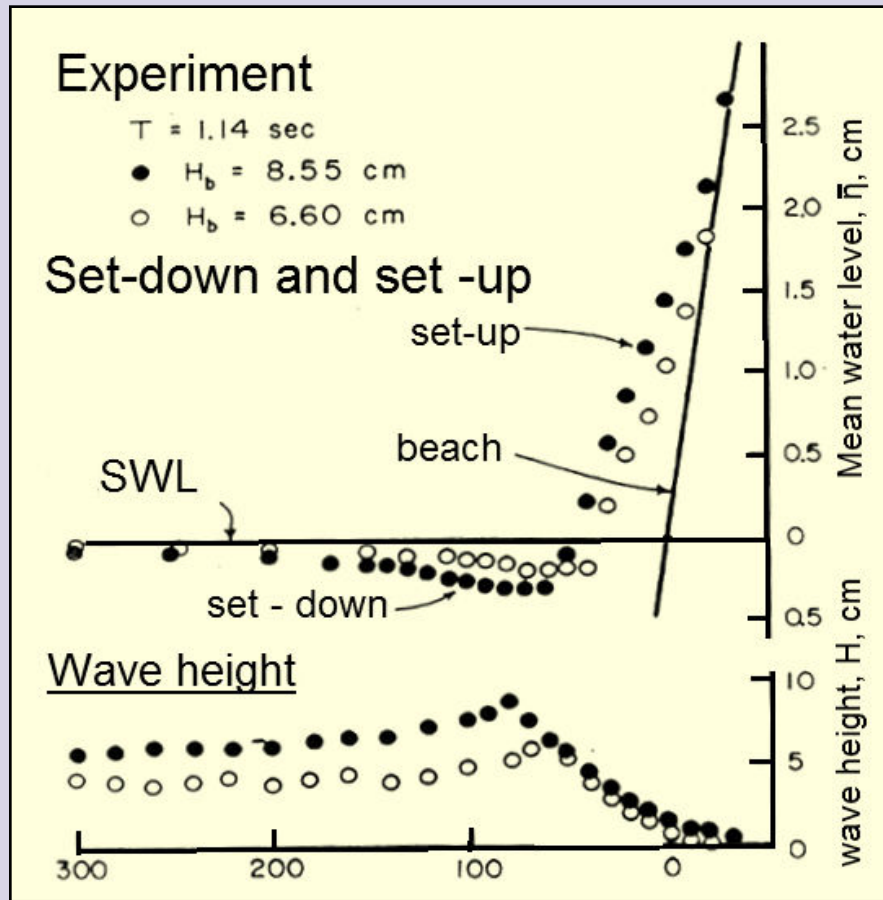
Σχήμα 7.6 Σχηματισμός rip currents. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Αίτια κυτταρικής κυκλοφορίας

Η αίτια της παράκτιας κυτταρικής κυκλοφορίας είναι η παρουσία της μεγαλύτερης ροής δυναμικού λόγω κυμάτων (radiation stress, Longuet-Higgins and Stewart, 1964, Deep Sea Research, 11, 529-563), η οποία προκαλεί ελάττωση (set down) της μέσης στάθμης του νερού πριν και ανύψωση (set up) μετά την θραύση των κυμάτων.

Η ανύψωση (set up) είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των υψηλότερων κυμάτων με αποτέλεσμα την δημιουργία κλίσης της πίεσης (pressure gradient) παράλληλα προς την ακτή.

Η κλίση ισορροπείται από την δημιουργία παράλληλων προς την ακτή ρευμάτων (longshore currents), τα οποία κινούνται από την περιοχή του μεγαλύτερου (set up) προς την περιοχή του μικρότερου



Σχήμα 7.7 Αίτια δημιουργίας rip currents. Προσέξτε ότι κύματα διαφορετικού ύψους δημιουργούν διαφορετικά set ups and downs. Αν λόγω διαφορεικής τοπογραφίας του πυθμένα τα ύψη των θραυομένων κυμάτων είναι διαφορετικά σε δύο γειτονικές περιοχές τότε θα υπάρξουν και ρεύματα παράλληλα στην ακτή τα οποία αν συγκλίνουν τότε δημιουργείται rip current. (Βασισμένα στον Komar, 1998).

Δημιουργία κλίσης της πίεσης (pressure gradient) παράλληλα προς την ακτή

Αποδεικνύεται ότι η κλίση λόγω διαφορικής ανύψωσης δίνεται από

$$\rho g(\eta + h) \partial \eta / \partial y = 1/4 \rho g H [kh / \sinh(2kh)] \partial \eta / \partial y$$

Όπου η είναι η κλίση του ανύψωσης κάθετα προς την ακτή, h είναι το βάθος, H είναι το ύψος κύματος, k είναι ο κυματικός αριθμός ($k=2\pi/L$)

Κυτταρική κυκλοφορία ιζημάτων

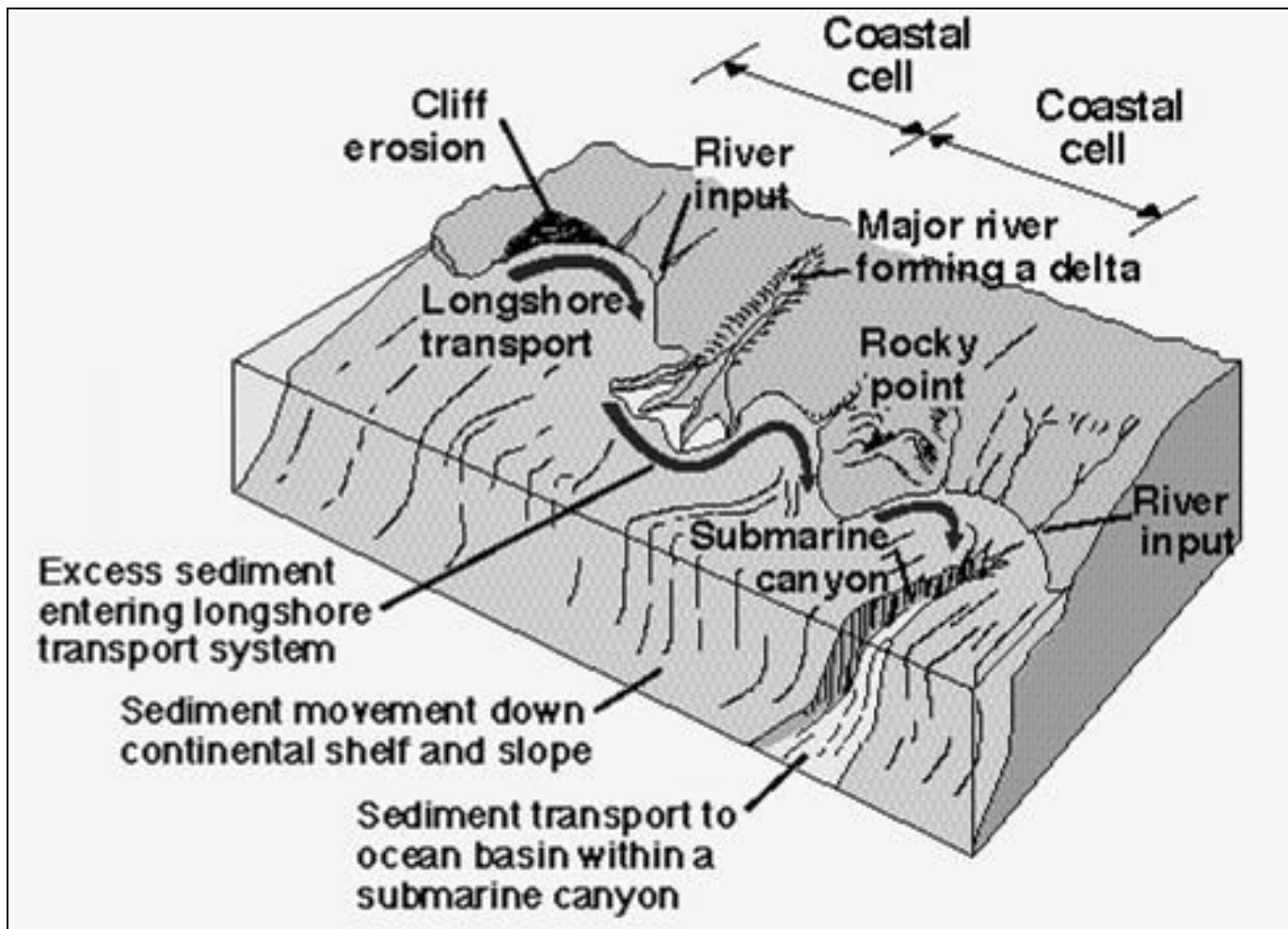
Πρέπει να θυμάστε ότι η παράκτια υδροδυναμική δημιουργεί ιζηματομεταφορά, η οποία οργανώνεται επίσης σε κυτταρική κυκλοφορία ιζημάτων (η οποία όμως δεν πρέπει να συγχέεται με αυτή του νερού)

Ο όρος εδώ σημαίνει παράκτιες περιοχές που δεν τροφοδοτούνται και δεν τροφοδοτούν με ιζήματα τις γειτονικές παράκτιες περιοχές (αν και υπάρχουν ανταλλαγές ιζημάτων με την ξηρά και την ανοικτή θάλασσα)

Η αναγνώριση των κύτταρων παράκτιας ιζηματομεταφοράς είναι η πρώτη και πλέον σημαντική εργασία στην μελέτη του «ισολογισμού» ιζημάτων της παράκτιας ζώνης



Σχήμα 7.8 Τα παράκτια κύτταρα ιζηματομεταφοράς της Ν. Καλιφόρνιας Βασισμένο στο SEPM, 1996.



Σχήμα 7.9 Διεργασίες παρακτίου κύτταρου ιζηματομεταφοράς (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

MAJOR INPUTS	MAJOR OUTPUTS
Rivers and streams	Winter transport and offshore bars
Longshore drift	Storm transport to outer shelf
<u>Shoreline erosion</u>	Submarine canyon capture
Windblown from land	Trapping in inlets
From offshore (especially during storms)	Windblown to dunes
Human replenishment projects	Beach sand and mining

Σχήμα 7.10 Ο ισολογισμός ιζημάτων σε κύτταρο κυκλοφορίας. Προσέξτε ότι δεν υπάρχει εισαγωγή-εξαγωγή ιζημάτων στο κύτταρο λόγω παράλληλης μεταφοράς.

7.2 Κυκλοφορία παράλληλη στην ακτή

Οφείλεται στην παρουσία των ρευμάτων παράλληλων προς την ακτή (longshore currents) λόγω της πλάγιας πρόσπτωσης των κυμάτων και δεν πρέπει να συγχέεται με αυτή που αποτελεί μέρος της κυτταρικής κυκλοφορίας

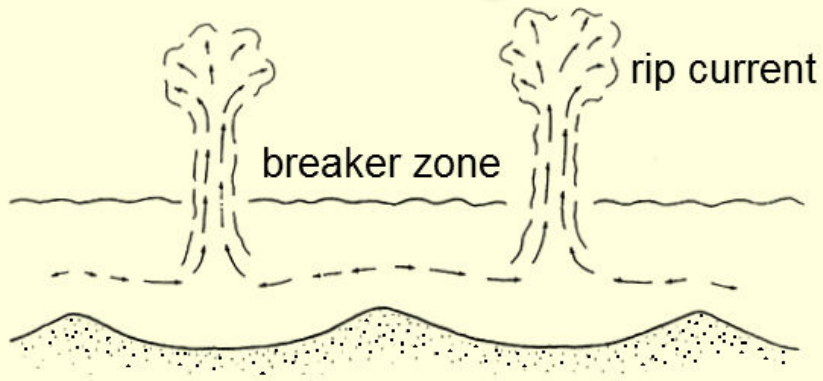
Τα ρεύματα αυτά οφείλονται στην παρουσία μιας άλλης συνιστώσας της ροής δυναμικού S_{xy} , η οποία δεν υπάρχει όταν τα κύματα προσπίπτουν κάθετα προς την ακτή (οπότε υπάρχουν μόνο οι συνιστώσες S_{xx} και S_{yy})

Αποδεικνύεται (Longuet-Higgins and Stewart, 1964) ότι

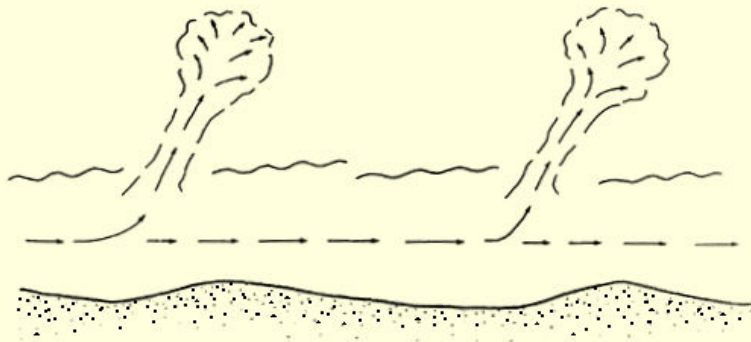
$$S_{xy} = ECn \cos\alpha (\sin\alpha/C)$$

όπου E είναι η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας ($E=1/8\rho gH^2$), Cn είναι η ταχύτητα ομάδας (δηλ. η ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η ενέργεια), α είναι η γωνία κυματικής πρόσπτωσης και C είναι η ταχύτητα φάσης ($C=L/T$).

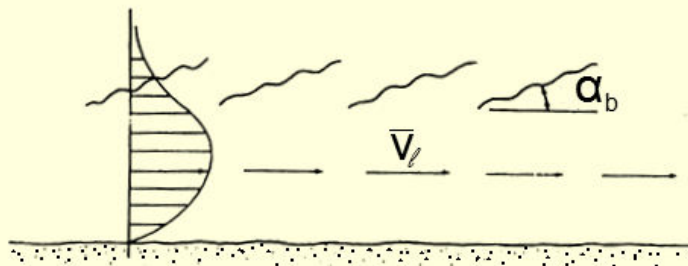
A CELL CIRCULATION ($\alpha_b \approx 0^\circ$)



B GENERAL CIRCULATION (small α_b)



C OBLIQUE WAVE APPROACH (large α_b)



Σχήμα 7.11 Ρεύματα παράλληλα στην ακτή εμφανίζονται σε όλα τα είδη παράκτιας κυκλοφορίας Βασισμένο στο Komar, 1998.

Η ταχύτητα των παράλληλων προς την ακτή ρευμάτων

Η ταχύτητα των ρευμάτων V_I δίνεται από (Komar, 1998):

$$V_I = 1.17 \sqrt{gH_b} \sin\alpha_b \cos\alpha_b$$

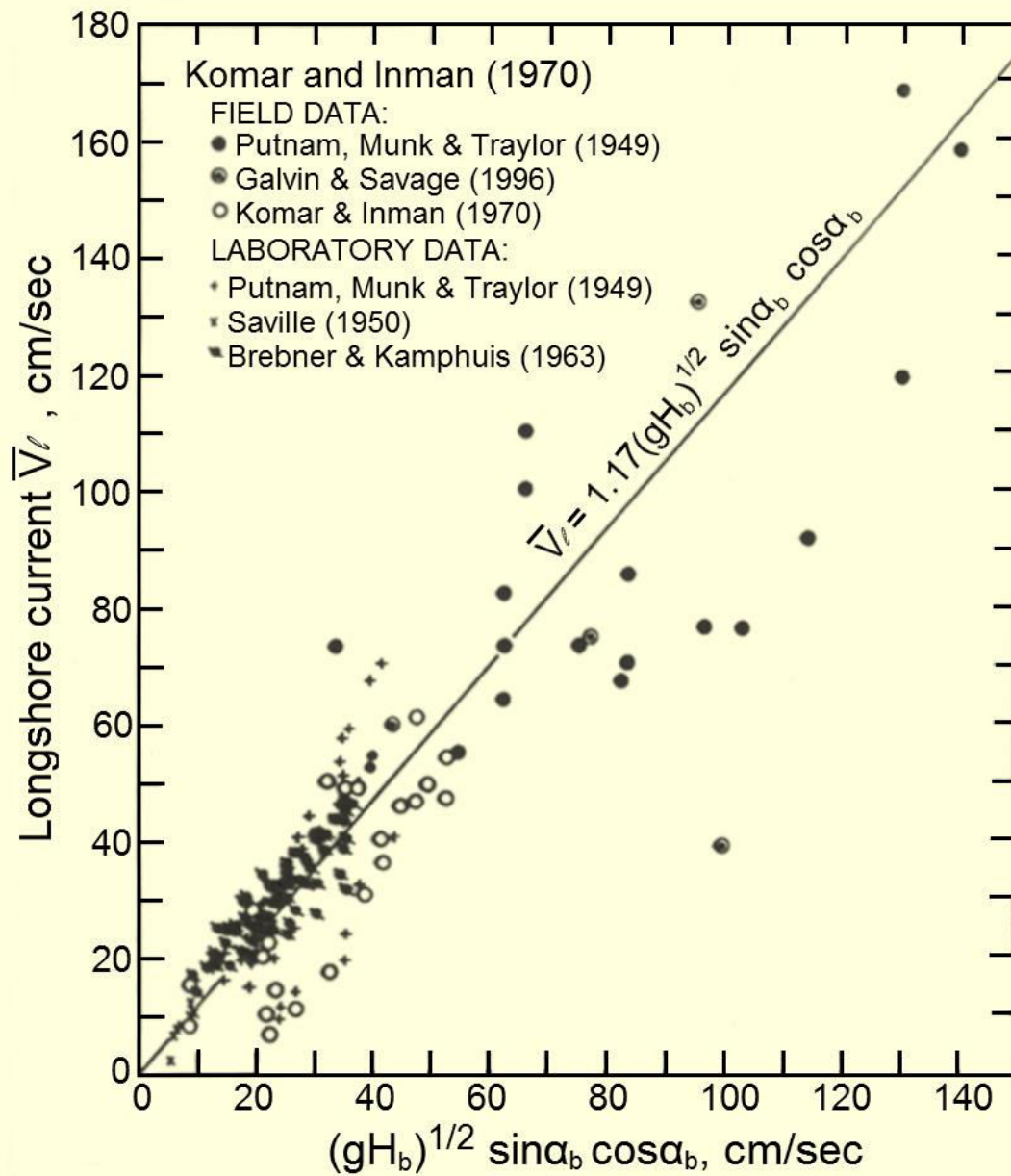
Όπου H_b είναι το ύψος κύματος στο σημείο θραύσης και α_b είναι η γωνία πρόσπτωσης στο σημείο θραύσης.

Στην περίπτωση που τα προσπίπτοντα κύματα έχουν διαφορεικά ύψη τότε

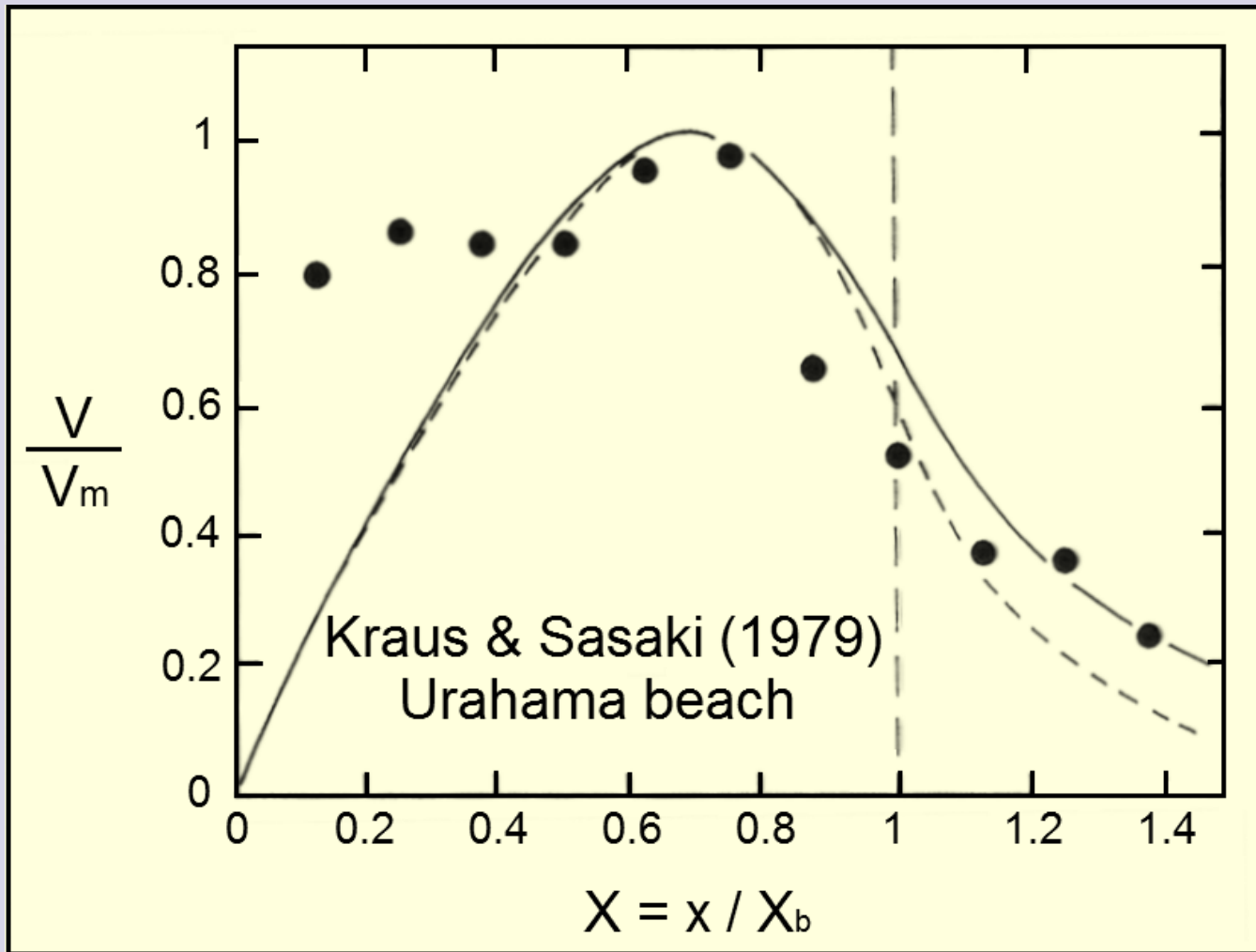
$$V_I = \sqrt{gH_{bs}} \sin\alpha_b \cos\alpha_b$$

όπου H_{bs} είναι το σημαντικό ύψος κύματος κατά την θραύση (το ύψος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων)

Η παραπάνω ταχύτητες αναφέρονται στην ταχύτητα των ρευμάτων στη μέση της ζώνης του σερφ. Να θυμάστε όμως ότι υπάρχει κλίση της ταχύτητας κάθετα προς την ακτή (Komar, 1998).



Σχήμα 7.12 Ταχύτητα ρευμάτων παράλληλων στην ακτή. Στη παλινδρόμηση (regression) χρησιμοποιείται διαστατική ανάλυση (βασισμένο στον Komar, 1998)



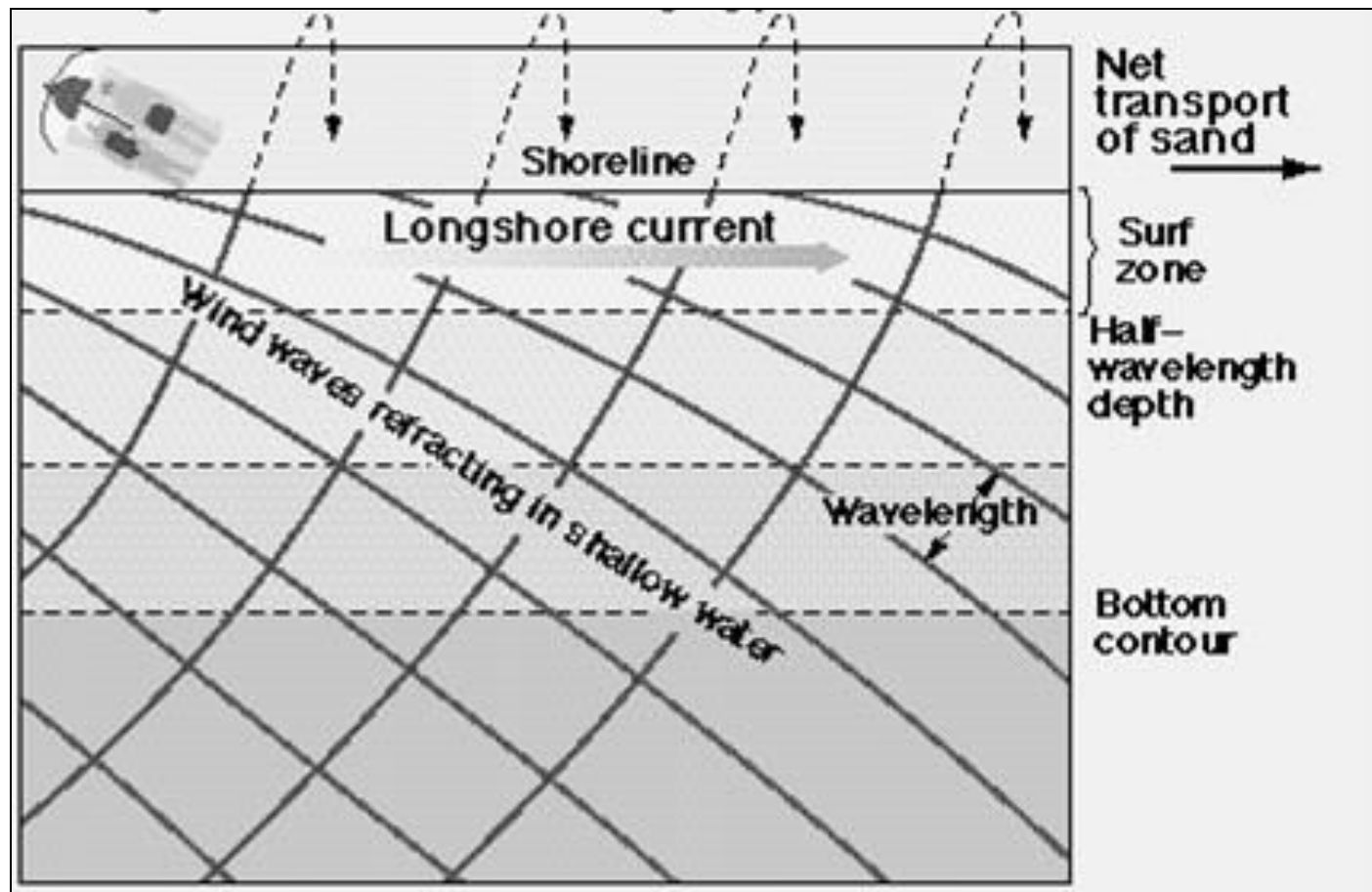
Σχήμα 7.13 Η χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων παράλληλων στην ακτή στη ζώνη του σερφ με την απόσταση από την ακτή . (Βασισμένο στον Komar, 1998).

Η σημασία των ρευμάτων για την ιζηματομεταφορά παράλληλα προς την ακτή

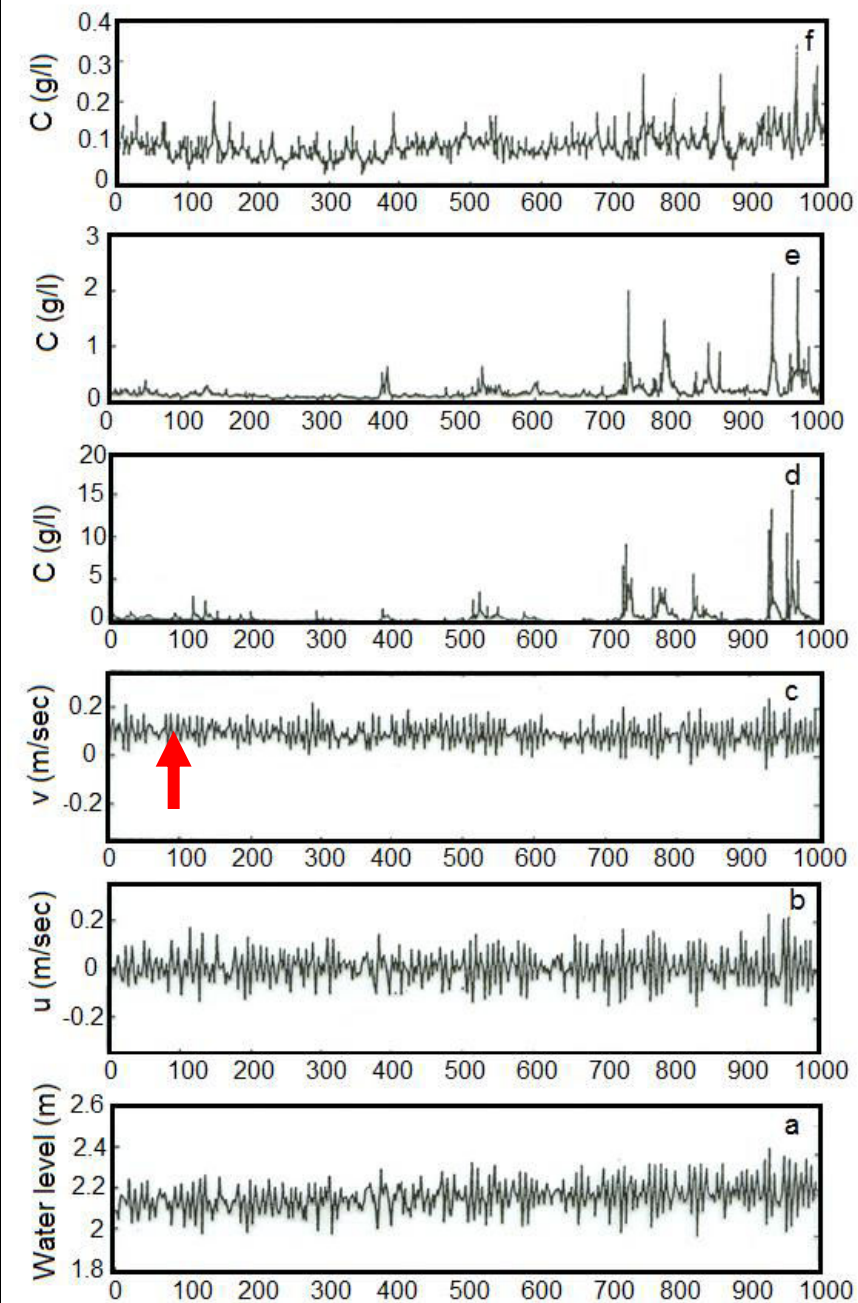
Τα ρεύματα παράλληλα προς την ακτή είναι από τους πλέον σημαντικούς φορείς ιζημάτων στην παράκτια ζώνη

Τα κύματα αναδεύουν/επαναιωρούν τα παράκτια ιζήματα, τα οποία κατόπιν παραλαμβάνονται από τα ρεύματα και μεταφέρονται παράλληλα προς την ακτή.

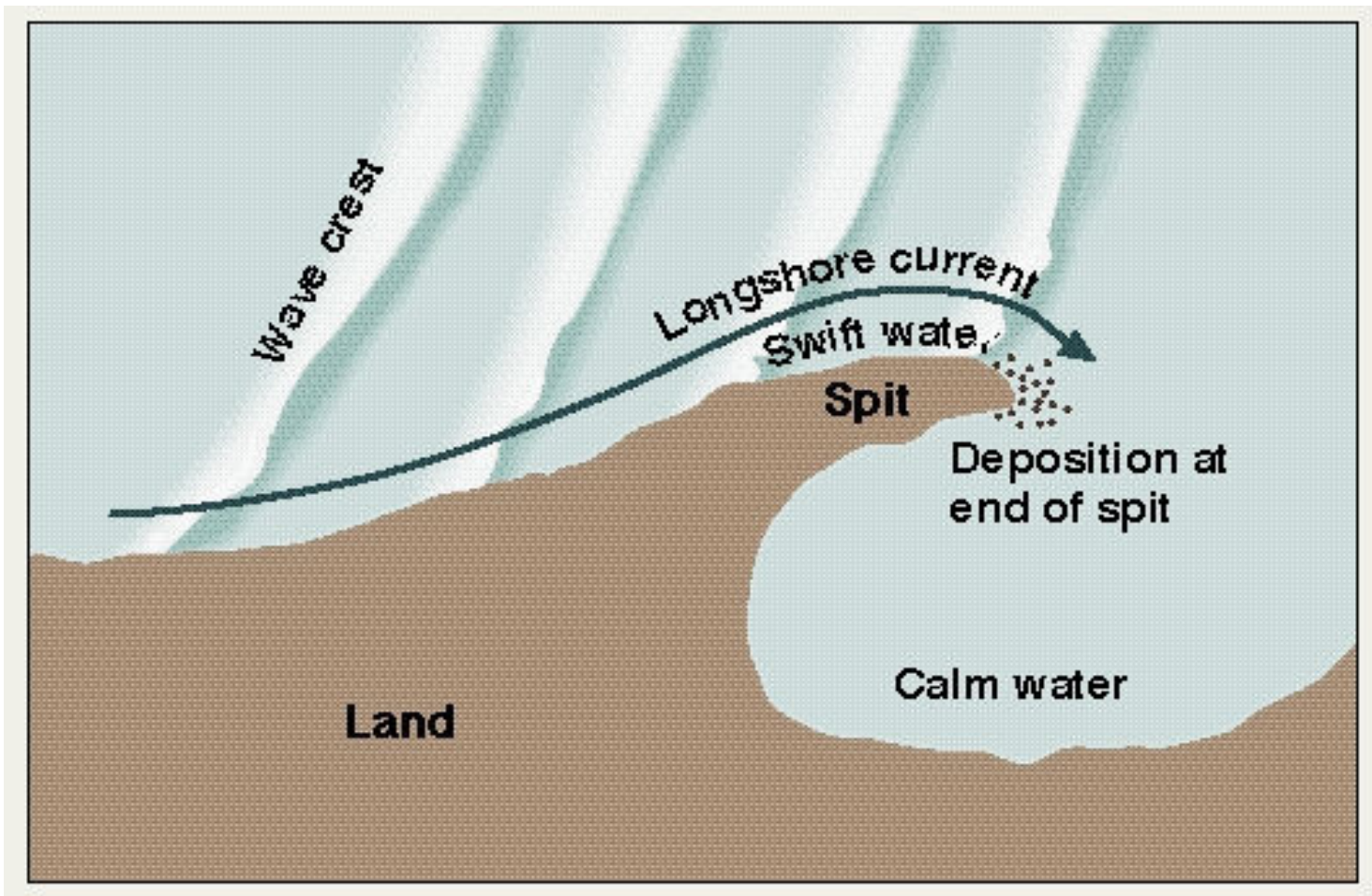
Προσοχή: Τα ρεύματα αυτά ενεργούν στη ζώνη του σερφ και η σχετική ιζηματομεταφορά (transport due to longshore currents) δεν πρέπει να συγχέεται με αυτή που συμβαίνει στη ζώνη διαβροχής (swash zone littoral drift).



Σχήμα 7.14 Τα ρεύματα παράλληλα στην ακτή και η μεταφορά στην ζώνη διαβροχής (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 7.15 Ρεύματα παράλληλα στην ακτή (v). Προσέξτε ότι οι υψίσυχνες μετρήσεις ρευμάτων παράλληλα στην ακτή (v) παλινδρομούν-oscillate- (λόγω κυμάτων) γύρω από μια μη μηδενική τιμή (~ 0.12 m/s), που δείχνει την παρουσία σταθερού ρεύματος παράλληλα στην ακτή (Βασισμένο στο Voulgaris, 1993).



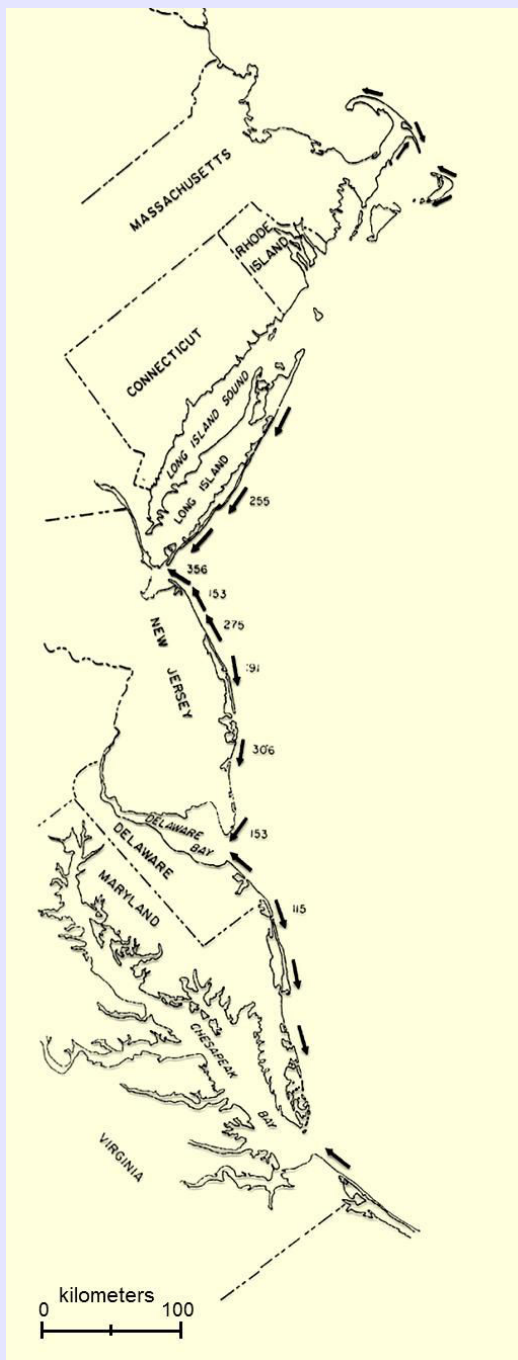
Σχήμα 7.16 Κατασκευή αμμώδους βέλους (spit) από την ενέργεια των ρευμάτων παράλληλων προς την ακτή.



Σχήμα 7.17 N. Carolina coast. Αγκιστρωτό αμμώδες βέλος (recurved spit) και υβώματα (ridges) διαφορετικών γενεών (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



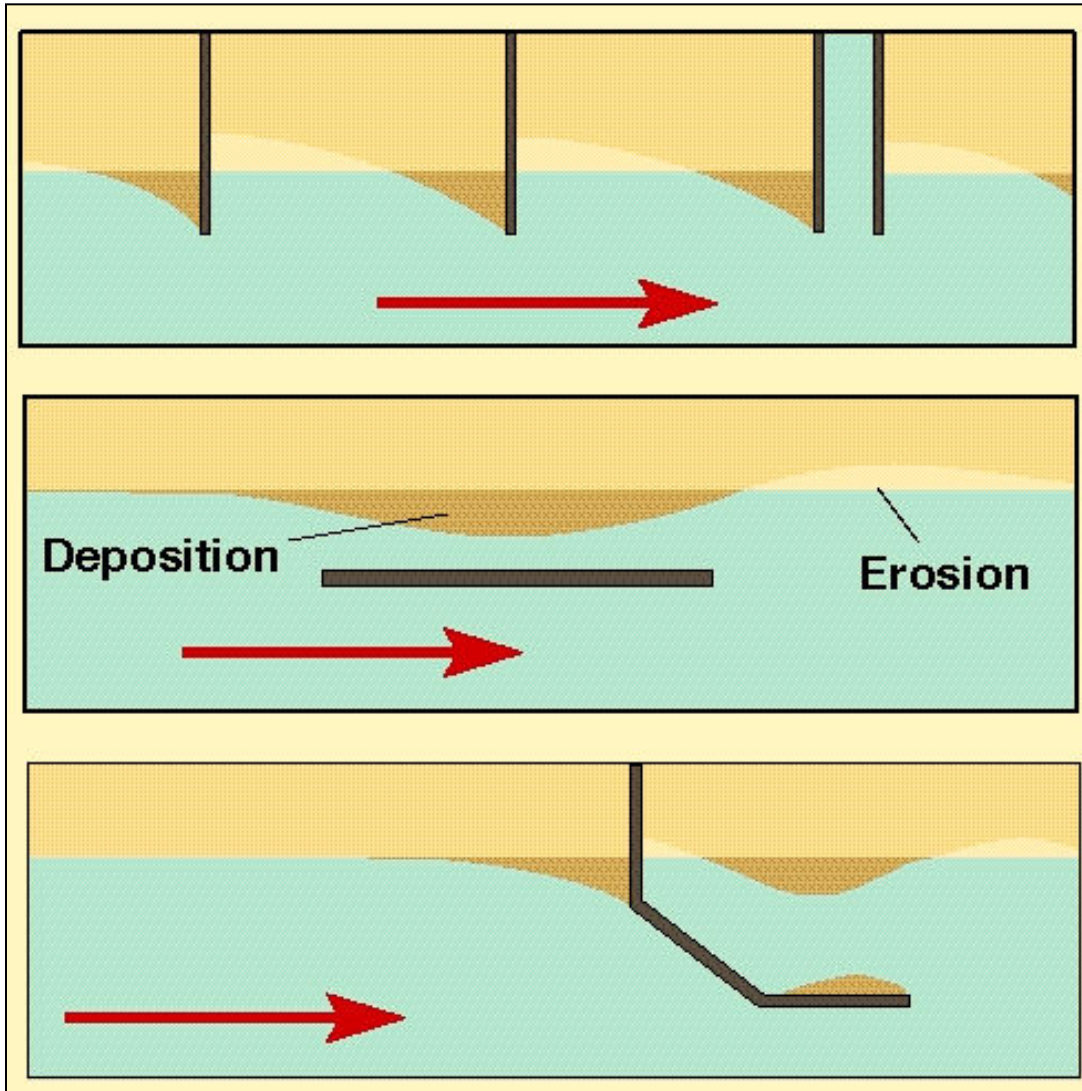
Σχήμα 7.18 N. Carolina coast. Παράκτιες γεωμορφες. Προσέξτε την βάση του αγκιστρωτού αμμώδους βέλους (recurved spit). (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 7.19 Μεταφορά ιζημάτων παράλληλα στην ακτή στην Ανατολική ακτή των ΗΠΑ. Βασισμένο στο Komar, 1998.



Σχήμα 7.20 Απόθεση στα ανάντη του προβόλου, λόγω μεταφοράς παράλληλα προς την ακτή. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



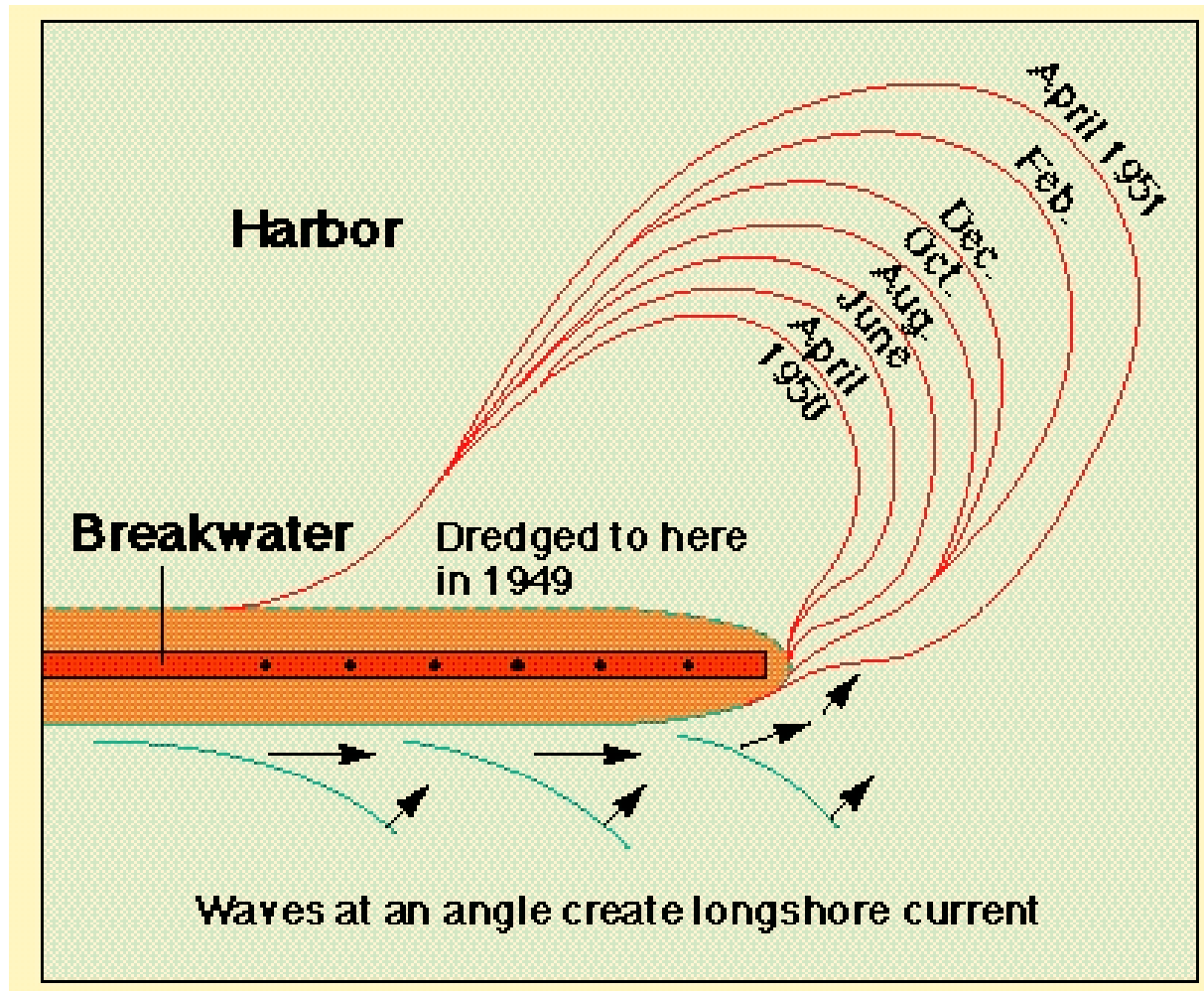
Σχήμα 7.21 Το αποτέλεσμα των προβόλων στην παγίδευση της ιζημεταφοράς παράλληλα προς την ακτή (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 7.22 N. Carolina coast. Το αποτέλεσμα των προβόλων στην παγίδευση της ιζημαμεταφοράς παράλληλα προς την ακτή (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 7.23 N. Carolina coast. Το αποτέλεσμα των προβόλων στην παγίδευση της ιζημεταφοράς παράλληλα προς την ακτή (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



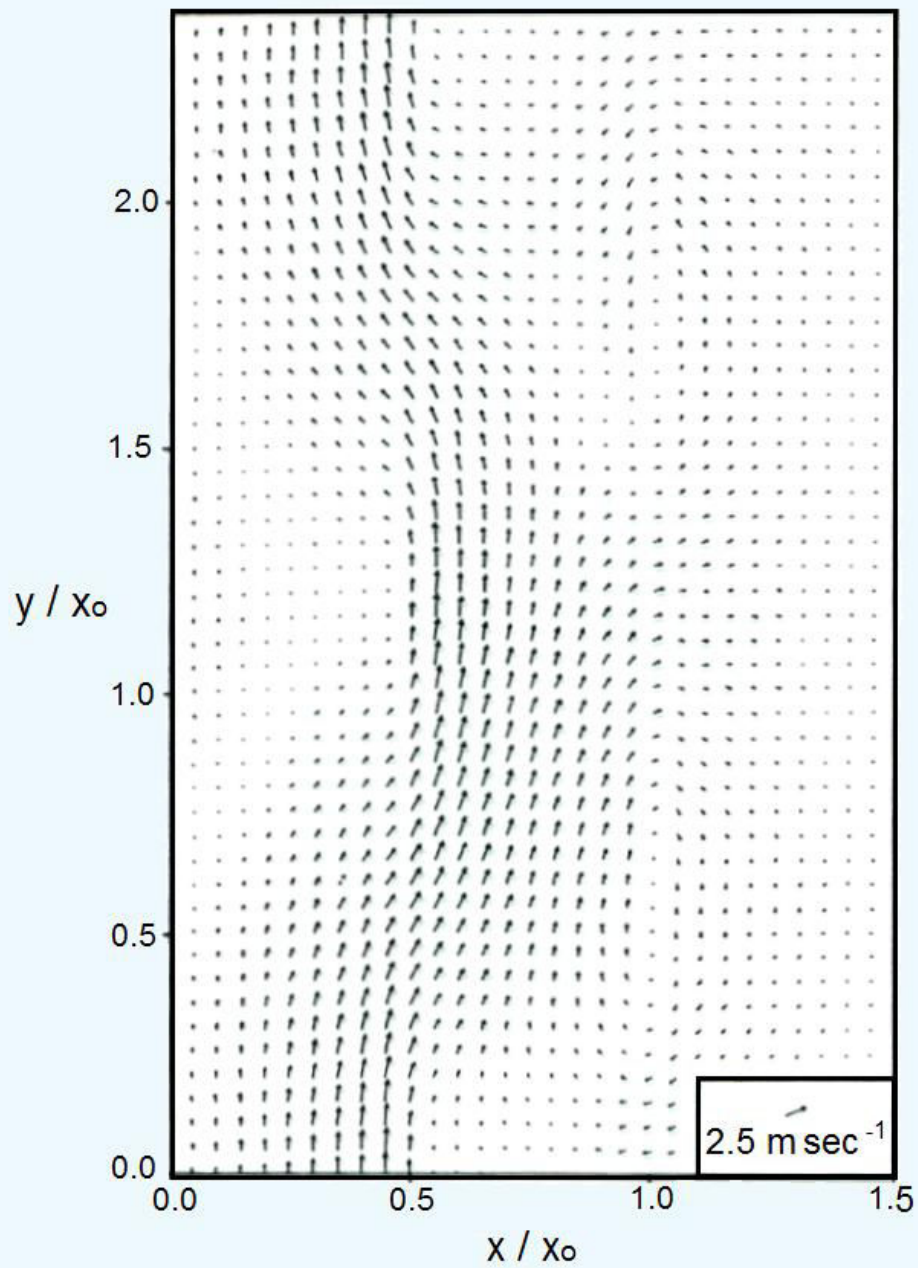
Σχήμα 7.24 Απόθεση λόγω προβόλων (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

7.3 Συνδυασμένη κυκλοφορία

Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει συνδυασμός των κυκλοφοριών

Τα κύματα, άνεμοι και οι παλίρροιες επίσης επιδρούν στην παράκτια κυκλοφορία

Τέλος υπάρχουν μη γραμμικές επιδράσεις στα παράκτια ρεύματα με αποτέλεσμα διατμητικές αστάθειες



Σχήμα 7.25 Διατμητικές αστάθειες στην παράκτια ζώνη. Βασισμένο στον Komar, 1998.