



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε το σύνδεσμο: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

# ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Ι

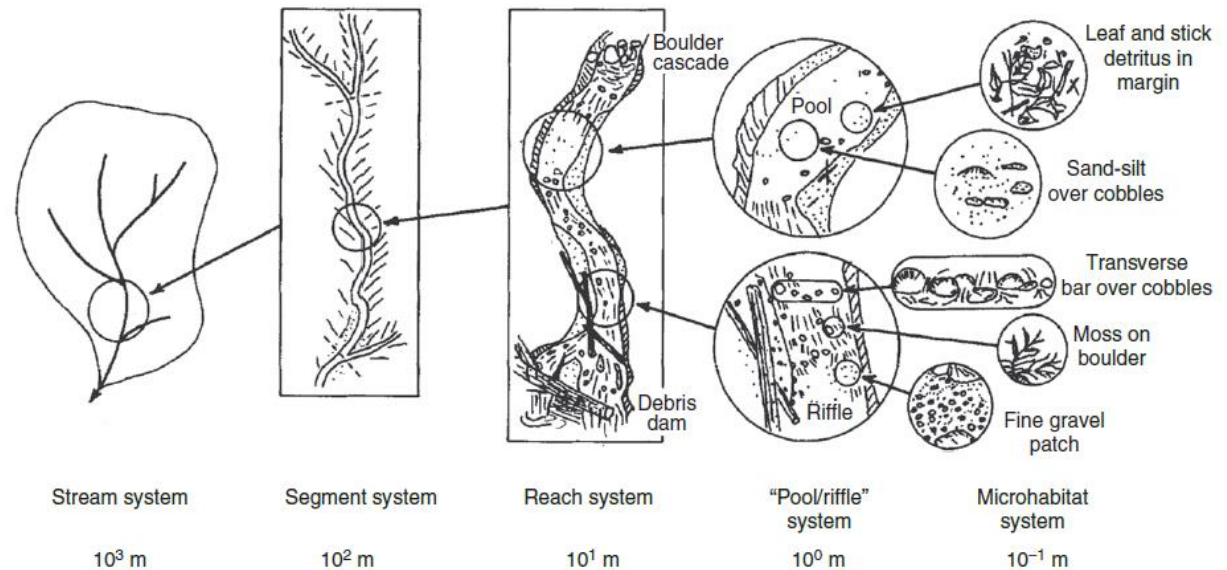
*Μηχανική των φερτών υλών*

Δρ. Βασίλης Μπέλλος

# Εισαγωγή

- Κίνηση και τη συμπεριφορά των φερτών υλών σε δύο χωρικές κλίμακες

- Λεκάνη απορροής
- Τμήμα ποταμού



**Πηγή:** Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (2013). Geomorphological classification of rivers. In: Shroder, J. (Editor in chief), Wohl, E. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, USA, 9, Fluvial Geomorphology, 730-767.

# Ορισμοί

- **Μεταφορά στερεής ύλης...**
  - Άργιλος-Ιλύς
  - Άμμος
  - Χαλίκια-Κροκάλες
- **... μέσω του υδρογραφικού δικτύου**
  - Ορεινά ρέματα
  - Ποτάμια
- **... και με τους εξής μηχανισμούς**
  - Σύρση στον πυθμένα
  - Αιωρούμενα
  - Επιπλέοντα

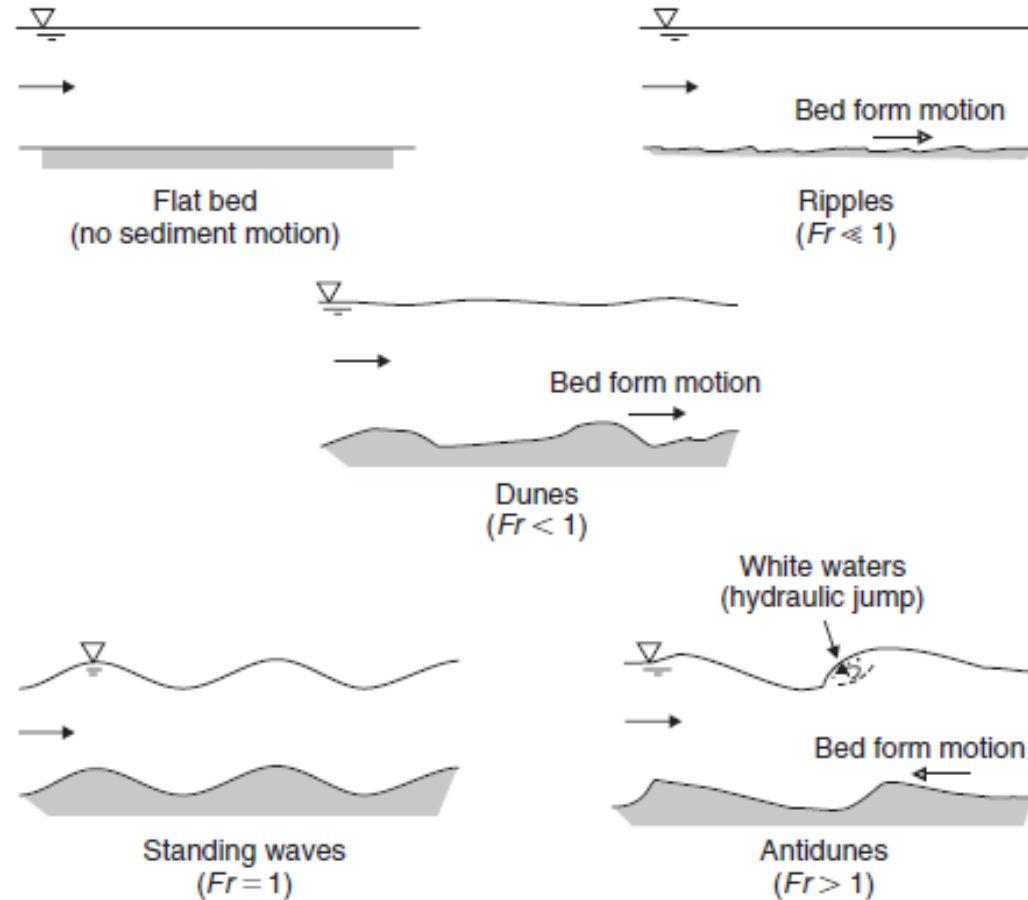
# Σχηματισμός πυθμένα

- Από μια διάμετρο και πάνω: μη συνεκτικό υλικό
- Ο σχηματισμός πυθμένα προκύπτει
  - Πυθμένας επιδρά στη ροή (οπισθελκουσα δύναμη)
  - Ροή επιδρά στον πυθμένα (κίνηση φερτών υλών)
- Παράγοντες
  - Κλίση ρέματος
  - Βάθος ροής
  - Ταχύτητα ροής
  - Κοκκομετρία
  - Ταχύτητα καθίζησης

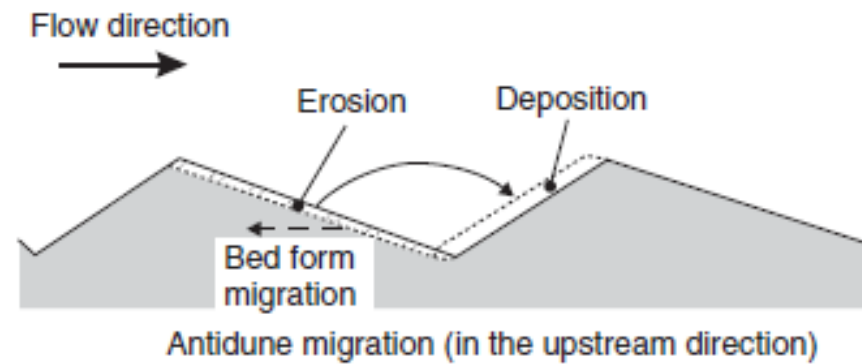
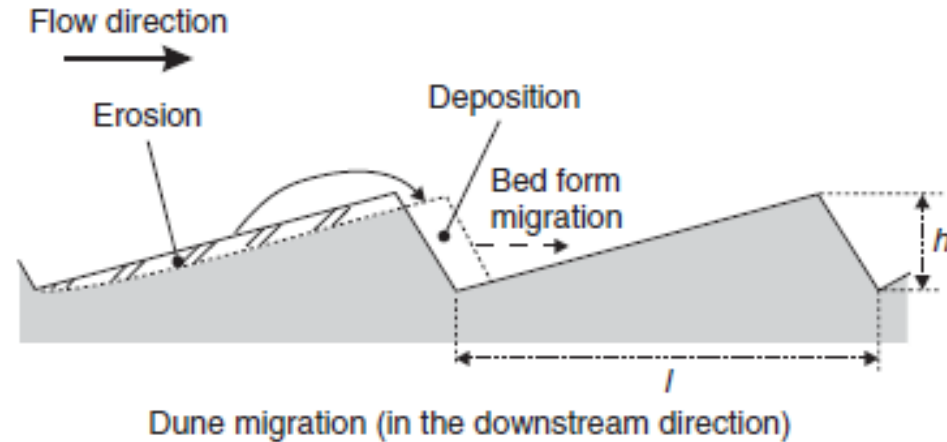
# Προβλήματα

- Απόπλυση και υποβάθμιση των εδαφών στις ορεινές ζώνες
- Πρόσχωση των πεδινών κοιτών
- Καταστροφή υδραυλικών έργων
- Διακοπή συγκοινωνίας
- Μετατόπιση κοίτης ποταμών
- Πρόσχωση λιμνών, λιμανιών, παραλιών
- Προώθηση Δέλτα στη θαλάσσια ζώνη
- Μεταφορά ρύπανσης από τους επιφανειακούς στους υπόγειους υδροφορείς

# Σχηματισμός πυθμένα



# Σχηματισμός πυθμένα



# Δίνες



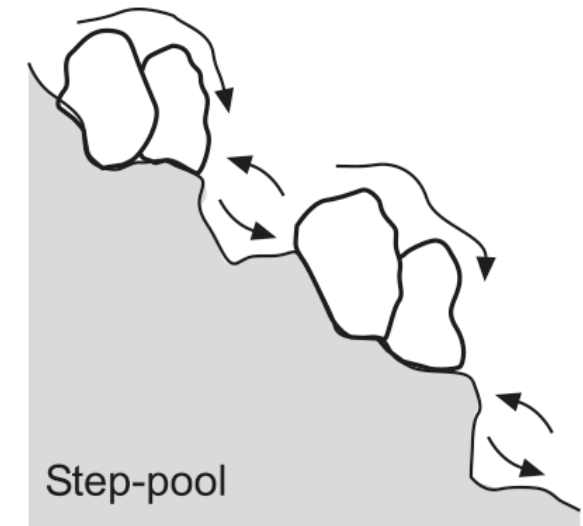


# Σχηματισμός πυθμένα

Bed form (1)	Flow (2)	Bed form motion (3)	Comments (4)
Flat bed	No Flow (or $Fr \ll 1$ )	NO	No sediment motion
Ripples	$Fr \ll 1$	D/S	Three-dimensional forms; observed also with air flows (e.g. sand ripples in a beach caused by wind)
Dunes	$Fr < 1$	D/S	Three-dimensional forms; sand dunes can also be caused by wind
Flat bed	$Fr \leq 1$	NO	Observed also with wind flow
Standing waves	$Fr = 1$	NO	Critical flow conditions; bed standing waves in phase with free-surface standing waves
Antidunes	$Fr > 1$	U/S	Supercritical flow with tumbling flow and hydraulic jump upstream of antidune crests
Chute-pools	$Fr > 1$	U/S	Very active antidunes
Step-pools	$Fr > 1$	–	Cascade of steps and pools; steps are often caused by rock bed

References: Henderson (1966) and Graf (1971).

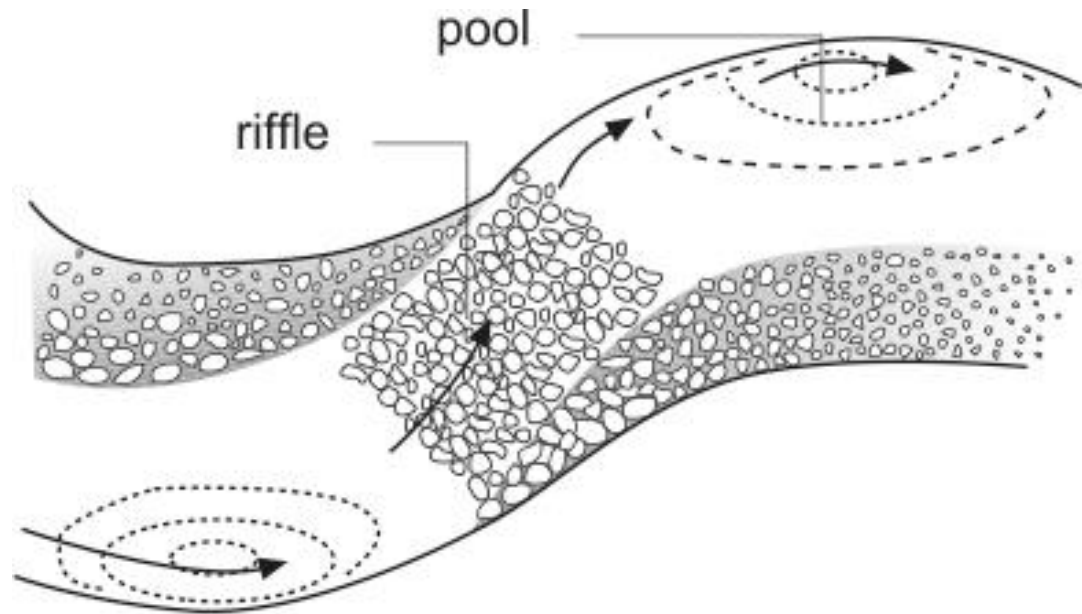
Notes: D/S = in downstream flow direction;  $Fr$  = Froude number; U/S = in upstream flow direction.



Πηγή: <https://riverstyles.com>

Πηγή: Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. 2nd ed. London: Elsevier

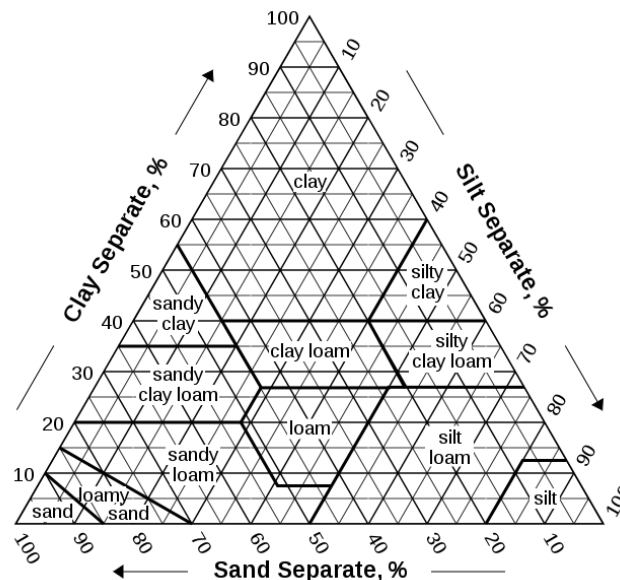
# Σχηματισμός πυθμένα



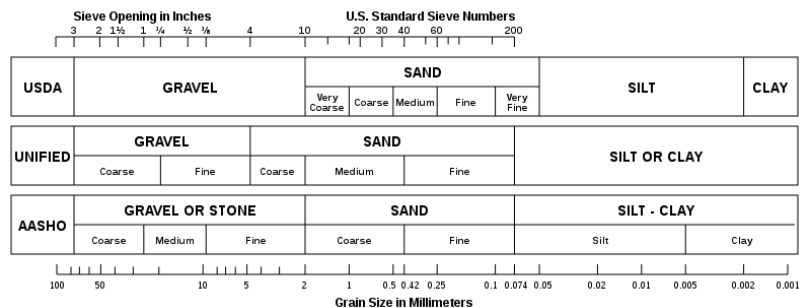
# Φυσικά χαρακτηριστικά

- Πυκνότητα νερού:  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
- Πυκνότητα χαλαζία (τυπική τιμή):  $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$
- Σχετική πυκνότητα  $s=\rho_s / \rho$
- Πυκνότητα φερτών (ξηρή κατάσταση):  $\rho_{s,dry}=(1-P_0) \rho_s$
- Πυκνότητα φερτών (υγρή κατάσταση):  $\rho_{s,wet}= P_0 \rho+(1-P_0) \rho_s$
- Παράγοντας πορώδους  $P_0$ :  $\sim 0.26-0.48$  (πρακτικά  $0.36-0.40$ )

# Συστήματα κατάταξης εδαφών



COMPARISON OF PARTICLE SIZE SCALES



# Κλίμακα φ κατά Krumbein

$$\phi = -\frac{\ln(d_s)}{\ln(2)}$$

φ scale

φ scale	Size range (metric)	Size range (approx. inches)	Aggregate name (Wentworth class)	Other names
<-8	>256 mm	>10.1 in	Boulder	
-6 to -8	64-256 mm	2.5-10.1 in	Cobble	
-5 to -6	32-64 mm	1.26-2.5 in	Very coarse gravel	Pebble
-4 to -5	16-32 mm	0.63-1.26 in	Coarse gravel	Pebble
-3 to -4	8-16 mm	0.31-0.63 in	Medium gravel	Pebble
-2 to -3	4-8 mm	0.157-0.31 in	Fine gravel	Pebble
-1 to -2	2-4 mm	0.079-0.157 in	Very fine gravel	Granule
0 to -1	1-2 mm	0.039-0.079 in	Very coarse sand	
1 to 0	0.5-1 mm	0.020-0.039 in	Coarse sand	
2 to 1	0.25-0.5 mm	0.010-0.020 in	Medium sand	
3 to 2	125-250 μm	0.0049-0.010 in	Fine sand	
4 to 3	62.5-125 μm	0.0025-0.0049 in	Very fine sand	
8 to 4	3.9-62.5 μm	0.00015-0.0025 in	Silt	Mud
10 to 8	0.98-3.9 μm	3.8×10 <sup>-5</sup> -0.00015 in	Clay	Mud
20 to 10	0.95-977 nm	3.8×10 <sup>-8</sup> -3.8×10 <sup>-5</sup> in	Colloid	Mud

# ISO 14688:1-2017

Name			Size range (mm)	Size range (approx. in)	
Very coarse soil		Large boulder	lBo	>630	>24.8031
		Boulder	Bo	200–630	7.8740–24.803
		Cobble	Co	63–200	2.4803–7.8740
Coarse soil	Gravel	Coarse gravel	cGr	20–63	0.78740–2.4803
		Medium gravel	mGr	6.3–20	0.24803–0.78740
		Fine gravel	fGr	2.0–6.3	0.078740–0.24803
	Sand	Coarse sand	cSa	0.63–2.0	0.024803–0.078740
		Medium sand	mSa	0.2–0.63	0.0078740–0.024803
		Fine sand	fSa	0.063–0.2	0.0024803–0.0078740
Fine soil	Silt	Coarse silt	cSi	0.02–0.063	0.00078740–0.0024803
		Medium silt	mSi	0.0063–0.02	0.00024803–0.00078740
		Fine silt	fSi	0.002–0.0063	0.000078740–0.00024803
	Clay	Cl	≤0.002	≤0.000078740	

# Κοκκομετρία

- Μη ομογενή πεδία: χαρακτηριστικό μέγεθος η διάμετρος του κόκκου όπου το 50% (κατά βάρος) του υπόλοιπου εδάφους είναι πιο λεπτόκοκκο  $d_{50}$

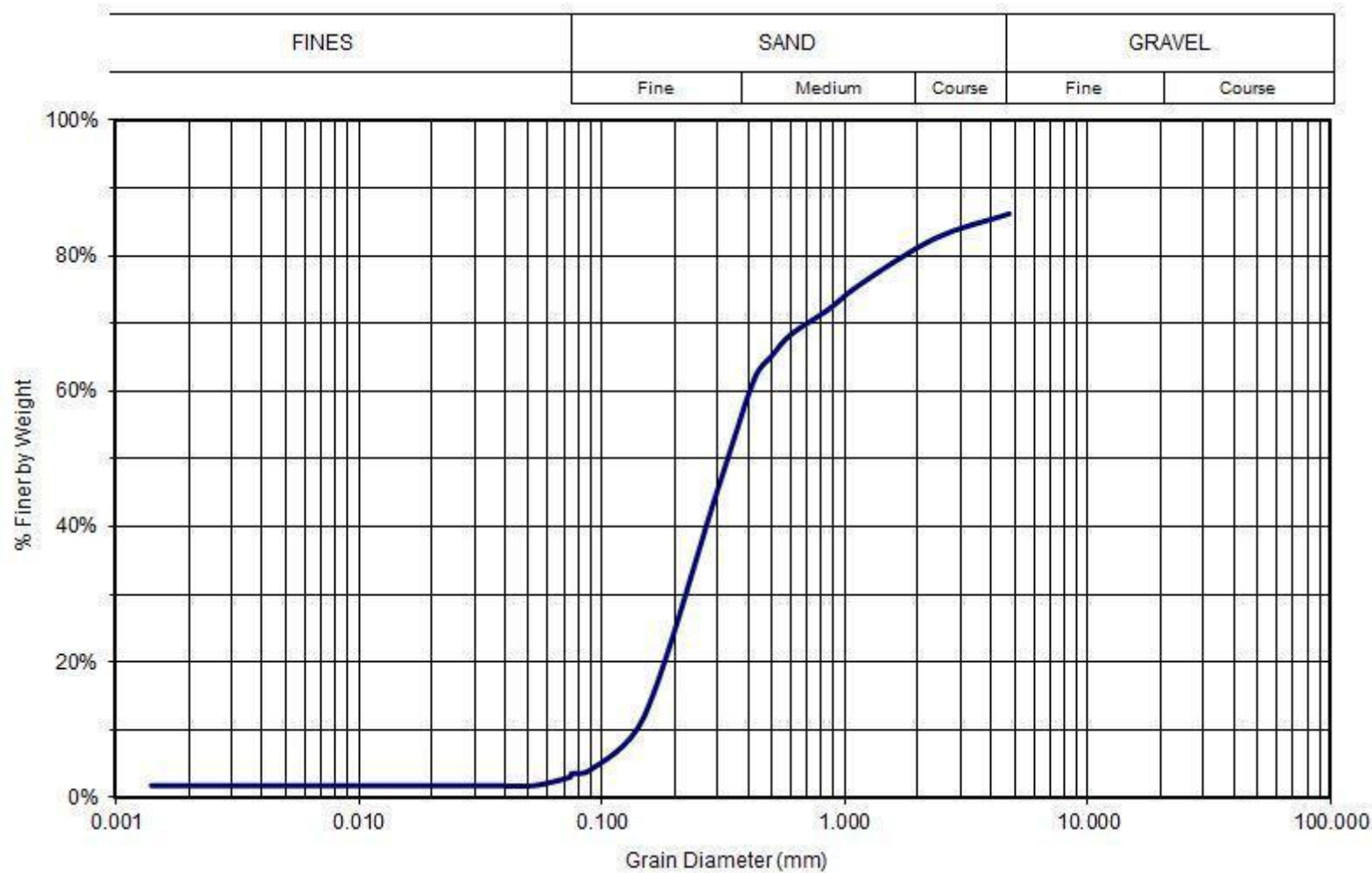
- Αντίστοιχα  $d_{10}$   $d_{25}$   $d_{75}$   $d_{90}$

- Συντελεστής κατάταξης  $S = \sqrt{\frac{d_{90}}{d_{10}}}$

- Τυπική απόκλιση (λογαριθμοκανονική κατανομή)  $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$

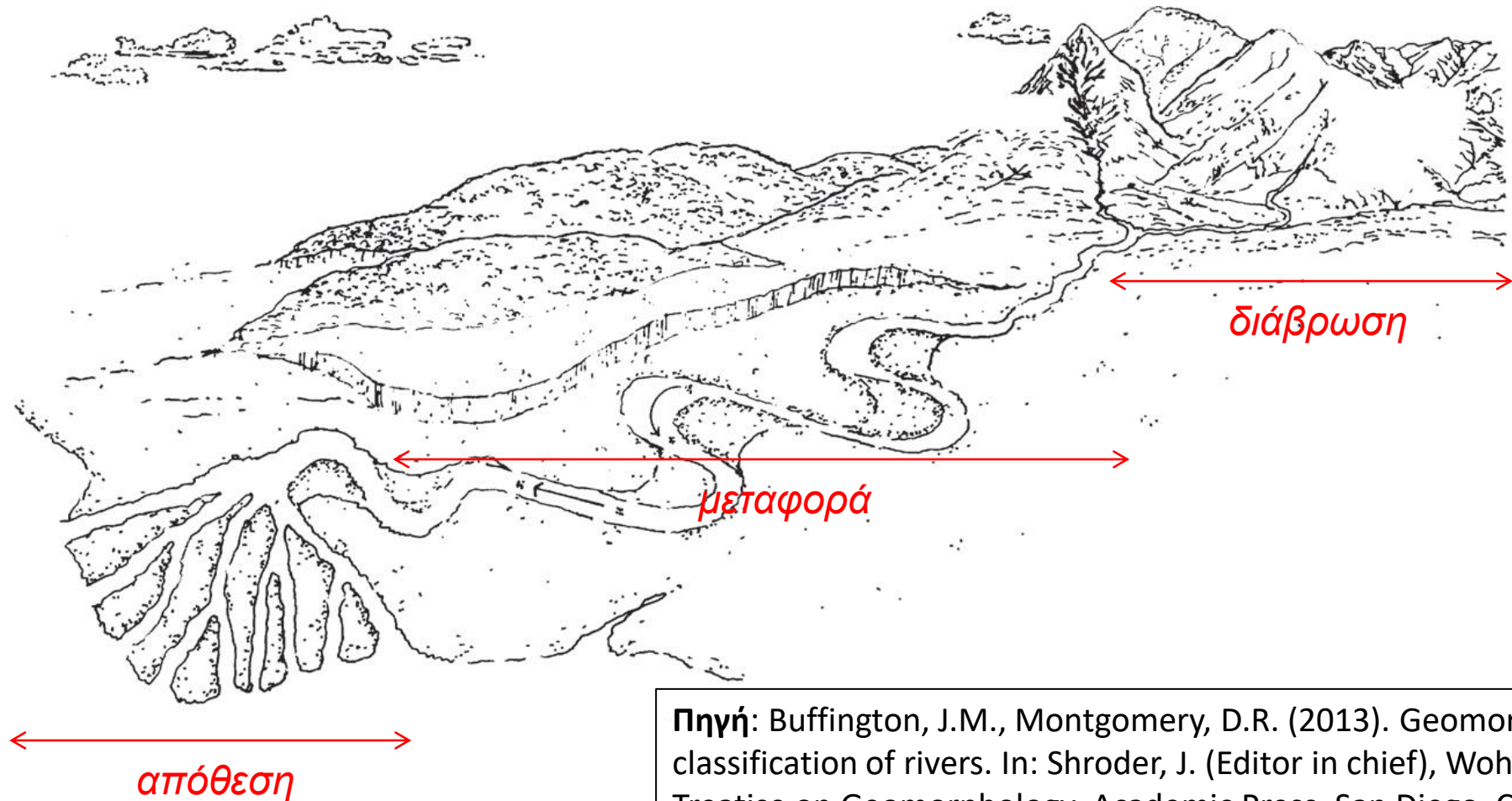
- Συντελεστής διαβάθμισης  $\frac{1}{2} \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right)$

# Κοκκομετρική καμπύλη



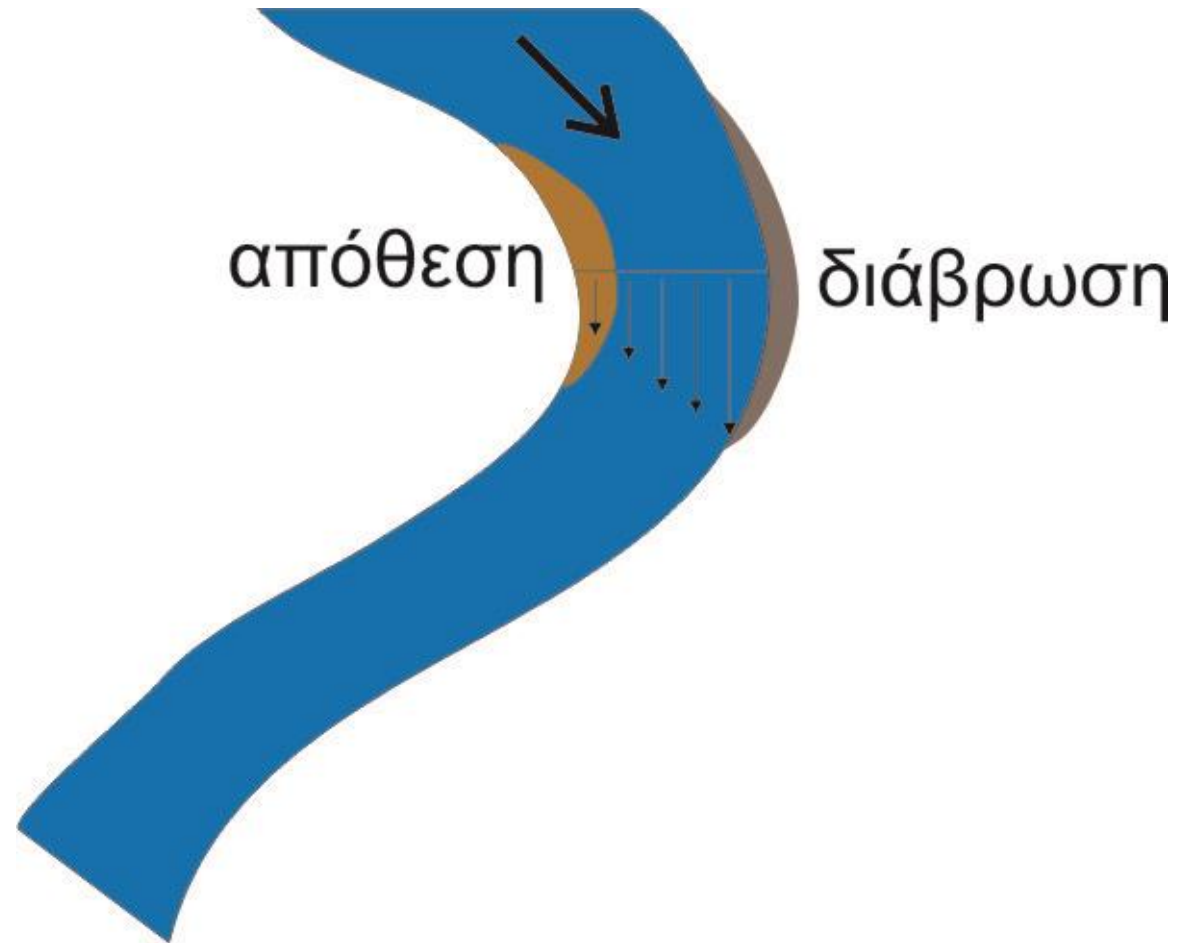


# Βασικά φαινόμενα



**Πηγή:** Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (2013). Geomorphological classification of rivers. In: Shroder, J. (Editor in chief), Wohl, E. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, USA, 9, Fluvial Geomorphology, 730-767.

# Σε όλες τις κλίμακες!



# Βασικά φαινόμενα

- **Διάβρωση**

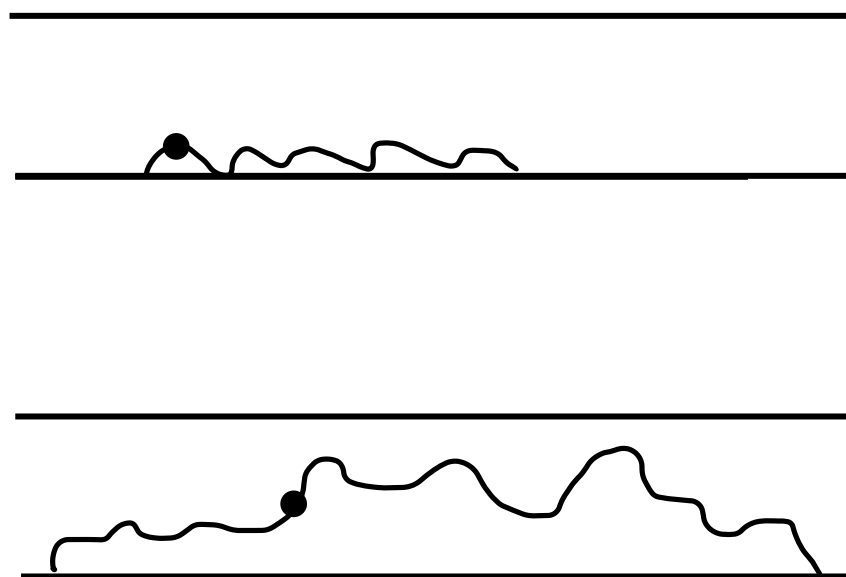
- Πετρώματα
- Αποσάθρωση

- **Μεταφορά**

- Σύρση
- Αιώρηση
- Απόπλυση

- **Απόθεση**

- Ποτάμια κοίτη
- Πλημμυρικό πεδίο



# Σύρση

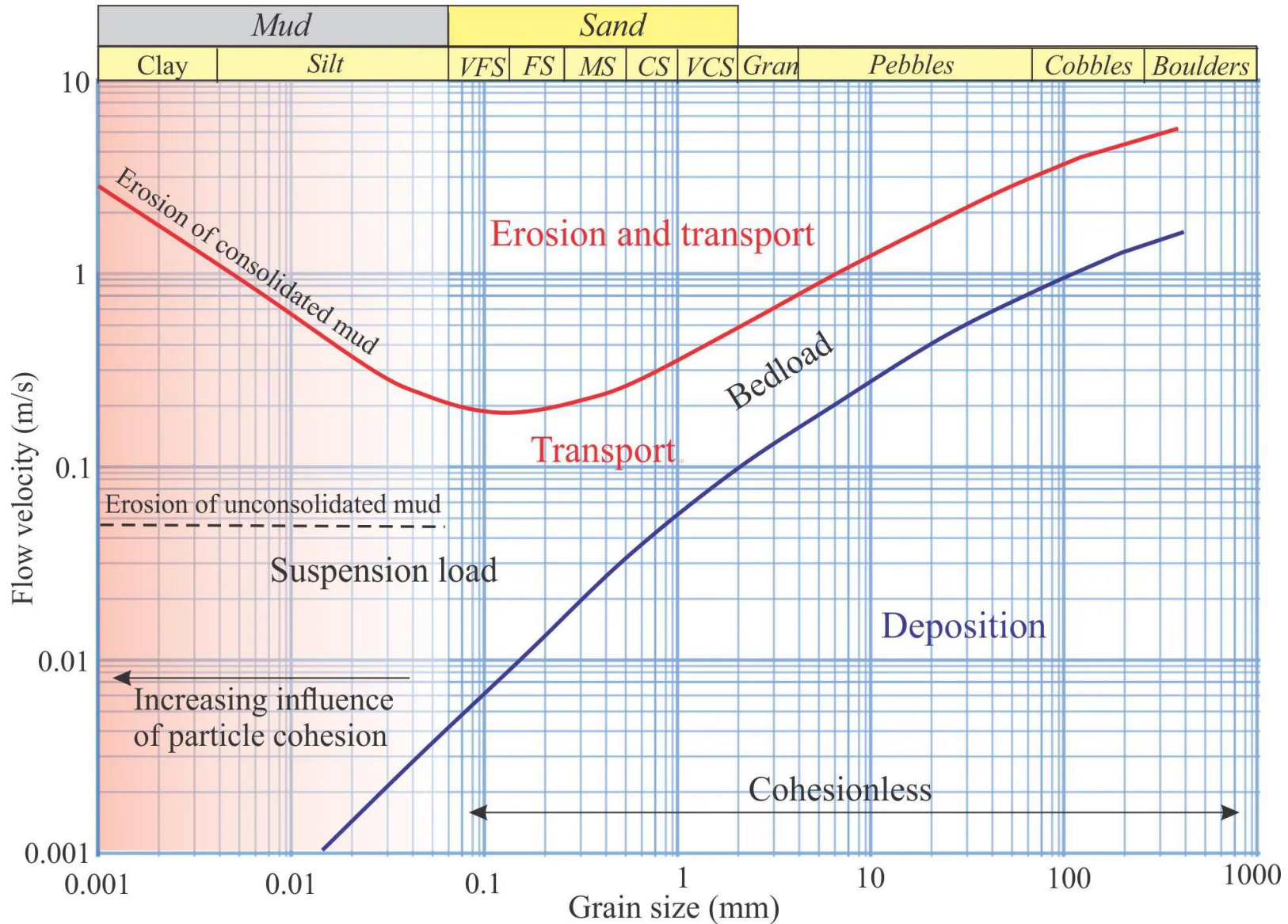


Πηγή: [http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics\\_e-book.htm](http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm)

# Σύρση+αιώρηση



Πηγή: [http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics\\_e-book.htm](http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm)



Πηγή: <https://www.geological-digressions.com>

***Απόθεση***

# Ταχύτητα καθίζησης

- Τελική ταχύτητα καθίζησης: κατάσταση ισορροπίας

$f$  (βαρύτητα, άνωση, οπισθέλκουσα, τύρβη)

- Σε ακίνητο νερό, ιδεατός κόκκος: σχήμα σφαίρας

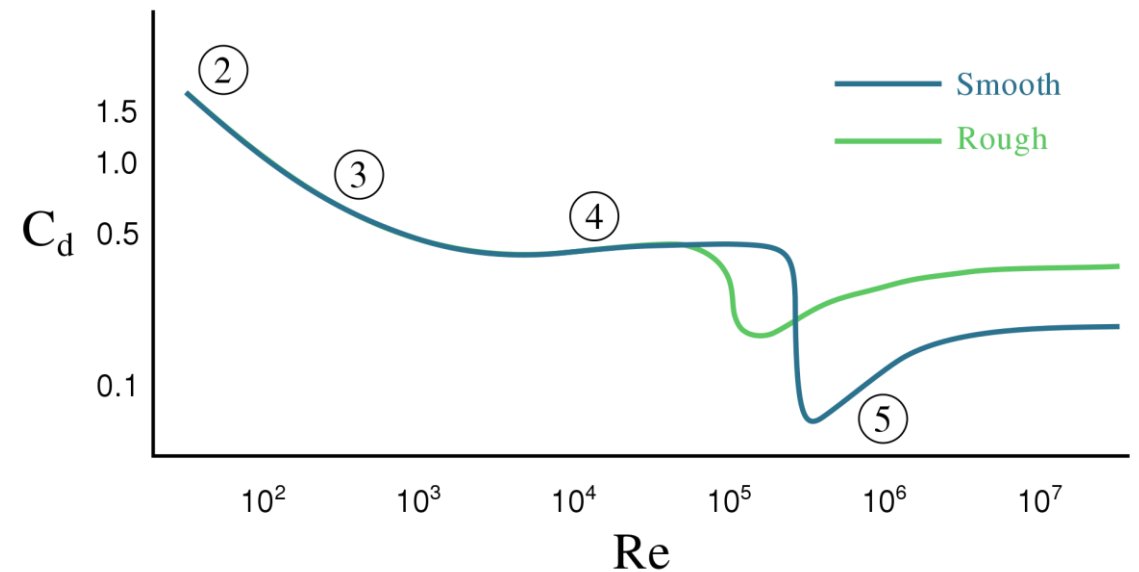
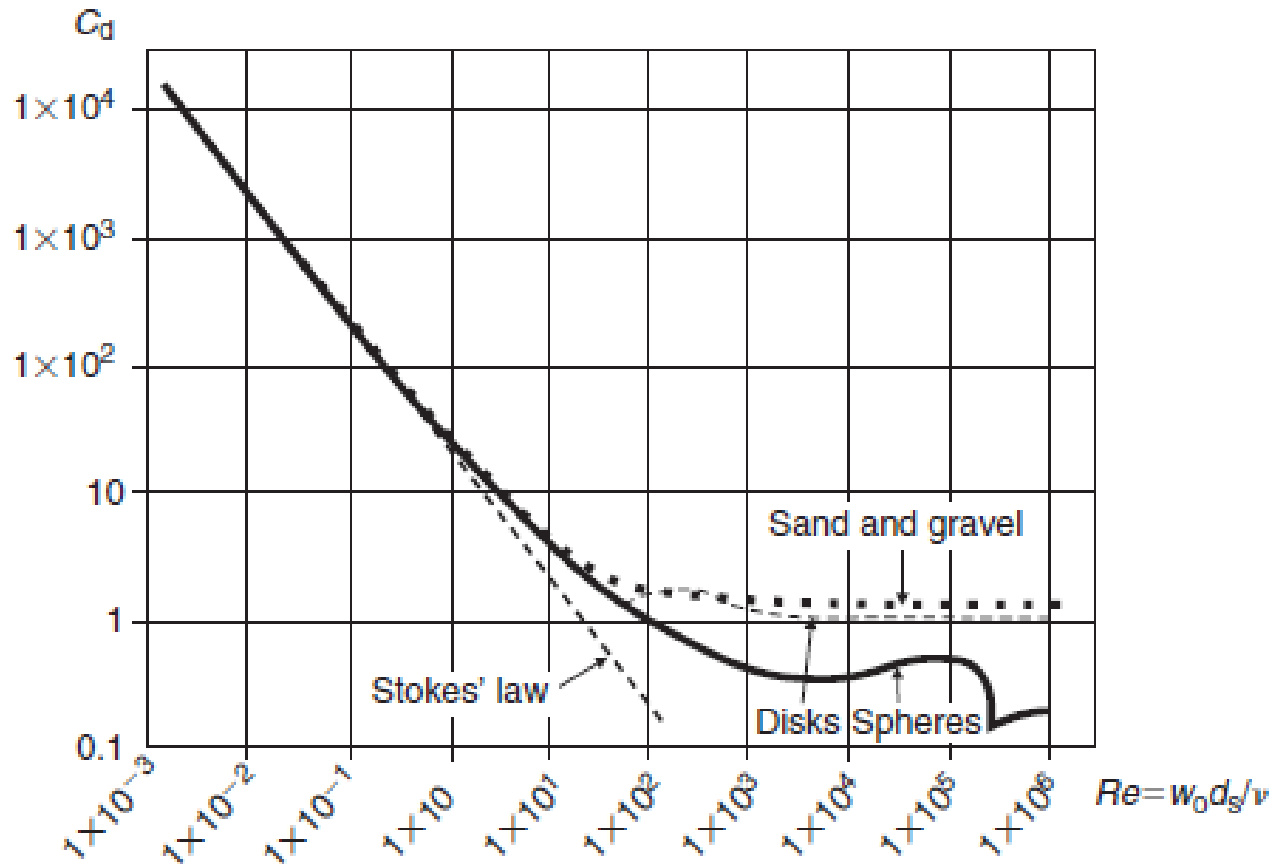
$$w_0 = -\sqrt{\frac{4gd_s}{3C_d}(s-1)}$$

- Συντελεστής οπισθέλκουσας

$$C_d = f\left(\frac{w_0 d_s}{v}; \sigma\chi\eta\mu\alpha\right)$$



# Συντελεστής οπισθέλκουσας



Πηγή: <https://en.wikipedia.org>

**Πηγή:** Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. 2nd ed. London: Elsevier

# Αν ρίξω μία πέτρα σε μία λίμνη;



*Σε πόση ώρα θα φτάσει στον πυθμένα μία πέτρα με διάμετρο 5 cm αν το βάθος ροής είναι 2 m;*

$$w_0 = - \sqrt{\frac{4gd_s}{3C_d}} (s - 1) = 0.85 \text{ m/s} \Rightarrow t = 2.35 \text{ s}$$

# Σε πραγματικές συνθήκες

- Για άμμο και χαλίκια ( $Re < 10000$ )

$$C_d = \frac{24}{Re} + 1.5$$

- Συνολική εξίσωση ταχύτητα καθίζησης (πεπλεγμένη)

$$w_0 = - \sqrt{\frac{4gd_s}{3 \left( \frac{24}{v|w_0|d_s} + 1.5 \right)}} (s - 1)$$

$d_s$ (mm)	$W_o$ (m/s)	Re	$C_d$
0.089	0.005	0.44	55
0.147	0.013	1.9	15
0.25	0.028	7	6
0.42	0.050	21	3
0.76	0.10	75	1.8
1.8	0.17	304	1.5

# Σε πραγματικές συνθήκες

- Για  $0.001 < d_s < 0.1$  mm

$$w_0 = \frac{(s - 1)gd_s^2}{18\nu}$$

- Για  $0.1 < d_s < 1$  mm

$$w_0 = \frac{10\nu}{d_s} [(1 + 0.01d_*^3)^{0.5} - 1] \quad d_* = d_s \left[ \frac{(s - 1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

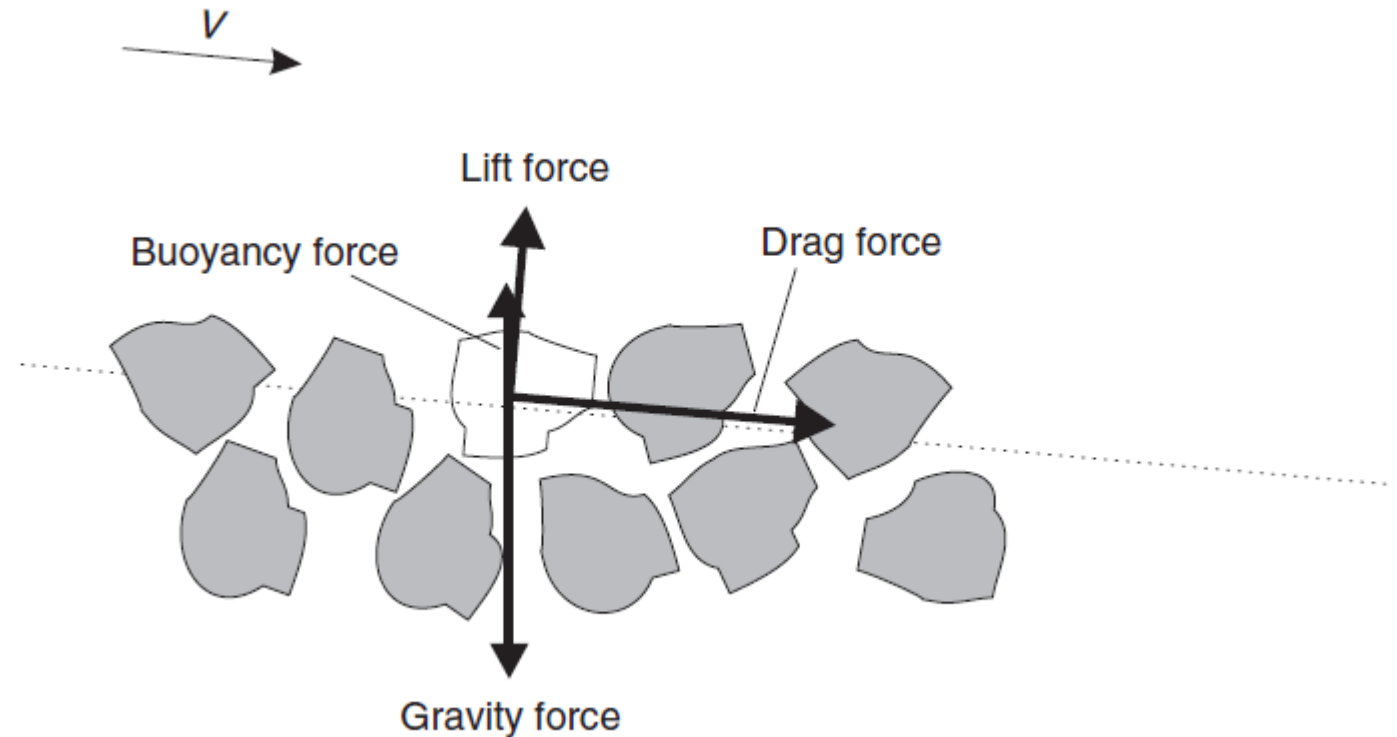
- Για  $d_s > 1$  mm

$$w_0 = 1.1[(s - 1)gd_s]^{0.5}$$

***Διάβρωση***

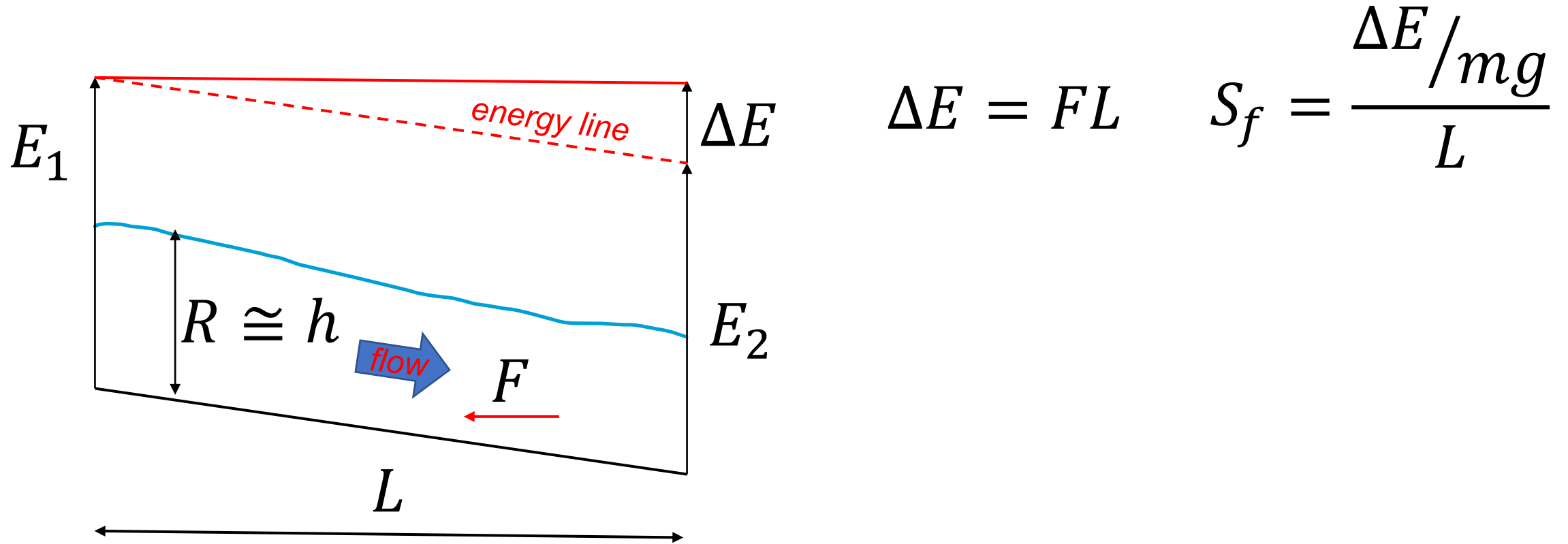
# Δυνάμεις που επιδρούν σε ένα κόκκο

- Βαρύτητα
- Άνωση
- Οπισθέλκουσα
- Ανύψωσης
- Σχέσεις δράσης-αντίδρασης με τους λοιπούς κόκκους

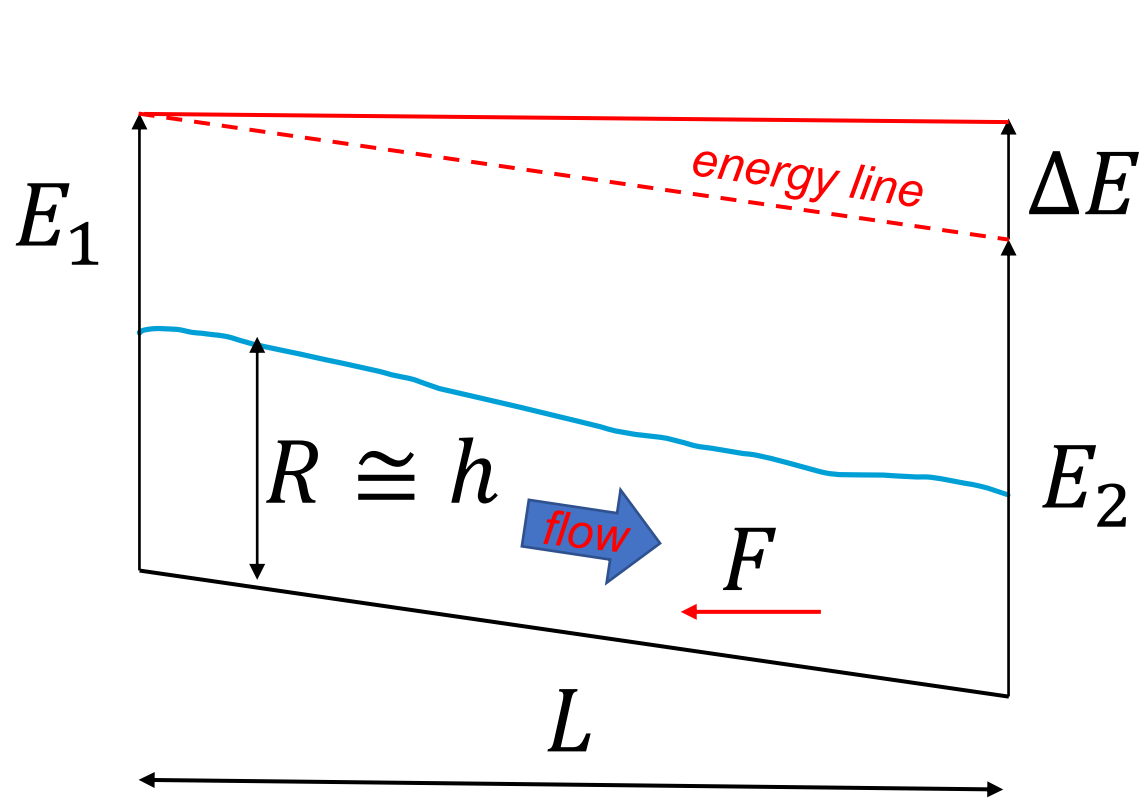


**Πηγή:** Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. 2nd ed. London: Elsevier

# Διατήρηση ενέργειας



# Διατήρηση ενέργειας

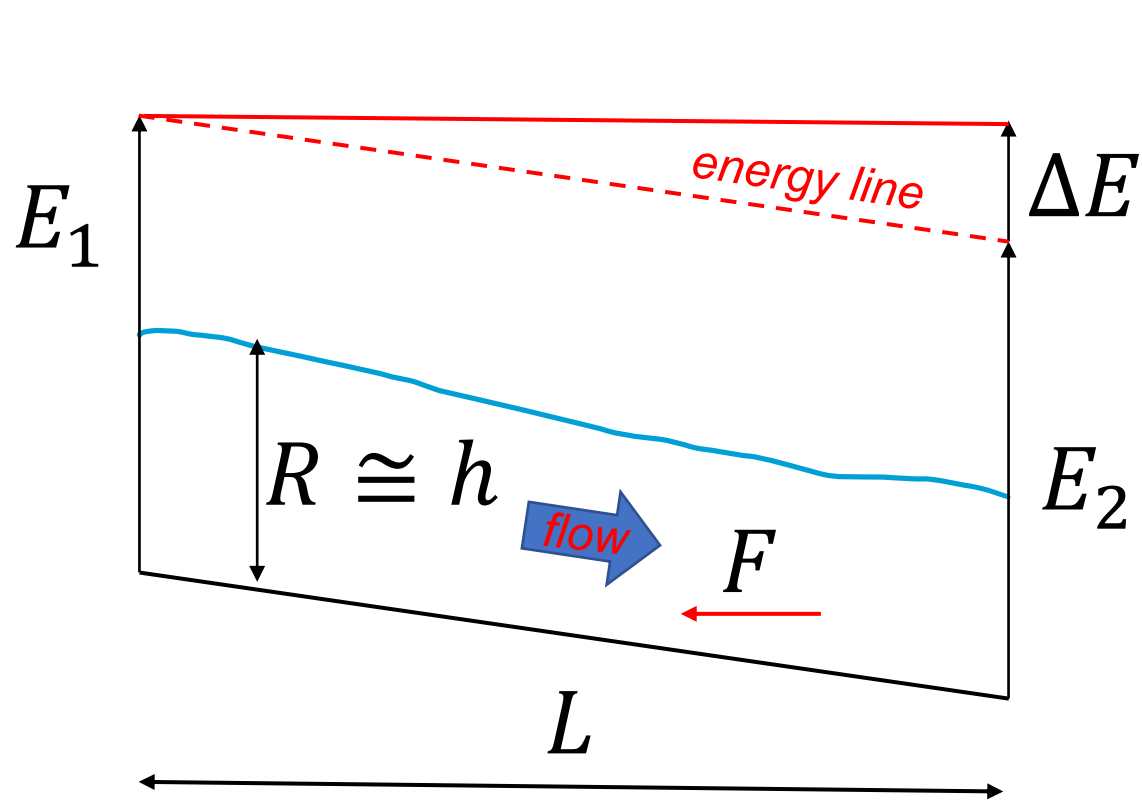


$$\Delta E = FL \quad S_f = \frac{\Delta E / mg}{L}$$

$$F = mgS_f$$



# Διατήρηση ενέργειας



$$\Delta E = FL \quad S_f = \frac{\Delta E / mg}{L}$$

$$F = mgS_f$$

$$\rho = m / Vol \quad \tau = F / A$$

$$\tau = g\rho RS_f$$

# Εμπειρικές σχέσεις για συρτική τάση

- Εξίσωση Darcy-Weisbach: αγωγός με κυκλική διατομή και ροή υπό πίεση

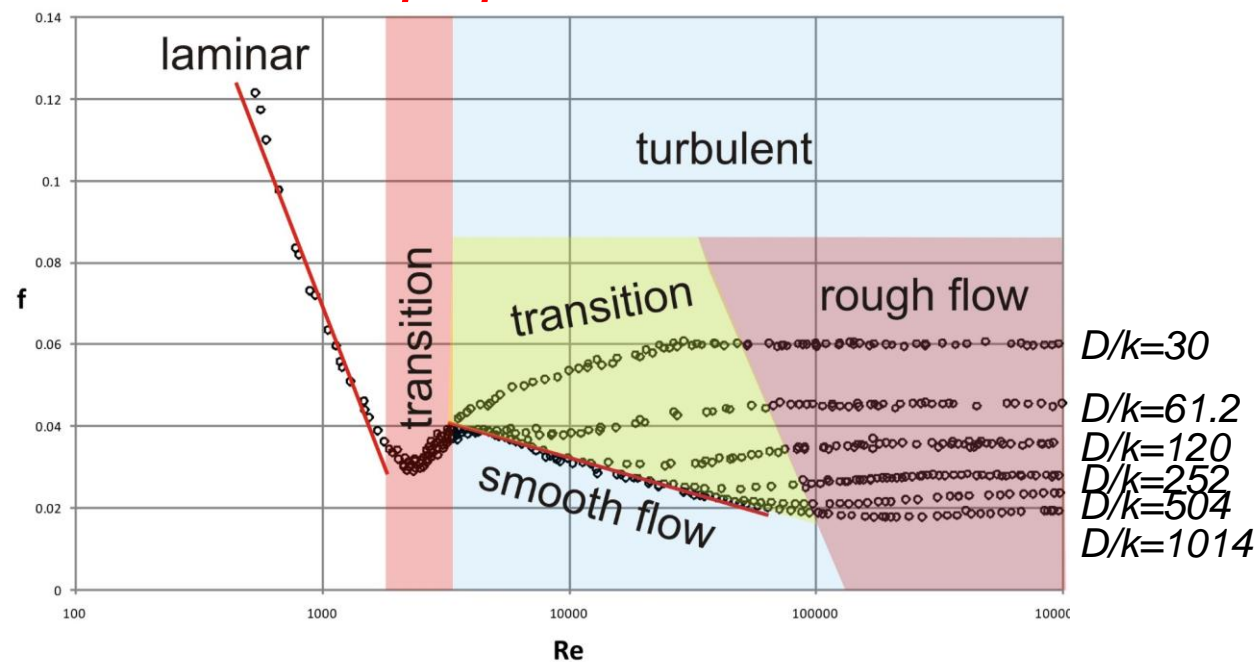
$$S_f = f \frac{\rho \bar{V}^2}{2 D} \quad \tau = g \rho R S_f$$

$$\tau_0 = \rho \frac{f}{8} \bar{V}^2 \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

συρτική τάση

συρτική ταχύτητα

πείραμα Nikuradse



# Συντελεστής τριβής $f$

- **Colebrook-White**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

- **Swamee and Jain**

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} + \frac{k/D}{3.7} \right) \right]^2}$$

**k:** τραχύτητα αγωγού  
**Re:** αριθμός Reynolds  
**D:** διάμετρος αγωγού

# Κρίσιμη τιμή συρτικής τάσης

- Παράμετρος Shields

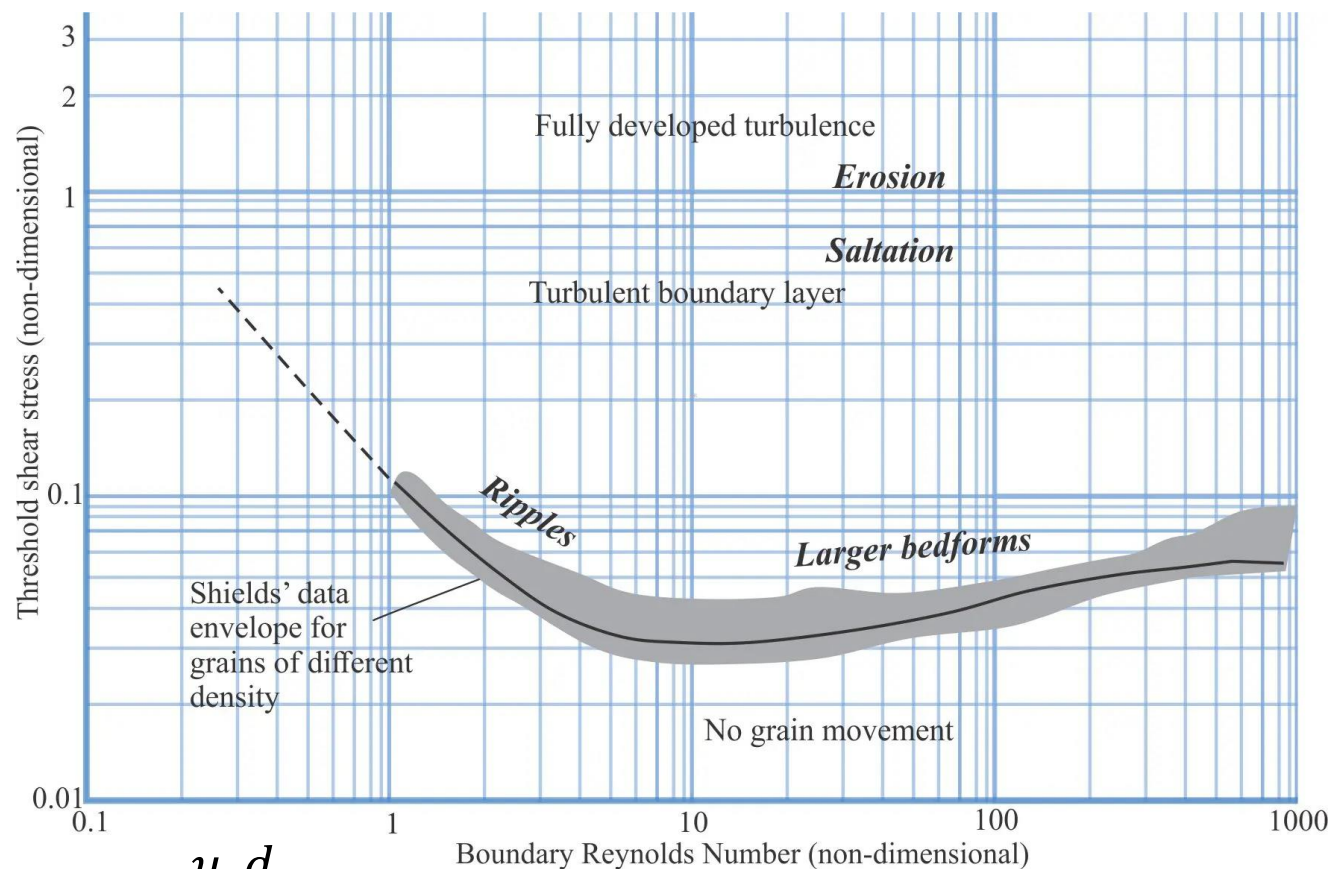
$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\rho(s-1)gd_s}$$

- Κρίσιμη συρτική τάση  $\tau_{*,cr}$

- Ο κόκκος αρχίζει αποσπάται και αρχίζει και κινείται  $\tau_* > \tau_{*,cr}$

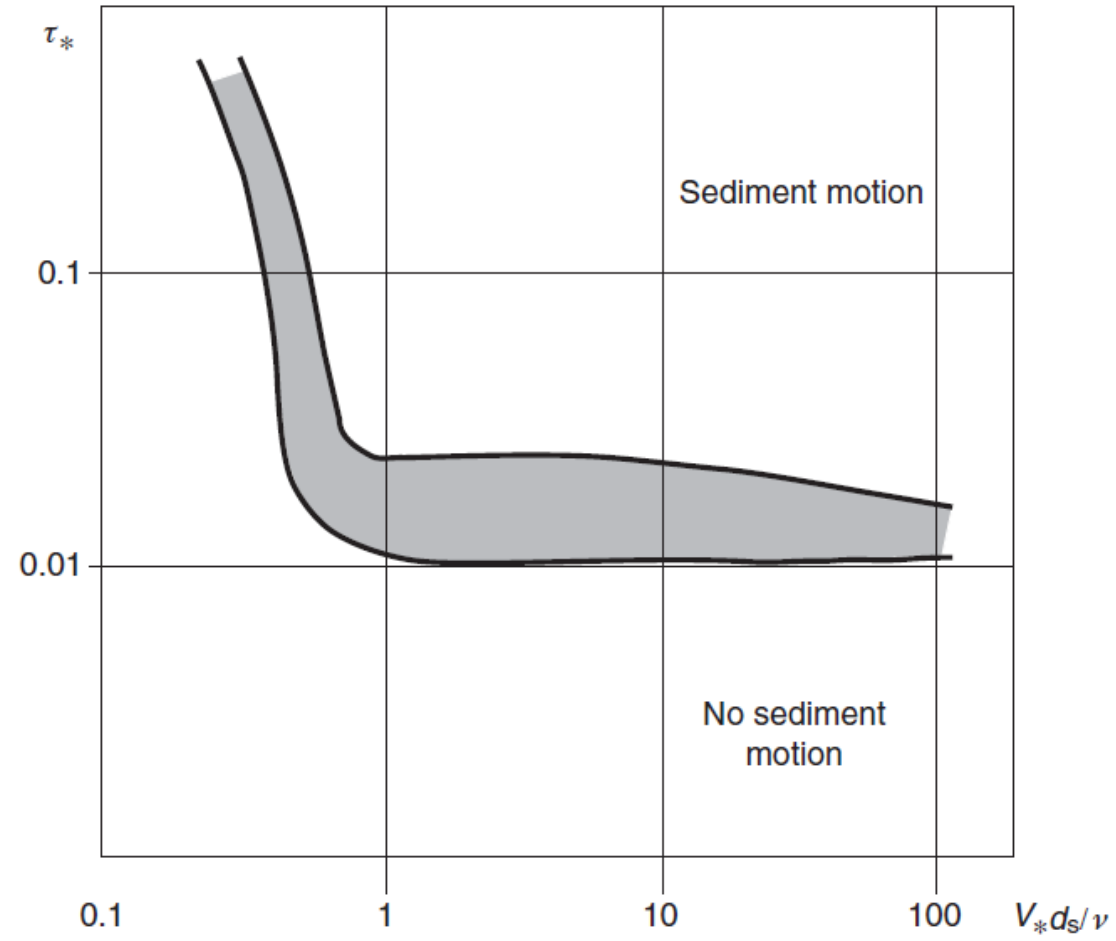
# Διάγραμμα Shields

$$\tau_{*,cr} = \frac{0.11}{Re_*} + 0.054 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4Re_*^{0.52}}{25}\right) \right]$$



$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu}$$

# Και στον αέρα!



# Έναρξη μεταφοράς φορτίου σε αιώρηση

*Ο λόγος της συρτικής ταχύτητας να είναι μεγαλύτερος από ένα κατώφλι*

$$\frac{u_*}{w_0} > 0.2 - 2.5$$

Σχέση	$u_*/w_0$
Bagnold (1966)	1
Raudkivi (1990)	0.5-1.2
Julien (1995)	0.2-2.5

***Μεταφορά***



# Σύρση

- Meyer-Peter and Müller

$$q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*,cr})^{3/2} = 8(\tau_* - 0.047)^{3/2}$$

αριθμός φορτίου κοίτης *Einstein*

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\rho(s-1)gd_s}$$

παράμετρος *Shields*

# Σύρση

- **Einstein-Brown** ( $0.3 \text{ mm} < d_{50} < 28.6 \text{ mm}$ ) για  $\psi > 5.5$

$$q_{b*} = \frac{F_*}{0.465} \exp(-0.391\psi)$$

- **Einstein-Brown** ( $0.3 \text{ mm} < d_{50} < 28.6 \text{ mm}$ ) για  $\psi < 5.5$

$$q_{b*} = F_* \frac{40}{\psi^3}$$

$$\psi = \frac{1}{\tau_*} \quad F_* = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{d_*^3}} - \sqrt{\frac{36}{d_*^3}} \quad d_* = d_s \left[ \frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3}$$

# Αιώρηση

ΣΔΕ

$$D_s \frac{dc_s}{dy} = -w_0 c_s$$

διαχυσιμότητα φερτού

σταθερη

$$D_s \approx \kappa u_* (h - y) \frac{y}{h}$$

παραβολικός νόμος

συγκέντρωση φερτών υλών (αιώρηση)

$$c_s = c_b \left[ \frac{\left(\frac{h}{y}\right) - 1}{\left(\frac{h}{\delta_b}\right) - 1} \right]^{w_0 / (\kappa u_*)}$$

# Αιώρηση

## Στερεοπαροχή

$$q_s = \int_{\delta_b}^h c_s u dy$$

στρώμα κοίτης

$$\delta_b = 0.3 d_s d_*^{0.7} \sqrt{\frac{\tau_*}{\tau_{*,cr}} - 1}$$

συγκέντρωση φερτών υλών (κοίτη)

$$c_b = \min \left[ \frac{0.117}{d_*} \left( \frac{\tau_*}{\tau_{*,cr}} - 1 \right), 0.65 \right]$$

τυρβώδης ροή

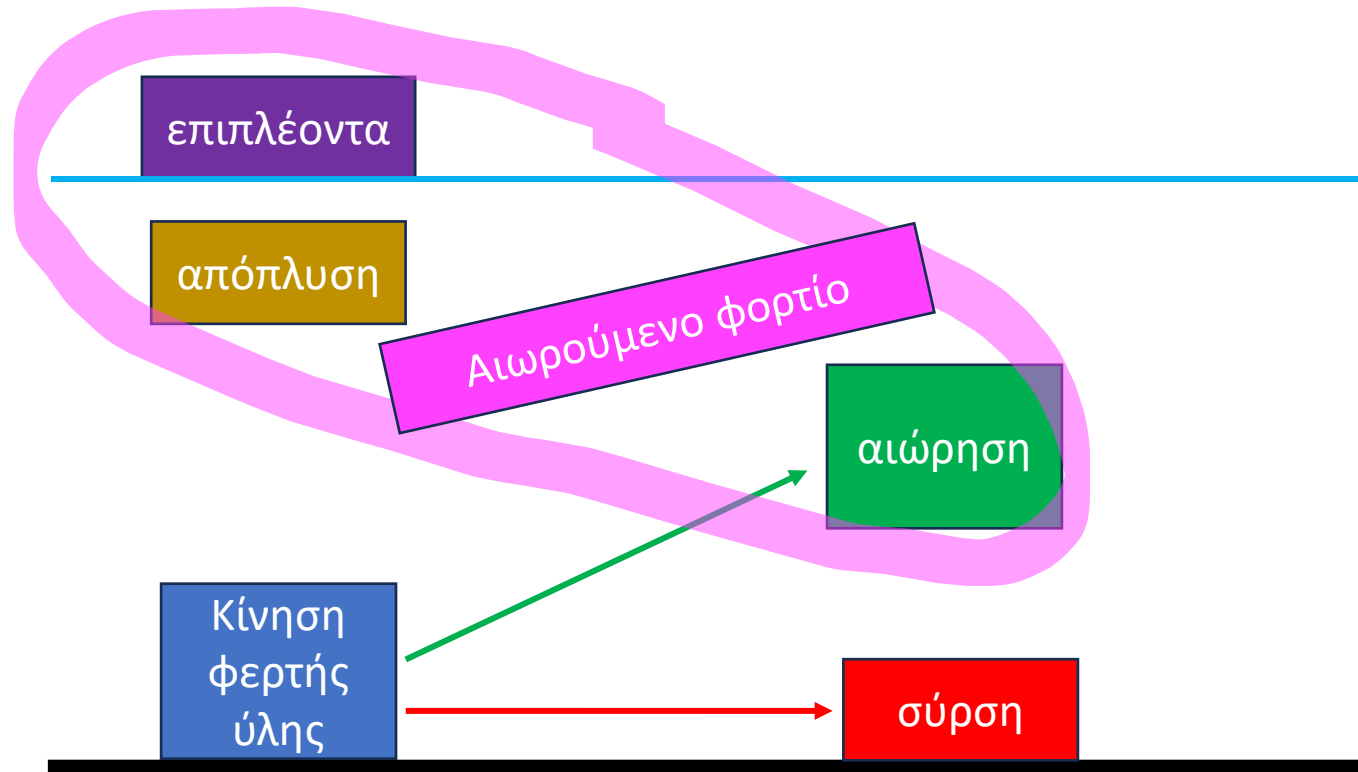
$$u = u_{max} \left( \frac{y}{h} \right)^{1/N}$$

$$u_{max} = \frac{N+1}{N} u_* \sqrt{\frac{8}{f}}$$

$$N = \kappa \sqrt{\frac{8}{f}}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{k/D}{3.7} \right) \right]^2}$$

# Ολικό φορτίο



$$q_{s,tot} = q_s + q_b$$

# Ολικό φορτίο

- **Du Boys (1879)**

$$q_{s,tot} = a_D \tau_0 (\tau_0 - \tau_{*,cr})$$

- **Shields**

$$q_{s,tot} = \frac{10q\rho S_0 (\tau_0 - \tau_{*,cr})}{(\rho_s - \rho)^2}$$

# Ολικό φορτίο

- **Engelund and Hansen (1967)** ( $0.19 \text{ mm} < d_s < 0.93 \text{ mm}$ )

$$q_{s,tot} = 0.4f \frac{\tau_0}{\rho} \sqrt{\frac{d_s}{(s-1)g}}$$

- **Bagnold (1966)**

$$q_{s,tot} = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \tau_0 u \left( \frac{e_b}{S_0} + 0.01 \frac{u}{w_0} \right)$$

# Συσχέτιση δεδομένων

- **Δεδομένα στερεοπαροχής από μετρήσεις**
- **Είσοδος**
  - Παροχή
  - Θολότητα
  - Παροχή αιχμής
  - Εμβαδό λεκάνης απορροής
  - Μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης
  - ...
- **Τεχνητή νοημοσύνη**
  - Μηχανική Μάθηση



# Μορφοδυναμικά μοντέλα

Υδροδυναμικό πεδίο

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} = 0 \quad \text{εξίσωση συνέχειας} \\ \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} = -\frac{1}{2}gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho} \quad \text{εξίσωση ορμής} \end{array} \right.$$

# Μορφοδυναμικά μοντέλα

Υδροδυναμικό πεδίο

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} = 0 \quad \text{εξίσωση συνέχειας} \\ \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 H)}{\partial x} = -\frac{1}{2} gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho} \end{array} \right.$$

τάσεις πυθμένα  
 $\frac{\tau_b}{\rho} \propto u^2$   
εξίσωση ορμής

# Μορφοδυναμικά μοντέλα

Υδροδυναμικό πεδίο

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} = 0$$

εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} = -\frac{1}{2}gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho}$$

τάσεις πυθμένα

$$\frac{\tau_b}{\rho} \propto u^2$$

εξίσωση ορμής

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{s,tot}}{\partial x} = 0$$

εξίσωση Exner

# Μορφοδυναμικά μοντέλα

Υδροδυναμικό πεδίο

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} = 0$$

εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} = -\frac{1}{2}gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho}$$

τάσεις πυθμένα

$$\frac{\tau_b}{\rho} \propto u^2$$

εξίσωση ορμής

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{s,tot}}{\partial x} = 0$$

$$q_b = f(u)$$

εξίσωση Exner

# Μορφοδυναμικά μοντέλα

Υδροδυναμικό πεδίο

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} = 0$$

εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} = -\frac{1}{2}gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho}$$

τάσεις πυθμένα

$$\frac{\tau_b}{\rho} \propto u^2$$

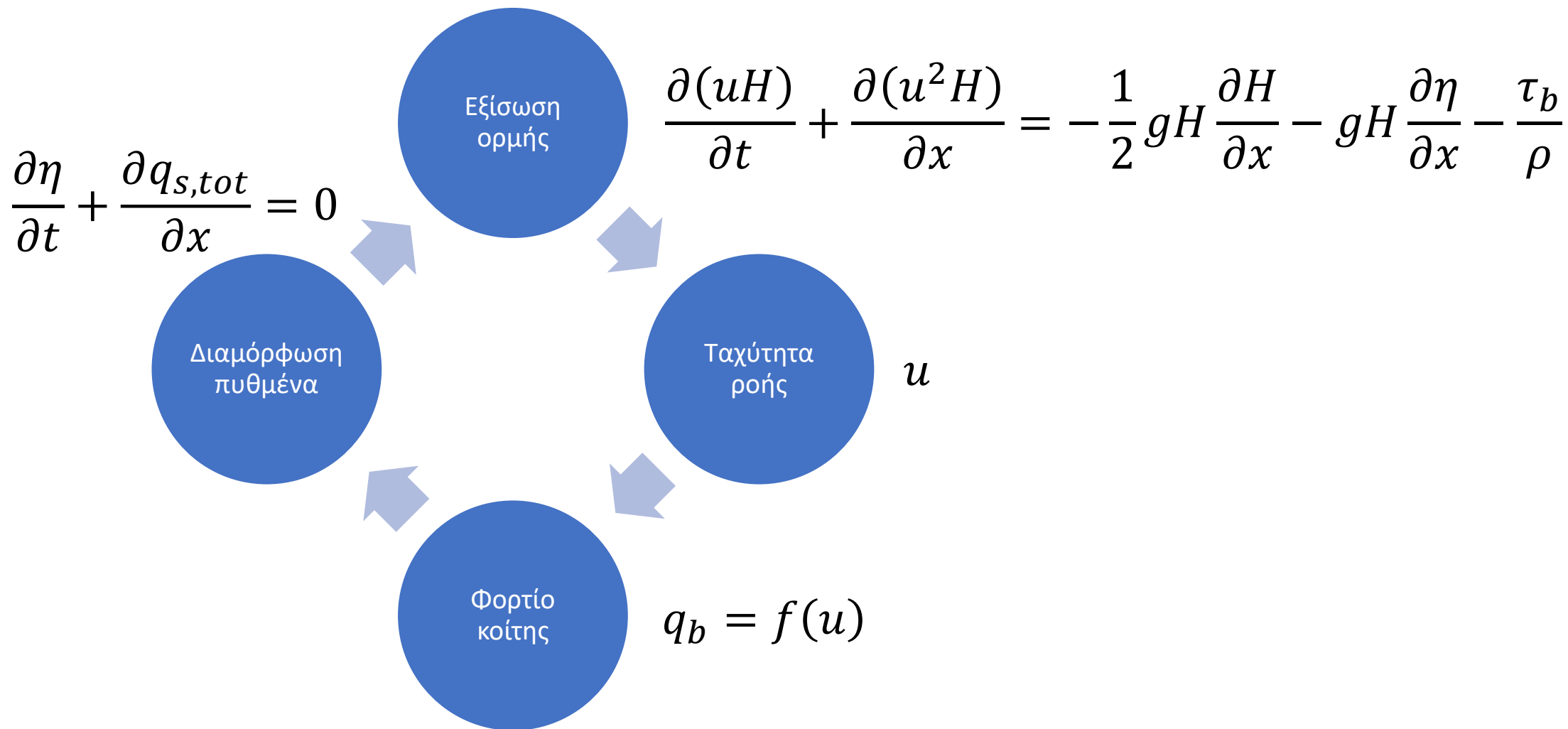
εξίσωση ορμής

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{s,tot}}{\partial x} = 0$$

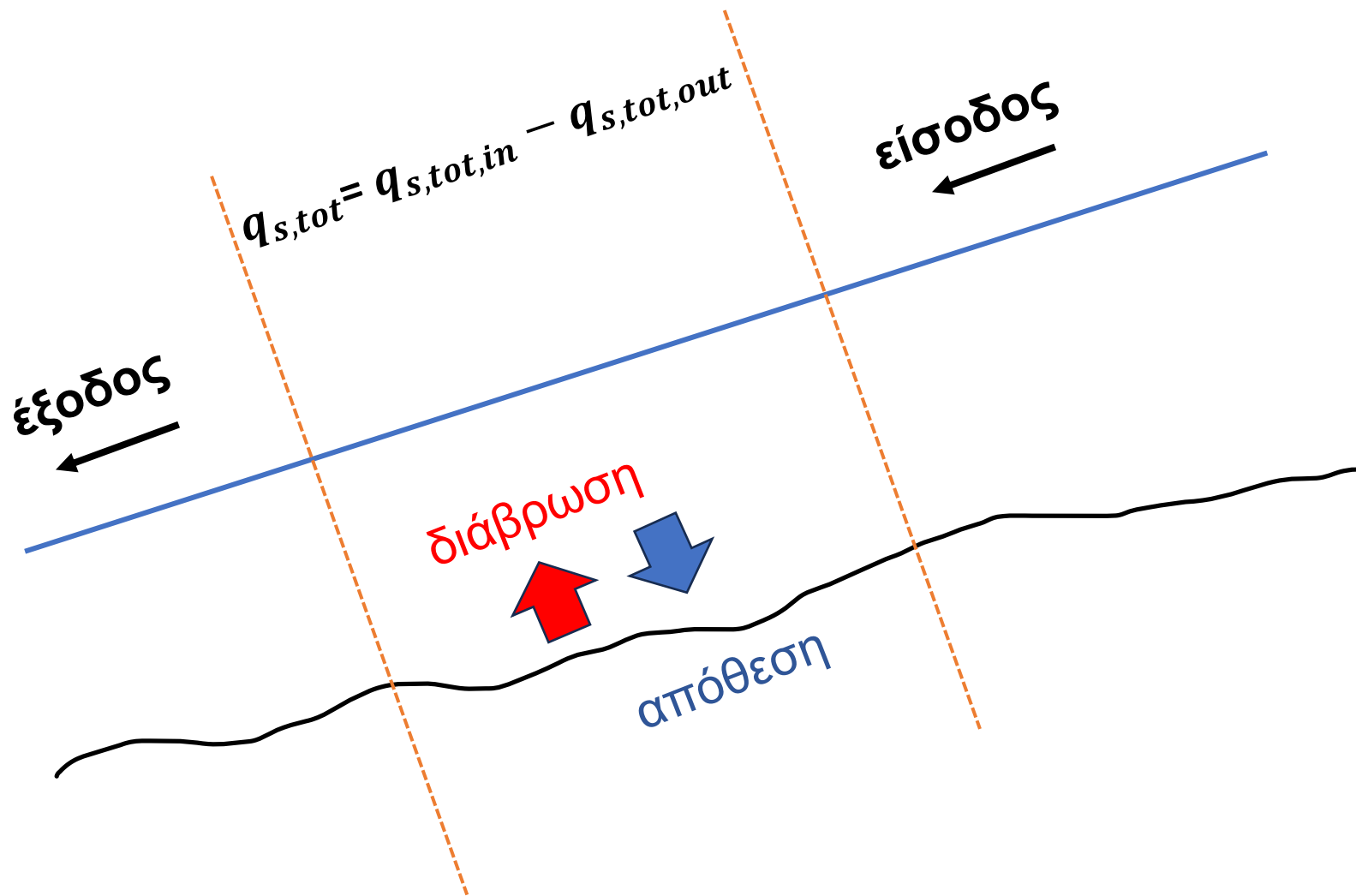
$$q_b = f(u)$$

εξίσωση Exner

# Μορφοδυναμικά μοντέλα



# Όγκος ελέγχου



# Εφαρμογή

- Τμήμα ποταμού με πλάτος διατομής  $B=100$  m, κατά μήκος κλίση 1‰ και το οποίο αποτελείται από ομογενές υλικό με διάμετρο κόκκων  $d=5$  mm δέχεται πενθήμερο πλημμυρικό γεγονός με μέση παροχή ανά μονάδα πλάτους  $q=2$  m<sup>3</sup>/s/m. Να βρεθεί:
  - Το ομοιόμορφο βάθος ροής
  - Αν θα διαμορφωθούν οι συνθήκες για κίνηση των φερτών υλών
  - Αν το φορτίο είναι σύρσης ή αιώρησης
  - Η στερεοπαροχή
  - Πόσο θα μεταβληθεί ο πυθμένας σε μία μοναδιαία λωρίδα κατά πλάτος