

# Παράκτια Μηχανική και Τεχνολογία

Μάθημα 12  
Εισαγωγή στην Ακτομηχανική

Γ. Συλαίος  
Καθηγητής ΔΠΘ

Ελλάδα – Χώρα με 16.000 χλμ ακτογραμμής

- η μεγαλύτερη στη Μεσόγειο και στην ΕΕ

- υψηλότερη αναλογία ακτής ανά συνολικό εμβαδόν (113 μ/χλμ<sup>2</sup>)

Παράκτια Ζώνη:

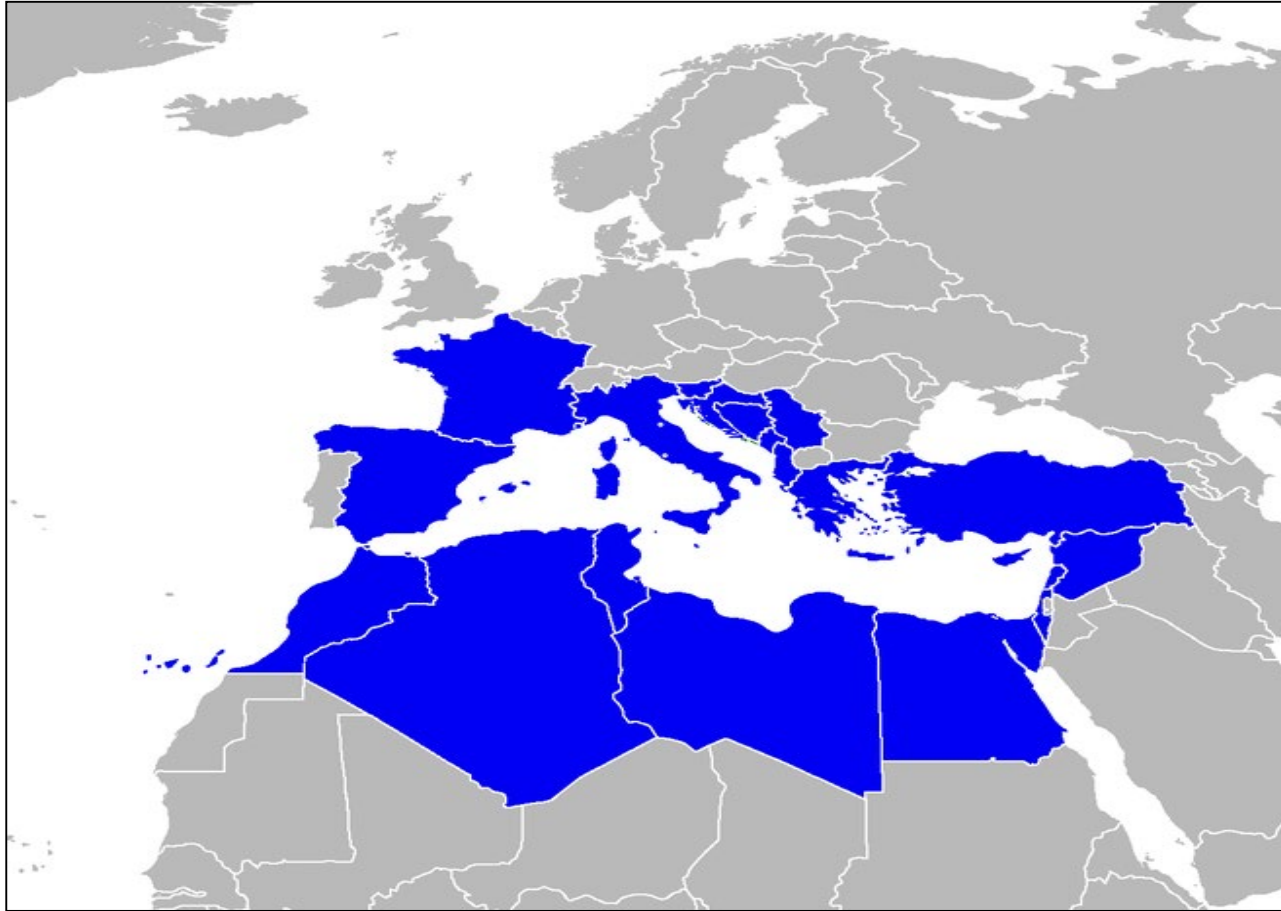
➤ σπουδαίος φυσικός πλουτοπαραγωγικός πόρος

➤ πόλος έλξης διεθνούς σημασίας για δραστηριότητες τουρισμού και αναψυχής,

➤ φυσικά και πολιτιστικά στοιχεία μοναδικής αξίας και ενδιαφέροντος

➤ προσφέρει σημαντικές αναπτυξιακές δραστηριότητες

Ως **παράκτια ζώνη** ορίζεται η γεωμορφολογική περιοχή με ασαφή όρια εκατέρωθεν της ακτογραμμής, στην οποία η αλληλεπίδραση μεταξύ του θαλάσσιου και του χερσαίου τμήματος αποκτά τη μορφή **πολύπλοκων συστημάτων οικολογικών στοιχείων και πόρων** αποτελούμενων από βιοτικές και αβιοτικές συνιστώσες που **συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν** με τις ανθρώπινες κοινότητες και τις σχετικές κοινωνικο-οικονομικές δραστηριότητες (*Μεσογειακό Πρωτόκολλο Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Παράκτιας Ζώνης, 2008*).



Το Μεσογειακό Πρωτόκολλο για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση της Παράκτιας Ζώνης (*Mediterranean Protocol on ICZM*) υπογράφηκε μεταξύ των 22 κρατών της Μεσογείου τον Ιανουάριο 2008 και τέθηκε σε εφαρμογή το Μάρτιο 2011 στα πλαίσια της Συνθήκης της Βαρκελώνης (*Barcelona Convention*).

## Παράκτιος Χώρος – Συστήματα και Υποσυστήματα

Στην Ελλάδα ο **Παράκτιος Χώρος** (ή παράκτια περιοχή) ορίζεται και περιγράφεται στο Άρθρο 2 στο Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού ως *«ο γεωμορφολογικός χώρος εκατέρωθεν της ακτογραμμής, όπου εκδηλώνεται διαδραστικά η σχέση μεταξύ του θαλάσσιου και του χερσαίου τμήματος, μέσω των σύνθετων οικολογικών συστημάτων που περιλαμβάνουν βιοτικές και αβιοτικές συνιστώσες. Πρόκειται για μεταβατική ζώνη μεταβλητού πλάτους που αποτελεί, ταυτόχρονα, ζωτικό χώρο ανθρώπινων κοινωνιών και κοινωνικο-οικονομικών δραστηριοτήτων»*.

## **Θαλάσσιο τμήμα του παράκτιου χώρου**

η ζώνη που εκτείνεται από την ακτογραμμή προς τη θάλασσα και μπορεί να φτάσει έως και το όριο των χωρικών υδάτων.

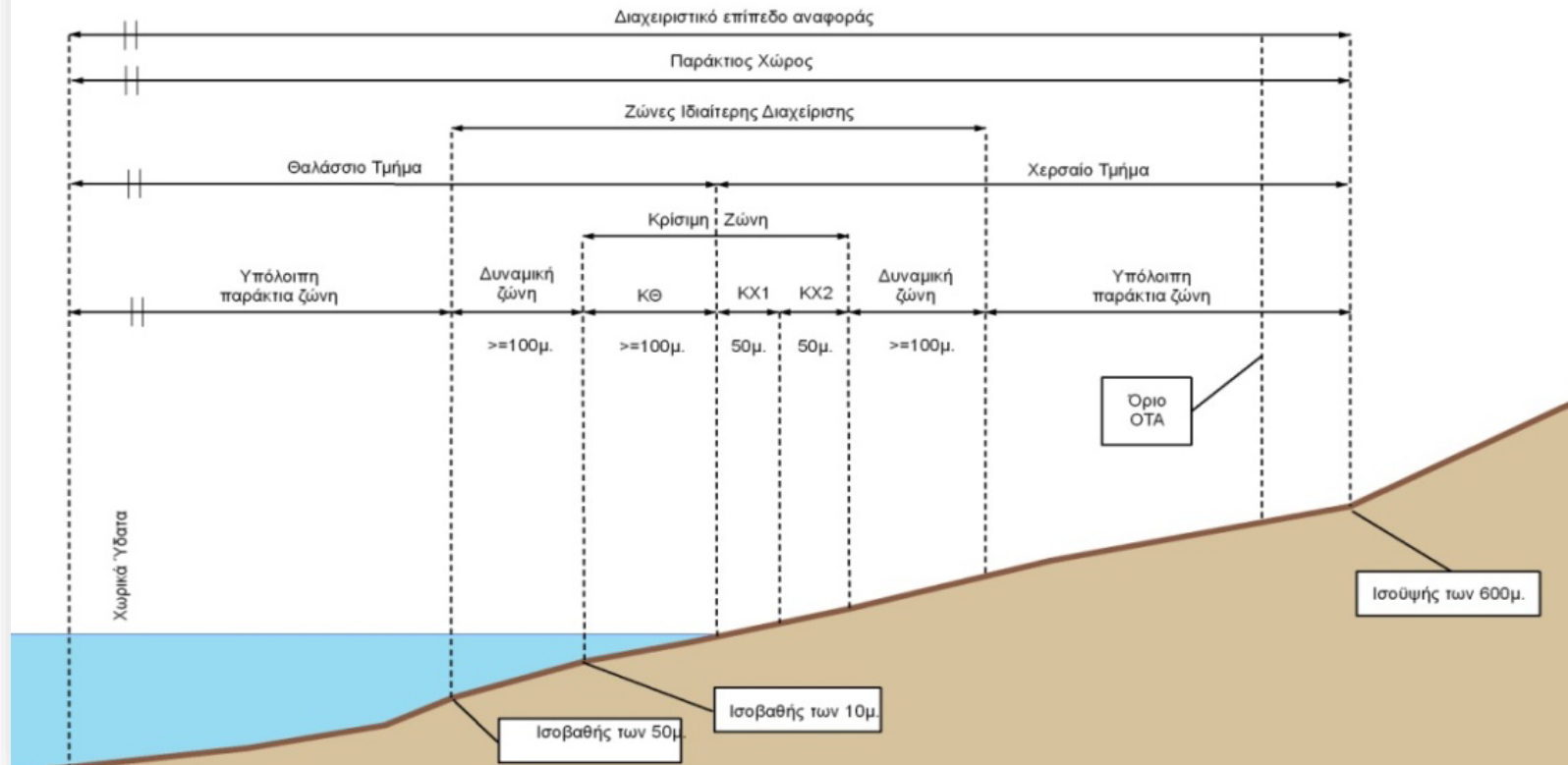
- ασκούνται ανθρώπινες δραστηριότητες και χρήσεις θαλάσσης και βυθού,
- διαβιούν είδη θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας,
- αποδέκτης ρύπανσης.

## **Χερσαίο τμήμα του παράκτιου χώρου**

Η ζώνη που εκτείνεται από την ακτογραμμή προς την ενδοχώρα έως τον αμιγώς ηπειρωτικό χώρο.

Μεταβάλλεται δυναμικά με το χρόνο και η έκτασή του καθορίζεται και/ή επηρεάζεται από τα ιδιαίτερα οικολογικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της περιοχής (διαβρώσεις, προσχώσεις, τεχνικά έργα κ.α.)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΤΟΜΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΧΩΡΟΥ



### **Κρίσιμη Ζώνη:**

- Αποτελεί το μέτωπο του παράκτιου χώρου
- Είναι το πλέον ευαίσθητο περιβαλλοντικά κομμάτι του
- Δέχεται σημαντικές πιέσεις από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η Κρίσιμη Ζώνη περιλαμβάνει θαλάσσιο και χερσαίο τμήμα.

Το θαλάσσιο τμήμα της ΚΖ εκτείνεται από την ακτογραμμή μέχρι την ισοβαθή των 10 μέτρων. Το πλάτος της δεν μπορεί να είναι μικρότερο των 100 μέτρων από την ακτογραμμή.

Το χερσαίο τμήμα της ΚΖ για τις εκτός εγκεκριμένων σχεδίων πόλεως και εκτός ορίων οικισμών προ του 1923 ή κάτω των 2000 κατοίκων περιοχές, ξεκινά από την ακτογραμμή και εκτείνεται προς την ξηρά σε ζώνη πλάτους 100 μέτρων από την καθορισμένη γραμμή του αιγιαλού (ή το χειμέριο κύμα όπου αυτή δεν είναι καθορισμένη).



### **Δυναμική ζώνη:**

- Περιλαμβάνει επίσης θαλάσσιο και χερσαίο τμήμα.

Θαλάσσιο τμήμα ΔΖ - ξεκινά από το όριο της Κρίσιμης Ζώνης (δηλαδή την ισοβαθή των 10 μέτρων και κατ' ελάχιστον 100 μέτρα από την ακτογραμμή) και εκτείνεται μέχρι την ισοβαθή των 50 μέτρων.

Σε κάθε περίπτωση το ακραίο προς την θάλασσα όριο της δεν μπορεί να απέχει λιγότερο των 200 μέτρων από την ακτογραμμή.

Χερσαίο τμήμα ΔΖ - για τις εκτός εγκεκριμένων σχεδίων πόλεως και εκτός ορίων οικισμών προ του 1923 ή κάτω των 2000 κατοίκων περιοχές, ξεκινά από το ακραίο προς την ξηρά όριο της Κρίσιμης Ζώνης και εκτείνεται κατ' ελάχιστον σε ζώνη πλάτους 200 μέτρων από την καθορισμένη γραμμή του αιγιαλού (ή το χειμέριο κύμα όπου αυτή δεν είναι καθορισμένη).

### **Υπόλοιπη Παράκτια Ζώνη:**

Περιλαμβάνει επίσης θαλάσσιο και χερσαίο τμήμα.

Θαλάσσιο τμήμα ΥΠΖ: εκτείνεται από το εξώτερο προς τη θάλασσα όριο της ΔΖ μέχρι το όριο των χωρικών υδάτων.

Χερσαίο τμήμα ΥΠΖ: ταυτίζεται με το τμήμα του χερσαίου παράκτιου χώρου που απομένει μετά την αφαίρεση της Κρίσιμης και της Δυναμικής Ζώνης.

- Αποτελεί «ζώνη μετάβασης» από την παράκτια ζώνη στον αμιγώς ηπειρωτικό χώρο
- Χαρακτηρίζεται από την παρουσία πλήθους ανθρωπίνων δραστηριοτήτων
- Έχει σημασία για το σχεδιασμό στη ΠΖ.

Για λόγους διαχειριστικούς, η ζώνη αυτή εκτείνεται κατ' αρχήν μέχρι και τα ακραία προς την ενδοχώρα διοικητικά όρια των αντίστοιχων παράκτιων ΟΤΑ, άλλως μέχρι υψόμετρο 600 μ. αν η εν λόγω ισοϋψής βρίσκεται εντός των διοικητικών ορίων των οικείων ΟΤΑ.

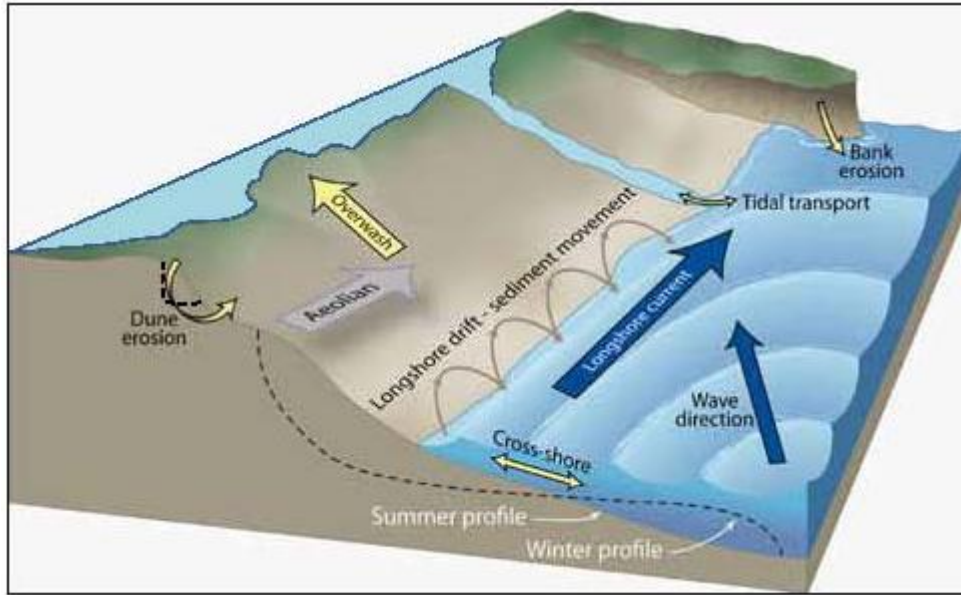
Σύμφωνα με στοιχεία του Ο.Η.Ε ο σημερινός παράκτιος πληθυσμός των 3 δισεκατομμυρίων κατοίκων αναμένεται να διπλασιαστεί στα επόμενα 20 χρόνια. Στη Μεσόγειο, ο πληθυσμός των κατοίκων στη παράκτια ζώνη φτάνει τα 150 εκατομμύρια, ενώ κάθε χρόνο 200 εκατομμύρια τουρίστες επισκέπτονται τις περιοχές αυτές.



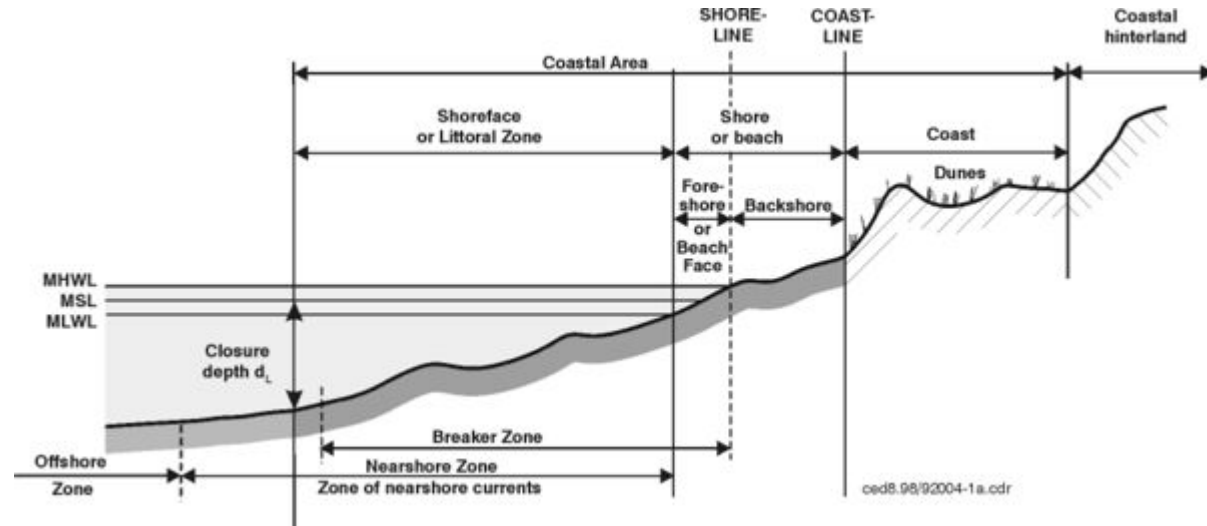
## Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά της Παγκόσμιας Παράκτιας Ζώνης.

### Η Παράκτια Ζώνη:

- Καλύπτει < 20% της επιφάνειας της Γης,
- Περιλαμβάνει > 60% του πληθυσμού της Γης,
- Περιλαμβάνει το 75% των πόλεων με πληθυσμό >10 εκατομμυρίων κατοίκων,
- Συγκεντρώνει το 75% της παγκόσμιας αλιευτικής παραγωγής,
- Αποτελεί το κύριο αποδέκτη ιζημάτων,
- Αποτελεί τη κύρια περιοχή ανάπτυξης βιογεωχημικών διεργασιών,
- Διαθέτει υψηλή χωρική μεταβλητότητα, υψηλή χρονική μεταβλητότητα και υψηλή βιοποικιλότητα.



## Διαμήκης Στερεομεταφορά



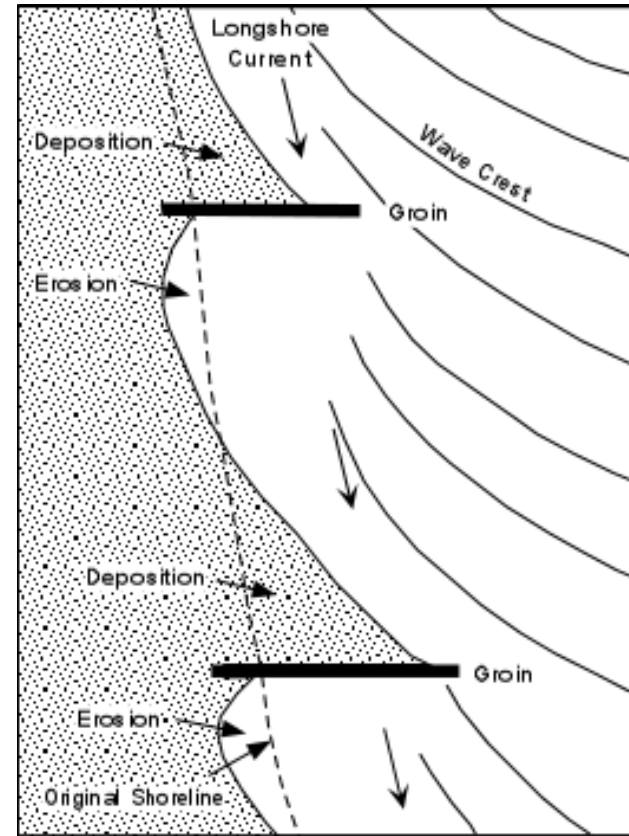
## Εγκάρσια Στερεομεταφορά

## 2. Παράκτιες Διεργασίες

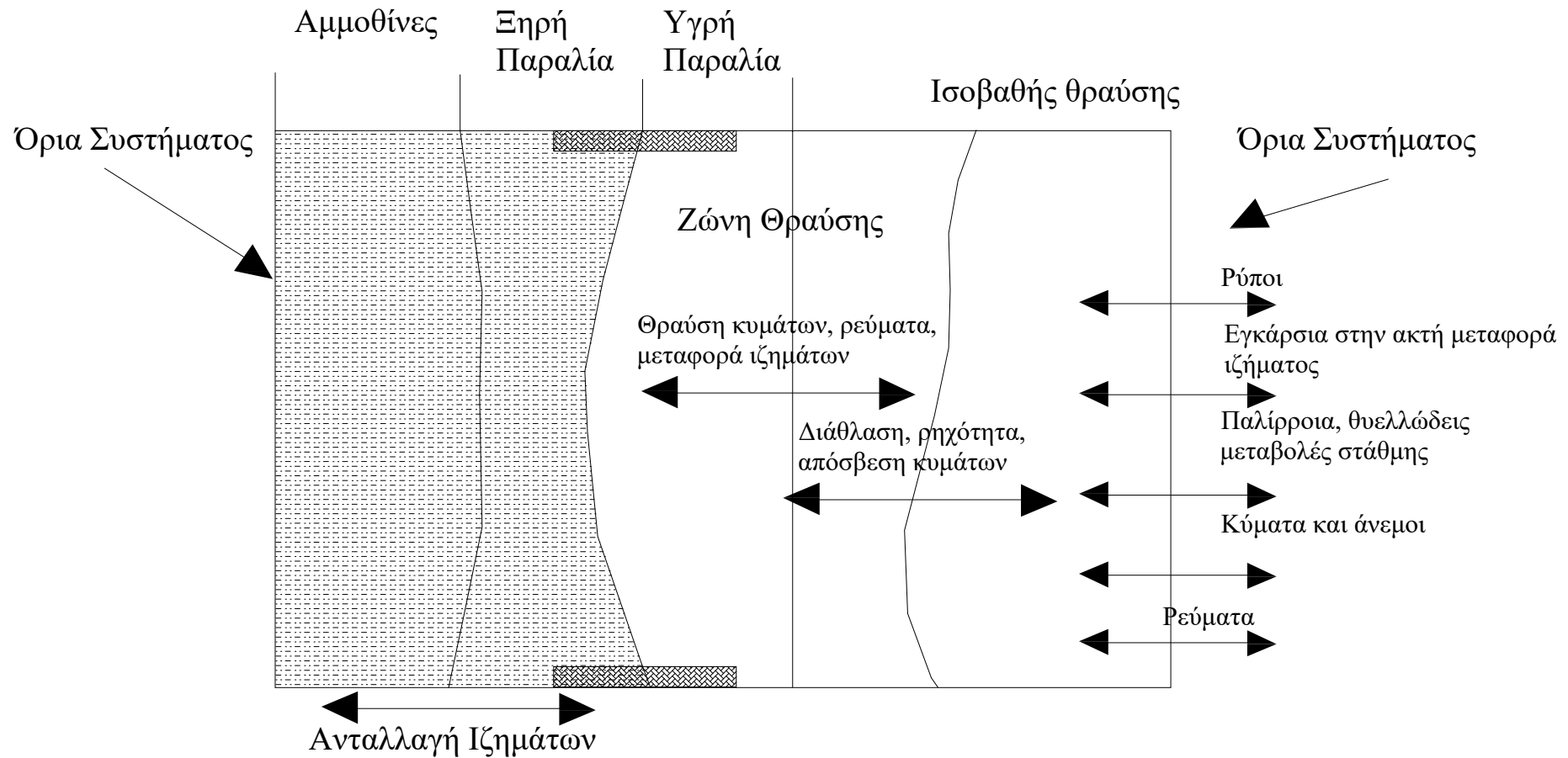
Οι υφαλοκρηπίδες αυτές με τη σειρά τους επηρεάζουν τη μορφή των κυματισμών που παράγονται και διαδίδονται από τα βαθιά προς τα ρηχά νερά, περιστρέφοντας τους ώστε να κινούνται κάθετα προς την ακτογραμμή, και αυξάνοντας τη κλίση τους, με αποτέλεσμα τη παράκτια θραύση τους.

Η διάθλαση (wave refraction) αυτή των κυμάτων είναι σημαντική για την εκτίμηση της διεύθυνσης των κυμάτων που κινούνται προς τα τεχνικά έργα που κατασκευάσθηκαν στην ακτή.

Παράλληλα, η παρουσία των έργων αυτών μεταβάλλει το παράκτιο υδροδυναμικό και κυματικό καθεστώς, προκαλώντας σημαντικές διαταραχές στη μεταφορά και απόθεση ιζημάτων

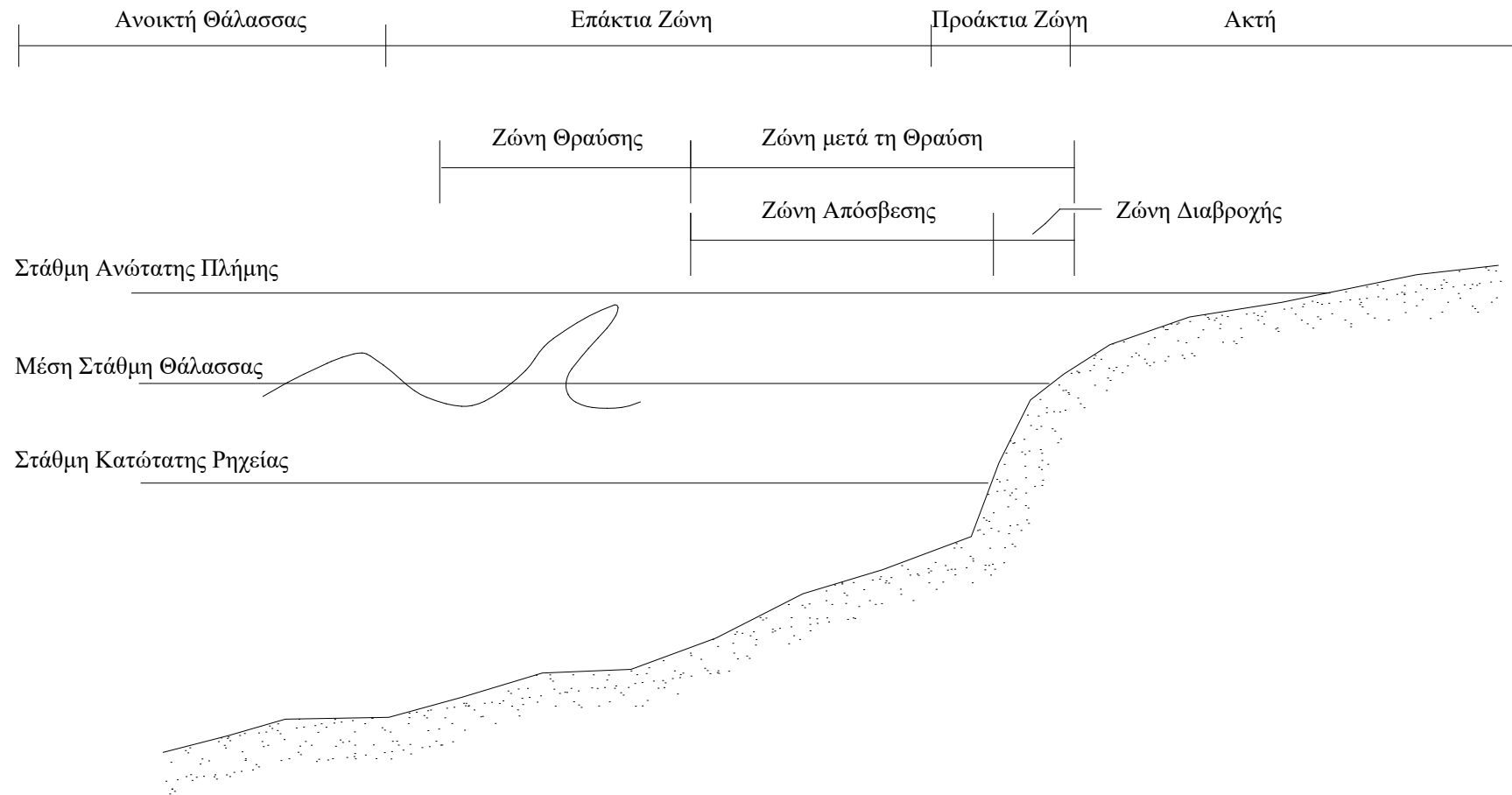


## 2. Παράκτιες Διεργασίες



Σχήμα 2. Σχηματική παρουσίαση ενός τυπικού παράκτιου υπο-συστήματος.

## 2. Παράκτιες Διεργασίες





## 2. Παράκτιες Διεργασίες (Ορολογία)

**Ακτή (coast)** ονομάζεται η ζώνη ξηράς, το ανάγλυφο της οποίας σχηματίστηκε από τη δράση της θάλασσας. Το εξωτερικό της όριο προς τη θάλασσα είναι η ακτογραμμή, ενώ το εσωτερικό προς τη ξηρά είναι το ανώτερο σημείο της ζώνης απόθεσης των ιζημάτων.

**Ακτογραμμή (shore line)** είναι η τομή της θαλάσσιας επιφάνειας με τη ξηρά. Η ακτογραμμή μεταβάλλεται τοπικά λόγω της μεταβολής της επιφάνειας του εδάφους στην ακτή (διάβρωση, εναπόθεση) ή λόγω της μεταβολής της επιφάνειας της θάλασσας (παλίρροια, κύματα, κλπ.).

**Παράκτια ζώνη (coastal zone)** ονομάζεται η θαλάσσια ζώνη αμέσως μετά την ακτή. Το εσωτερικό της όριο είναι η ακτογραμμή, ενώ το εξωτερικό της φθάνει ως την ισοβαθή στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση των κυμάτων. Η παράκτια ζώνη διακρίνεται στην επάκτια ζώνη (inshore zone) και στην προάκτια ζώνη (foreshore zone). Το μεταξύ τους όριο τοποθετείται στη γραμμή της κατώτατης ρηχίας (mean lower low water line). Η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει τη βαθύτερη ζώνη πριν τη θραύση, τη ζώνη θραύσης (breaker zone) και τη ζώνη μετά τη θραύση (after-breaker zone).

## 2. Παράκτιες Διεργασίες (Ορολογία)

**Ζώνη θραύσης (breaker zone)** αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης, όπου λαμβάνει χώρα ο φυσικός μηχανισμός της θραύσης κυμάτων.

**Ζώνη απόσβεσης (Surf zone)** είναι η περιοχή όπου αποσβένεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυομένου κύματος. Το εύρος της εξαρτάται από τα κυματικά χαρακτηριστικά, τη παλιρροιακή φάση και τη κλίση πυθμένα.

**Ζώνη διαβροχής** είναι η περιοχή της ακτής που διαβρέχεται κατά την ανοδική και καθοδική κίνηση του νερού λόγω του κυματισμού. Το πλάτος της εξαρτάται από τη κλίση της ακτής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

**Παράκτιο ρεύμα (littoral current)** ονομάζεται το οποιοδήποτε ρεύμα κινείται στη παράκτια ζώνη. Τα σημαντικότερα δημιουργούνται από τη κυματική δράση (κυματογενή ρεύματα) όπως το διαμήκες ρεύμα (longshore current) και το βελοειδές ρεύμα (rip current).

### 3. Διάβρωση Παράκτιων Ζωνών

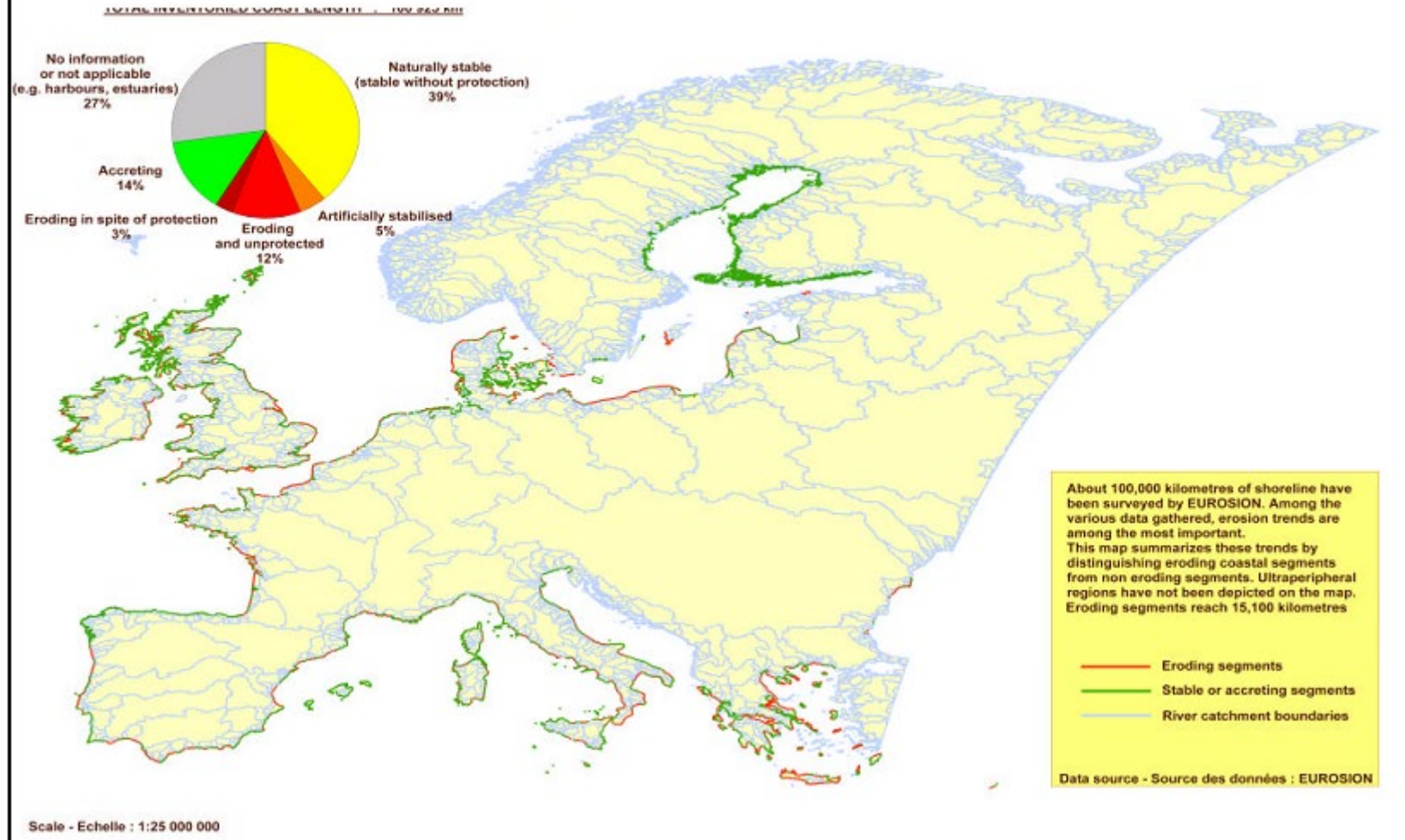
Η διάβρωση των παράκτιων ζωνών μπορεί να καταστρέψει κατοικίες και υποδομές, απειλώντας την ασφάλεια του πληθυσμού και την ανάπτυξη οικονομικών δραστηριοτήτων, όπως του τουρισμού, ενώ παράλληλα αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για τους φυσικούς οικότοπους.

Μεγάλα τμήματα της Ευρωπαϊκής παράκτιας ζώνης απειλούνται σήμερα από τη διάβρωση και τις πλημμύρες, ενώ ταυτόχρονα η οικονομική σημασία τους αυξάνει λόγω της διαρκούς συγκέντρωσης του πληθυσμού στη παράκτια ζώνη

Πίνακας 2. Επίπεδο παράκτιας διάβρωσης στα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Χώρα	Ποσοστό (%) της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση	Χώρα	Ποσοστό (%) της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση
Βέλγιο	25,5	Ιταλία	22,8
Κύπρος	37,8	Λεττονία	32,8
Δανία	13,2	Λιθουανία	24,3
Εσθονία	2,0	Κάτω Χώρες	10,5
Φινλανδία	0,04	Πολωνία	55,0
Γαλλία	24,9	Πορτογαλία	28,5
Γερμανία	12,8	Ισπανία	11,5
Ελλάδα	28,6	Σουηδία	2,4
Ιρλανδία	19,9	Ηνωμένο Βασίλειο	17,3

## Coastal erosion trends in the European Union



### 3. Διάβρωση Παράκτιων Ζωνών





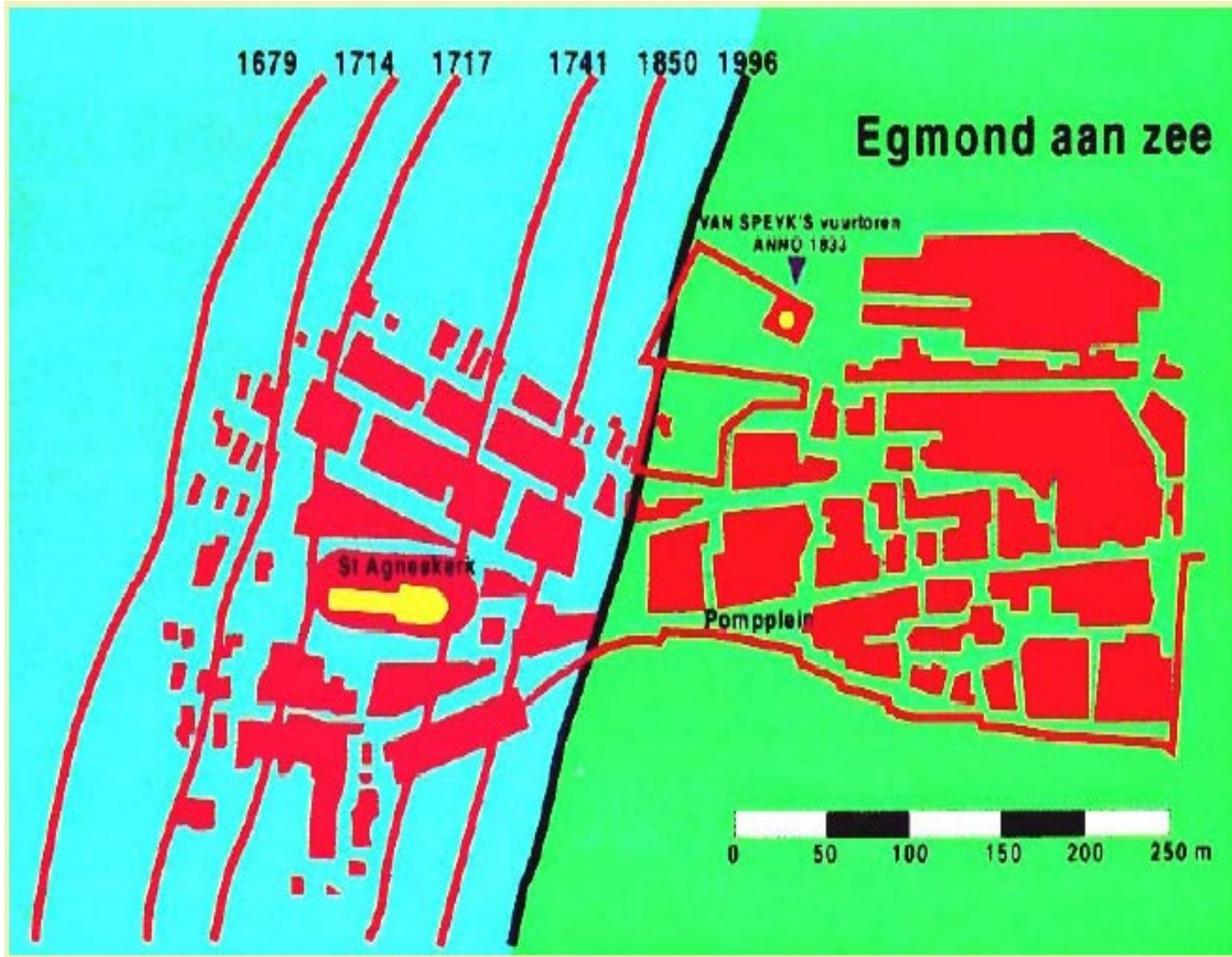
### 3. Διάβρωση Παράκτιων Ζωνών







### 3. Διάβρωση Παράκτιων Ζωνών





Πίνακας 1.3. Βαθμός επίδρασης τεχνικών έργων στη παράκτια διάβρωση.

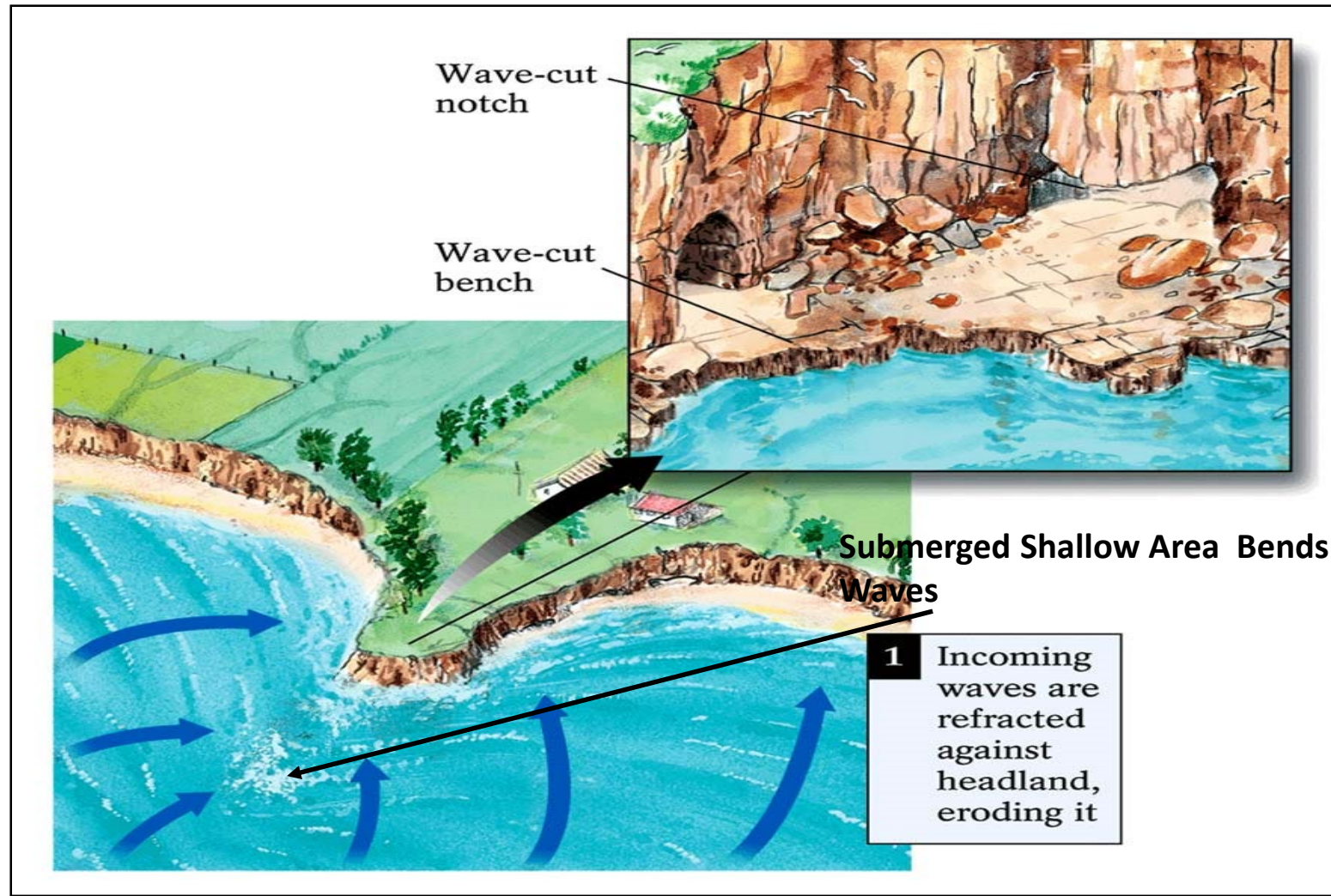
Τεχνικό Έργο	Βαθμός επίδρασης στη διάβρωση	Συνήθης κάλυψη από ΜΠΕ
Λιμενικά έργα και εγκαταστάσεις	Υψηλός	Ναι
Φραγματοποίηση και παρεμβάσεις στη κοίτη ποταμών	Υψηλός	Όχι
Κατασκευή κρηπιδωμάτων	Μέτριος	Όχι
Επιχώσεις και αλλαγές χρήσης στη παράκτια ζώνη	Μέτριος	Μερικά
Εκσκαφές ιζημάτων	Μέτριος	Ναι
Εξορύξεις πετρελαίου ή αερίου	Χαμηλός έως μέτριος	Όχι
Ναυσιπλοΐα	Χαμηλός	Όχι

# Παράκτια Διάβρωση

- Παράγεται από τα κύματα, τα διαμήκη ρεύματα και τα εγκάρσια ρεύματα.

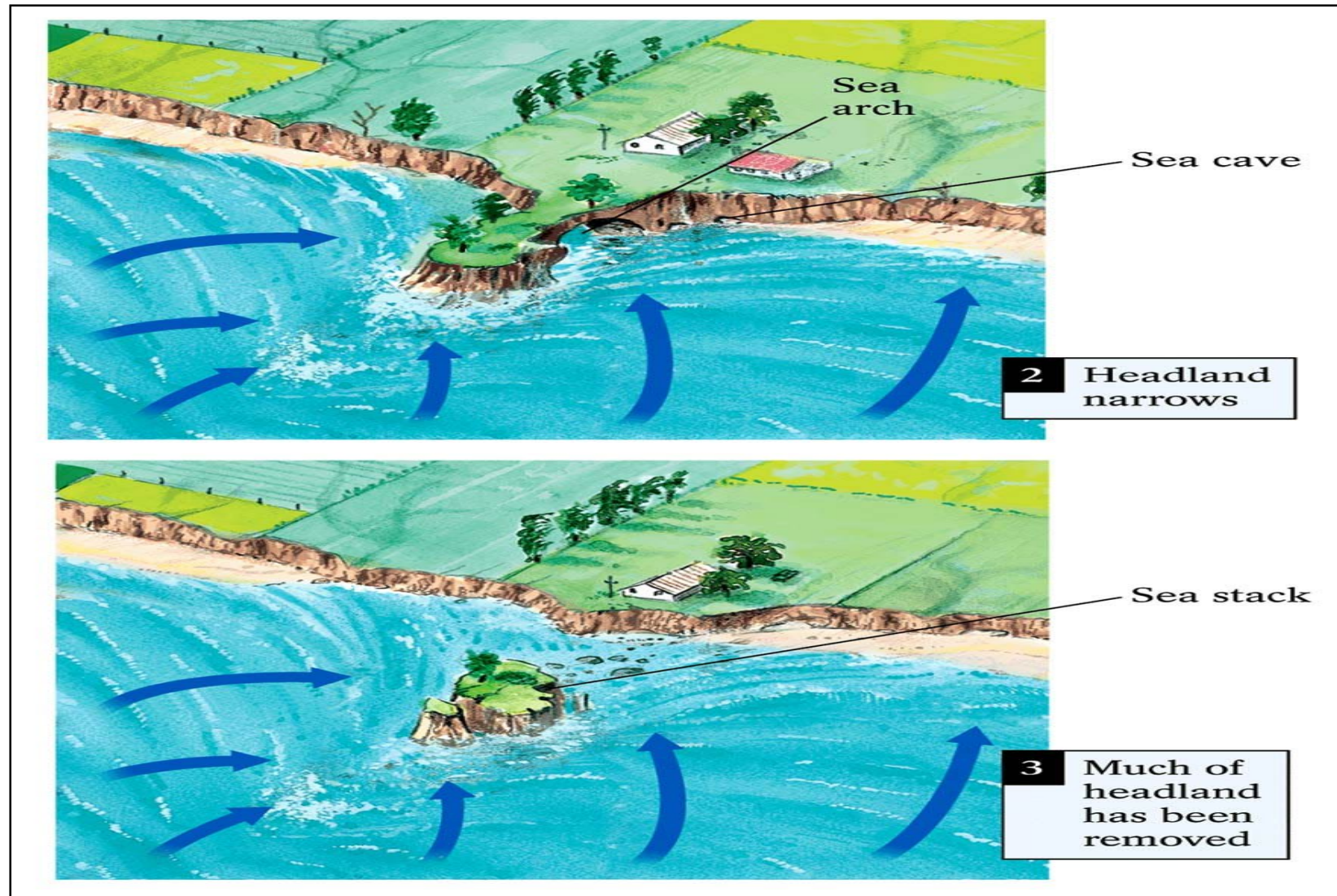


# Γεωμορφές Παράκτιας Διάβρωσης





# Γεωμορφές Παράκτιας Διάβρωσης

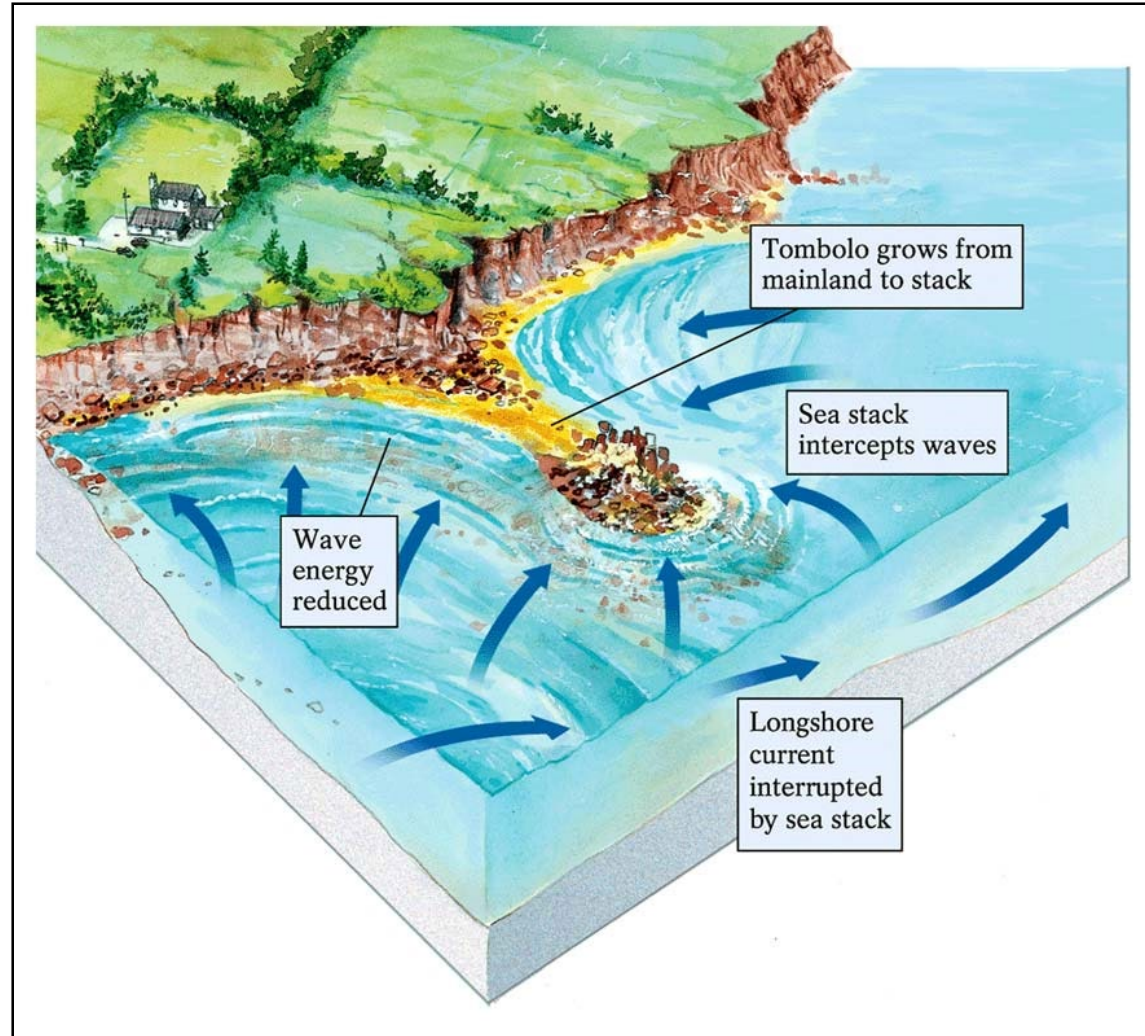


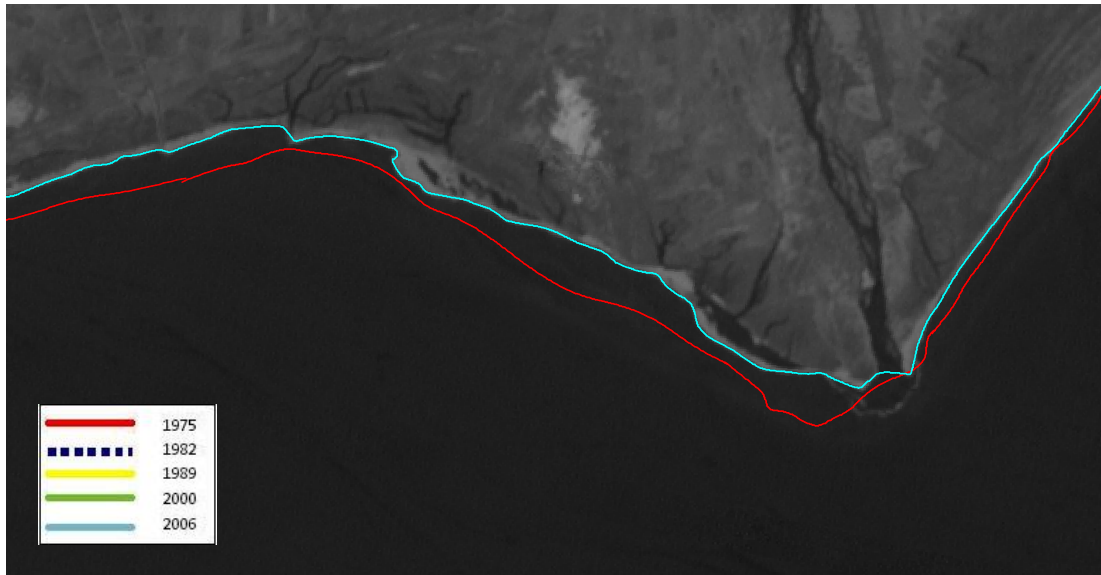
# Γεωμορφές Παράκτιας Διάβρωσης





# Απόθεση και Σχηματισμός Tombolo



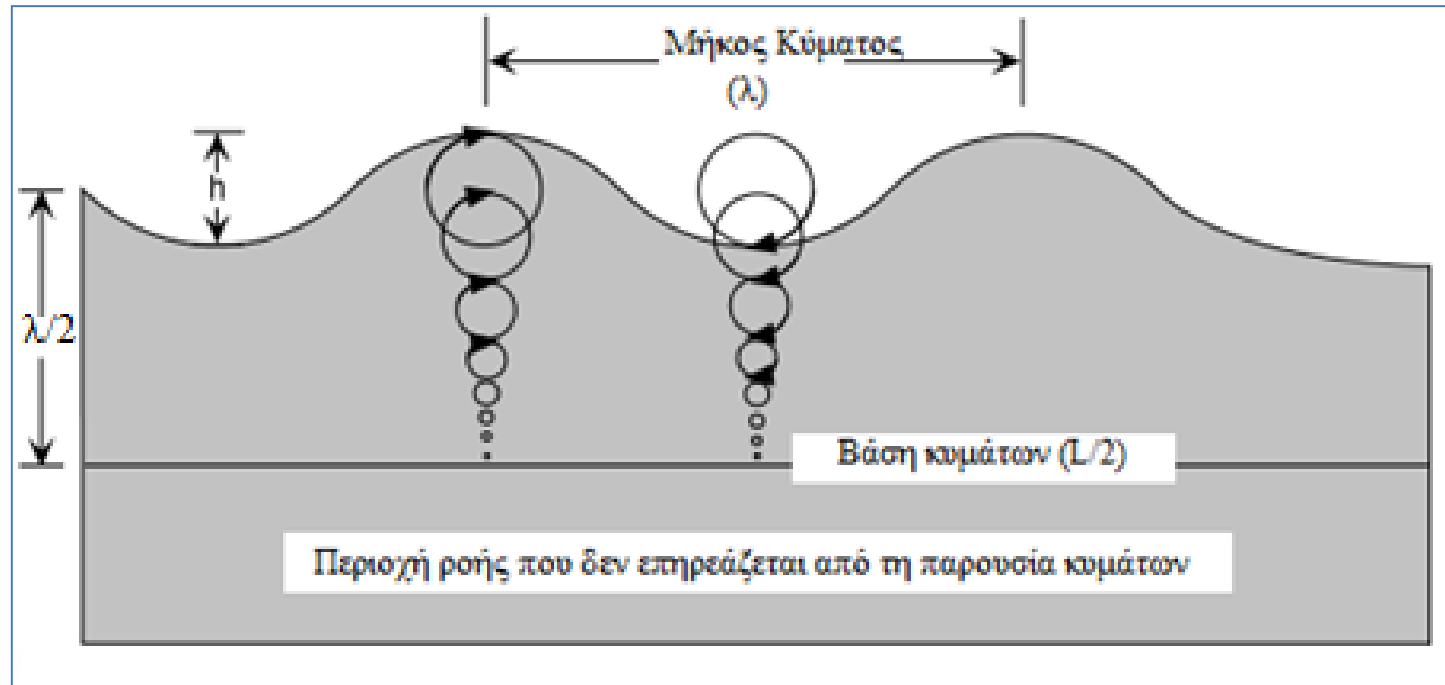


Αποτελέσματα ψηφιοποίησης της ακτογραμμής γύρω από το δέλτα του Νέστου για τα έτη 1975 και 2006 (εικόνα LANDSAT 2006).

Πίνακας 2: Ρυθμοί διάβρωσης ανά τμήμα της ακτογραμμής για κάθε χρονική περίοδο που αντιστοιχεί στις δορυφορικές εικόνες.

Περιοχή/Αποτελέσματα km <sup>2</sup>		1975-1982	1982-1989	1989-2000	2000-2006	1975-2006
Δυτική ακτογραμμή	Διάβρωση ή Απόθεση	<b>0.3465</b>	-0.5117	-0.187	-0.0936	-0.4458
	Ετήσιος Ρυθμός	<b>0.0495</b>	-0.0731	-0.017	-0.0156	-0.0144
Αμμόγλωσσα	Διάβρωση ή Απόθεση	<b>0.099</b>	-0.141	<b>0.012</b>	<b>0.037</b>	0.007
	Ετήσιος Ρυθμός	<b>0.0141</b>	-0.0201	<b>0.0011</b>	<b>0.0062</b>	0.000226
Ανατολική ακτογραμμή_Δ. Νέστου	Διάβρωση ή Απόθεση	<b>0.100</b>	-0.366	-0.672	-0.146	-1.084
	Ετήσιος Ρυθμός	<b>0.0143</b>	-0.0523	-0.0611	-0.0243	-0.0349





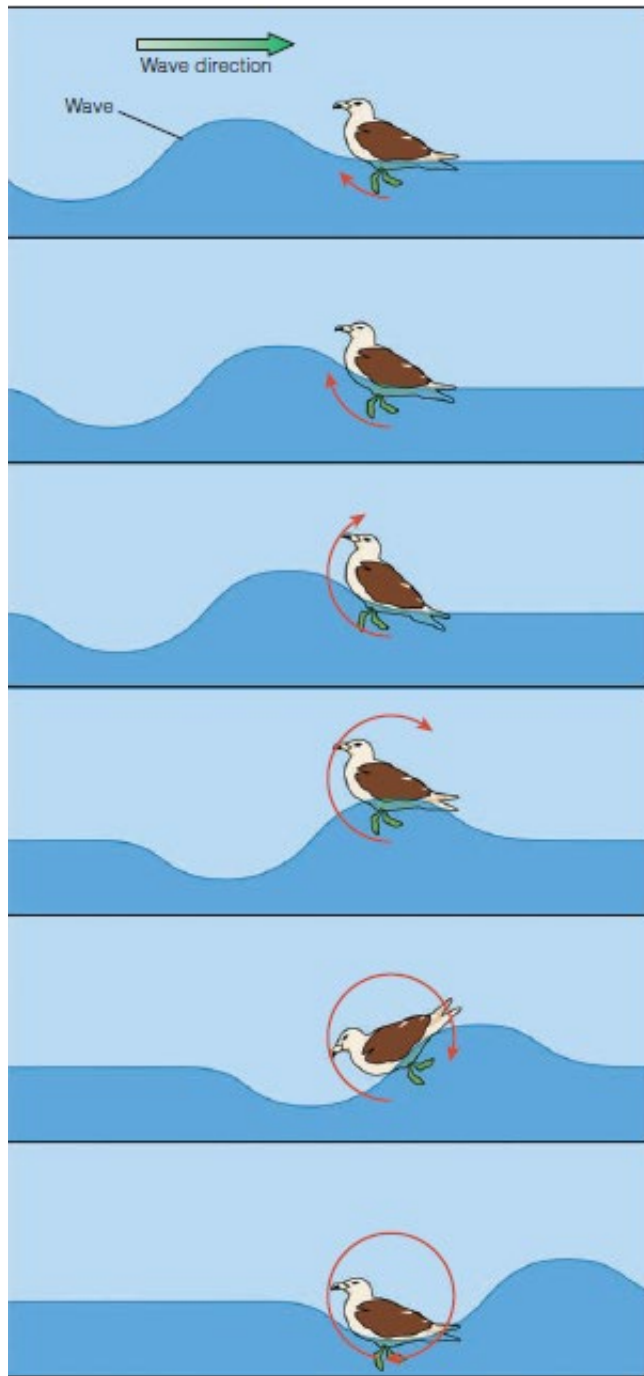
Ο κυματισμός χαρακτηρίζεται από τα βασικά στοιχεία:

**ύψος κύματος** (*wave height*,  $H$ ): η την κατακόρυφη απόσταση κοιλίας – κορυφής,

**πλάτος κύματος** (*wave amplitude*,  $A = H/2$ ),

**περίοδος κύματος** (*wave period*,  $T$ ): η χρονική απόσταση ανάμεσα στην εμφάνιση δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών σε μία θέση, και

**μήκος κύματος** (*wavelength*,  $\lambda$ ): η απόσταση ανάμεσα σε δύο κορυφές ή κοιλίες.



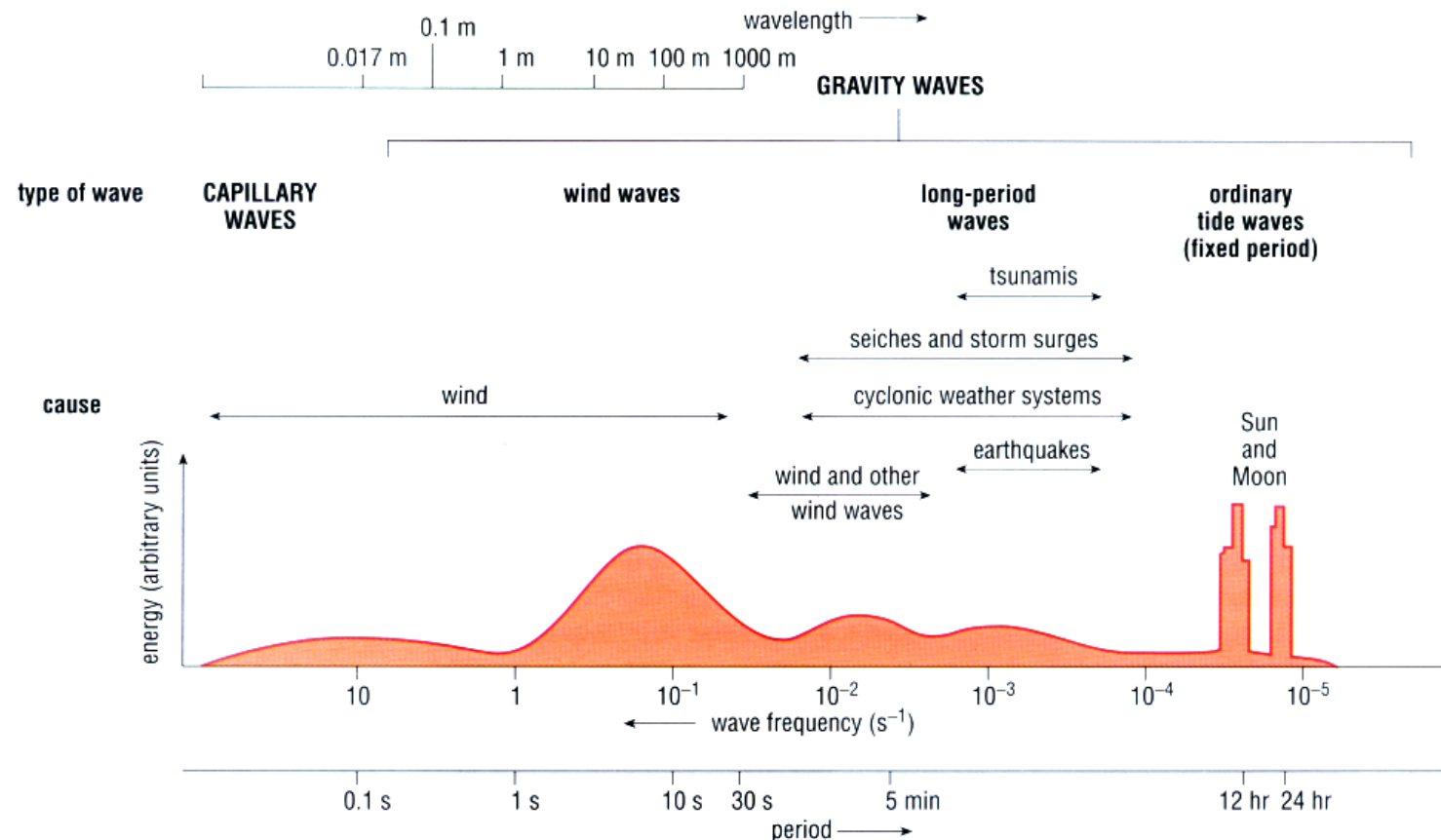
Τα κύματα μεταφέρουν ενέργεια και  
όχι μάζα

## Κατηγορίες επιφανειακών κυμάτων

Τύπος Κύματος	Περίοδος (T)	Μήκος Κύματος (λ)	Γεννεσιουργό Αίτιο
Μικρο-κυματώσεις (Ripples)	0-0,2 sec	Μερικά εκατ.	Άνεμος μικρής διάρκειας και έντασης
Ανεμογενείς κυματισμοί (Wind-waves)	0,2-9 sec	Μέχρι 130 μ.	Άνεμος μεγάλης διάρκειας και έντασης
Βωβός Κυματισμός (swell)	9-15 sec	Εκατοντάδες μέτρα	Θύελλα μακρυνής προέλευσης
Tsunamis	0,5 min – hours	Χιλιάδες χιλιόμετρα	Υποθαλάσσιοι σεισμοί
Παλίρροιες (Tides)	12,5 – 25 hours	Χιλιάδες χιλιόμετρα	Βαρυνητική επίδραση πλανητών

Κάθε χρονοσειρά υψών κύματος σε μία θέση περιέχει κυματισμούς διαφορετικών συχνοτήτων, φάσεων και ευρών τα οποία μεταφέρουν ενέργεια από τη θέση γένεσης τους στην υπόλοιπη ωκεάνια επιφάνεια.

Το διάγραμμα που σχετίζει τη κατανομή της κυματικής ενέργειας στις διάφορες κυματικές συχνότητες που απαντώνται στον ωκεανό καλείται κυματικό φασματικό διάγραμμα (wave energy spectrum).



Κατανομή κυματικής ενέργειας της επιφάνειας της θάλασσας ως προς τη κυματική περίοδο

Τα **ανεμογενή επιφανειακά κύματα βαρύτητας** (*gravity wind waves*) με περιόδους από 1 έως 30 sec εμφανίζουν τη μέγιστη ενέργεια, ακολουθούμενα από τις παλίρροιες (tides).

Τα **μικρής περιόδου (ή υψηλής συχνότητας) μικροκυματώσεις** (*capillary waves*) οφείλονται στην επιφανειακή τάση,

Τα **μεγάλης περιόδου (ή χαμηλής συχνότητας) κύματα βαρύτητας** τα βωβά κύματα (*swells, storm surges*) και οι παλίρροιες επηρεάζονται από τη περιστροφή της Γης.

Η ταχύτητα με την οποία ένα τμήμα του κύματος διέρχεται από σταθερό σημείο είναι  $C = \lambda/T$ .

Για να απλοποιήσουμε τους συμβολισμούς των χαρακτηριστικών των κυμάτων εισάγουμε τους όρους :

α) γωνιακή συχνότητα,  $\omega = 2\pi/T$ , και

β) γωνιακός αριθμός κύματος,  $k = 2\pi/\lambda$ .

Προκύπτει από τα παραπάνω ότι :  $C = \lambda/T = \omega/k$ .

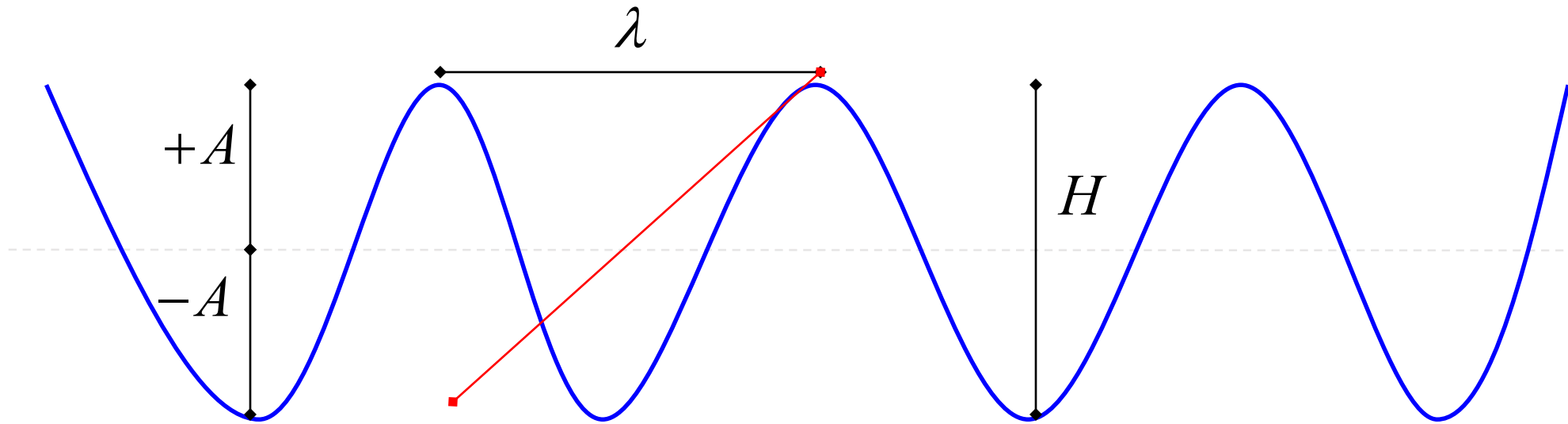
Αυτή είναι μία κινηματική σχέση που ισχύει για όλα τα κύματα.

Η μαθηματική έκφραση μίας μονοχρωματικής κυματομορφής είναι:

$$\eta = A \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] = A \cos(kx - \omega t)$$

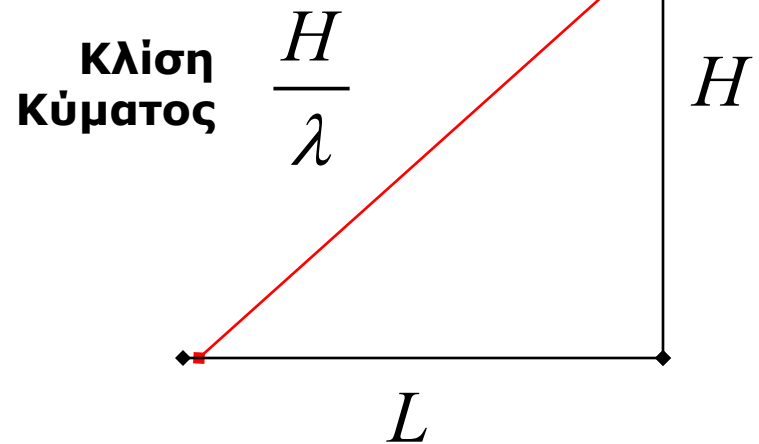
Όπου  $\eta$  η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας λόγω κυματισμού ως προς τη Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ),  $A = H/2$  είναι το μισό το **κυματικό ύψους** και καλείται **κυματικό εύρος**. Ο όρος  $(kx - \omega t)$  ονομάζεται **φάση του κύματος**, και μεταβάλλεται από 0 έως  $2\pi$ , καθώς το κύμα κινείται από τη μία κορυφή στην άλλη.

# Ωκεάνια Κύματα



## Ορισμοί:

---



## Κυματαριθμός

$$k = \frac{\text{number of peaks}}{\text{length}}$$

## Συχνότητα

$$\omega = \frac{\text{number of peaks}}{\text{time}}$$

Θεωρητικές λύσεις έδειξαν ότι η ταχύτητα του κύματος  $C$  ορίζεται ως εξής :

$$C = \left[ \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \right]^{1/2} = \left[ \frac{g}{k} \tanh kh \right]^{1/2}$$

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$



Καθώς  $C = \lambda/T$ , προκύπτει:

$$C = \left[ \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \right]^{1/2} = \left[ \frac{g}{k} \tanh kh \right]^{1/2} \quad C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{\lambda} \right)$$

Καθώς ο κυματαριθμός  $k = 2\pi/\lambda$  και η γωνιακή συχνότητα  $\omega = 2\pi/T$ , προκύπτει ότι

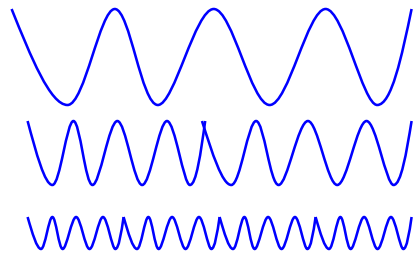
$$C = \left( \frac{g}{\omega} \right) \tanh(kh)$$

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \left( \frac{g}{\omega} \right) \tanh(kh)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

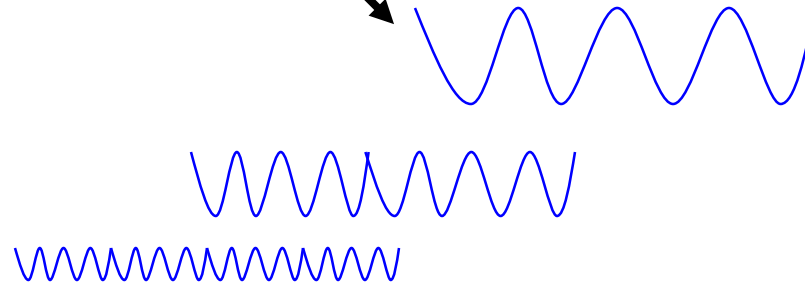
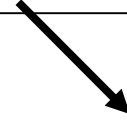
**‘σχέση διασποράς κυμάτων’** (dispersion relation) καθώς δηλώνει ότι κύματα με διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες (άρα και περιόδους) αποκτούν διαφορετικούς κυματαριθμούς, άρα και μήκη κύματος, και συνεπώς κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες

**Θύελλα**



$t_1$

**Ανάπτυξη Κυμάτων  
διαφόρων μηκών κύματος,  
τα οποία διασπείρονται**



$t_2$

**ΑΝΟΙΚΤΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ**

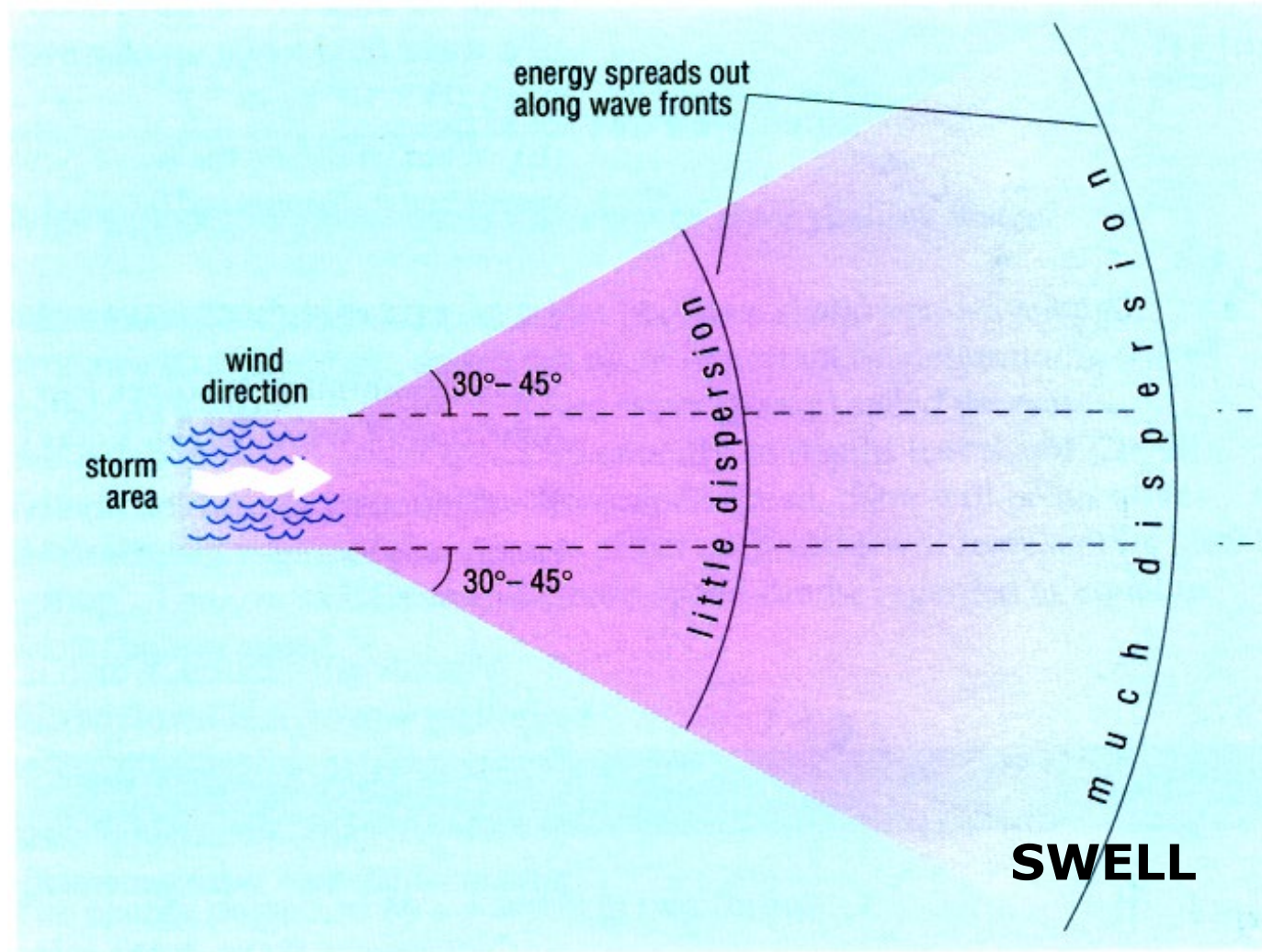


**ΑΚΤΗ**



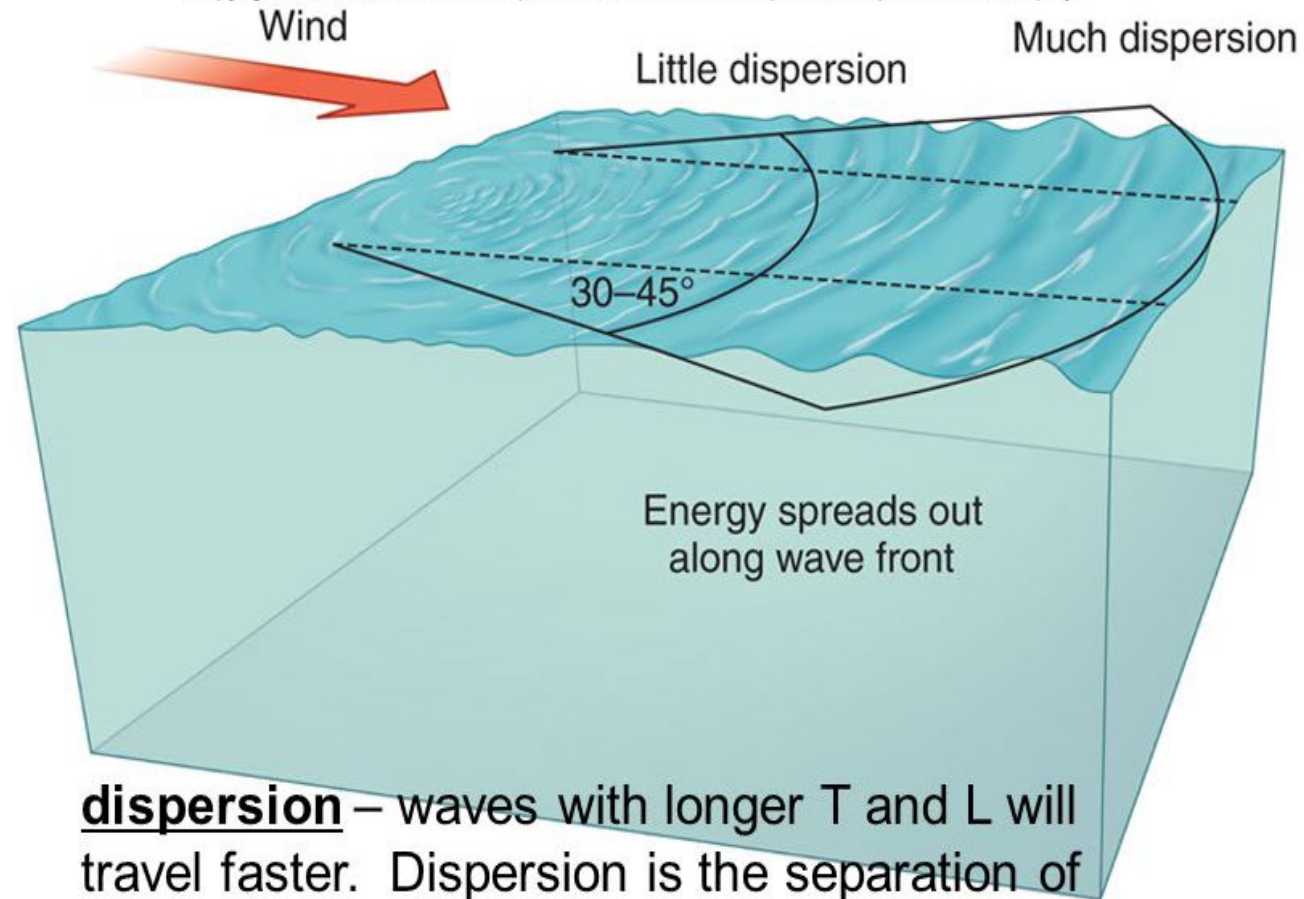
**Απόσταση από τη Θύελλα**

## Επίδραση της Κυματικής Διασποράς (στα νερά μεγάλου βάθους)



# wave generation by wind

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



**dispersion** – waves with longer T and L will travel faster. Dispersion is the separation of waves that travel with different speeds.

Γέννεση και διασπορά κυμάτων  
κατά την διάδοσή τους

Ο μηχανισμός γέννησης των ωκεάνειων κυμάτων είναι η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Η επίδραση αυτή παράγει μία δύναμη που καλείται **διατμητική τάση** (*shear stress*) μέσω της οποίας κύματα διαφορετικού ύψους, μήκους και περιόδου παράγονται και διαδίδονται.

Η διάδοση των κυμάτων στο νερό μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) και του βάθους του νερού ( $h$ ) στο οποίο διαδίδεται.

Παράμετρος '**σχετικού βάθους**' (relative depth) που εκφράζει ο λόγος του βάθους  $h$  ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$ .

Όταν ο λόγος  $h/\lambda > 0,5$ , δηλαδή το βάθος νερού είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος ( $\lambda/2$ ), τότε καλούνται **κύματα μεγάλου βάθους** (*deep water waves*) ή **κύματα μικρού μήκους** (*short water waves*).

Όταν ο λόγος  $h/\lambda$  είναι μικρότερος του  $0,05$  ( $1/20$ ), τότε τα κύματα καλούνται **κύματα μικρού βάθους** (*shallow water waves*) ή **κύματα μεγάλου μήκους** (*long water waves*).

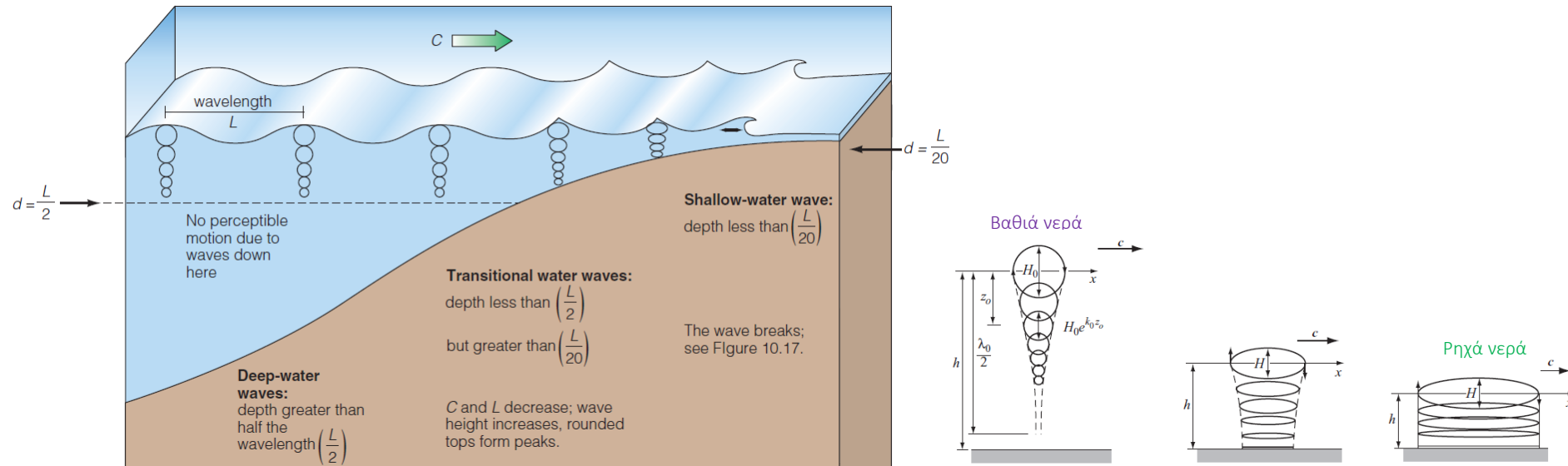
Τα κύματα με χαρακτηριστικά μεταξύ του  $0.05$  και του  $0.5$  δηλ. τα κύματα μεταξύ αυτών μικρού μήκους (μεγάλου βάθους) και μεγάλου μήκους (μικρού βάθους) καλούνται **ενδιάμεσα κύματα** (*intermediate waves*).

Ταξινόμηση επιφανειακών κυμάτων κατά Irpen (1966), με βάση το σχετικό βάθος ( $h/\lambda$ )

Τιμές σχετικού βάθους ( $h/\lambda$ )	Τιμές $kh = 2\pi h/\lambda$	Τύπος κύματος
0 έως 0,05	0 έως $\pi/10$	Μικρού βάθους ή μεγάλου μήκους
0,05 έως 0,5	$\pi/10$ έως $\pi$	Ενδιάμεσα κύματα
0,5 έως $\infty$	$\pi$ έως $\infty$	Μεγάλου βάθους ή μικρού μήκους

# Η επίδραση του βάθους νερού

- Το μήκος κύματος διέπει την τροχιά των μορίων νερού
- Το βάθος νερού προσδιορίζει το σχήμα της τροχιάς πχ, κυκλική, ελλειπτική
- **Κύματα βαθιών νερών** κινούνται σε νερό βάθους  $>0.5\lambda$
- **Κύματα ρηχών νερών** συναντώνται σε βάθη  $<(1/20)\lambda$





Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη διάδοση των κυμάτων γίνονται:

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$$

**A. Κύματα μεγάλου βάθους ή μικρού μήκους κύματος ( $h > \lambda/2$  ή  $\lambda < 2h$ )**

Στην περίπτωση που  $\lambda < 2h$ , τότε  $\tanh 2\pi h/\lambda = \tanh kh = 1$ .

$$\text{Άρα } C = (g\lambda/2\pi)^{1/2} = (g/k)^{1/2}$$

Τα κύματα αυτά ονομάζονται κύματα διασποράς (dispersive waves) επειδή η ταχύτητά τους εξαρτάται από το μήκος κύματος τους. Προκύπτει έτσι ότι στα κύματα μεγάλου βάθους ή μικρού μήκους κύματος, τα κύματα με τα μεγαλύτερα μήκη κινούνται ταχύτερα από ότι αυτά με τα μικρότερα μήκη.

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} = 1.56 T \text{ (m / s)}$$

$$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56 T^2 \text{ m}$$

## B. Κύματα μικρού βάθους ή μεγάλου μήκους κύματος ( $h < \lambda/20$ ή $\lambda > 20h$ )

Στη περίπτωση που  $\lambda > 20h$ , τότε  $\tanh 2\pi h/\lambda = \tanh kh = kh$ .

$$\text{Άρα } C = (gh)^{1/2}$$

Τα κύματα αυτά δεν εμφανίζουν διασπορά (non-dispersive waves) διότι η ταχύτητά τους εξαρτάται μόνο από το βάθος.

Τα κύματα αυτά **δεν εμφανίζουν διασπορά** (non-dispersive waves) διότι η ταχύτητά τους εξαρτάται μόνο από το βάθος. Συνεπώς η ταχύτητα διάδοσης των παλιρροιακών κυμάτων είναι εύκολα προσδιορίσιμη σε οποιοδήποτε σημείο του ωκεανού.

---

Μικρού μήκους κύματα (κύματα  
μεγάλου βάθους)

Μεγάλου μήκους κύματα (κύματα  
μικρού βάθους)

---

$$C_s = (g\lambda/2\pi)^{1/2} = (g/k)^{1/2} = g/\omega$$

$$C_l = (gh)^{1/2} = 3,13 h^{1/2}$$

$$C_s = 1,56 T = 1,25 (\lambda)^{1/2}$$

$$\lambda = 3,13 (h)^{1/2} T$$

$$\lambda = 1,56 T^2$$

---

Στον πραγματικό ωκεανό δεν υπάρχουν ημιτονοειδή κύματα μίας μόνο συχνότητας, αλλά αθροίσματα κυμάτων με διάφορα εύρη, μήκη κύματος και περιόδους, τα οποία κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες προς όλες τις διευθύνσεις.

Θεωρούμε δύο ημιτονοειδή κύματα  $\eta_1$  και  $\eta_2$  με ίδιο εύρος αλλά ελαφρά διαφορετικό κυματαριθμό και συχνότητα, τα οποία κινούνται στην ίδια ωκεάνια περιοχή.

$$\eta_1 = \cos(k_1x - \omega_1t)$$

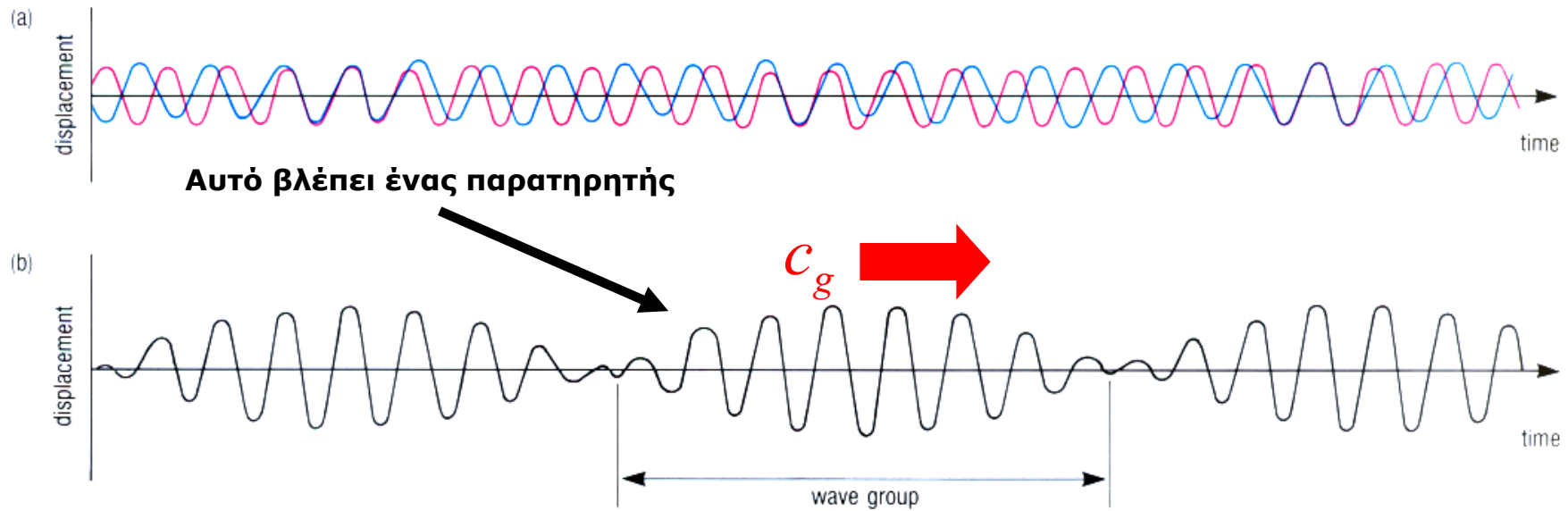
$$\eta_2 = \cos(k_2x - \omega_2t)$$

Προκύπτει ότι η συμβολή των δύο κυμάτων θα δώσει μία νέα ταλάντωση της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = 2 \cos(kx - \omega t) \cos(\Delta kx - \Delta \omega t)$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει ένα κύμα υψηλής συχνότητας ( $kx - \omega t$ ) με μήκος κύματος  $\lambda = 2\pi/k$  του οποίου το εύρος μεταβάλλεται από τον όρο χαμηλής συχνότητας ( $\Delta kx - \Delta \omega t$ ).





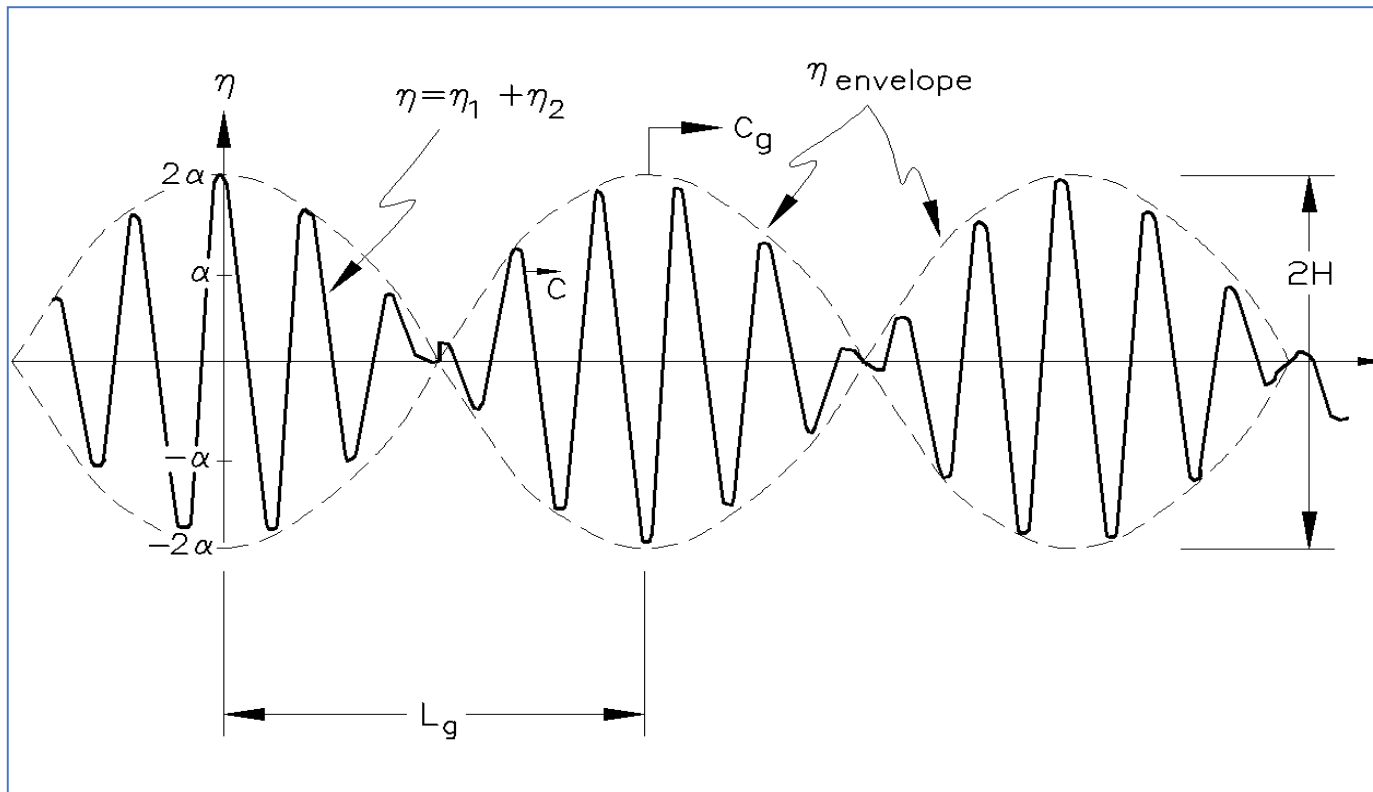
## A

**Η κυματική ενέργεια κυμάτων με παρόμοια περίοδο και μήκη κύματος κινείται με τη κυματική ταχύτητα της ομάδας**

$$C_g = \frac{C}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right]$$

Για κύματα μεγάλου μήκους κύματος,  $kh \ll 1$  και  $\sinh 2kh \rightarrow 2kh$ , οπότε  $C_g = C_l$ .

Για κύματα μικρού μήκους κύματος,  $kh \gg 1$  και  $\sinh 2kh \gg 2kh$ , οπότε  $C_g = C_s/2$ .



Ομάδα κύματος σχηματιζόμενη από την άθροιση επιμέρους κυμάτων διαφορετικής περιόδου



Στα βαθιά νερά, ισχύει ότι  $kh \gg 1$  και  $\sinh 2kh \gg 2kh$ , οπότε  $C_g = C/2$ , δηλ. η ταχύτητα ομάδας κυμάτων στα βαθιά νερά είναι ίση με το ήμισυ της ταχύτητας φάσης κάθε συμμετέχοντος κύματος.

Στα βαθιά νερά, η ταχύτητα των κυμάτων είναι ανάλογη του μήκους κύματος, άρα τα ελαφρώς μεγαλύτερου μήκους κύματος κύματα θα κινηθούν ελαφρώς ταχύτερα από τα αντίστοιχα μικρότερου μήκους κύματος. Με τον τρόπο αυτό τα κύματα διασπείρονται, οπότε καθώς τα επιμέρους κύματα κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες, το σχήμα της ομάδας μεταβάλλεται με αποτέλεσμα τα μεγαλύτερου μήκους κύματα να προηγούνται.

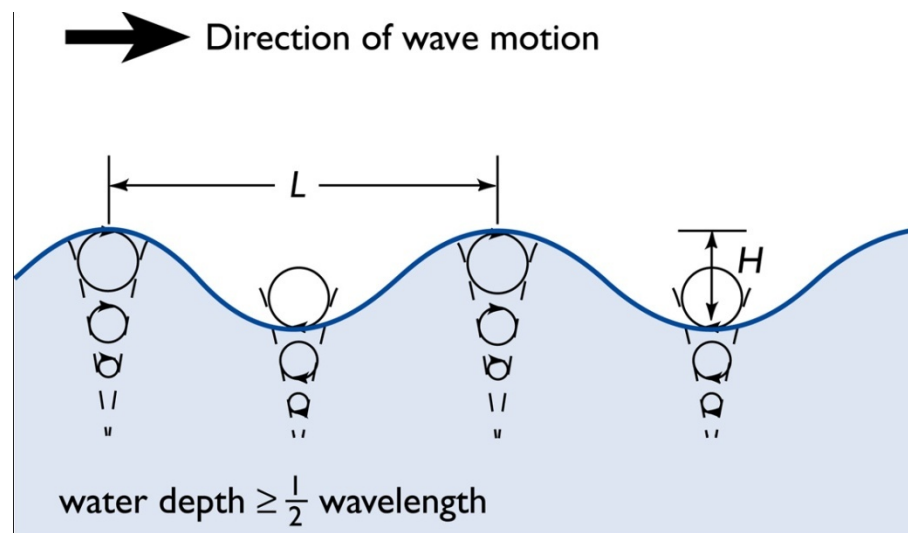
Η κατάσταση αυτή ονομάζεται **κανονική διασπορά** (normal dispersion). Επιπλέον ισχύει ότι η ταχύτητα της ομάδας είναι μικρότερη της ταχύτητας των επιμέρους κυμάτων που συνθέτουν την ομάδα, δηλ.  $C_g < C$ .

Στα ρηχά νερά, ισχύει ότι  $kh \ll 1$  και  $\sinh 2kh \rightarrow 2kh$ , οπότε  $C_g = C = (gh)^{1/2}$ . Άρα **στα ρηχά νερά, όλα τα συμμετέχοντα κύματα στην ομάδα κύματος θα έχουν την ίδια ταχύτητα.**

Η κυματική ενέργεια κινείται με τη ταχύτητα της ομάδας κυμάτων. Συνεπώς, το διανυσματικό μέγεθος της ταχύτητας ομάδας ( $C_g$ ) είναι πιο σημαντικό μέγεθος από τη ταχύτητα φάσης ( $C$ ) του κάθε διακριτού κύματος. Ουσιαστικά, η ταχύτητα ομάδας δείχνει τη κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων.

# Κύματα Μεγάλου Βάθους

Τα κύματα αυτά δεν επηρεάζονται από τη παρουσία του πυθμένα.  
Οι σωματιδιακές τροχιές είναι κυκλικές.



(a) DEEP-WATER WAVE

Η διάμετρος της κυκλικής τροχιάς ορίζεται ως:

$$D_z = H \exp(kz) = H \exp(2\pi z/\lambda)$$

όπου  $H$  το ύψος του κύματος και  $z$  το βάθος που βρίσκονται τα υπό εξέταση σωματίδια.

Προκύπτει ότι για  $z = -\lambda$ , η διάμετρος κίνησης των σωματιδίων νερού είναι

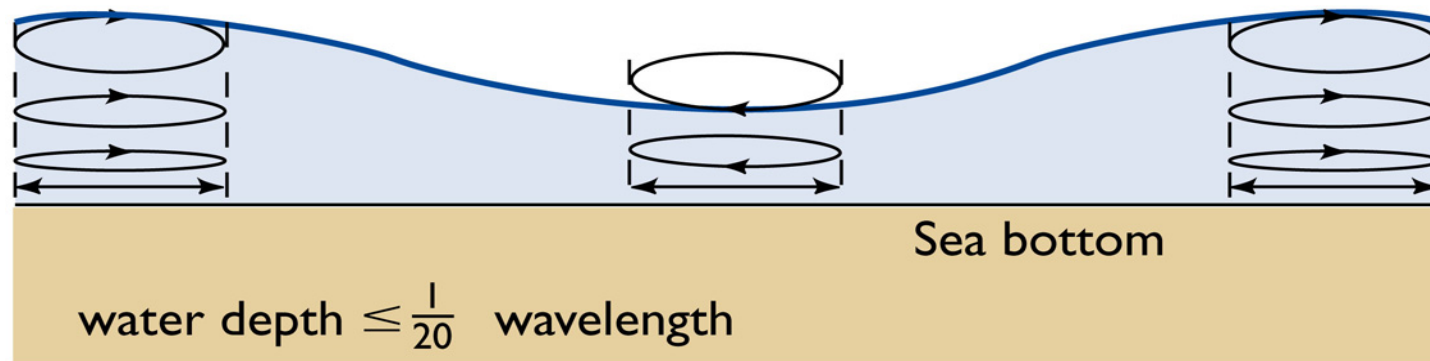
$$D_{z\lambda} = 0,002 D_0.$$

# Κύματα Μικρού Βάθους

Τα κύματα αλληλεπιδρούν με το πυθμένα.

Οι σωματιδιακές τροχιές είναι ελλειπτικές.

➔ Direction of wave motion



(b) SHALLOW-WATER WAVE

$$E = \frac{\rho g A^2}{2} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (\text{Joules} / m^2)$$

## B

**Η Ισχύς του Κύματος εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς της κυματικής ενέργειας: Κυματική Ενέργεια x Ταχύτητα Ομάδας**

$$P = c_g E = c_g \frac{1}{8} \rho g H^2$$

Μετά από αντικαταστάσεις προκύπτει ότι για τα βαθιά νερά η κυματική ισχύς είναι:

$$P = \frac{1}{32 \pi} \rho g^2 T H^2$$

ενώ για τα ρηχά νερά είναι:

$$P = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh}$$

Επιστήμονες εκτίμησαν ότι η κυματική ενέργεια του παγκόσμιου ωκεανού είναι περίπου  $10^{18}$  Joules, ενώ η ισχύς που προσεγγίζουν τις δυτικές ακτογραμμές των Η.Π.Α είναι περίπου  $4 \times 10^{10} \text{ J sec}^{-1} = 4 \times 10^7 \text{ KW}$ . Η ισχύς των κυματισμών που φθάνουν στις ακτογραμμές όλων των ωκεανών είναι περίπου  $2 \times 10^9 \text{ KW}$ . Έχει υπολογισθεί ότι αν ολόκληρη η ενέργεια των κυματισμών του παγκόσμιου ωκεανού μετατρεπόταν σε θερμότητα, θα απαιτούνται 90.000 έτη για να ανέβει η θερμοκρασία του ωκεανού κατά  $1^\circ\text{C}$ .

Πίνακας 3. Συνοπτική παρουσίαση κυματικών χαρακτηριστικών.

Παράμετρος	Γενική Εξίσωση	Νερά μεγάλου βάθους ( $d/L > 0.5$ )	Νερά μικρού βάθους ( $d/L < 0.05$ )
Επιφάνεια κύματος (m)	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$		
Ταχύτητα κύματος (m/s)	$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh kh$	$C_0 = \frac{gT}{2\pi}$	$C = \sqrt{gh}$
Μήκος κύματος (m)	$\lambda = CT = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh$	$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$	
Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας σωματιδίων (m/s)	$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H_0}{T} e^{k_0 z} \cos(k_0 x - \omega t)$	
Κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας σωματιδίων (m/s)	$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sin k(z+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t)$	$w_0 = \frac{\pi H_0}{T} e^{k_0 z} \sin(k_0 x - \omega t)$	
Κυματική ενεργειακή πυκνότητα (J/m <sup>2</sup> )	$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$		
Κυματική ισχύς (W/m)	$P = EC_G$	$P_0 = \frac{EC_0}{2}$	$P = EC$
Ταχύτητα Ομάδας Κυμάτων (m/s)	$C_G = nC$ $n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right]$	$(C_G)_0 = \frac{C_0}{2}$	$C_G = C$



Να υπολογιστούν τα κυματικά χαρακτηριστικά κύματος περιόδου  $T=8$  sec και κυματικού ύψους  $H=1.5$  μ σε βάθος νερού  $h=6$  μ.

Αρχικά θα υπολογίσουμε το μήκος κύματος στα βαθιά νερά και το σχετικό βάθος.

$$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2 = 1.56 \times 64 = 100 \text{ m}$$

$$\frac{h}{\lambda_0} = \frac{6}{100} = 0.060$$

Με τη χρήση του Κυματικού Πίνακα (Παράρτημα Ι) έχουμε:

$$\frac{h}{\lambda} = 0.104; \tanh kh = 0.575; \sinh kh = 0.703; \cosh kh = 1.22; n = 0.881$$

Από τη τιμή του σχετικού βάθους  $h/\lambda$ , το μήκος κύματος και ο κυματαριθμός σε βάθος 6 μ μπορεί να υπολογιστεί:

$$\lambda = \frac{h}{0.104} = 57.5 \text{ m}; k = \frac{2\pi}{\lambda} = 0.109 \text{ m}^{-1}$$

Άλλες κυματικές παράμετροι είναι:

$$C = \frac{\lambda}{T} = 7.2 \text{ m / s}$$

$$C_g = nC = 0.881 \times 7.2 = 6.35 \text{ m / s}$$

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} = 2854 \text{ J / m}^2$$

$$P = EC_g = 18.124 \text{ W / m}$$

Στο πυθμένα, έχουμε  $z=-h$ ,  $k(z+h)=0$ ,  $\sinh k(z+h) = 0$ ,  $\cosh k(z+h)=1.0$  οπότε η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας είναι:

$$u_B = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) = \frac{1.5\pi}{8} \frac{1}{0.703} \cos(kx - \omega t) = 0.84 \cos(kx - \omega t)$$

Άρα στο πυθμένα η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.84 m/s ενώ η τιμή της κατακόρυφης ταχύτητας είναι μηδέν. Το εύρος της σωματιδιακής ταλάντωσης στο πυθμένα είναι

$$A_b = \frac{H}{2 \sinh kh} = \frac{1.5}{2 \times 0.703} = 1.07 \text{ m}$$

και η σωματιδιακή διάμετρος  $2A_b = 2.14 \text{ m}$ .