



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Κύματα III: Θραύση/απόσβεση στη
παραλία

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 6

Κύματα III: Θραύση/απόσβεση στη παραλία

Α.Φ. Βελεγράκης

6 Κύματα III: Θραύση/απόσβεση στη παραλία

6.1 Θραύση κυμάτων στην παραλία

6.1.1 Παράκτιες κυματικές ζώνες

6.1.2 Τυποι θραύσης κυμάτων

6.1.3 Μέτρηση υδροδυναμικής/ιζηματοδυναμικής στη παραλία

6.2 'Παρακμή' των κυμάτων στη παραλία

6.3 Ανύψωση/βύθιση μέσης στάθμης στη παραλία (set up-set down)

6.4. Ζώνη διαβροχής/αναρρίχησης (swash zone)

6.5 Υπο-βαρυτικές κινήσεις (Infra-gravity)/ακραία κύματα (edge waves)

6.1 Θραύση κυμάτων στην παραλία

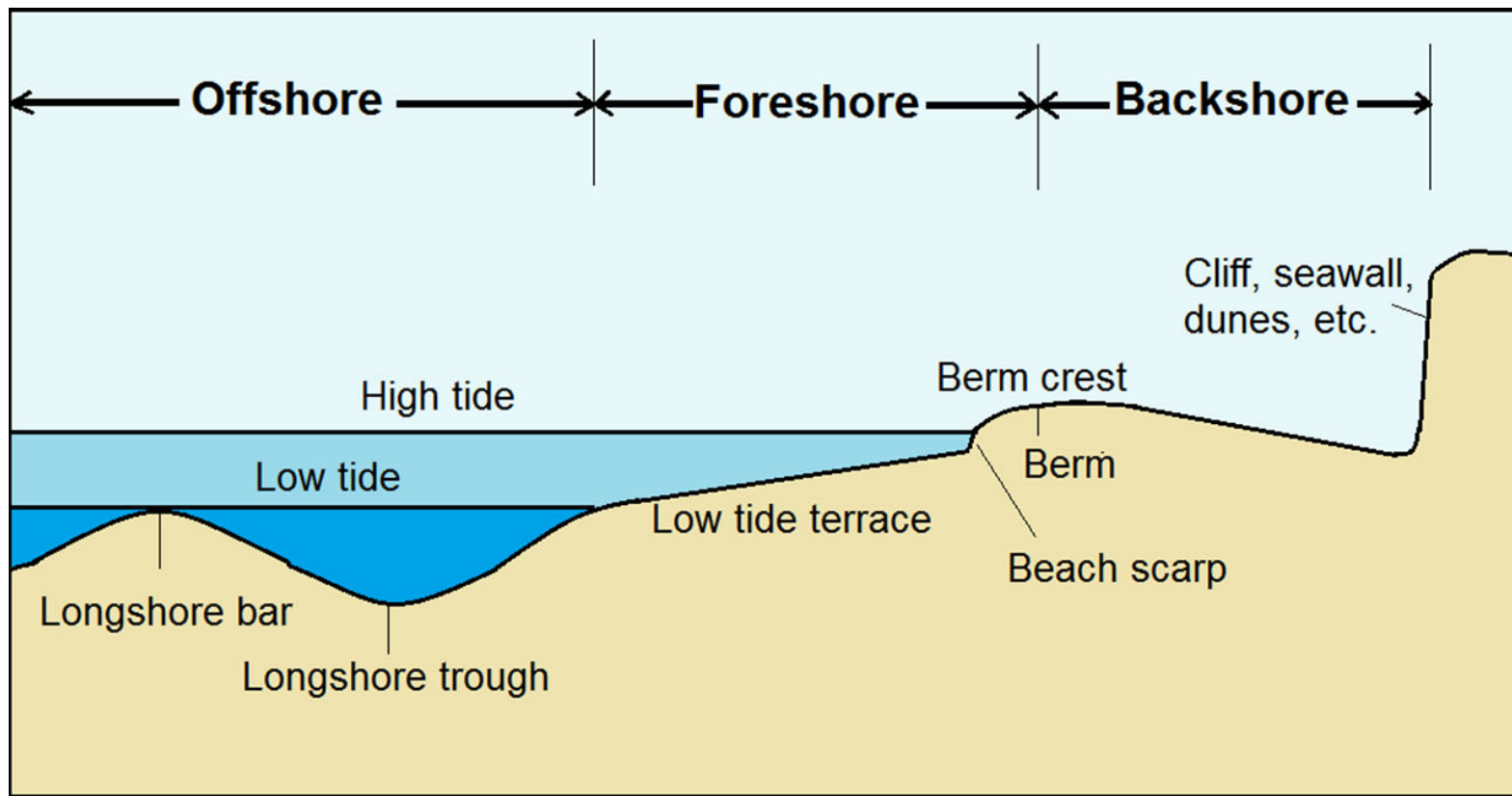
Η πλέον έντονη μεταφορά ιζημάτων στην παράκτια ζώνη (αλλά και σε άλλες αβαθείς περιοχές, όπως π.χ. στους υποθαλάσσιους ύφαλους, σχετίζεται με τα θραυόμενα κύματα

Οι διεργασίες στην ζώνη θραύσης (αλλά και πέρα από αυτή) είναι πολύ πολύπλοκες και όχι τελείως γνωστές

Οι πλέον συνηθισμένοι (και πολλές φορές οι μόνοι δυνατοί τρόποι) για την εκτίμηση της ιζηματομεταφοράς στην ζώνη αυτή είναι

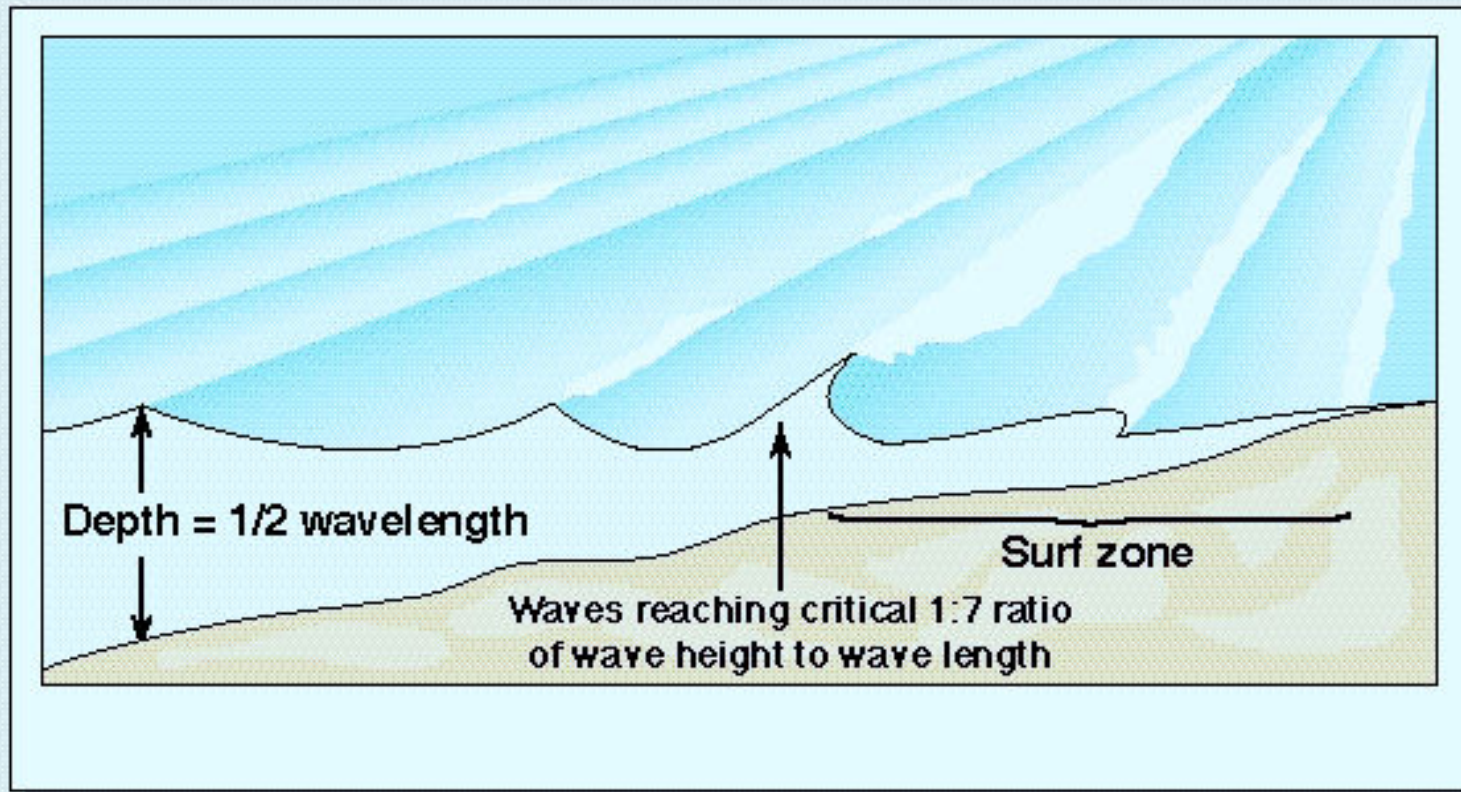
- (α) η χρήση θεωριών που δεν λαμβάνουν υπ' όψη τους τη κυματική θραύση και
- (β) παραμετροποίηση (parameterisation) και εμπειρικές μελέτες (empirical studies)

Το πλέον βασικό κριτήριο της κυματικής θραύσης είναι ότι η ταχύτητα του νερού στη κορυφή του κύματος είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα φάσης του κύματος ($C = L/T$)

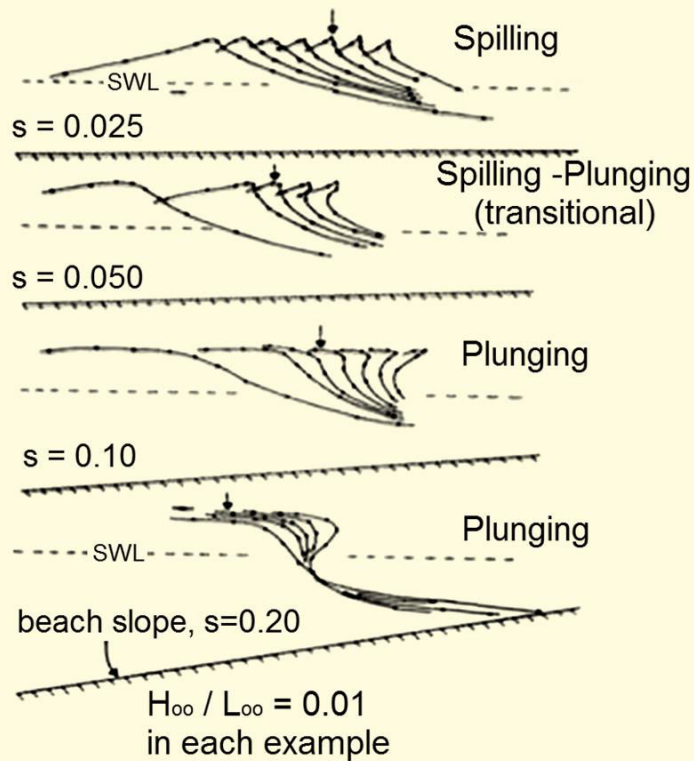
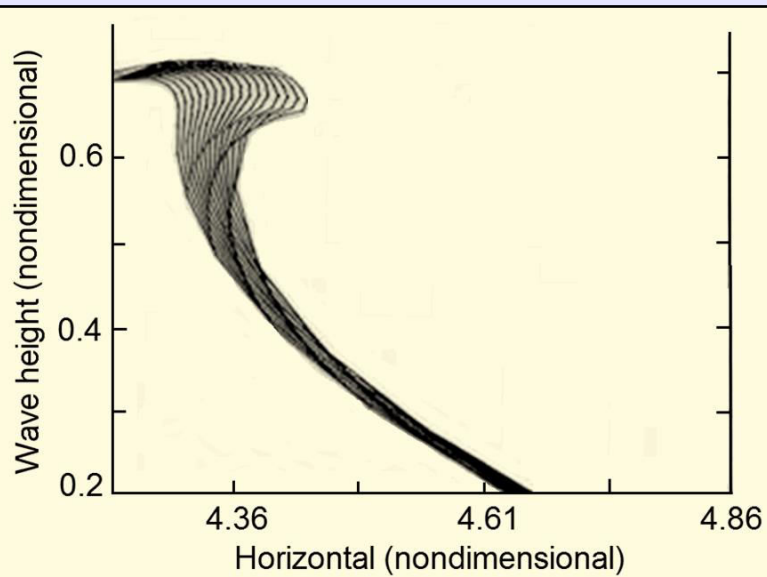


Σχήμα 6.1 Το γενικό προφίλ παραλίας

A Wave Train Breaking on the Shore



Σχήμα 6.2 Οι επιμήκεις ύφαλοι-ύφαλοι αναβαθμοί (ΕΥ) σχηματίζονται στο σημείο που σπάζουν τα κύματα. Τα κύματα σπάζουν σύμφωνα με τον ακόλουθο τρόπο (α) Το κύμα αρχίζει να νοιώθει τον πυθμένα όταν το βάθος γίνεται μικρότερο από $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος (wavelength), (β) οι κορυφές γίνονται πιο απότομες, (γ) η τριβή του πυθμένα 'φρενάρει' το κύμα και το μήκος κύματος ελαττώνεται αλλά η περίοδος (period) παραμένει η ίδια (δ) η σχέση του ύψους/μήκους πλησιάζει στην κριτική τιμή $1/7$ και (ε) το κύμα σπάζει όταν η σχέση ύψους/βάθους γίνεται 0.8.



Σχήμα 6.3 Θραύση κυμάτων και τύποι θραύσης σύμφωνα με την κλίση πυθμένα. (Βασισμένο στον Komar, 1998)

6.1.1 Παράκτιες κυματικές ζώνες

1. Ζώνη βαθιών νερών (Deep water zone)

Το βάθος h είναι μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος (wavelength) L

Οι κορυφές είναι ίσιες

Η ταχύτητα φάσης του κύματος C και η γωνία πρόσπτωσης είναι σταθερές

2 . Ζώνη διάθλασης (Refraction zone) ($h < L/2$, $h > 1.25 H$)

Τα κύματα νοιώθουν τον πυθμένα

Το μήκος κύματος L και η ταχύτητα C αλλάζουν αλλά η περίοδος T μένει σταθερή

Οι κορυφές τείνουν να γίνουν παράλληλες με την ακτή

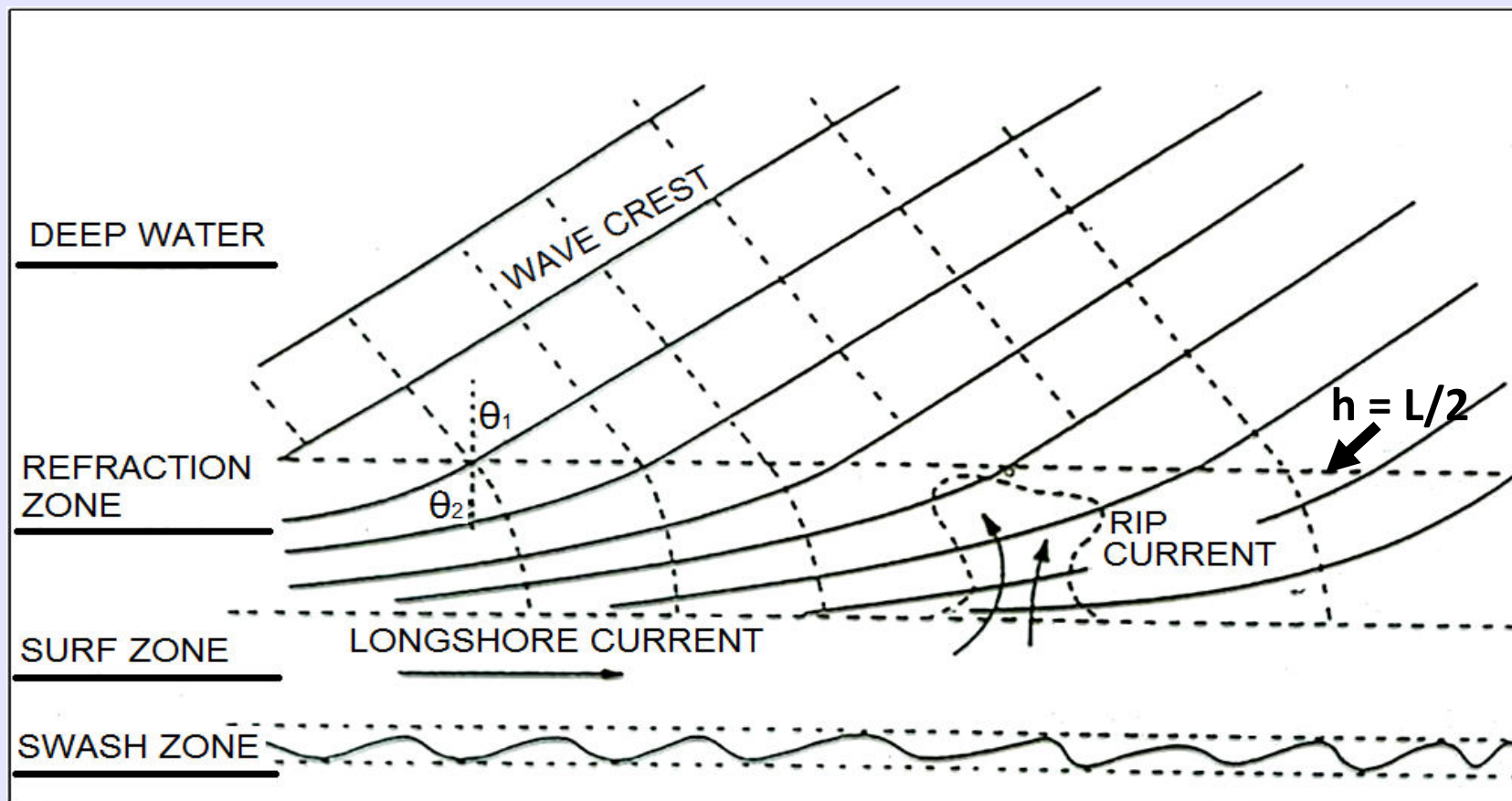
Τα κύματα «πυργώνουν» (γίνονται απότομα) και σπάζουν

3. Ζώνη του σέρφ, μεταξύ του σημείου θραύσης και της παραλίας (Surf zone), $h < 1.2 H$)

Το σημείο θραύσης δεν είναι σταθερό(εξαρτάται από το ύψος κύματος H)

Περιοχή των ρευμάτων παράλληλα στην ακτή (*alongshore currents*)

4 Η ζώνη διαβροχής-αναρρίχησης (Swash zone) (μεταξύ του χαμηλότερου σημείου της εκτεθειμένης παραλίας και του υψηλότερου σημείου που φθάνουν τα κύματα (wave run up))



Σχήμα 6.4 Κυματικές ζώνες (βασισμένο στο Dyer, 1986)

6.1.2 Τύποι θραύσης κυμάτων

Ο τύπος του κύματος κατά την θραύση εξαρτάται από

(α) την κλίση του βυθού και

(β) από την σχέση μεταξύ ιού ύψους και μήκους του κύματος.

Υπάρχει συντελεστής ξ (surf similarity parameter), από την τιμή του οποίου εξαρτάται το είδος του θραυομένου κύματος

$$\xi_0 = \tan\beta / (H_0/L_0)^{1/2}$$

$$\xi_b = \tan\beta / (H_b/L_0)^{1/2}$$

Όπου οι δείκτες **0** and **b** δηλώνουν συνθήκες βαθέων υδάτων και θραύσης αντίστοιχα.

6.1.2 Τύποι θραύσης κυμάτων (συν.)

Στα **spilling** κύματα (**breakers**) (μικρή κλίση παράλιας, $\xi_0 < 0.5$ η $\xi_b < 0.4$)

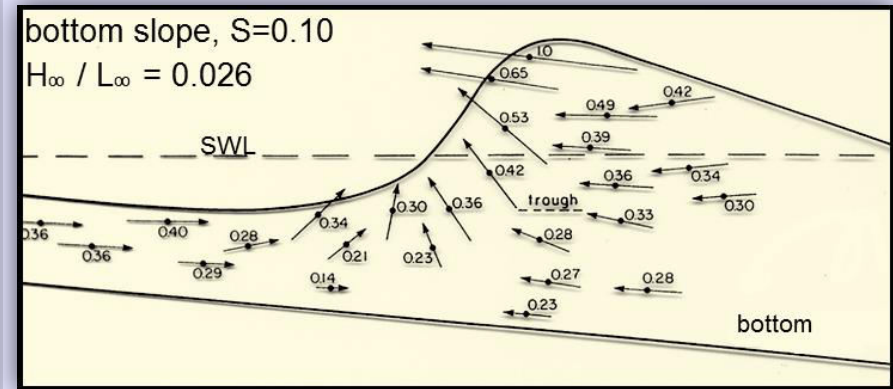
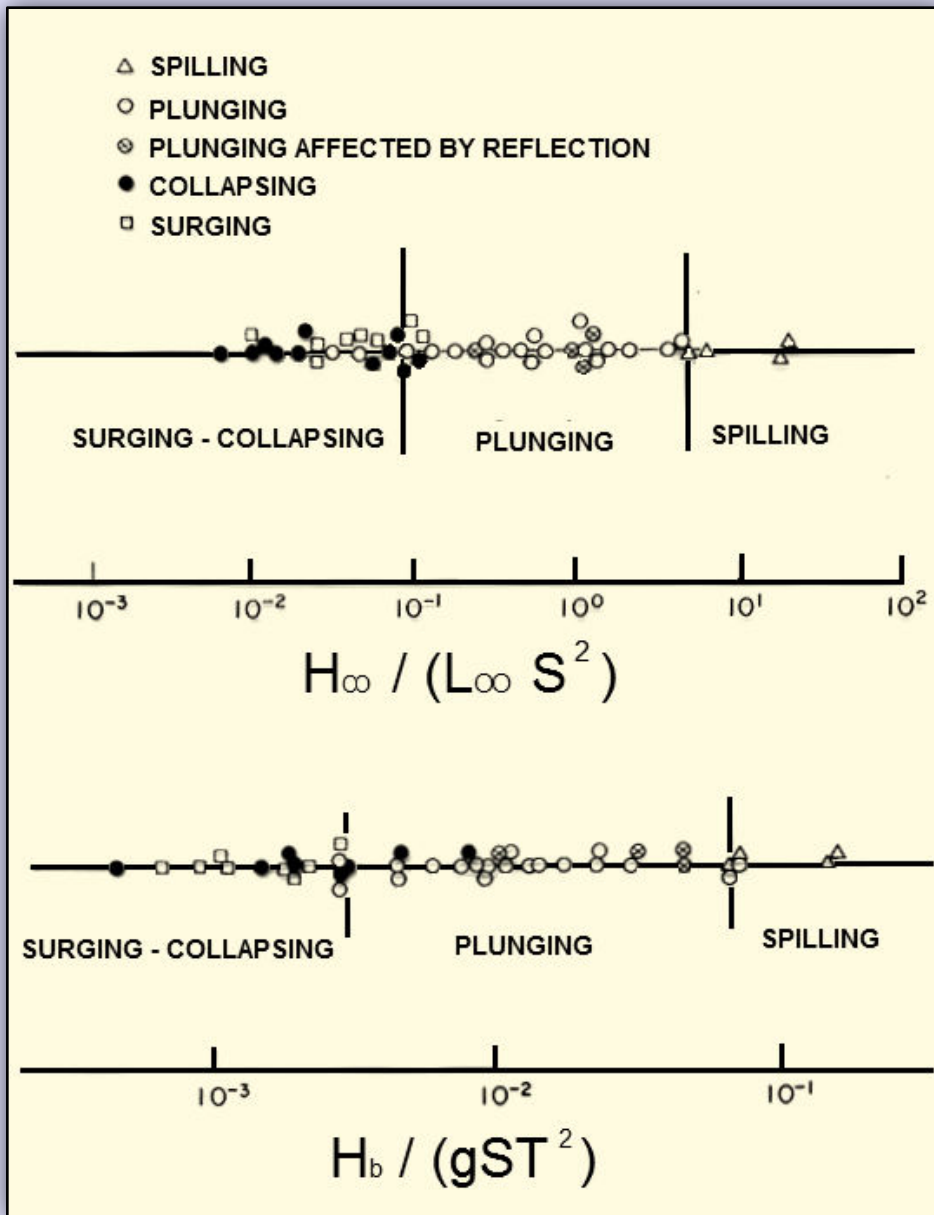
- η μπροστινή πλάγια του της κορυφής του κύματος γίνεται ασταθής
- νερό και φυσαλίδες κυλούν από την κορυφή
- οι διαδικασίες αυτές συμβαίνουν και στα βαθιά νερά

Στα **plunging** κύματα (απότομη κλίση παράλιας $0.5 < \xi_0 < 3.3$ η $0.4 < \xi_b < 2$)

- η κορυφή (crest) κινείται προς τα εμπρός και πέφτει στην προηγούμενη κοιλάδα (trough) με δομημένο τρόπο (structured water jet)
- Αυτό γεννά συνεκτικές τύρβεις (coherent vortices) οι οποίες φθάνουν και αναδεύουν τον πυθμένα

Στα **surging** κύματα (πολύ απότομη κλίση παράλιας) $3.3 < \xi_0$ or $2 < \xi_b$

- η βάση γίνεται ασταθής (και όχι η κορυφή)
- Η κορυφή (wave crest) μικραίνει και εξαφανίζεται



Σχήμα 6.5 Θραύση κυμάτων
 (Βασισμένο στον Komar, 1998)



Σχήμα 6.6 Spilling κύματα που σχηματίζονται σε πυθμένες με μικρή κλίση. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.7 Plunging κύματα που σχηματίζονται σε σχετικά απότομες κλίσεις πυθμένα. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.8 Surging κύματα που σχηματίζονται σε παραλίες με πολύ απότομη κλίση πυθμένα. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.9 Marin Headlands, California. Θραύση μεγάλου κύματος. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.10 Hatteras Lighthouse, N. Carolina.Θραύση κυμάτων σε υποθαλάσσιους ύφαλους. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.11 Safi, Morocco. Θραύση swell. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6. 12 Halloween" storm (Οκτώβριος/Νοέμβριος 1991), Pea Island, N. Carolina, U.S.A. Προσέξτε το μεγάλο εύρος της ζώνης του σεφ, το οποίο είναι μεγαλύτερο από αυτό της φραγματογενους νήσου (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

6.1.3 Μέτρηση της υδροδυναμικής και ιζηματοδυναμικής στην παράκτια ζώνη

Η παρατήρηση των υδροδυναμικών και ιζηματοδυναμικών διεργασιών στην παράκτια ζώνη απαιτεί την χρήση υψισυχνων καταγραφικών οργάνων.

Τα πλέον βασικά όργανα είναι:

- (α) υψισυχνοι ($F > 4$ Hz) ρευματογραφοι όπως ηλεκτρομαγνητικοί (electromagnetic) και ακουστικοί (acoustic Doppler velocimeters or profilers) ρευματογραφοι,
- (β) υψισυχνοι ($F > 4$ Hz) πιεσομετρικοι κυματογράφοι (pressure sensors),
- (γ) υψισυχνοι ($F > 4$ Hz) οπτικοί η ακουστικοί καταγραφείς ιζήματος σε αιώρηση (optical or acoustic backscatterometers)

Η μεταφορά των ιζημάτων πάνω στον πυθμένα (bed load transport) όμως είναι πολύ δύσκολη να μετρηθεί στις ίδιες χρονικές κλίμακες και γίνεται συνήθως με την χρήση ιζηματοπαγιδων η με δείκτες (tracers, fluorescent, radioactive (όχι πια), aluminium and/or electronic pebbles για χαλίκια)

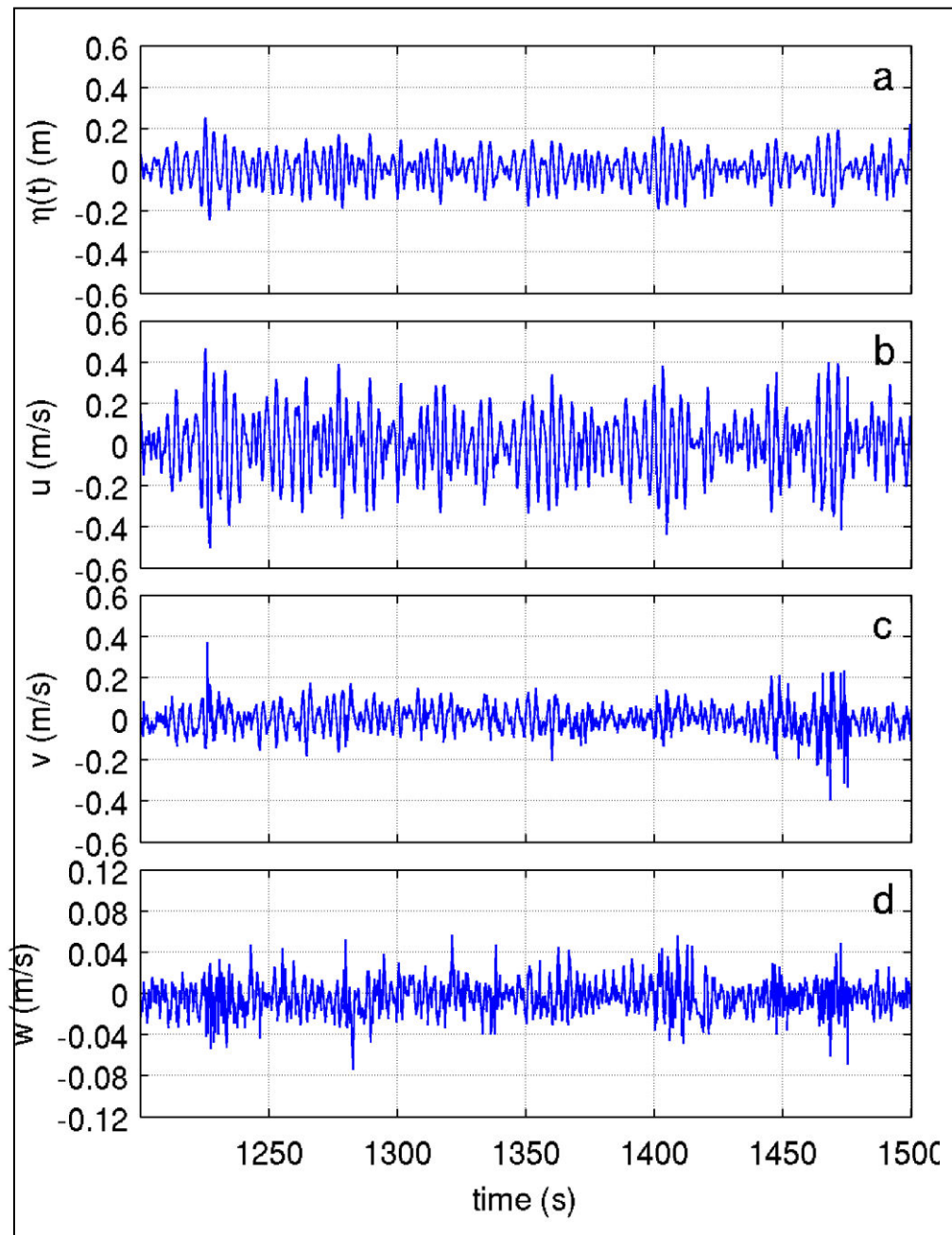
Οι παρατηρήσεις αυτές είναι χρονοβόρες και ακριβές



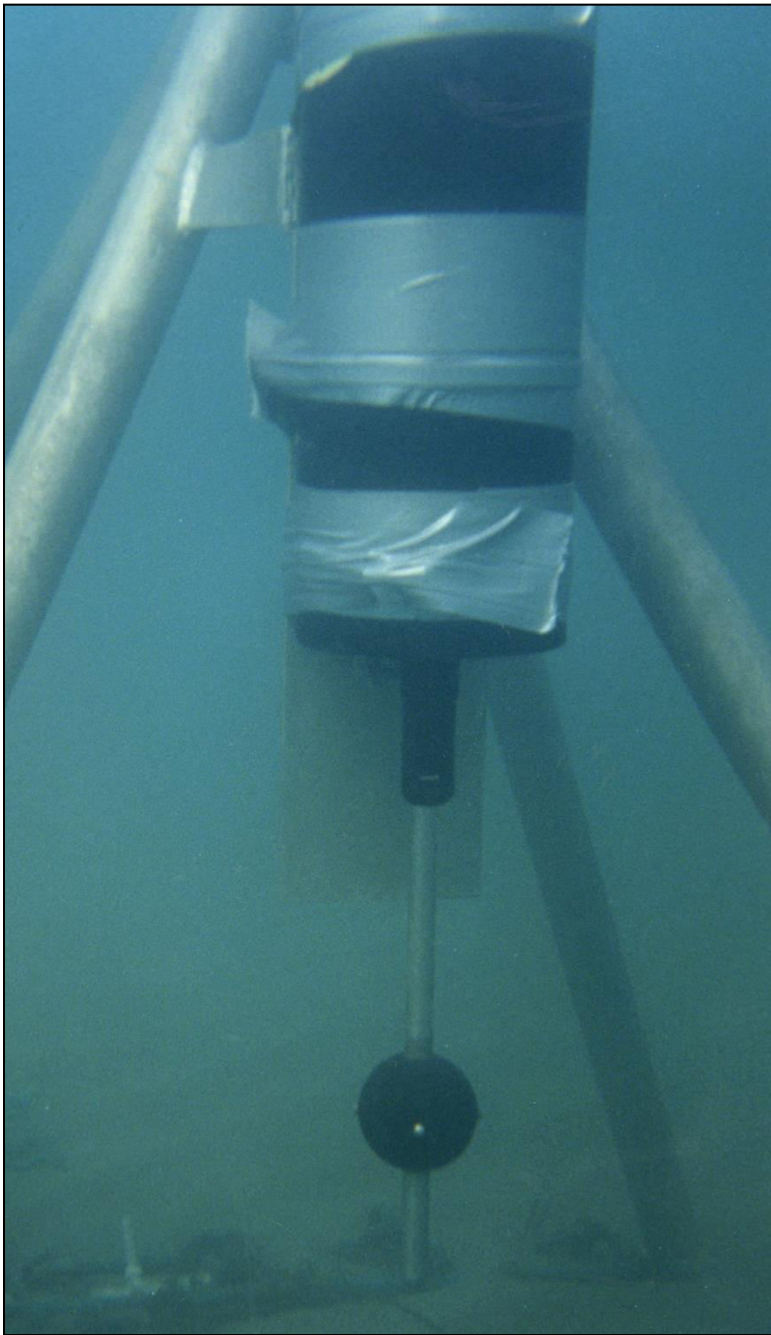
Σχήμα 6.13 Τρίποδας οργάνων AQUILLA (SOES SOC) για την μέτρηση υδροδυναμικών και ιζηματολογικών διεργασιών στην παράκτια ζώνη



Σχήμα 6.14 Τρίποδας οργάνων AQUILLA και ολοκληρωμένο όργανο VALEPORT 808 (SOES SOC) για την μέτρηση υδροδυναμικών και ιζηματολογικών διεργασιών στην παράκτια ζώνη (τοποθέτηση οργάνων στην άμπωτη)



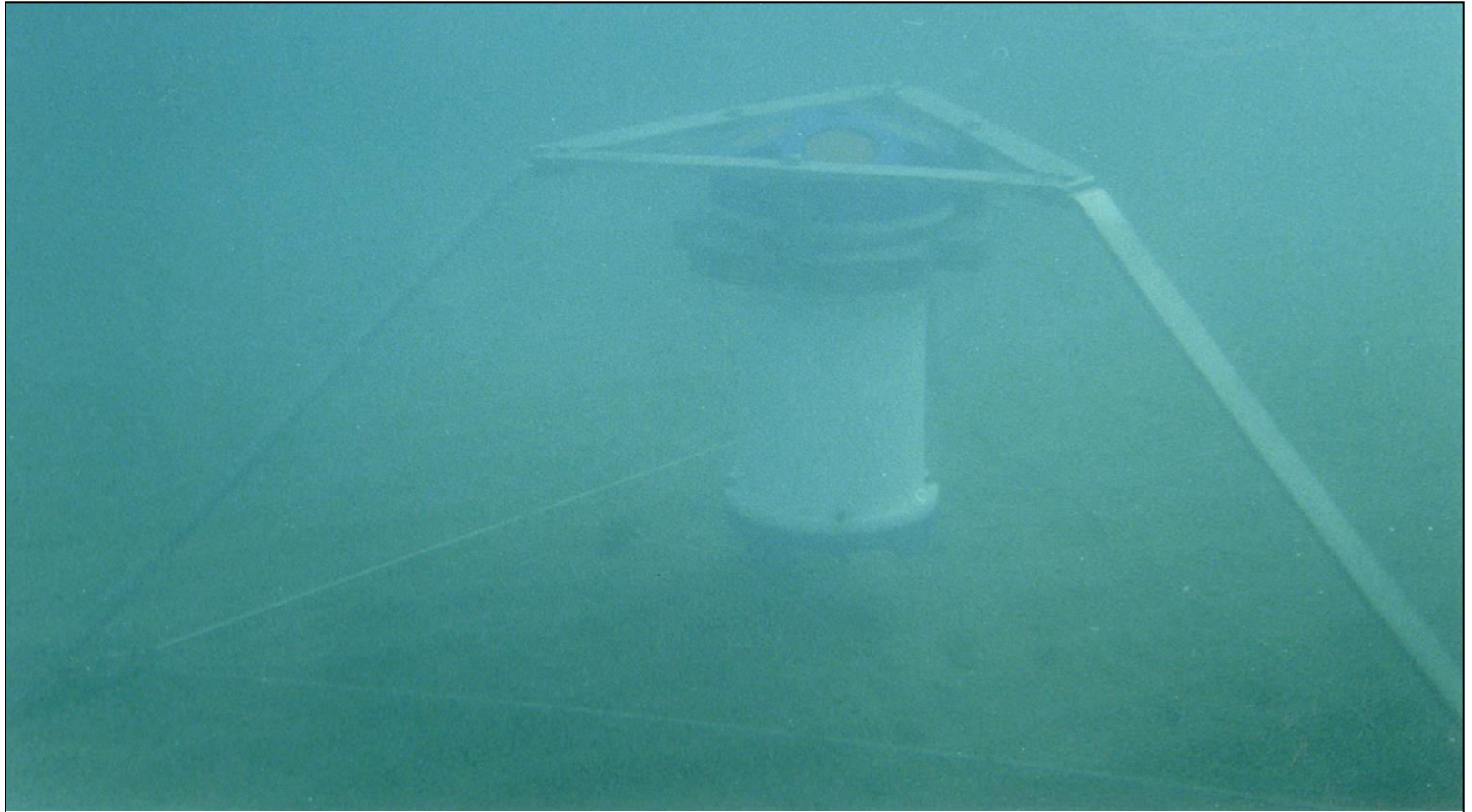
Σχήμα 6.15 Υψίσυχνες χρονοσειρές κυμάτων (η) και ρευμάτων (u, v, w)



Σχήμα 6.16 Ολοκληρωμένο όργανο VALEPORT 808 (SOES SOC) για την μέτρηση υδροδυναμικών και ιζηματολογικών διεργασιών στην παράκτια ζώνη του Θερμαϊκού



Σχήμα 6.17 Ακουστικός ρευματογράφος (Acoustic Doppler Velocimeter (ADV, 25 Hz)) (SOES SOC) για την μέτρηση ρευμάτων και τυρβώδους ροής σε κυματοθραύστες (τοποθέτηση στην άμπωτη (ebb-low tide))



Σχήμα 6.18 Ακουστικός ρευματογράφος (Acoustic Doppler Current Profiler ADCP 1200Hz στην παράκτια ζώνη του Θερμαϊκού

6.2 Η 'παρακμή' των κυμάτων στην παραλία

Το ύψος κύματος στο σημείο θραύσης: Χρησιμοποιώντας γραμμική θεωρία (linear theory), συνθήκες απόσβεσης ενέργειας (energy dissipation considerations) και εμπειρικά πειράματα βρέθηκε ότι (π.χ. Fredsoe and Deigaard, 1992 και Komar, 1998):

$$H_b/H_0 = 0.56 (L_0/H_0)^{1/5}$$

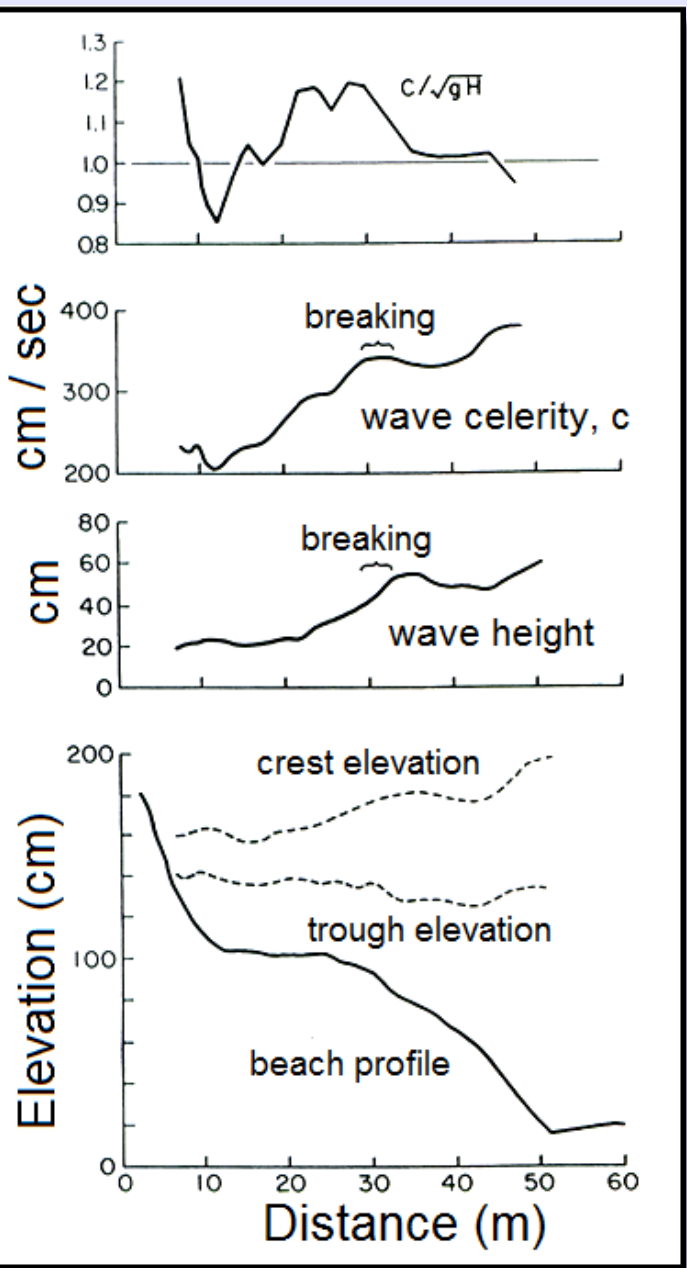
Στο σημείο θραύσης τα πεδία ταχύτητας αλλάζουν με τρόπο που πολύ δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί από την θεωρία

Η ταχύτητα φάσης C και το ύψος H μειώνονται ταχύτατα μετά την θραύση

Η μέση στάθμη της θάλασσας αλλάζει πριν, στο και μετά το σημείο θραύσης (**set up/set down**) λόγω της (i) απόσβεσης ενέργειας (energy dissipation), (ii) ελάττωση του ύψους κύματος και (iii) αλλαγές στην ροή δυναμικού (momentum flux)

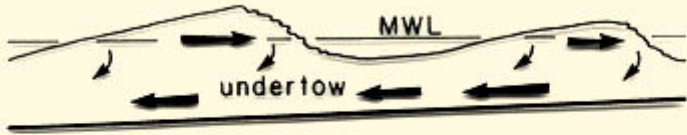
Λόγω του **set up** δημιουργείται δυνατό ρεύμα επαναφοράς (undertow)

Η απόσβεση ενέργειας στο κυματικό οριακό στρώμα (wave boundary layer) είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή λόγω θραύσης

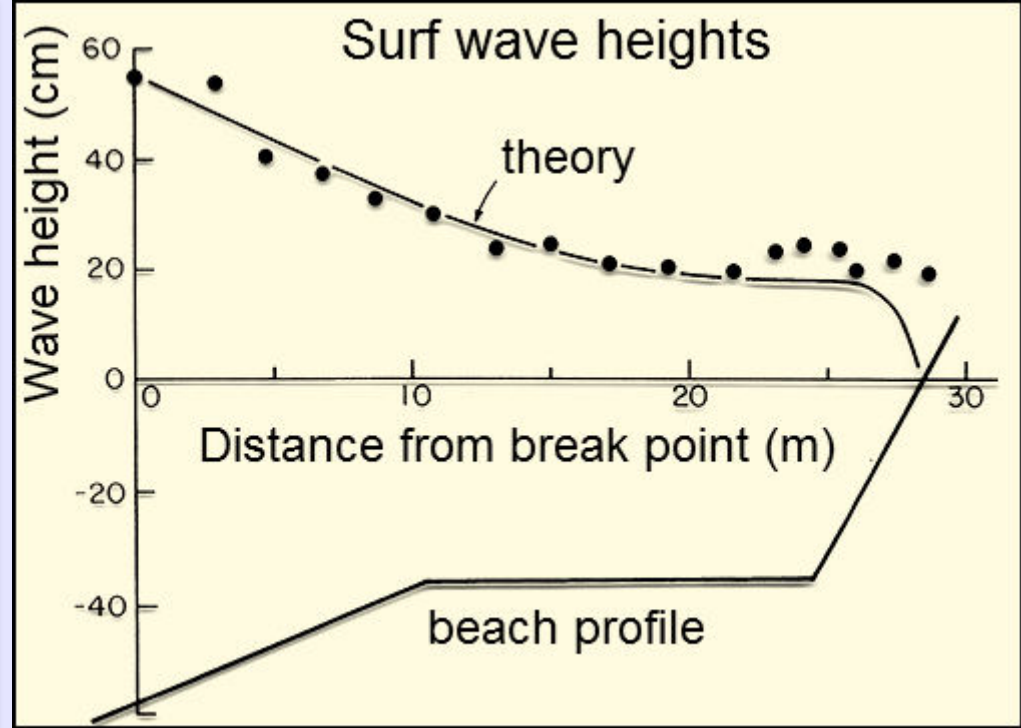
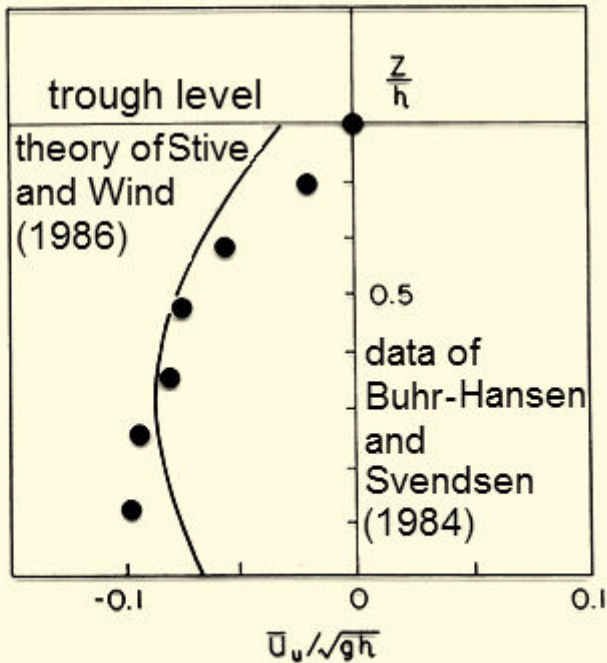


Σχήμα 6.19 Η 'παρακμή' των κυμάτων στην παραλία (Βασισμένο στο Komar, 1998)

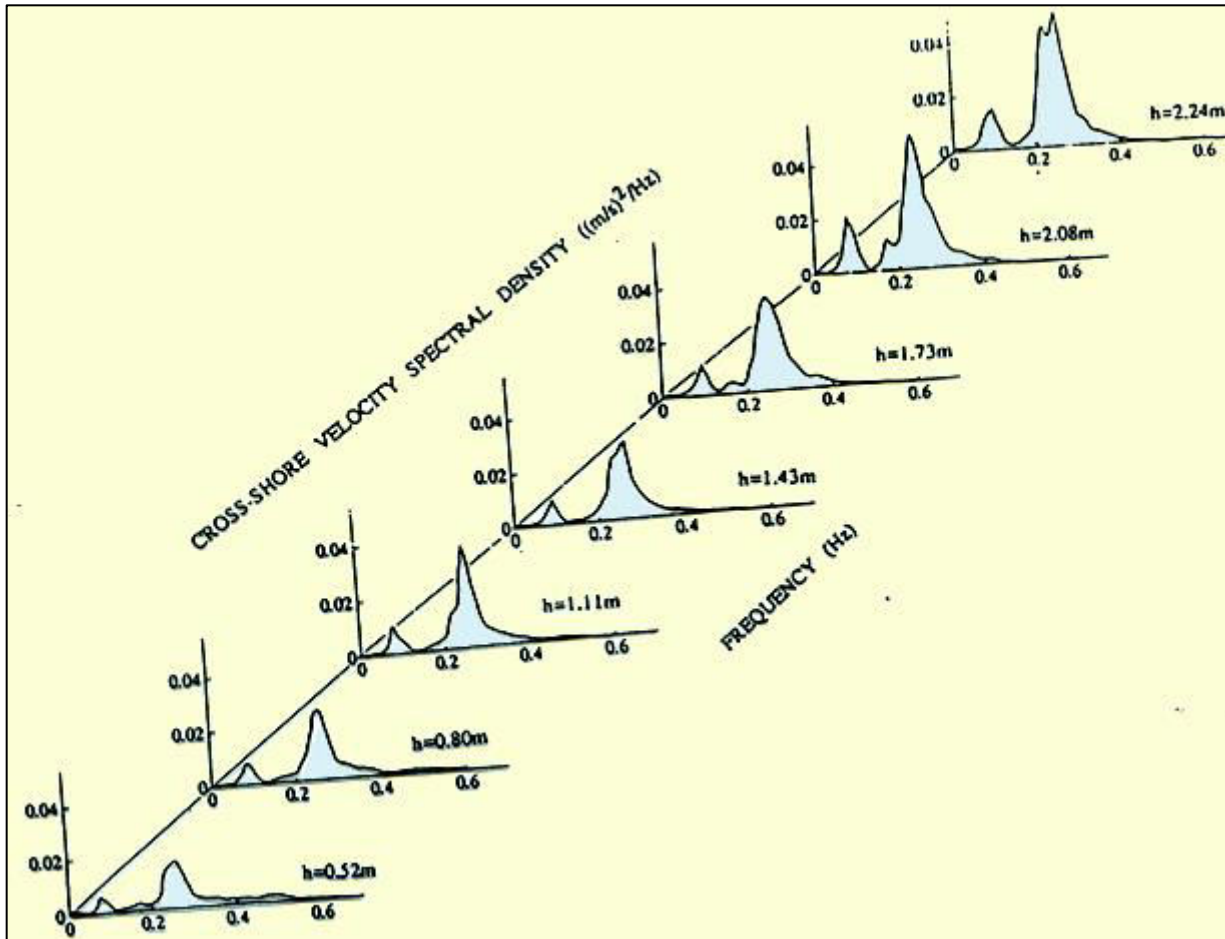
A Undertow



B Measured velocities



Σχήμα 6.20 Ροές και παρακμή του κυματικού ύψους στην ζώνη του σερφ (Βασισμένο στον Komar, 1998)



Σχήμα 6.21 Αλλαγές στην ενέργεια στην παράκτια ζώνη (Βασισμένος στον Voulgaris, 1992).

6.3. Η ανύψωση/βύθιση μέσης στάθμης στην παραλία (set up και set down)

Ανύψωση στάθμης (Set-up): η μέση στάθμη ανεβαίνει μεταξύ της ζώνης θραύσης και της παράλιας

Βύθιση στάθμης (Set-down): η μέση στάθμη κατεβαίνει πριν την ζώνη θραύσης

Αυτή είναι η αντίδραση της στάθμης για να ισορροπήσει με την βοήθεια της μεταβολής πίεσης την κάθετη προς την ακτή συνιστώσα της τάσης ακτινοβολίας (radiation stress S_{xx}) δηλ την ροή δυναμικού των κυμάτων, που στα ρηχά νερά είναι

$$S_{xx} = 3/2 E$$

όπου E είναι η πυκνότητα ενέργειας

$$E = 1/8 \rho g H^2$$

(ρ είναι η πυκνότητα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και H το ύψος κύματος)

Η διαφορική ανύψωση της στάθμης του νερού μεταξύ γειτονικών περιοχών είναι η αιτία πίσω από την δημιουργία των παράλληλων ρευμάτων στην ακτή (alongshore currents) και των rip currents. Να ξέρετε όμως τι αυτή είναι η σχετικά απλοϊκή εξήγηση αυτών των ρευμάτων

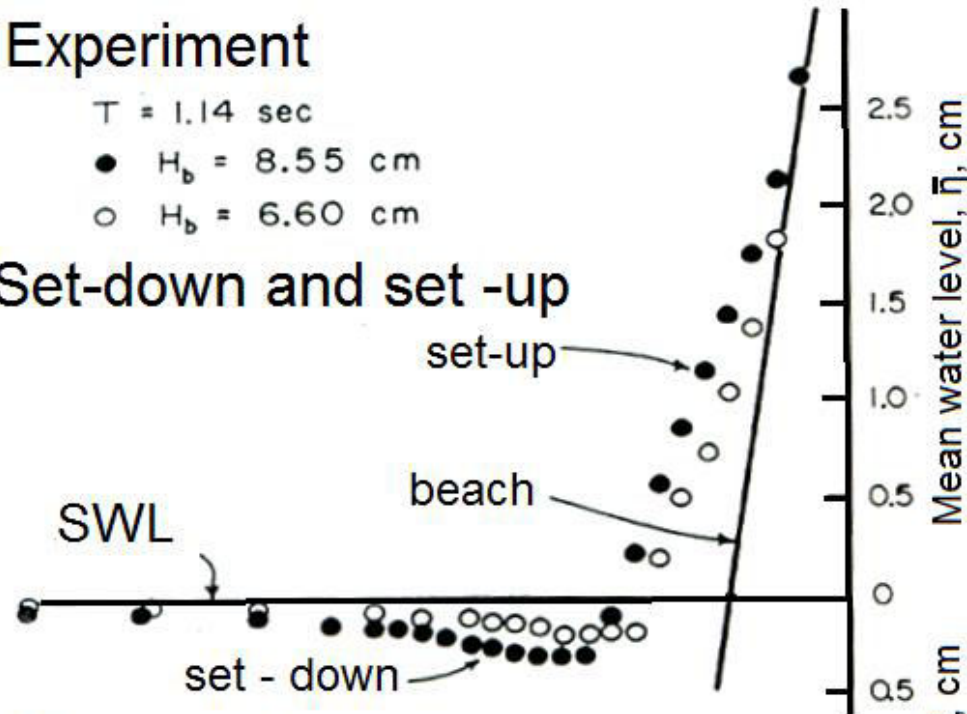
Experiment

$T = 1.14$ sec

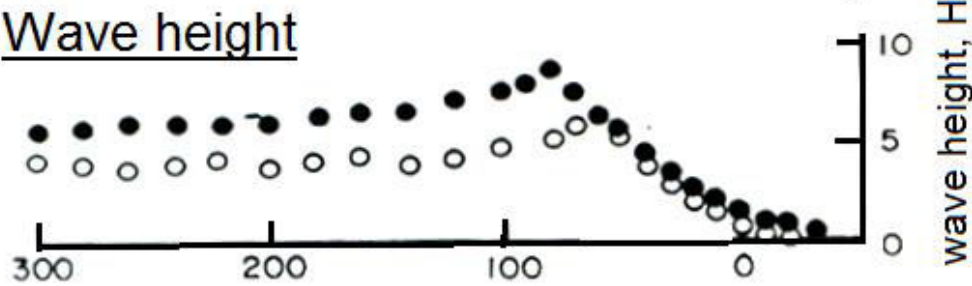
● $H_b = 8.55$ cm

○ $H_b = 6.60$ cm

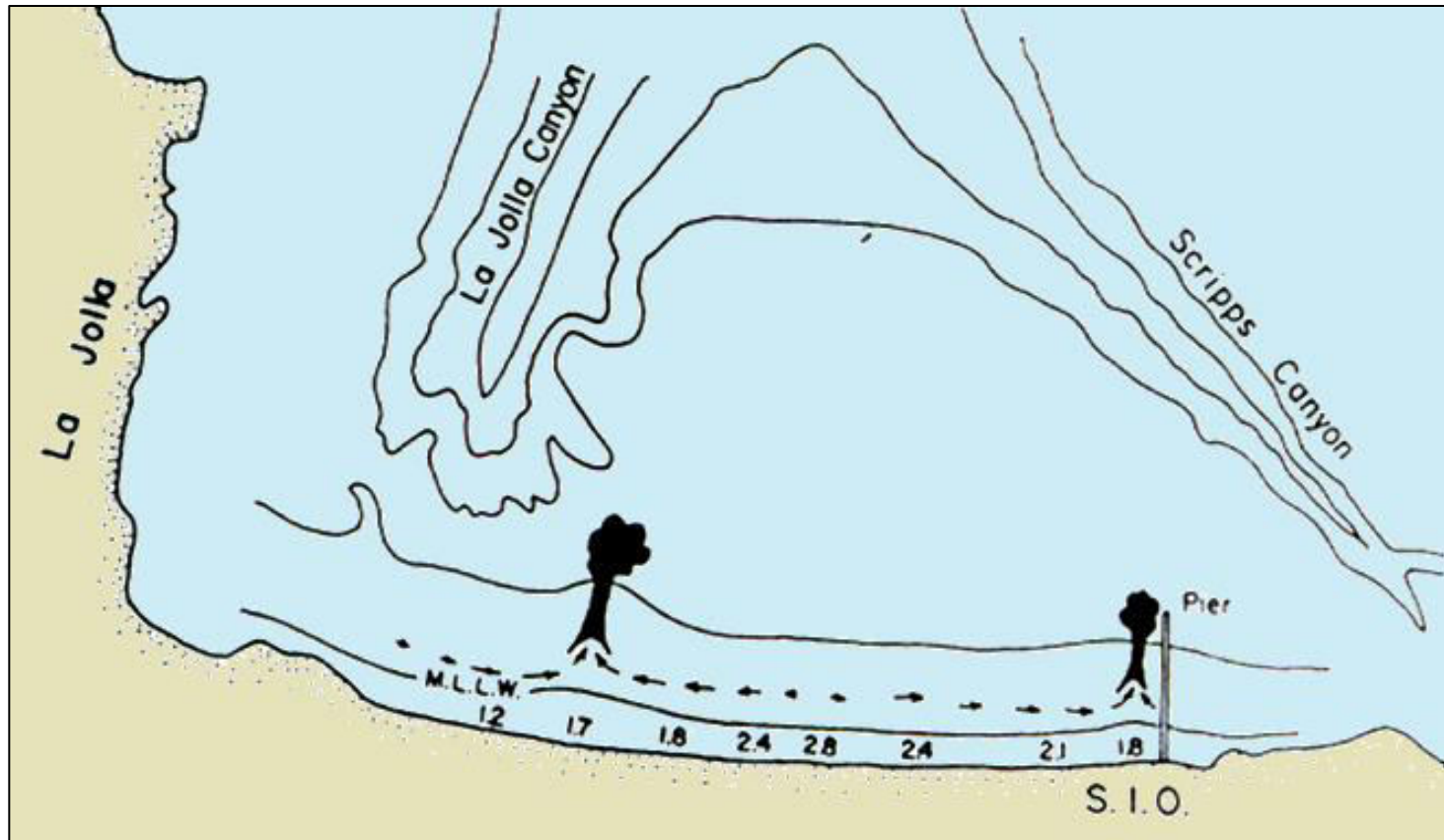
Set-down and set-up



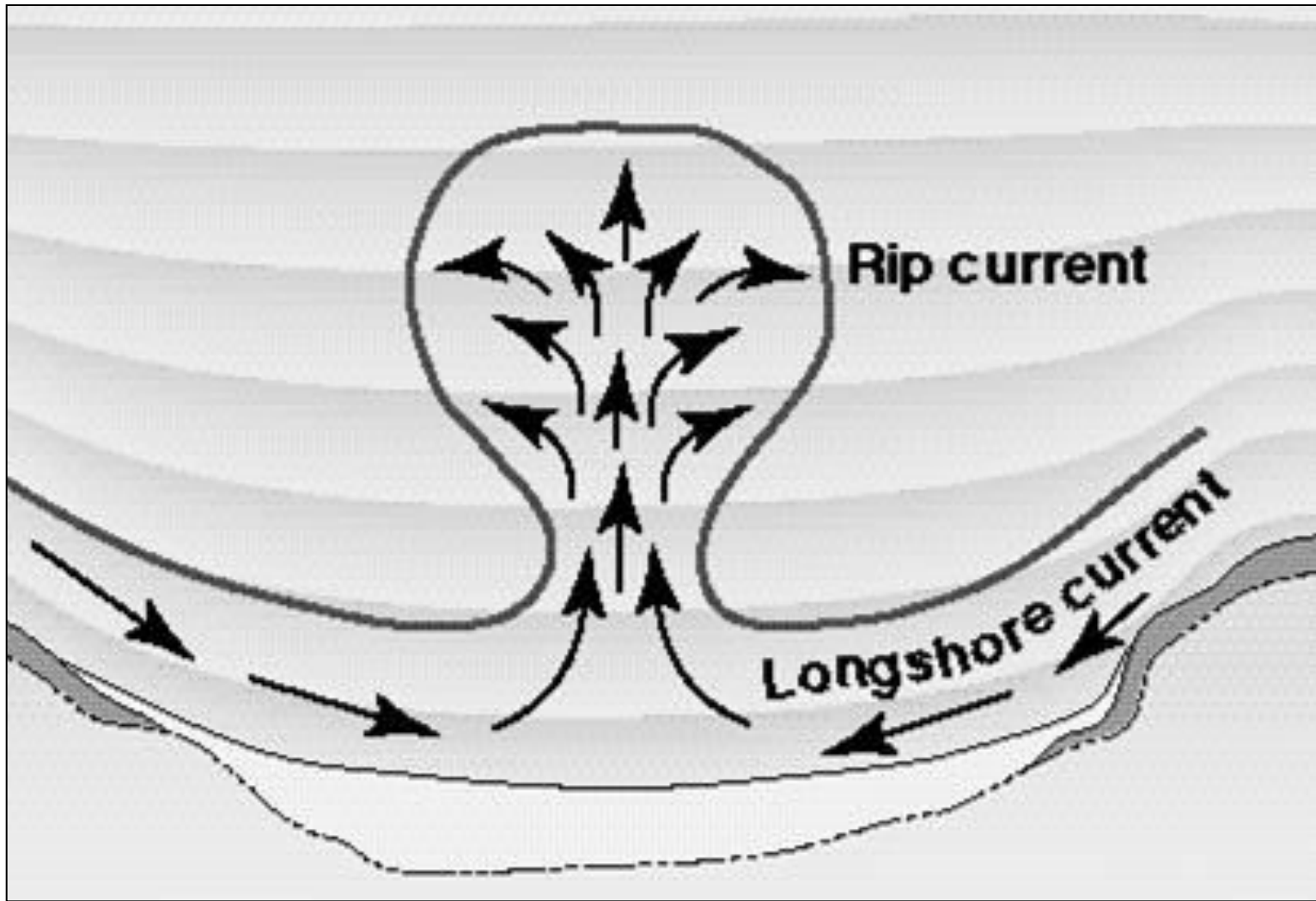
Wave height



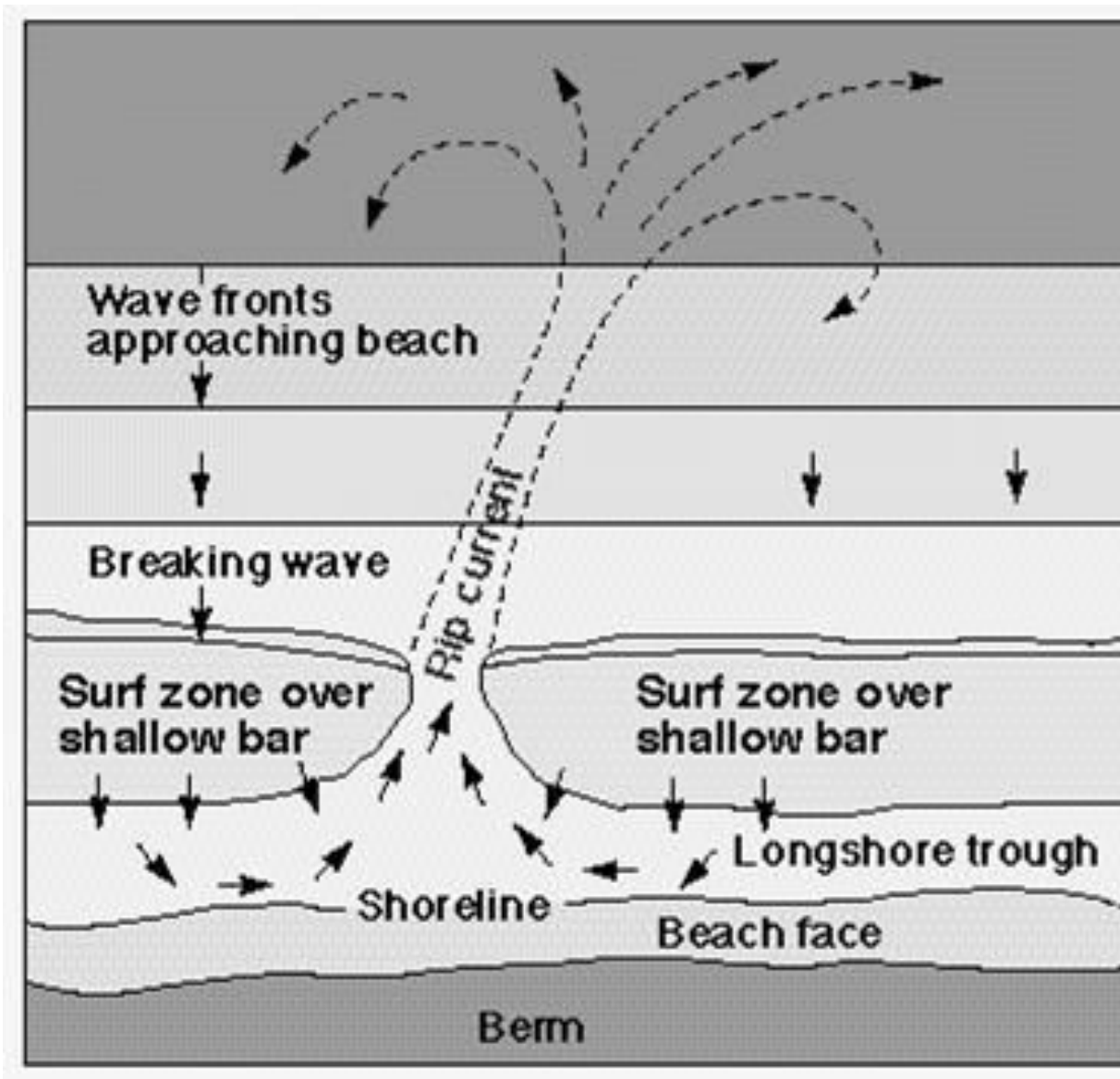
Σχήμα 6.22 Ανύψωση/βύθιση μέσης στάθμης στην παραλία (set up/set down). Οι τιμές της ανύψωσης/βύθισης εξαρτώνται από το κυματικό ύψος. (Βασισμένο στον Komar, 1998).



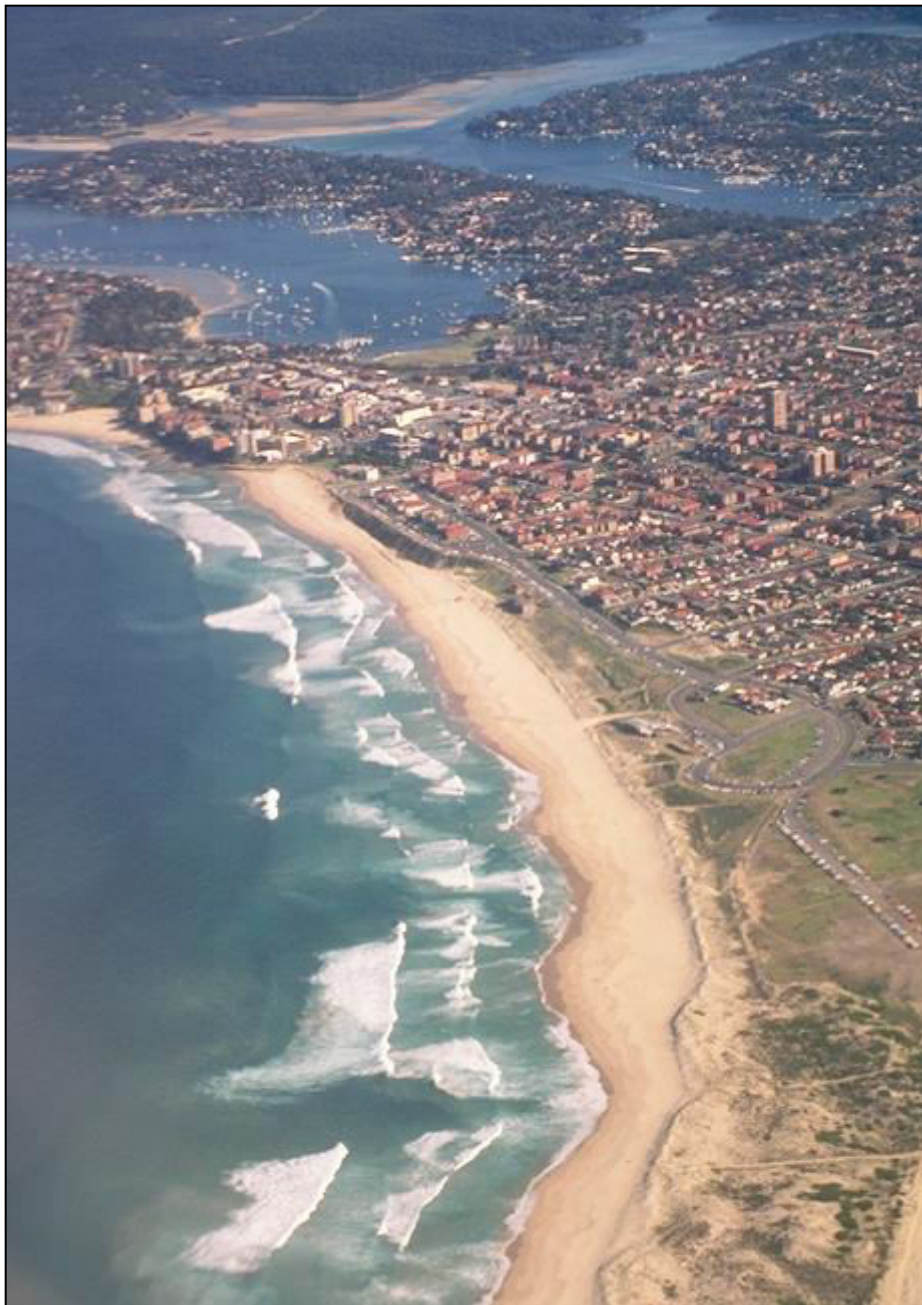
Σχήμα 6.23 Δημιουργία ρευμάτων παράλληλων και κάθετων στην παραλία λόγω διαφορών στην παράκτια βαθυμετρία που έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικά ύψη θραυόμενων κυμάτων σε γειτονικές περιοχές λόγω διαφορετικής απόσβεσης ενέργειας των προσπιπτόντων κυματισμών (Komar, 1998). Το διαφορετικό ύψος προκαλεί διαφορετικά ύψη ανύψωσης (differential set ups) σε γειτονικές περιοχές και συνεπώς τη δημιουργία παράλληλων προς την ακτή ροών από τις περιοχές με μεγαλύτερη ανύψωση προς αυτές με μικρότερη ανύψωση. Έτσι σε περιοχές με συγκλίνουσες ροές δημιουργούνται ρεύματα κάθετα στην ακτή (rip currents) για να οδηγήσουν το παραπάνω νερό στα ανοικτά. (Βασισμένο στο Komar, 1998)



Σχήμα 6.24. Σχηματισμός rip current σε παραλία τσέπης. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.25 Σχηματισμός rip currents. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 6.26 Sydney, Australia. Ομάδες κυμάτων με πολλές ζώνες rip currents. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

6.4. Η ζώνη διαβροχής (swash zone)

Η διαβροχή-αναρρίχηση των κυμάτων στην παράλια (swash) αποτελεί σημαντικό παράγοντα μορφοδυναμικής/διάβρωσης

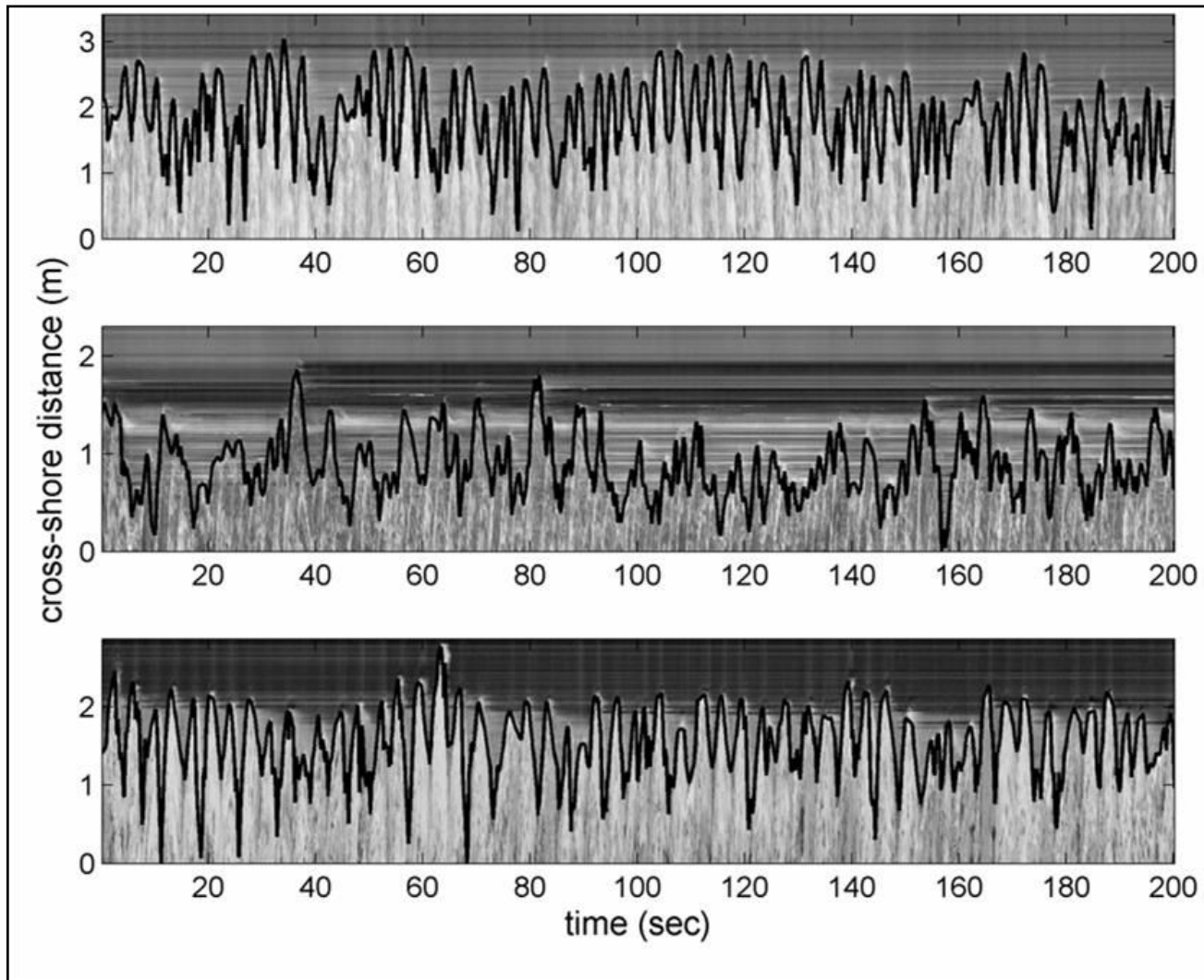
Παρατηρήσεις/μετρήσεις των φυσικών χαρακτηριστικών του swash είναι δύσκολη λόγω του μικρού βάθους ροής. Έτσι ασυνήθιστες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως καλώδια αντίστασης (Guza and Thornton, 1982) και η χρήση videos (Holman and Sallenger, 1985, Holland and Holman, 1993, Vousdoukas et al., 2009)

Βρέθηκε ότι το swash (Komar, 1998) αποτελείται από 3 κύριες συνιστώσες (1) το set-up, (2) μεταβολές γύρω από την μέση στάθμη του set-up δηλ. η άνοδος (run-up) και κάθοδος (run-down) του νερού στην παράλια και (3) υπό-βαρυτικές παλινδρομήσεις (infra-gravity motions) με περίοδο T πάνω από 20 sec

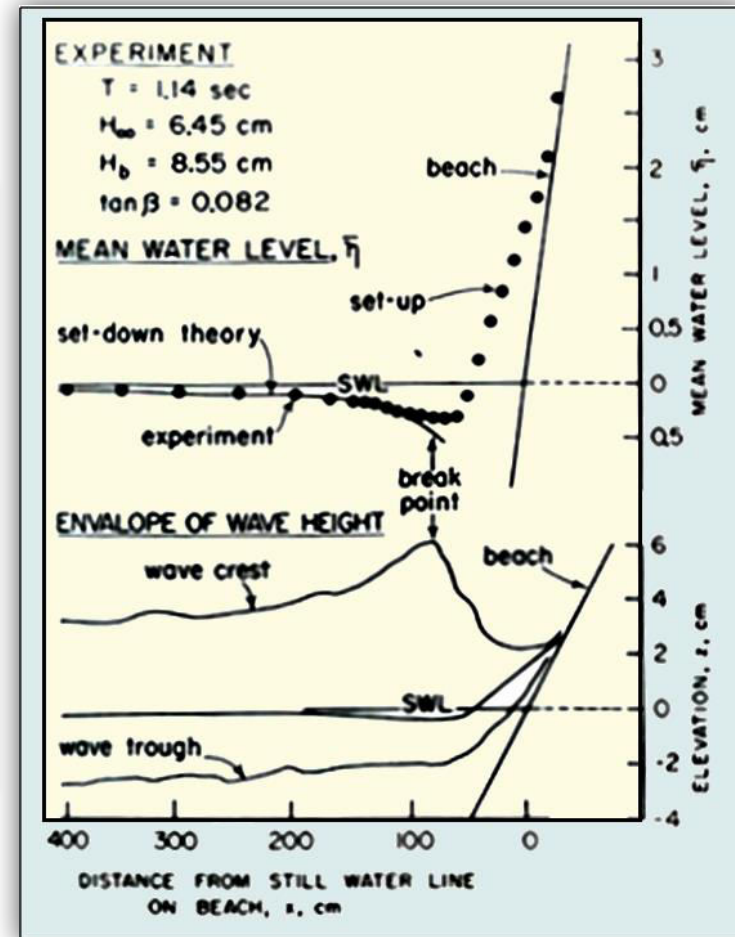
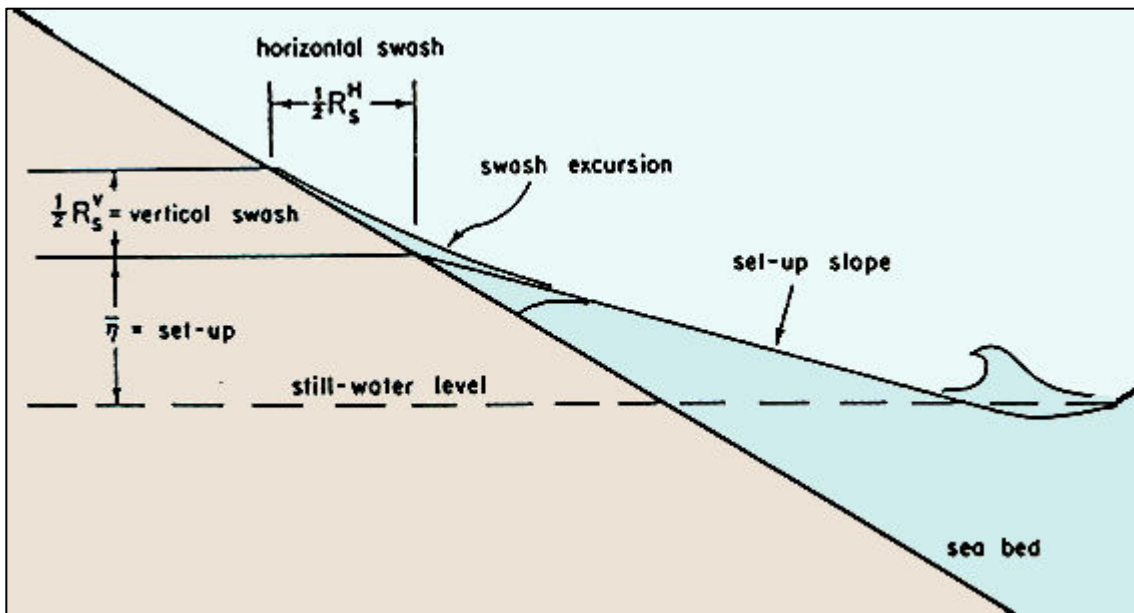
Το ύψος αναρρίχησης στη ζώνη διάβροχης R_s βρέθηκε (Guza and Thornton, 1982) ότι εξαρτάται κυρίως από το σημαντικό ύψος κύματος στην ανοικτή θάλασσα H_0

$$R_s = 0.7 H_0$$

Νεότερες έρευνες έδειξαν ότι λόγω το ύψος αυτό εξαρτάται και από άλλους παραμέτρους (βλ. Σημειώσεις)



Σχήμα 6.27 Χρονοσειρές αναρρίχησης (Wave run up excursion lengths) από 3 παραλίες της Λέσβου καταγραμμένες με videos. Προσέξτε τις υποβαρυτικές κινήσεις (Βασισμένο στο Vousdoukas et al., 2009)



Σχήμα 6.28 Ανύψωση και βύθιση της μέσης θαλάσσιας στάθμης μετά και πριν την θραύση. Από το set up εξαρτάται και το μήκος/ύψος της ζώνης διαβροχής (Βασισμένο στον Komar, 1998).

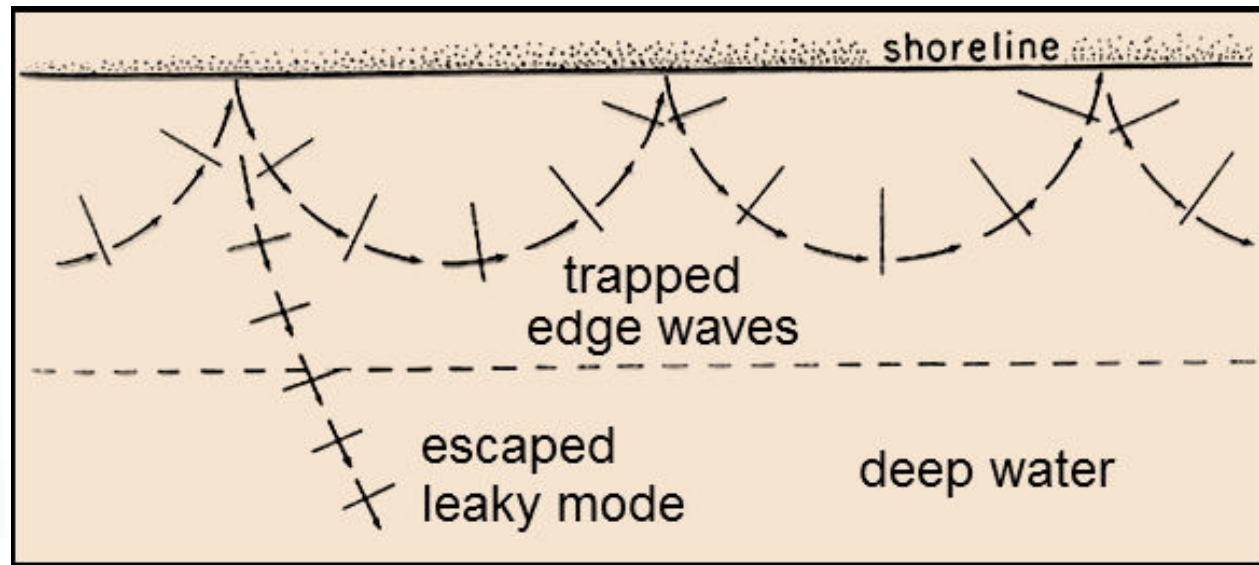
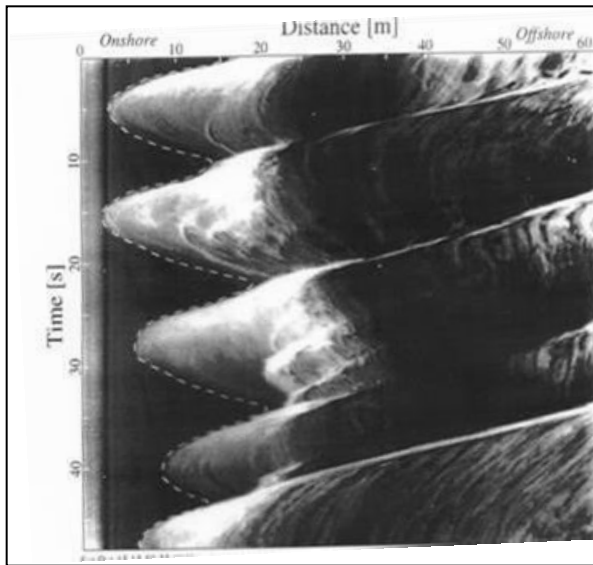
6.5 Υπο-βαρυτικές κινήσεις (Infra-gravity) και ακραία κύματα (edge waves)

Στην ζώνη διαβροχής γεννούνται παλινδρομήσεις (infra-gravity oscillations) με μεγάλες περιόδους (> 15-20 sec) από την μεταφορά ενέργειας από τα προσπίπτοντα κύματα σε μικρότερες συχνότητες (μεγαλύτερες περιόδους).

Οι κινήσεις αυτές μπορεί να είναι πολύ σημαντικές για τη μεταφορά ιζημάτων και τη μορφοδυναμική των παραλιών.

Η παρουσία των κινήσεων αυτών μπορεί να συνδέεται με τη παρουσία ακραίων κυμάτων (edge waves), τα οποία είναι παγιδευμένα κύματα της ακτογραμμής (trapped waves).

Τα κύματα αυτά δημιουργούνται/παγιδεύονται λόγω κυματική ανάκλασης και διάθλασης. Η κίνηση αυτών των κυμάτων είναι παράλληλα στην ακτή και το εύρος τους μειώνεται ταχύτατα με την απόσταση από την ακτή.



Σχήμα 6.29 Υποβαρυτικές κινήσεις στην παράκτια ζώνη (Βασισμένο στο Komar, 1998). Βλ. και Σχήμα 6.27