



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΠ535 Παράκτια Μηχανική 1^η Εβδομάδα

Θαλάσσιοι κυματισμοί
Γραμμική θεωρία κυματισμών

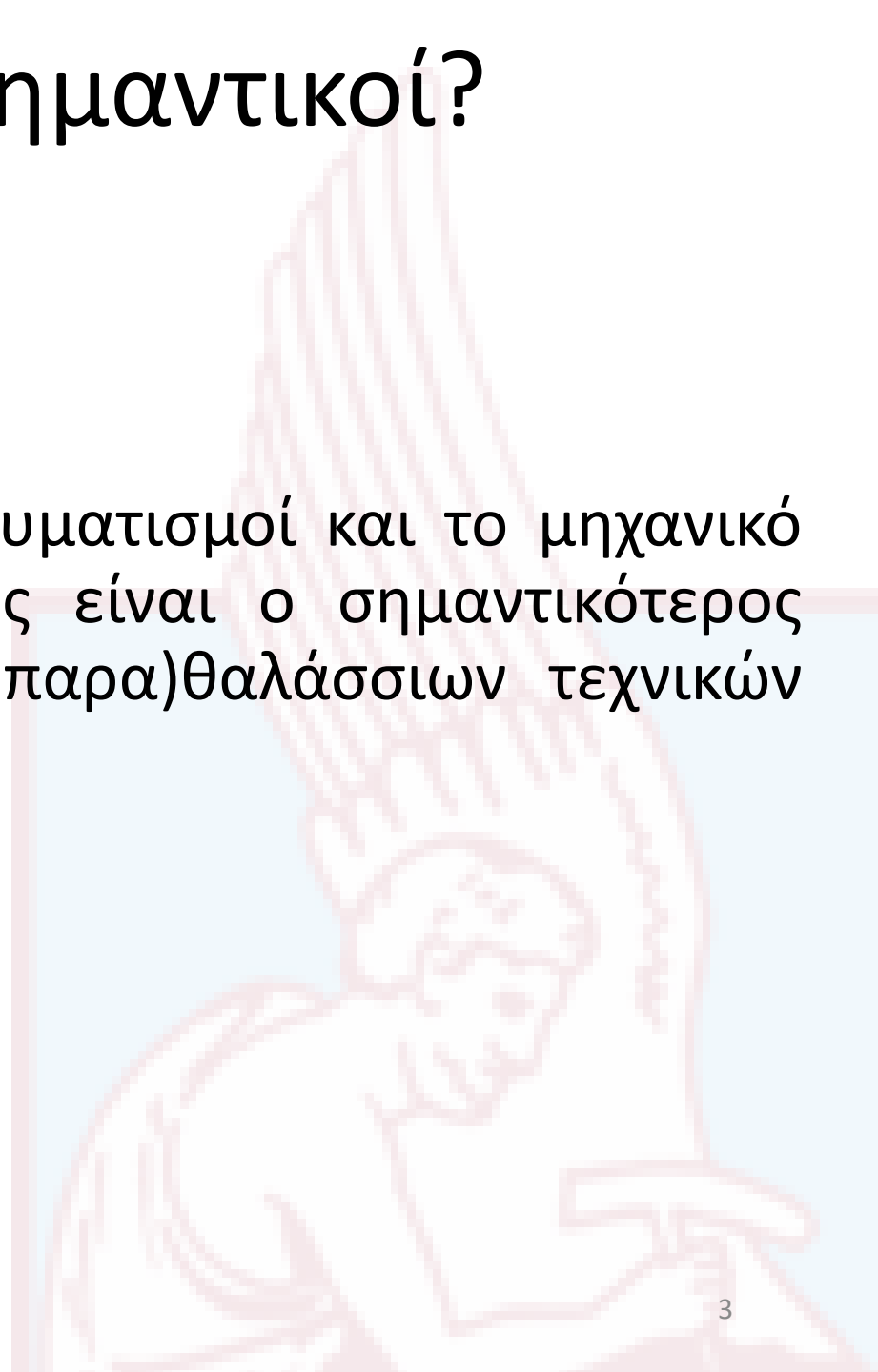
Κυματισμοί

Ταξινόμηση - Θεωρία



Γιατί είναι σημαντικοί?

Οι επιφανειακοί θαλάσσιοι κυματισμοί και το μηχανικό ενεργειακό περιεχόμενό τους είναι ο σημαντικότερος παράγοντας φόρτισης των (παρα)θαλάσσιων τεχνικών έργων.



Γιατί είναι σημαντικοί?



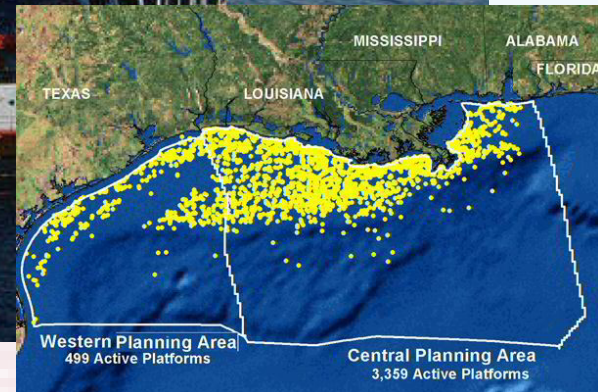
Γιατί είναι σημαντικοί?



Γιατί είναι σημαντικοί?



Γιατί είναι σημαντικοί?



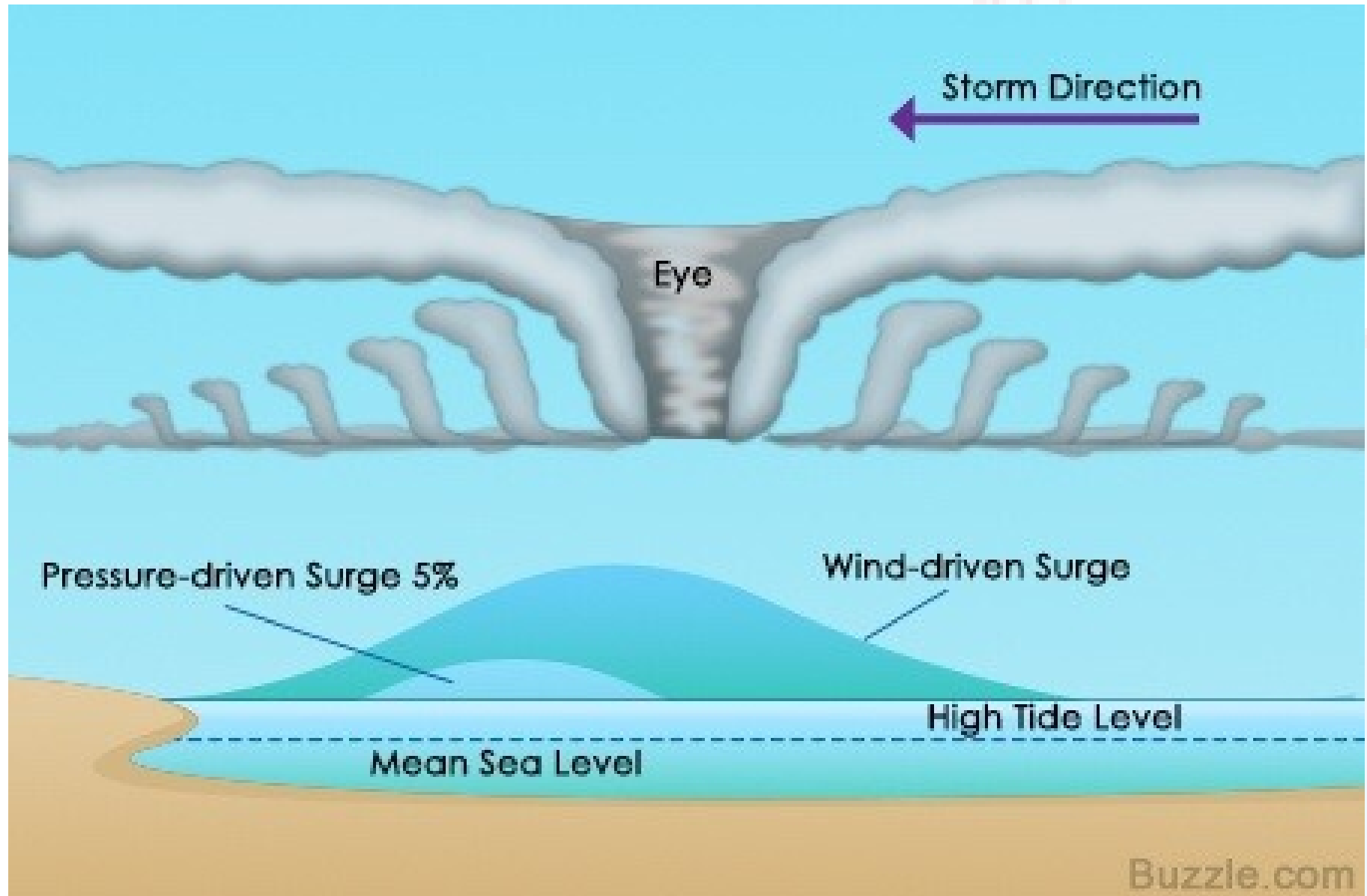
Γιατί είναι σημαντικοί?



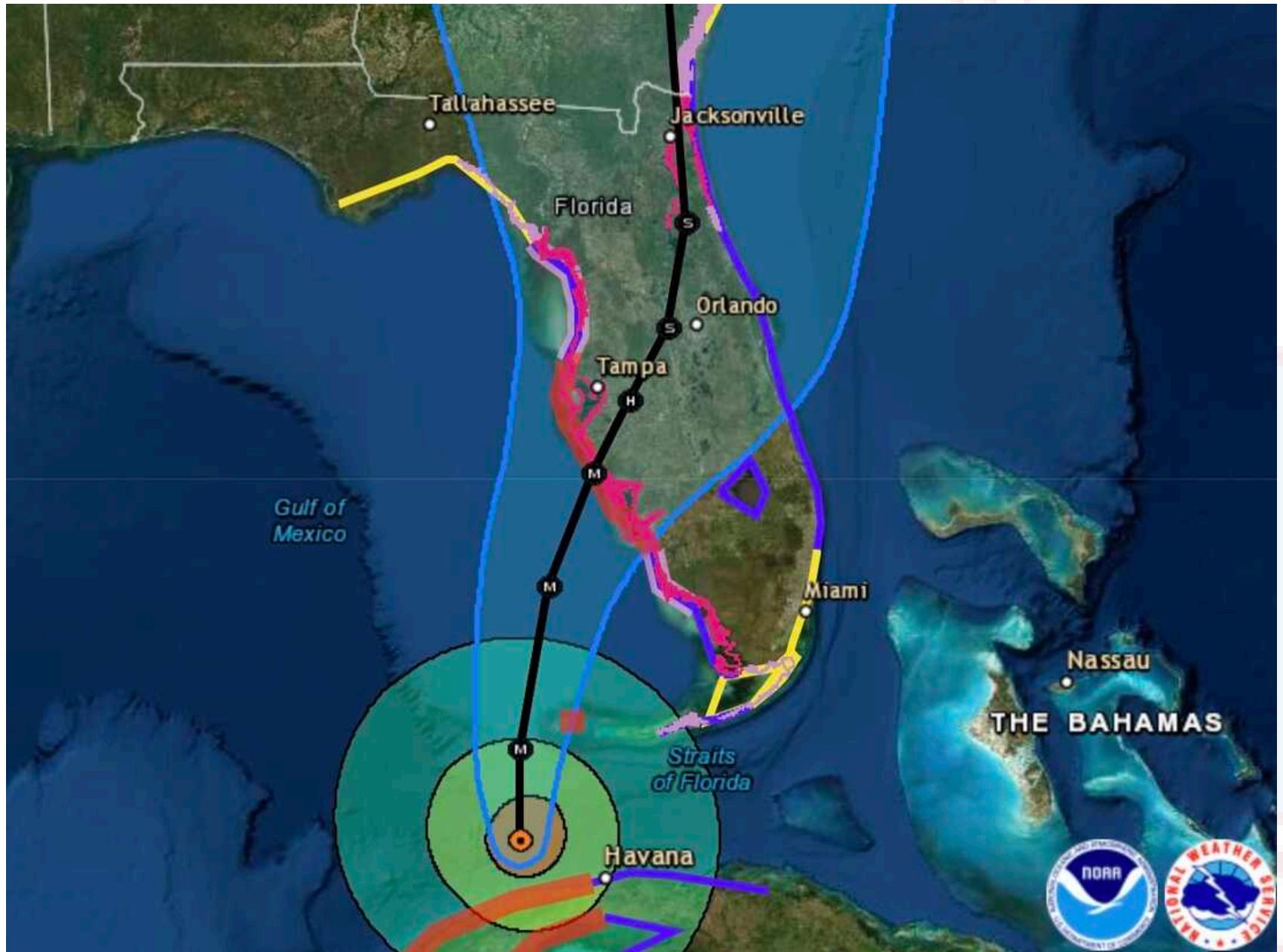
Τύποι και χαρακτηριστικά κυματισμών

Φαινόμενο	Προέλευση	Περίοδος κυματισμού
Φουσκοθαλασσιές (surge)	Ατμοσφαιρική πίεση και δράση ανέμου	1 – 30 μέρες
Παλίρροιες (tides)	Βαρυτικές δυνάμεις λόγω περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο και της Σελήνης γύρω από τη Γη	Περίπου μεταξύ 12 – 24 h
Θαλάσσιοι σεισμογενείς κυματισμοί (tsunamis)	Υποθαλάσσιοι σεισμοί, υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και υποθαλάσσια ηφαίστεια	5 – 60 mins
Κυματανάπαλη (seiches) (μεταβολές θαλάσσιας στάθμης σε γεωφυσικές λεκάνες και λιμενολεκάνες)	Συντονισμός συνιστωσών κυματισμών μεγάλης περιόδου	1 – 30 mins
Αποθάλασσες (swells)	Κυματισμοί παραγόμενοι από καταιγίδα σε μεγάλη απόσταση από την ακτή	< 40 sec
Ανεμογενείς κυματισμοί (wind generated waves)	Διατμητικές τάσεις ανέμου στην θαλάσσια επιφάνεια	< 40 sec

Φουσκοθαλασσιές (surge)



Φουσκοθαλασσιές (surge)



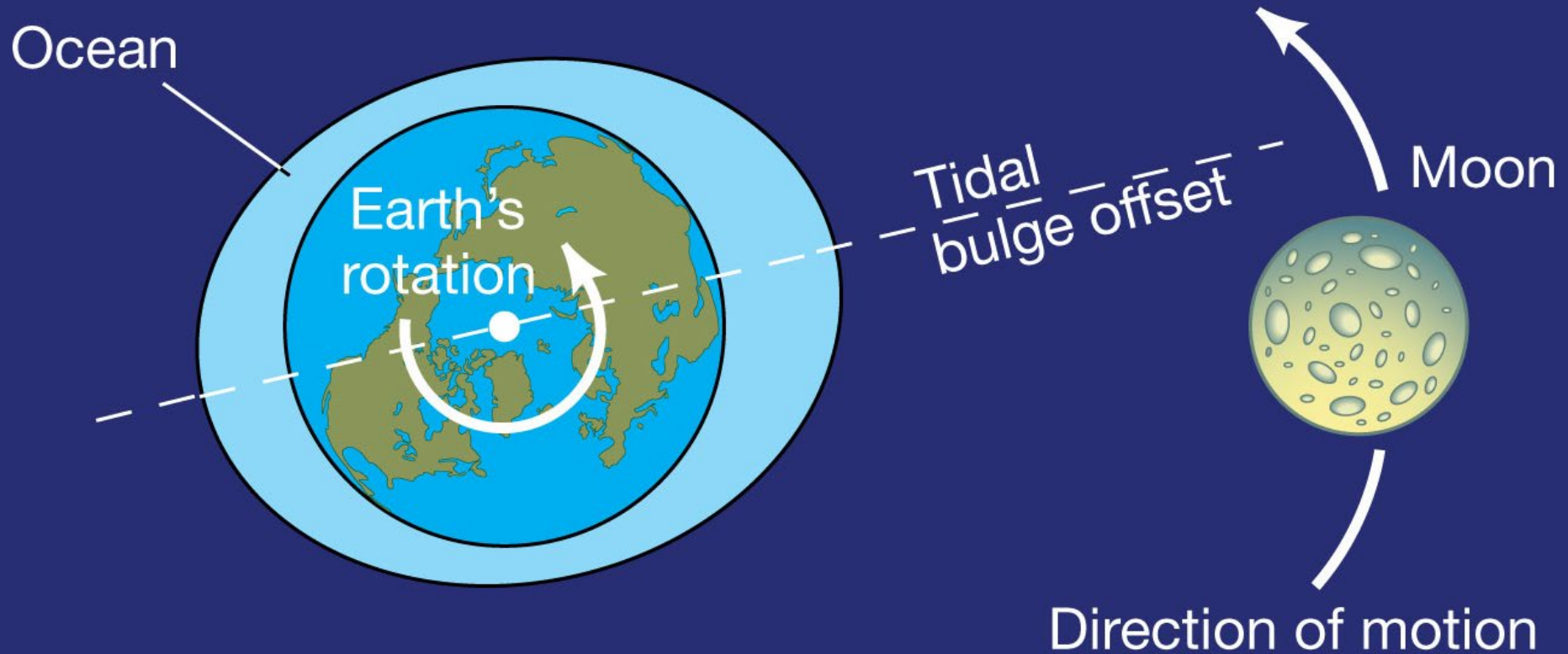
Φουσκοθαλασσιές (surge)



Φουσκοθαλασσιές (surge)



Παλίρροιες (tides)



Παλίρροιες (tides)

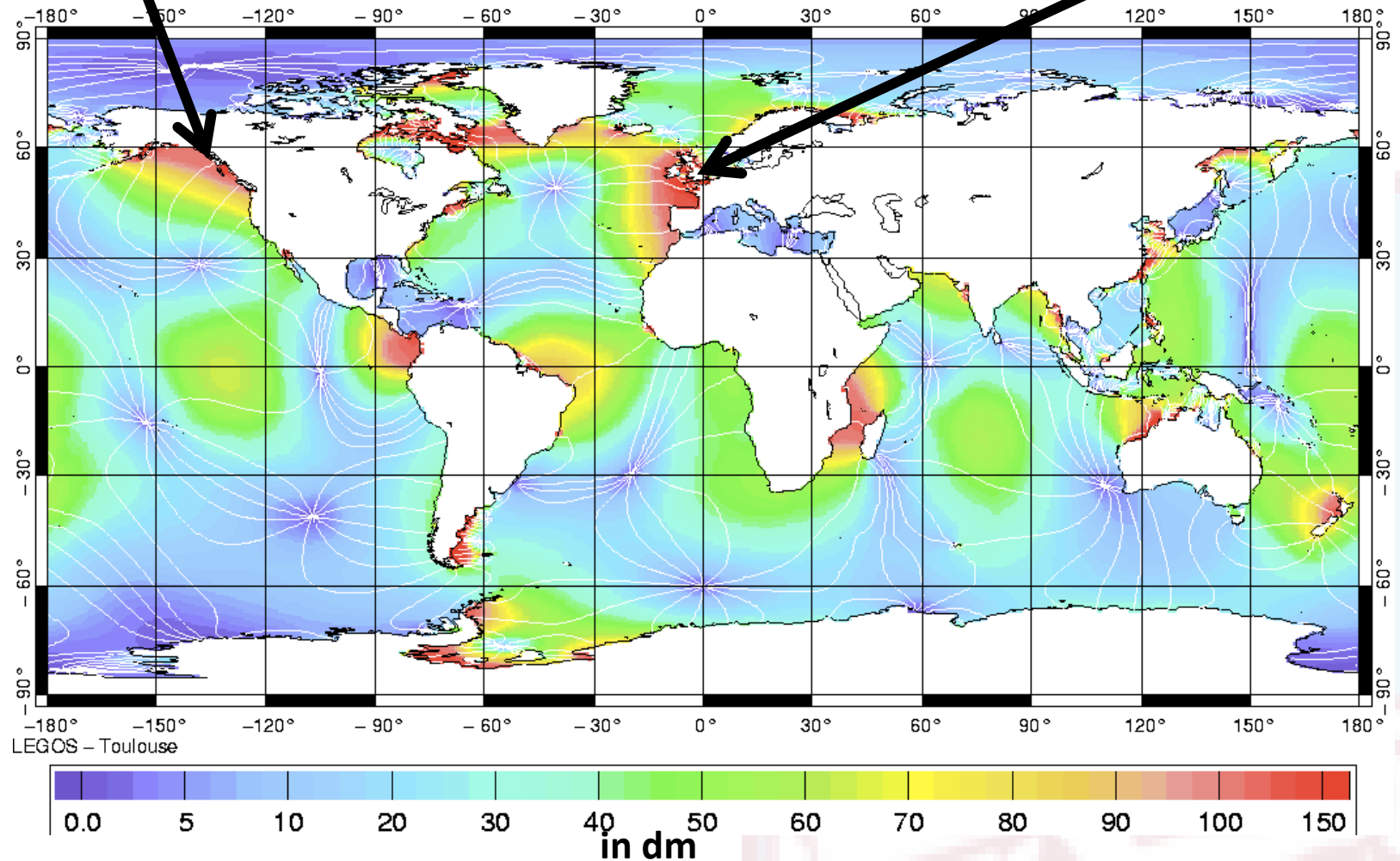
The Bay's tides

measure over 16 m

The Severn Estuary tides

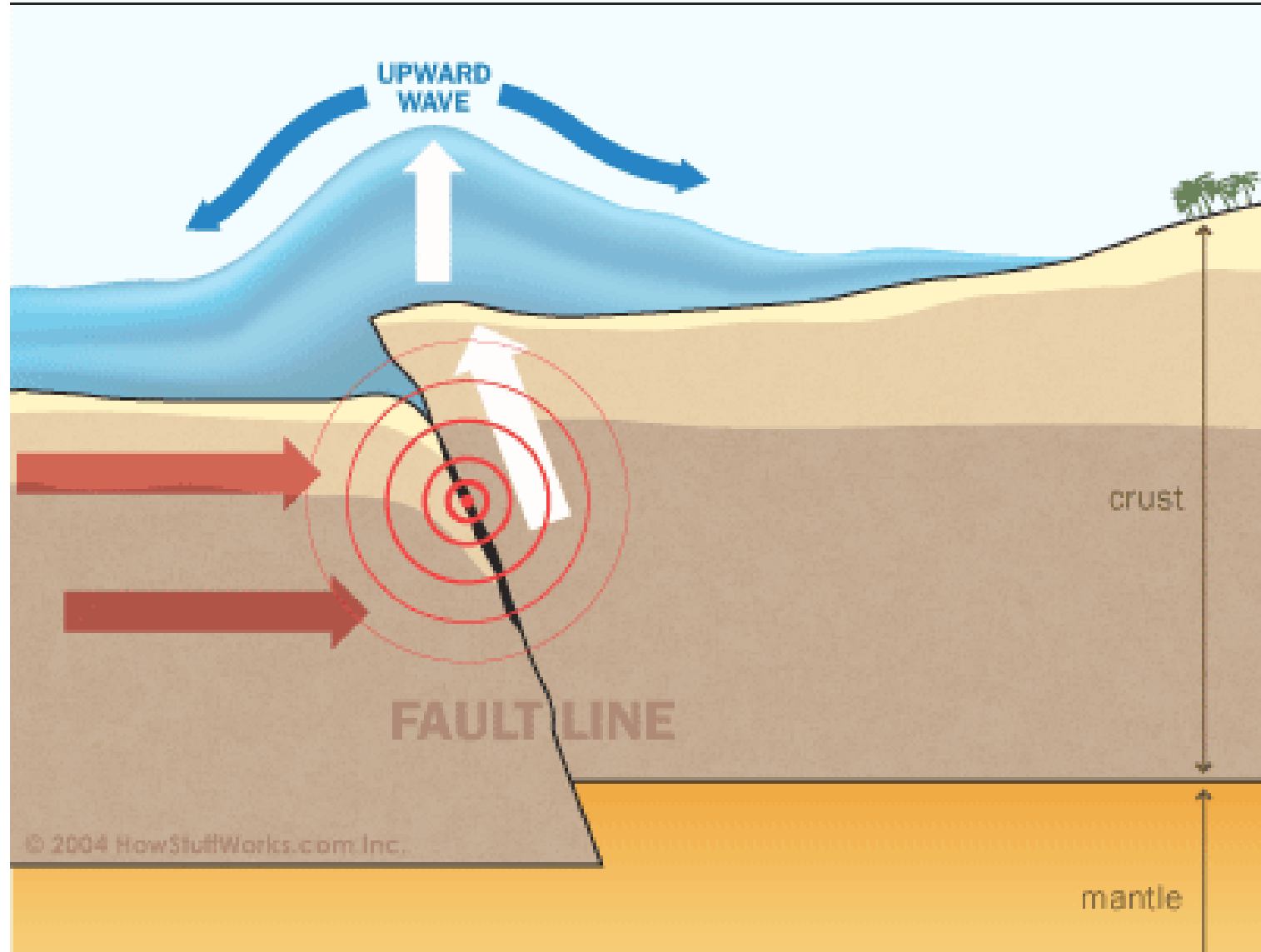
measure over 15 m

FES99 – M2 TIDAL WAVE

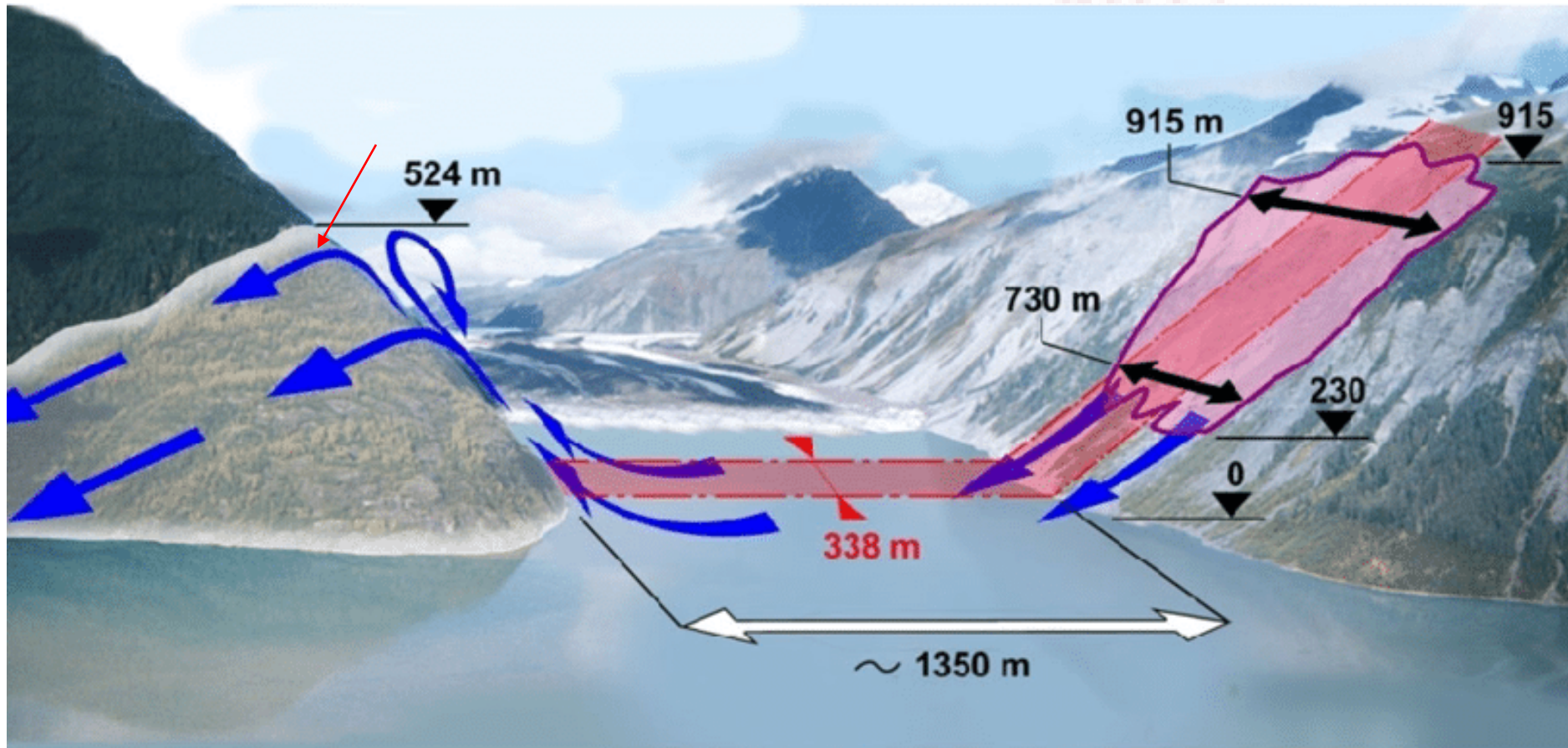


Σεισμογενή (tsunamis)

How Tsunamis Work: Tsunamigenesis



Σεισμογενή (tsunamis)



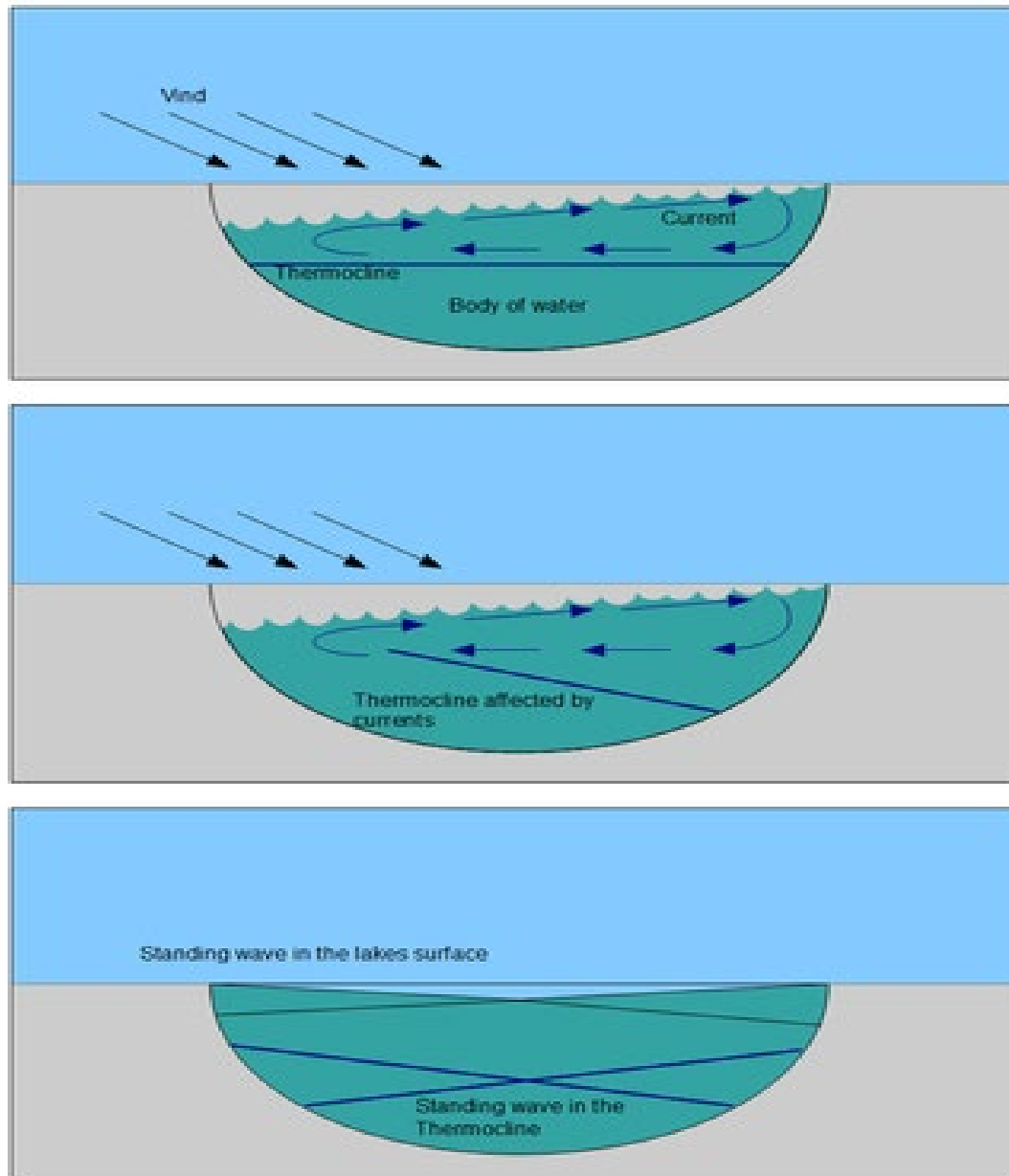
1958 tsunami event in Alaska

Σεισμογενή (tsunamis)



1958 tsunami event in Alaska

Κυματάνάπαλση (seiches)



Αποθάλλασες (swell waves)



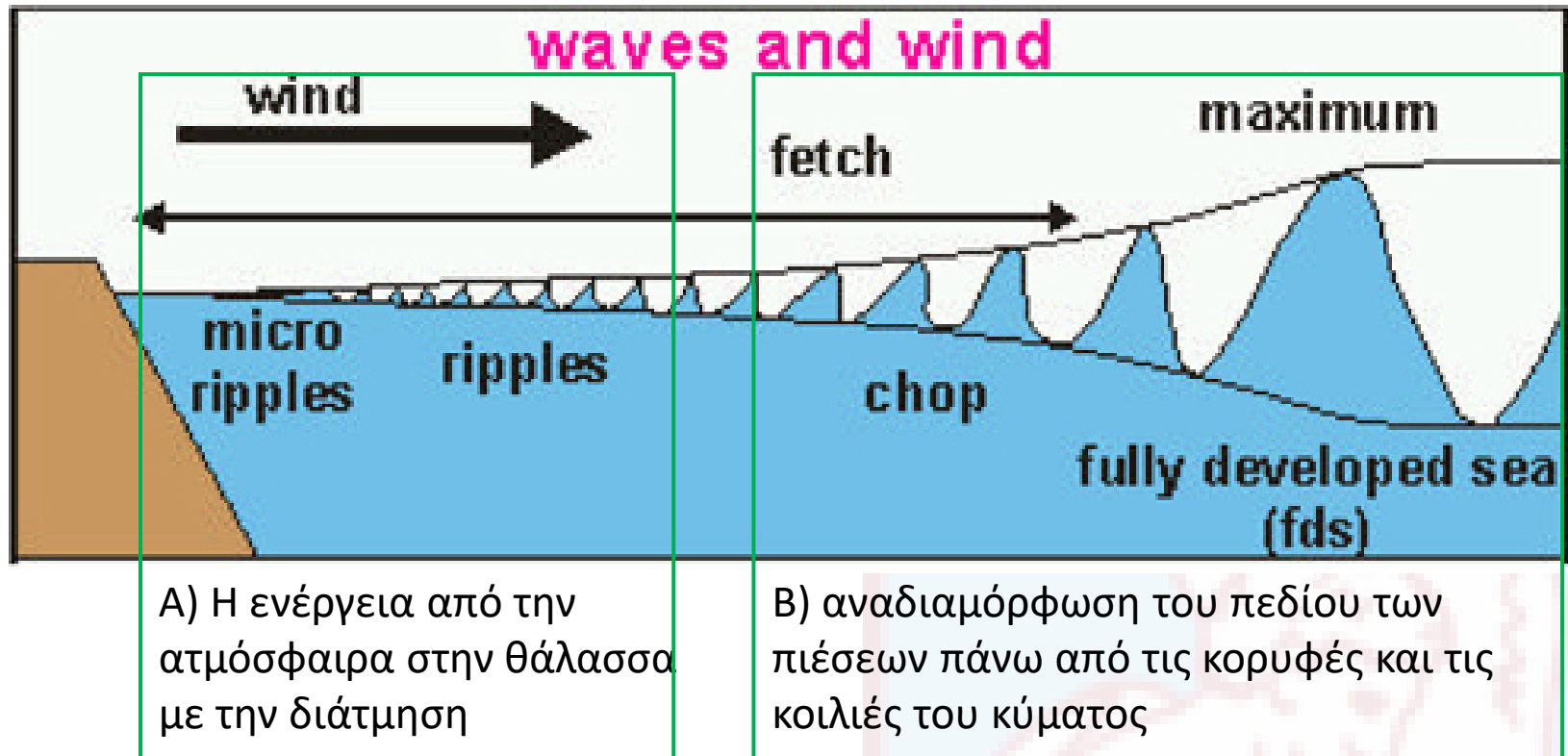
Αποθάλασες (swell waves)



Ανεμογενείς Κυματισμοί



Ανεμογενείς Κυματισμοί



Η κυματογένεση ξεκινά με γραμμική αύξηση του κύματος και συνεχίζει με εκθετικό ρυθμό.

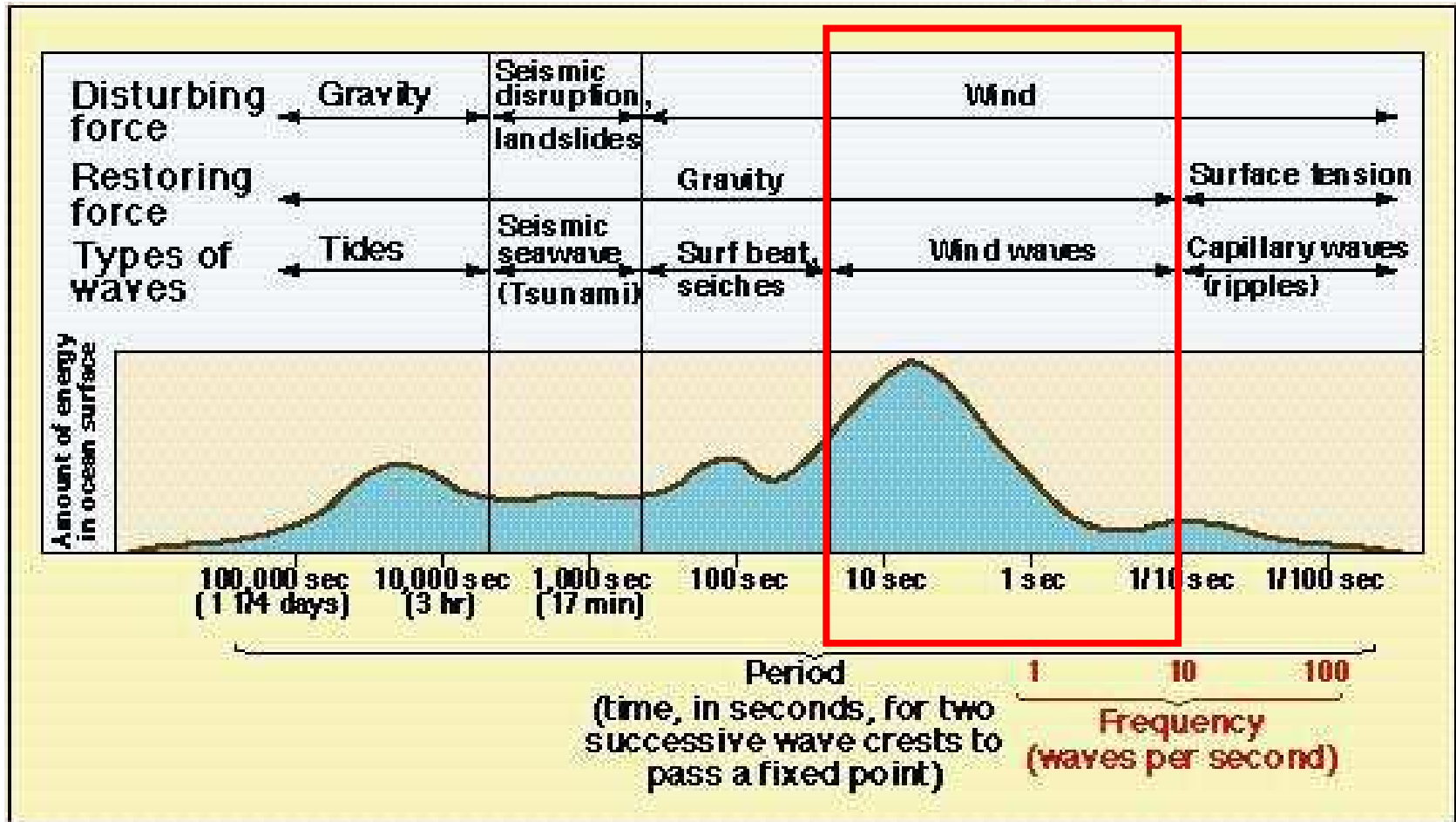
Ταξινόμηση Κυματισμών

Φαινόμενα πρώτης κατηγορίας (φουσκοθαλασσιές, παλίρροιες) → μεταβολές μέσης στάθμης θάλασσας

Κύματα τελευταίας κατηγορίας → μικρής περιόδου κύματα (ανεμογενή κύματα)

- Γενεσιουργό αίτιο δράση ανέμου
- Περίοδος ≤ 40 s
- Ανάπτυξη ανεμογενών κυματισμών σε ταχύτητες ανέμου $> 1\text{m/s}$, μετατροπή αιολικής σε κυματική ενέργεια

Φάσμα της κυματικής ενέργειας συναρτήσει της περιόδου



Γραμμική θεωρία κυματισμών - Linear wave theory ή Airy wave theory ή γραμμική θεωρία κυματισμών απειροστού πλάτους

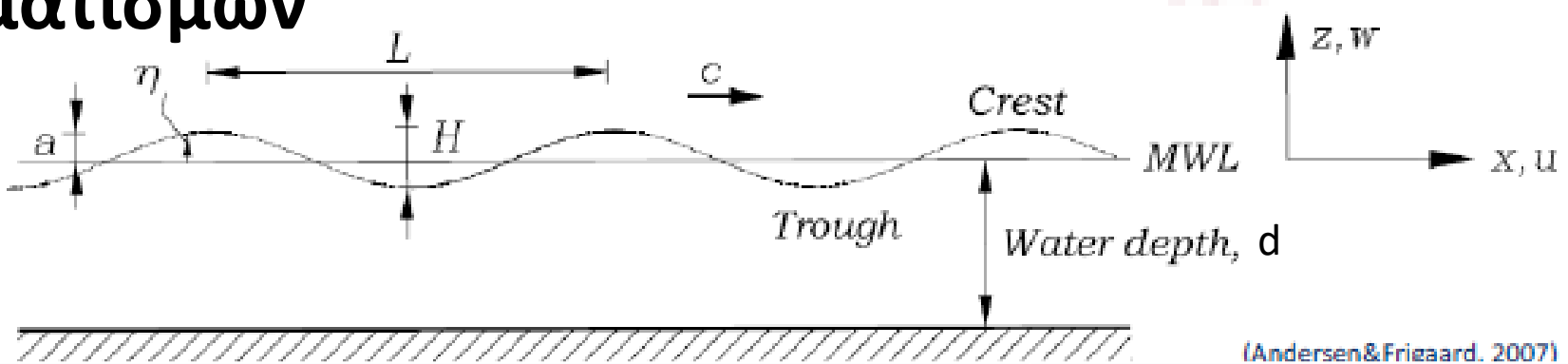
- Αποτελεί την πιο απλή κυματική θεωρία και η οποία αναπτύχθηκε από τον Airy (1845).
- Είναι εύκολη στην εφαρμογή και δίνει λογικές προσεγγίσεις των κυματικών χαρακτηριστικών για μεγάλο εύρος κυματικών παραμέτρων.
- Πολλά προβλήματα παράκτιας μηχανικής μπορούν να αντιμετωπιστούν με ευκολία και σχετική ακρίβεια με τη χρήση της συγκεκριμένης θεωρίας.
- Βασική παραδοχή της είναι ότι το ύψος κύματος είναι πολύ μικρότερο του βάθους (νερού) και του μήκους κύματος

Παραδοχές και συνθήκες γραμμικής θεωρίας

- Το υγρό είναι ομοιογενές και ασυμπίεστο - η πυκνότητα ρ παραμένει σταθερή
- Η επιφανειακή τάση θεωρείται αμελητέα
- Η επίδραση Coriolis λόγω περιστροφής της Γης θεωρείται αμελητέα
- Η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι ομοιόμορφη και σταθερή
- Το υγρό είναι ιδανικό (το ιξώδες είναι αμελητέο)
- Η ροή είναι αστρόβιλη (~~$\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0$~~)
- Ο βυθός αποτελεί ένα οριζόντιο, σταθερό και αδιαπέραστο όριο
=> η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο βυθό είναι μηδενική
- Το ύψος του κύματος είναι μικρό και η κυματομορφή παραμένει αμετάβλητη στο χώρο και το χρόνο
- Τα κύματα είναι δισδιάστατα ή «απειροστού πλάτους» (2D, long crested waves)

Η γραμμική θεωρία κυμάτων μπορεί να προσεγγίσει σε καλό βαθμό και τα σεισμογενή τσουνάμια, όσο αυτά βρίσκονται σε μεγάλα θαλάσσια βάθη.

Συμβολισμοί και ορισμοί παραμέτρων γραμμικών κυματισμών



(Andersen&Frizaard. 2007)

H	ύψος κύματος (απόσταση κοίλου και κορυφής)	ω	γωνιακή συχνότητα ($\omega = 2\pi/T$)
a	πλάτος κύματος (μισό ύψος) (amplitude)	k	“αριθμός” κύματος ($k = 2\pi/L$)
η	ανύψωση στάθμης της θάλασσας, $\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$	d	το βάθος του υγρού από τη μέση στάθμη
L	μήκος κύματος (απόσταση μεταξύ δύο κορυφών)	$S = \frac{H}{L}$	η κλίση του κύματος
T	περίοδος κύματος (η χρονική διάρκεια στην οποία εμφανίζονται δύο διαδοχικές κορυφές από το ίδιο σημείο)	u	οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας των μορίων του νερού
$C = \frac{L}{T}$	φασική ταχύτητα κυματισμού (ταχύτητα διάδοσης)	w	κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας των μορίων του νερού

Γενικές σχέσεις επίλυσης των κυματικών παραμέτρων

- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (I)$$

- Εξίσωση διασποράς (κύματα με διαφορετική περίοδο ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα)

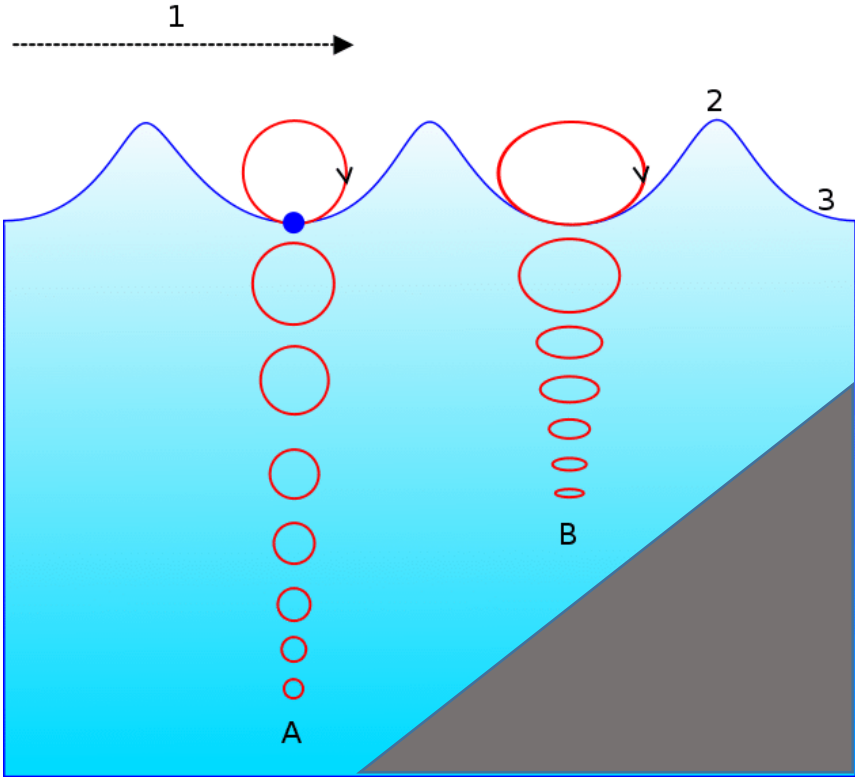
$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (II)$$

- Μήκος κύματος

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (III)$$

- όπου d το βάθος και g η επιτάχυνση της βαρύτητας

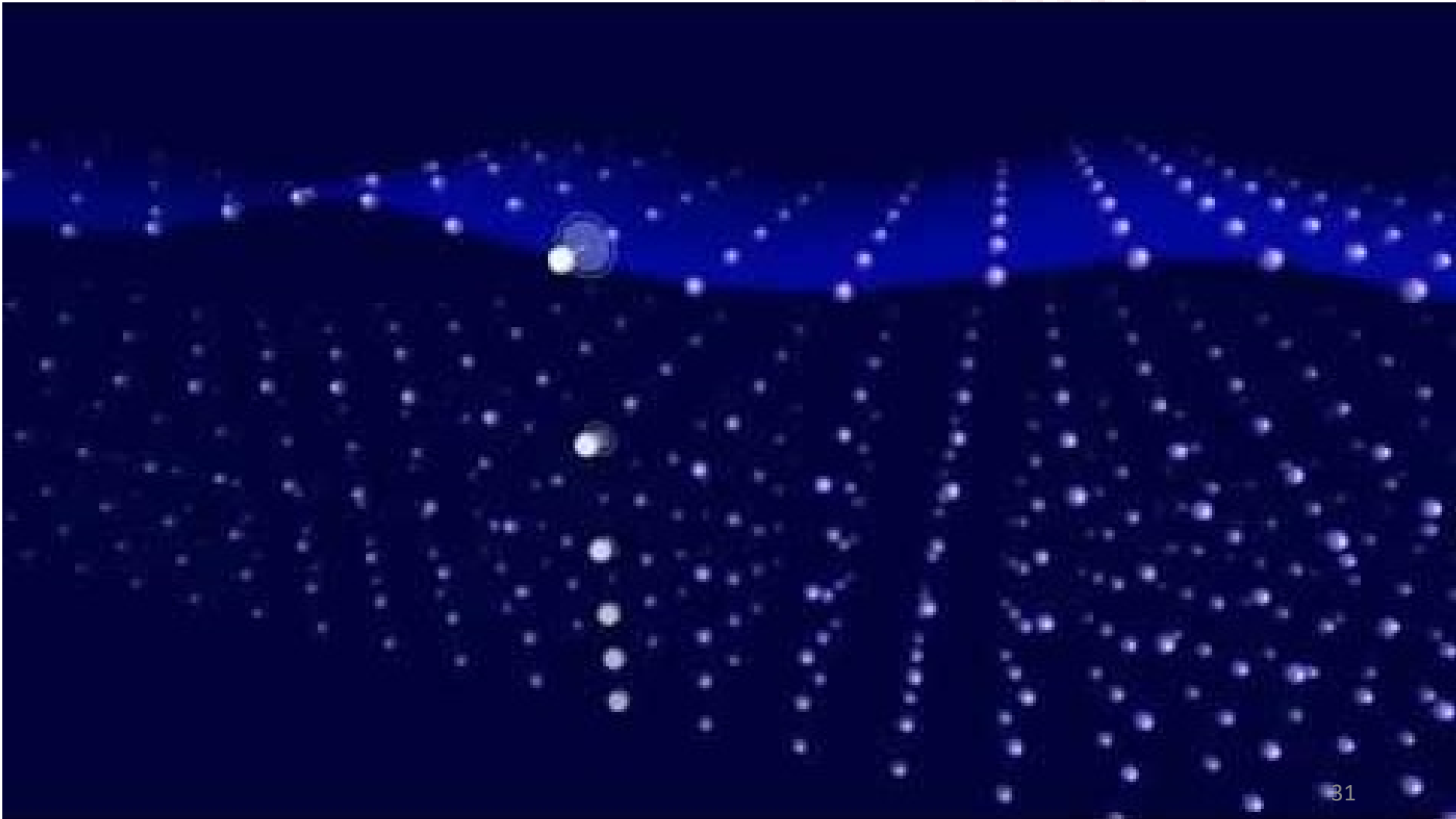
Κίνηση μορίων νερού



Αν και τα κύματα μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις, το ίδιο το νερό δείχνει μικρή οριζόντια κίνηση. Είναι η ενέργεια του κύματος που μεταδίδεται, όχι το νερό ως μάζα.

Η κυκλική κίνηση συμβαίνει επειδή τα κύματα του νερού περιέχουν συνιστώσες ταχύτητας τόσο κατά το διαμήκη όσο και τον κάθετο άξονα, οδηγώντας σε κυκλική κίνηση.

Κίνηση μορίων νερού



Συνιστώσες της ταχύτητας

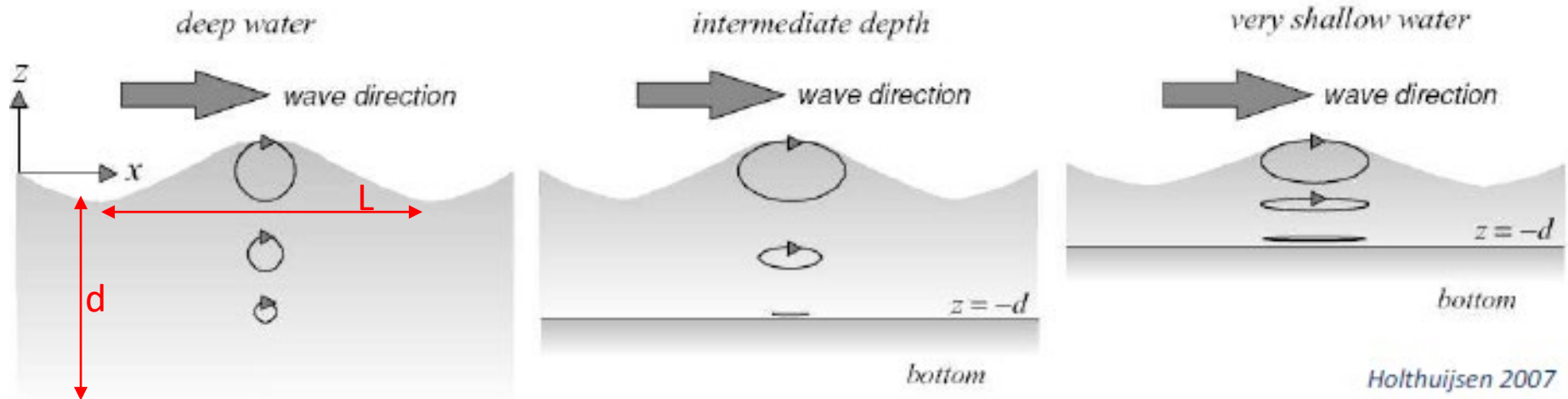
- Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας των μορίων του νερού
(μέγιστη σε κοιλίες και κορυφές μηδενική στο μηδέν της στάθμης)

$$u = \frac{\pi H \cosh(k(d+z))}{T \sinh(kd)} \cos(kx + \omega t), \quad \theta = kx - \omega t \quad (IV)$$

- Κάθετη συνιστώσα ταχύτητας των μορίων του νερού
(μέγιστη στο μηδέν της στάθμης μηδενική σε κοιλίες και κορυφές)

$$w = \frac{\pi H \sinh(k(d+z))}{T \sinh(kd)} \sin(kx + \omega t), \quad \theta = kx - \omega t \quad (V)$$

Εξισώσεις βαθιών και ρηχών νερών



$$\frac{d}{L} \geq 0.5$$

$$0.5 > \frac{d}{L} \geq 0.05$$

$$\frac{d}{L} \leq 0.05$$

- «Βαθιά» νερά: **βάθος να είναι τουλάχιστον το μισό του μήκους κύματος**
- Στα βαθιά νερά τα σωματίδια του νερού διαγράφουν κυκλικές τροχιές, ενώ σταδιακά οι τροχιές με τη μείωση του βάθους μετατρέπονται σε ελλειπτικές στα ενδιάμεσα νερά. Στα ρηχά νερά οι ελλειπτικές τροχιές γίνονται όλο και πιο πεπλατυσμένες έως ότου έρθουν σε επαφή με τον πυθμένα, όπου πλέον έχουν μετατραπεί σε μια παλινδρόμηση

Τι συμβαίνει με τις παραμέτρους του κύματος καθώς αυτό πλησιάζει την ακτή = μικρότερα βάθη?

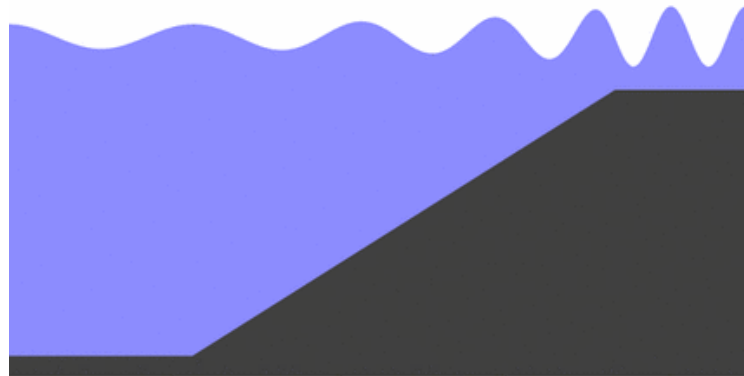
- 1) Κατά την προσέγγιση ενός κύματος στην ακτή από τα βαθιά στα ρηχά νερά, το μήκος του κύματος μειώνεται.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

- 2) Αφού μειώνεται το μήκος, μειώνεται και η ταχύτητα:

$$C = \frac{L}{T} \text{ ή Ταχύτητα κύματος} = \frac{\text{Μήκος κύματος}}{\text{Περίοδος}}$$

- 3) Όμως για να «διατηρηθεί» η ενέργεια που μεταφέρεται από το κύμα, η μείωση στην ταχύτητα «εξισορροπείται» από την αύξηση στο ύψος του κύματος:



Εξισώσεις βαθιών και ρηχών νερών

Βαθιά νερά, $\frac{d}{L} > 0.5$

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (VIa)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (VIb)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (VIc)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (VI d)$$

Ρηχά νερά, $\frac{d}{L} < 0.05$

$$C = \sqrt{gd} \quad (VIIa)$$

$$L = CT = T\sqrt{gd} \quad (VIIb)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{kd} \cos(kx - \omega t) \quad (VIIc)$$

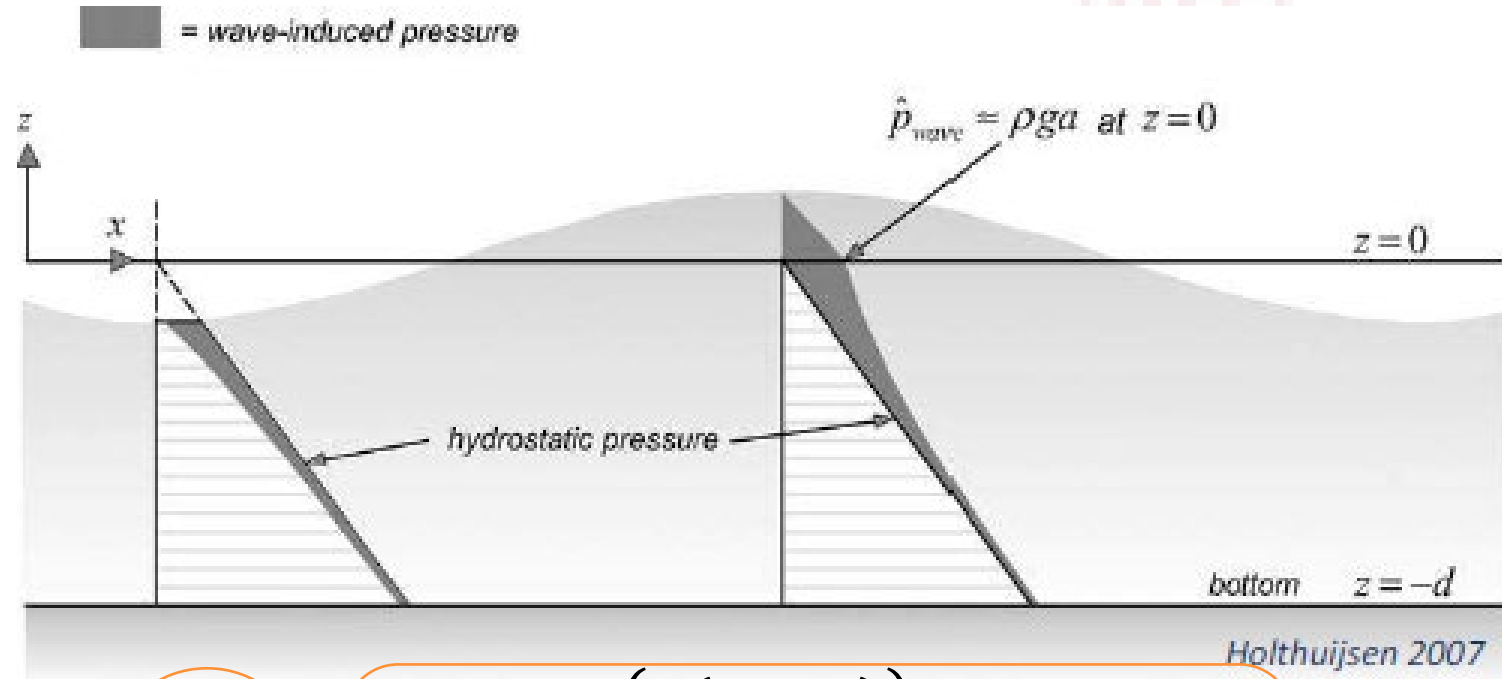
$$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(kx - \omega t) \quad (VIId)$$

Αλλά τι συμβαίνει στα ενδιάμεσα νερά?

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) = \frac{d}{L} \tanh kd$$

Γνωρίζοντας το μήκος κύματος στα βαθιά, μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος στα ενδιάμεσα νερά

Κατανομή της πίεσης συναρτήσει του βάθους

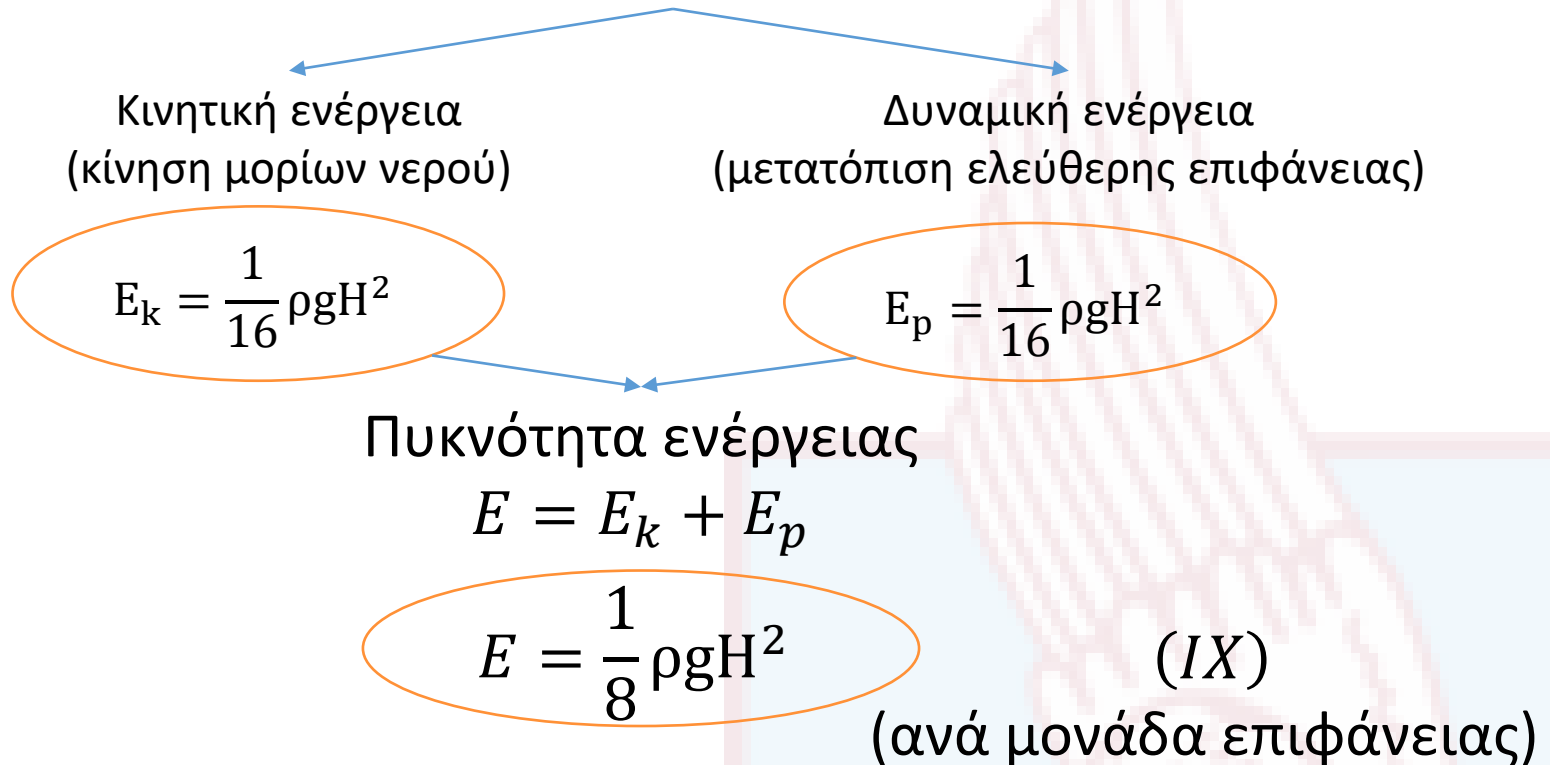


$$p = -g\rho z + \frac{\rho g H \cosh(k(d+z))}{2 \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (VIII)$$

Υδροστατική συνιστώσα
(ανεξάρτητη από το κύμα)

Υδροδυναμική συνιστώσα
Είναι σε φάση με την ανύψωση της στάθμης
Μειώνεται με το βάθος

Μηχανική ενέργεια και ισχύς κύματος



Ισχύς κύματος $\rightarrow P = \frac{En}{T} \quad (X)$, όπου $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$
(βαθιά νερά) $0.5 < n < 1$ (ρηχά νερά)

Βιβλιογραφία

- Dean R.G. & Dalrymple R.A., *Water Wave Mechanics for Scientists and Engineers*, 1991, World Scientific Publishing
- Holthuijsen L.H., *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, 2007, Cambridge University Press
- Kamphuis J.W., *Introduction to Coastal Engineering and Management*, 2000, World Scientific Publishing
- Sorensen R.M., *Basic Coastal Engineering* (3rd Edition), 2006, Springer
- U.S.A.C.E., *Coastal Engineering Manual*, 2002