

Vận chuyển bùn cát

PGS.TS. Nghiêm Tiến Lam
Khoa Kỹ thuật Biển, Đại học Thủy lợi

PGS. TS. Trần Thanh Tùng
TS. Nguyễn Quang Chiến



Chương 1. Giới thiệu môn học

Các vấn đề thực tế liên quan đến vận chuyển bùn cát:

- Xói lở bờ sông, biển
- Bồi lắng hồ chứa
- Bồi lắng các cửa lấy nước, kênh tưới
- Bồi tụ trong cảng, bồi lấp luồng tàu và cửa sông





§ 1.1. Mục đích của môn học

- Nghiên cứu các quy luật chuyển động của bùn cát trong nước; các quá trình xói cát đáy, vận chuyển và lắng đọng của bùn cát.
 1. Hiểu được các đặc tính thủy lực và bùn cát
 2. Hiểu được các quy luật chuyển động của bùn cát
 3. Hiểu được phương pháp tính toán.
- Mối liên hệ với các môn chuyên ngành khác:
 - Sóng gió, Mực nước dòng chảy (có ĐK thủy động → VCBC)
 - Hình thái bờ biển (có VCBC → bồi/lở bờ biển)

§ 1.2. Phương châm

- Bài toán 1 chiều (đơn giản hoá). VCBC xảy ra theo hướng “tiến” hoặc “lùi” trong “kênh hở”.
- Khái niệm:
 - lưu lượng bùn cát đơn vị (hay suất chuyển bùn cát), m^2/s
 - lưu lượng bùn cát, m^3/s
- Trong số các yếu tố ảnh hưởng đến lưu lượng VCBC:
 - Nhất thuỷ lực: VD lưu tốc, độ sâu nước, chiều cao & chu kì sóng, độ nhớt chất lỏng, độ gồ ghề đáy.
 - Nhì bùn cát: VD đường kính hạt, trọng lượng riêng, hình dạng hạt, cấp phối hạt.
 - Ba địa hình: VD đáy dốc

§ 1.3. Nội dung môn học

Chương I. GIỚI THIỆU MÔN HỌC

- 1.1 Vai trò và tầm quan trọng của vận chuyển bùn cát
- 1.2 Mục đích môn học

Chương II. DÒNG CHẢY VÀ PHÂN BỐ VẬN TỐC

- 2.1. Đặc tính của chất lỏng
- 2.2 Công thức dòng đều
- 2.3 Dòng chảy rối
- 2.4 Phân loại chế độ chảy
- 2.5 Phân bố vận tốc theo độ sâu
- 2.6 Ứng suất tiếp và ma sát đáy

Chương III. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ BÙN CÁT

- 3.1 Khái niệm, nguồn gốc và thành phần của bùn cát
- 3.2 Đặc trưng hình học, vật lý, thủy lực của bùn cát
- 3.3 Các hình thức chuyển động của bùn cát

Chương IV. CHUYỂN ĐỘNG CỦA BÙN CÁT ĐÁY

- 4.1 Ngưỡng chuyển động
- 4.2 Ảnh hưởng của dạng đáy
- 4.3. Ứng suất tiếp và độ nhám đáy
- 4.4 Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

Chương V. CHUYỂN ĐỘNG CỦA BÙN CÁT LƠ LỬNG

- 5.1 Giới thiệu về bùn cát lơ lửng
- 5.2 Lý thuyết khuếch tán
- 5.3 Phân bố bùn cát lơ lửng theo chiều sâu dòng chảy
- 5.4 Sức tải cát lơ lửng của dòng nước

Chương VI. VẬN CHUYỂN BÙN CÁT VEN BIỂN

- 5.1 Lớp biên sóng
- 5.2 Hệ số ma sát sóng
- 5.3 Ứng suất đáy tổng hợp do sóng và d. chảy

§1.4. Yêu cầu môn học

- Môn học 2 tín chỉ. Đề cương chung: GV gửi qua email.
- Thiên về kỹ năng tính toán, tra bảng biểu, mô tả hiện tượng
- Điểm thi 70%, điểm quá trình 30%
- Điểm quá trình = 10 bài kiểm tra ngắn + 1 bài dài (45 phút)
- Trên lớp: luôn mang quyển slide này, máy tính CASIO, vở ghi chép. Làm đầy đủ ví dụ trên lớp.
- Bài thi: 90 phút,
mang tài liệu duy nhất = quyển slide này, ghi rõ tên ngoài bìa
- Chuẩn bị kỹ trước khi thi dù được mang slide. Ôn lại trong vở, đánh dấu cẩn thận vào quyển slide. Thuộc tên các đại lượng. Đừng nhầm giữa các đại lượng có kí hiệu giống nhau!
- Tuyệt đối *không* trao đổi bài khi thi và khi kiểm tra.

Tài liệu tham khảo

- Van Rijn, L.C. (2001). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans. Lecture Notes. IHE, Delft.
- Gaweesh M.T.K, Ramadan, K.A.H, Klaassen, G.J. (2002). Sediment Transport in Rivers. Lecture Notes. IHE, Delft.
- Chien, N. and Wan, Z. (1999). Mechanics of Sediment Transport. ASCE.
- Nielsen P. (2013) Basic Coastal Sediment Transport Mechanisms. Chap. 4 – International Compendium of Coastal Engineering. World Scientific.
- Raudkivi, A. J. (1976) Loose Boundary Hydraulics. Pergamon.
- Liu, Z. (2001). Sediment Transport. Aalborg Universitet.
- R. Soulsby (1998) Động lực học cát biển. Bản dịch của Nguyễn Thọ Sáo.
- Trần Thanh Tùng, N. Q. Chiến (2014). Hình thái bờ biển. NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ.
- Southard, J. (2006) Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-Generated Sedimentary Structures. Học liệu mở của MIT.

Chương 2

Dòng chảy và phân bố vận tốc

§2.1. Đặc tính của chất lỏng

- Mật độ (ρ , kg/m³)

$$\rho = 1000 + 1.455CL - 0.0065(T - 4 + 0.4CL)^2$$

$$S = 0.03 + 1.805CL$$

– CL (‰): độ clo

– T (°C): **hiệt độ**

– S (‰): độ muối

Nước ngọt: 1000 kg/m³, nước biển ~1025 kg/m³

- Độ nhớt (ν , m²/s)

– ν (m²/s): hệ số nhớt **động học**, cỡ 10^{-6} m²/s

– μ (Ns/m²): hệ số nhớt **động lực**

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\nu = 10^{-6} \times \left[1.14 - 0.031(T - 15) + \frac{0.00068}{10}(T - 15)^2 \right]$$

§2.2. Công thức dòng đều

- Phương trình chuyển động cho dòng đều, ổn định, chảy rối

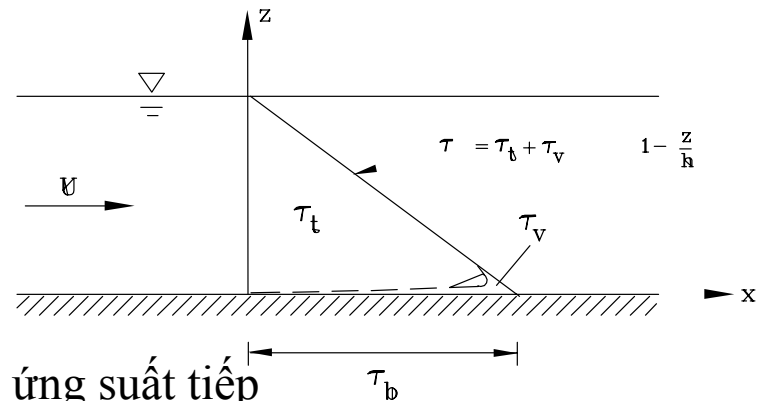
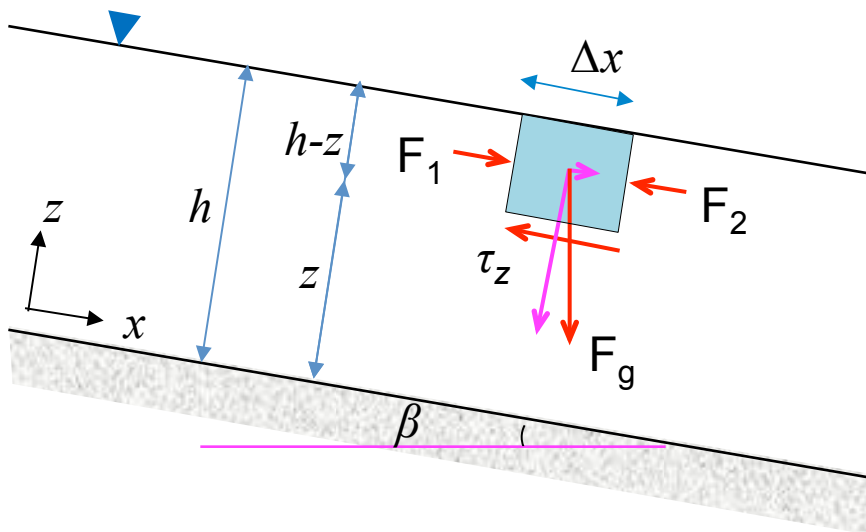
$$\tau_z \Delta x \Delta y = \rho g (h - z) \Delta x \Delta y \sin \beta$$

– Đặt $I = \sin \beta \longrightarrow \tau_z = \rho g (h - z) I$

– Tại $z=0$

– Chảy nhám sát biên ($b = \text{bed}$, tại đáy) $\tau_b = \rho g h I$

$\tau_b = \rho u_*^2 \longrightarrow u_* = \sqrt{g h I}$

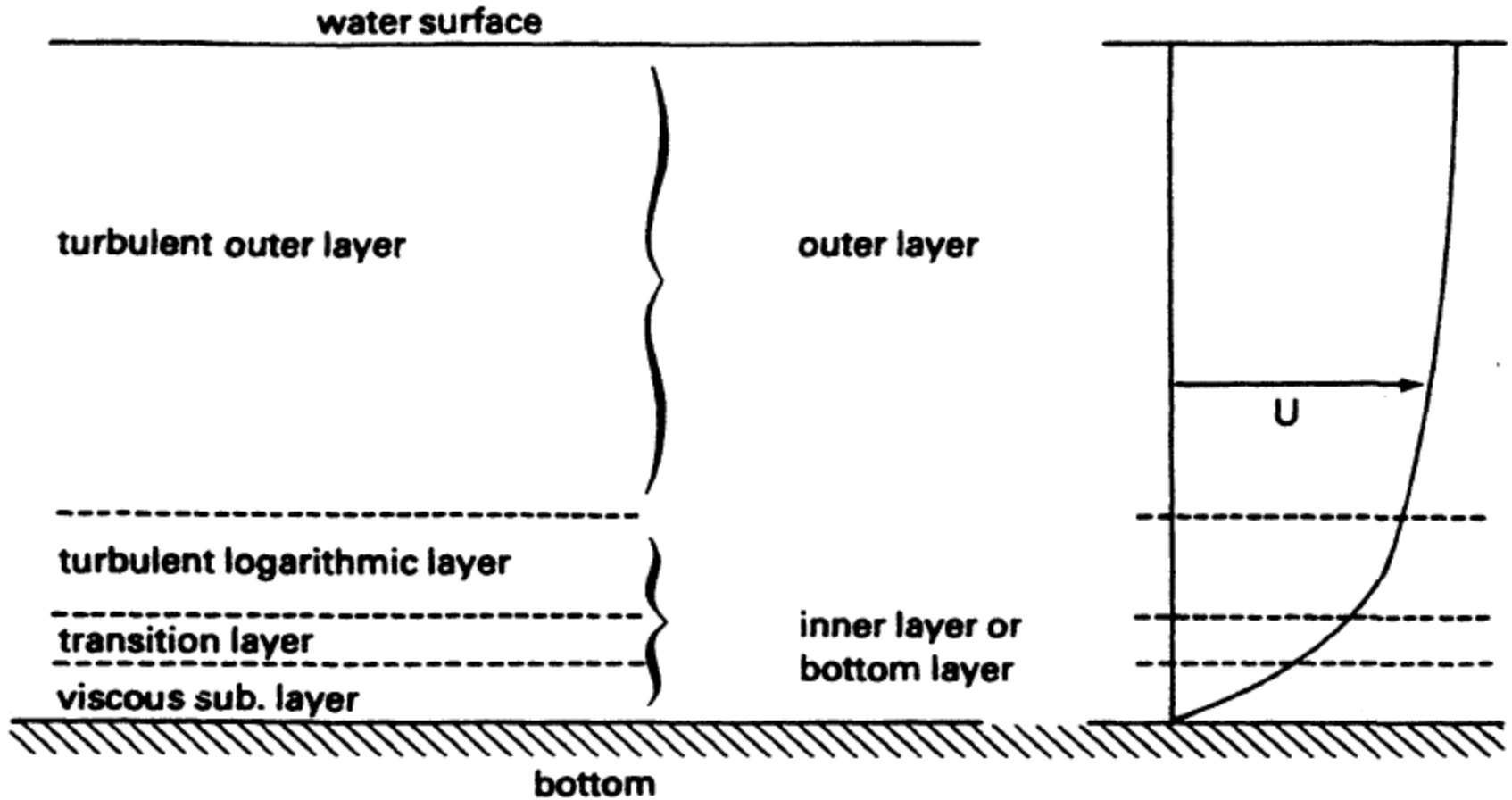


τ : ứng suất tiếp

τ_t : ứng suất tiếp rối (t = turbulent)

τ_v : ứng suất tiếp nhớt (v = viscous)

§2.3. Dòng chảy rối



§2.4. Chế độ thủy lực

- Phụ thuộc vào:
 - Chiều dày nhám Nikuradse (k_s , m): độ nhám hạt cát tương đương,
 - Độ nhớt của lớp nhớt sát biên (ν , m²/s)
 - Vận tốc ma sát --- vận tốc điển hình sát đáy (u_* , m/s)

- Các chế độ chảy:

- Chảy rối thành trơn

$$\frac{u_* k_s}{\nu} \leq 5$$

- Chảy rối thành nhám

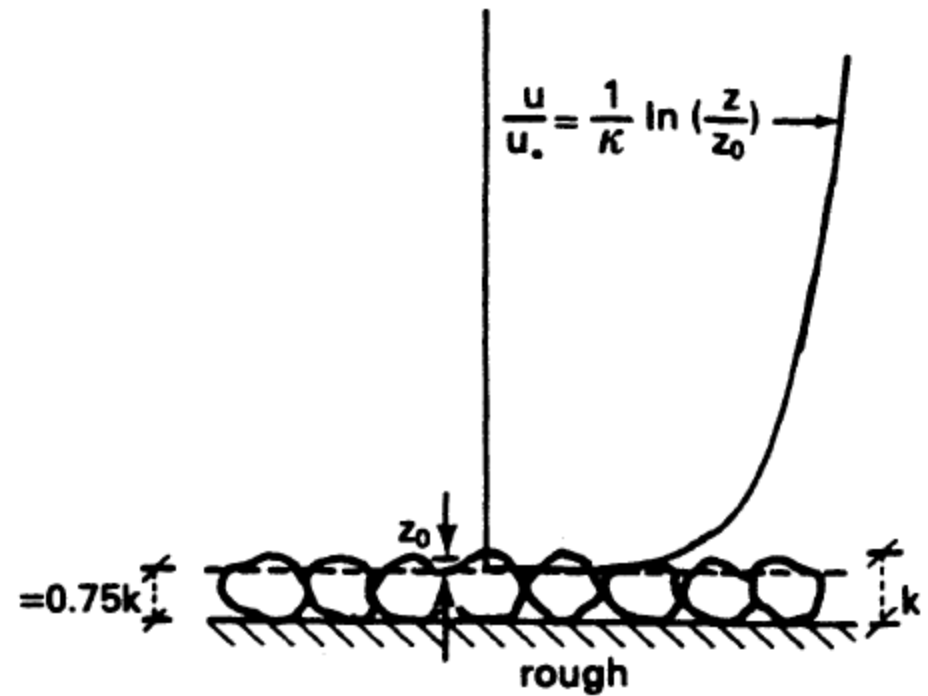
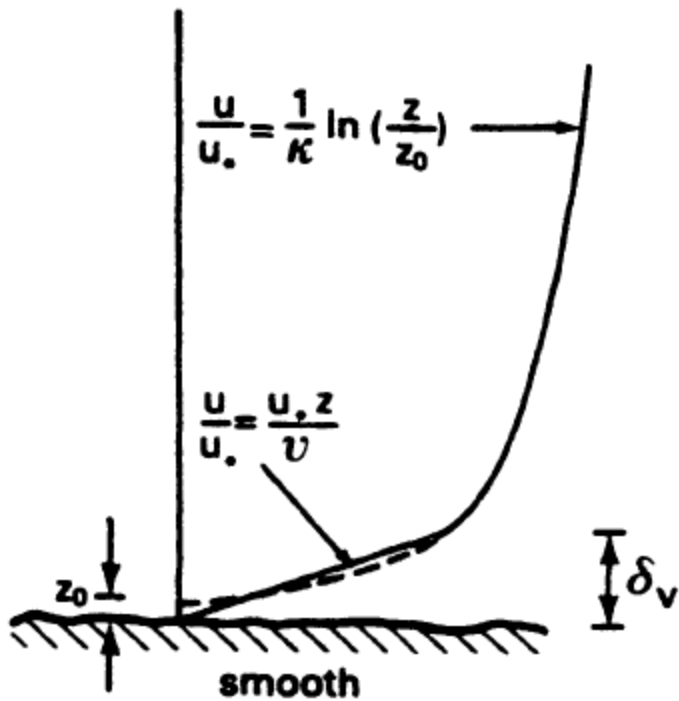
$$\frac{u_* k_s}{\nu} \geq 70$$

- Chuyển tiếp:

$$0.5 < \frac{u_* k_s}{\nu} < 70$$

§2.5. Phân bố vận tốc theo độ sâu

Bề dày lớp nhớt $\delta_v = 11,6\nu / u_*$



§2.5. Phân bố vận tốc theo độ sâu

- Quy luật phân bố vận tốc

- u_* (m/s): vận tốc ma sát
- $\kappa = 0,4$: hằng số Von Karman
- z_0 (m): độ cao tham chiếu có $u = 0$
- z (m): độ cao tính toán
- u (m/s): vận tốc tính toán

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{z_0}^h u dz = \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{z_0}{h} - 1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]$$

- Chảy rối thành trơn

$$z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*}$$

- Chảy rối thành nhám

$$z_0 = k_s / 30$$

- Chuyển tiếp

$$z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_*} + \frac{k_s}{30}$$

$$\int \ln x dx = x \ln x - x + C$$

§2.6. Ứng suất tiếp và ma sát đáy

- Chézy $\bar{u} = C\sqrt{hI}$
- Darcy-Weisbach $\bar{u} = \sqrt{\frac{8ghI}{f_c}}$
- Manning $\bar{u} = \frac{1}{n}h^{2/3}I^{1/2}$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{u} = C\sqrt{hI} \\ \bar{u} = \sqrt{\frac{8ghI}{f_c}} \end{array} \right\} \rightarrow C = \sqrt{\frac{8g}{f_c}}$$

- Ứng suất tiếp tại đáy trung bình theo thời gian

$$\tau_b = \rho ghI = \rho g \frac{\bar{u}^2}{C^2} = \frac{1}{8} \rho f_c \bar{u}^2$$

- Chảy tầng $f_c = \frac{64}{R_e}$
- Số Reynolds $R_e = \frac{\bar{u}h}{\nu}$

§2.6. Ứng suất tiếp và ma sát đáy

- Chảy rối

$$\bar{u} = C\sqrt{hI} \quad u_* = \sqrt{ghI}$$

$$\rightarrow C = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \left[-1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right] = \frac{2.3\sqrt{g}}{\kappa} \log_{10} \left(\frac{0.4h}{z_0} \right)$$

Quy định kí hiệu $\log = \log_{10}$

$\kappa = 0.4, g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\rightarrow C = 18 \log_{10} \left(\frac{0.37h}{z_0} \right)$$

– Thành trơn

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{3.3\nu / u_*} \right) = 18 \log \left(\frac{11.4h}{\nu C / \bar{u}} \right)$$

– Thành nhám

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$$

– Chuyển tiếp

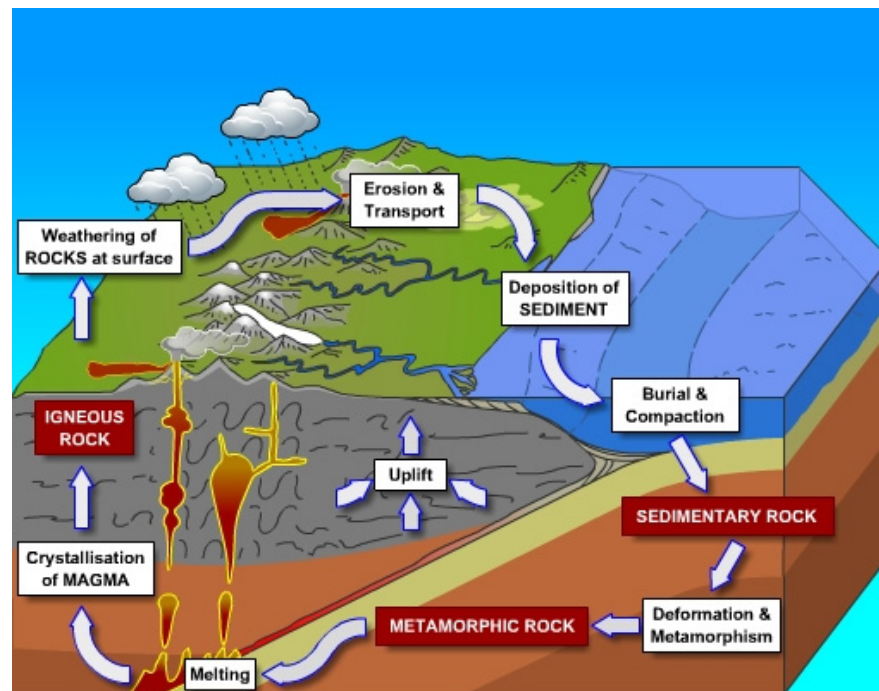
$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s + 3.3\nu / u_*} \right) = 18 \log \left(\frac{11.4h}{1\kappa_s + 1.05\nu C / \bar{u}} \right)$$

Chương 3

Các khái niệm cơ bản về bùn cát

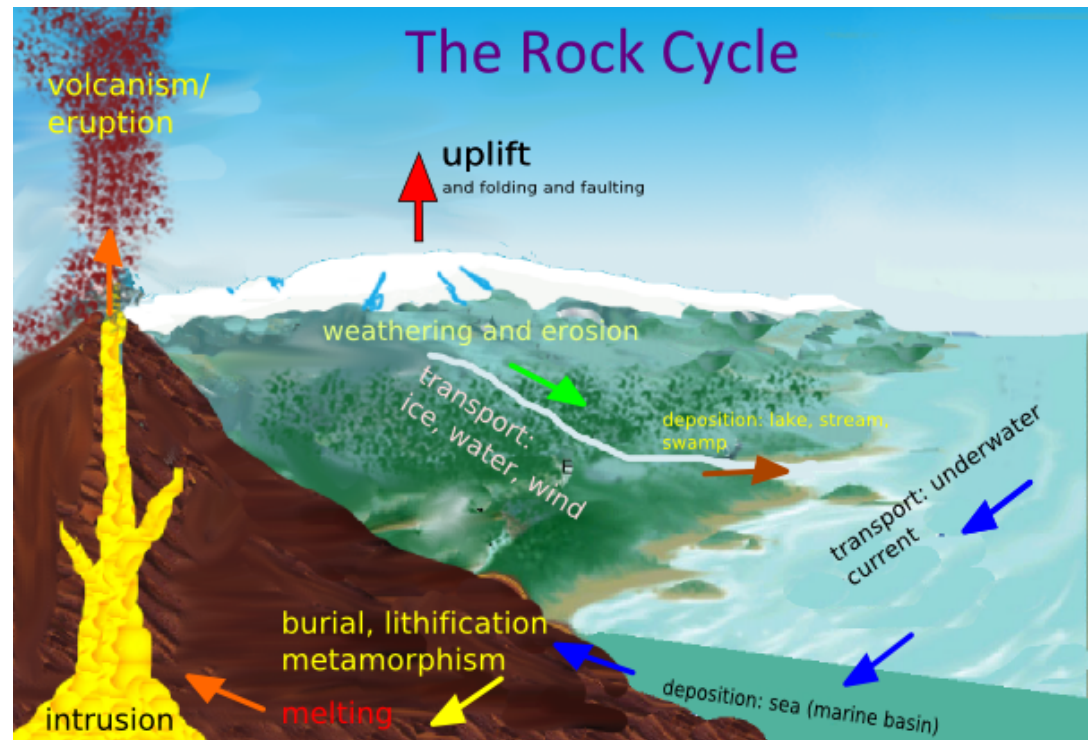
§3.1. Khái niệm, nguồn gốc và thành phần của bùn cát

- Bùn cát là các mảnh hoặc hạt rắn đang chuyển động hoặc đã bồi tụ bởi sự vận chuyển của dòng chảy, sóng, gió, băng hà hoặc trọng lực.
- Nguồn gốc chính của bùn cát là đá phong hóa → từ sông mang ra.
- Ngoài ra còn có xương và vỏ sinh vật; tro, xỉ và vật chất do núi lửa phun trào, magma ở đáy biển hoặc từ suối nước nóng, mảnh thiên thạch bị vỡ vụn ...



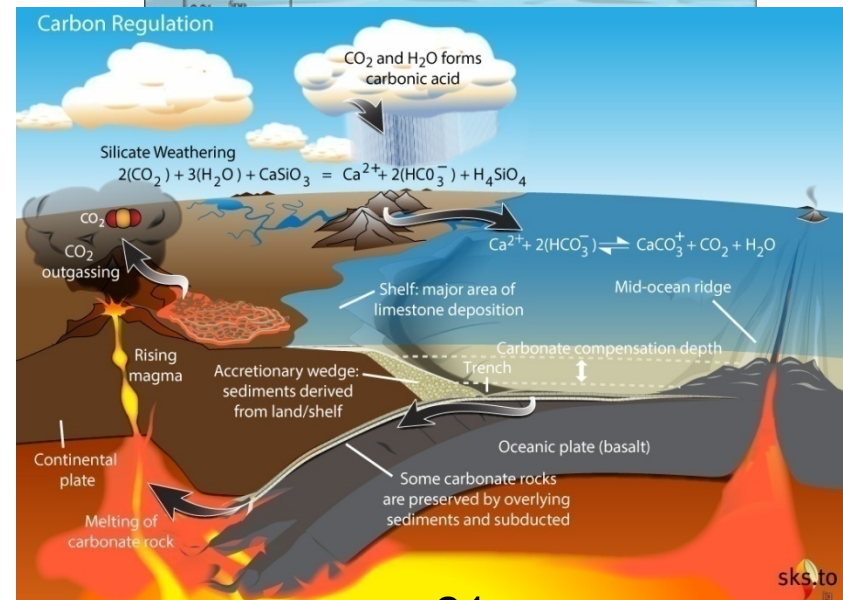
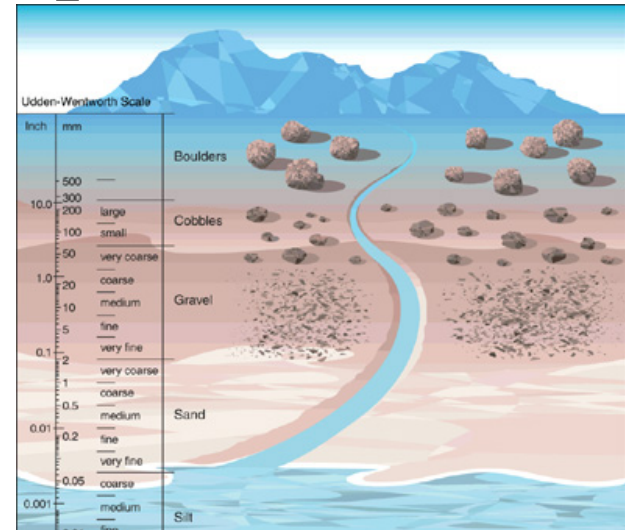
§3.1. Nguồn gốc của bùn cát

- Phân tách cơ học
 - Nứt vỡ đá
 - Phân tách của các hạt khoáng chất nhỏ
 - Bóc tách khỏi bề mặt do ngoại lực
- Các nguyên nhân
 - Chuyển động kiến tạo
 - Thay đổi nhiệt độ
 - Đóng và tan băng
 - Phát triển của tinh thể
 - Ngoại lực (động vật, cây cối, con người)
 - Mài mòn do nước và băng hà



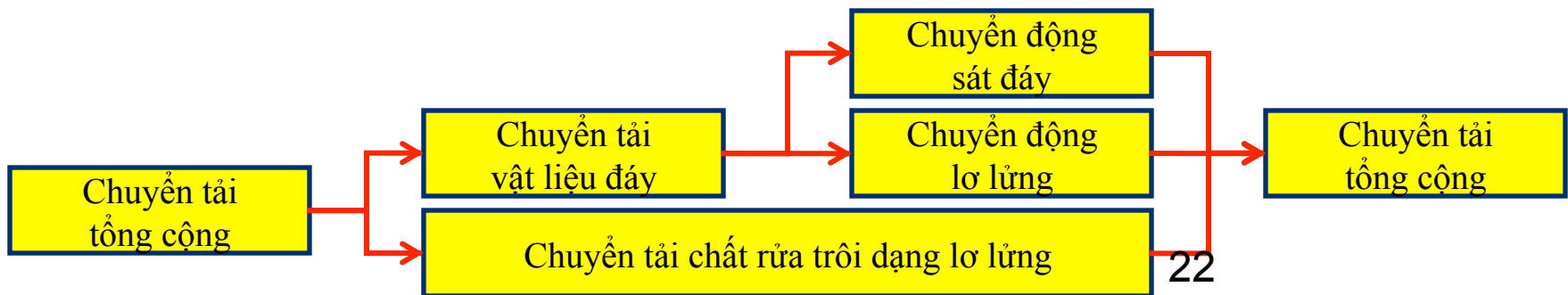
§3.1. Nguồn gốc và thành phần của bùn cát

- Phân tách do hóa học
 - Quá trình ô-xi hóa
 - Quá trình thủy hóa và thủy phân
 - Quá trình hòa tan
 - Các tác động sinh hóa (vi khuẩn, vi sinh vật)
- Thành phần của bùn cát
 - Sét (clay): các mảnh vụn khoáng chất (mica)
 - Bụi (silt): chủ yếu khoáng chất silicát
 - Cát (sand): chủ yếu thạch anh (quartz, SiO_2)
 - Sỏi (gravel), cuội, đá tảng (boulders): mảnh vụn đá gốc



§3.2. Phân loại chuyển động

- Xói lở ←
 - Vận chuyển bùn cát
 - Chuyển động lăn, trượt của các hạt ở đáy
 - Chuyển động nhảy cóc của các hạt sát đáy
 - Chuyển động lơ lửng của các hạt trong nước
 - Trầm tích đáy
 - Chuyển tải đáy
 - Chuyển tải lơ lửng
 - Bồi lắng →
 - Trầm tích đáy
- Chuyển tải tổng cộng



§3.2. Phân loại chuyển động

- Trầm tích đáy (bed material): các hạt, vật liệu là một phần của đáy có kích cỡ phù hợp bị ảnh hưởng bởi quá trình chuyển tải.
- Chuyển tải lơ lửng (bùn cát lơ lửng – suspended load): phần chuyển tải bùn cát dạng lơ lửng do dòng rối, cách xa đáy và có vận tốc bằng vận tốc dòng chảy.
- Chuyển tải đáy (bùn cát đáy – bed load), trong đó bùn cát chuyển động sát đáy dưới dạng lăn, trượt hoặc nhảy cóc → có tiếp xúc đáy, xác định theo ứng suất tiếp.
- Chuyển tải rửa trôi (bùn cát rửa trôi – wash load), trong đó phần bùn cát lơ lửng có kích thước hạt nhỏ hơn các hạt trầm tích đáy. Gần như thường xuyên ở dạng lơ lửng mà không bị bồi lắng trong dòng chảy, không phụ thuộc vào khả năng chuyển tải của dòng chảy.

§3.2. Các đặc tính của bùn cát

- Đường kính hạt
- Hình dạng hạt
- Độ rỗng
- Dung trọng riêng, tỷ trọng riêng
- Tốc độ lắng chìm đều (độ thô thủy lực)
- Góc ma sát
- Ảnh hưởng của độ nhớt

§3.2. Kích thước hạt

- Đường kính hạt (d) có thể được đo bằng kẹp, ảnh chụp, quang học, sàng, hay phương pháp lắng kết.

- Đường kính sàng (d_s): đường kính hình cầu bằng kích thước cạnh mắt sàng vuông mà hạt lọt qua
- Đường kính danh định (d_n): đ. kính hình cầu có cùng thể tích với hạt
- Đường kính lắng chìm tiêu chuẩn (d_f): đường kính hạt hình cầu với tỷ trọng 2,65 có cùng vận tốc lắng chìm trong nước tĩnh ở 24°C

d_s mm	d_n mm	d_f mm	$w_s(10^\circ\text{C})$ m/s	$w_s(20^\circ\text{C})$ m/s
0.089	0.10	0.10	0.005	0.008
0.126	0.14	0.14	0.010	0.013
0.147	0.17	0.16	0.013	0.016
0.208	0.22	0.22	0.023	0.028
0.25	0.25	0.25	0.028	0.033
0.29	0.30	0.29	0.033	0.039
0.42	0.46	0.40	0.050	0.058
0.59	0.64	0.55	0.077	0.084
0.76	0.80	0.70	0.10	0.11
1.25	1.4	1.0	0.15	0.16
1.8	1.9	1.2	0.17	0.17

- Thang đo ϕ (Wentworth, 1922): $\phi = -\log_2 d$

$$d = 2^{-\phi}$$

§3.2. Thành phần hạt

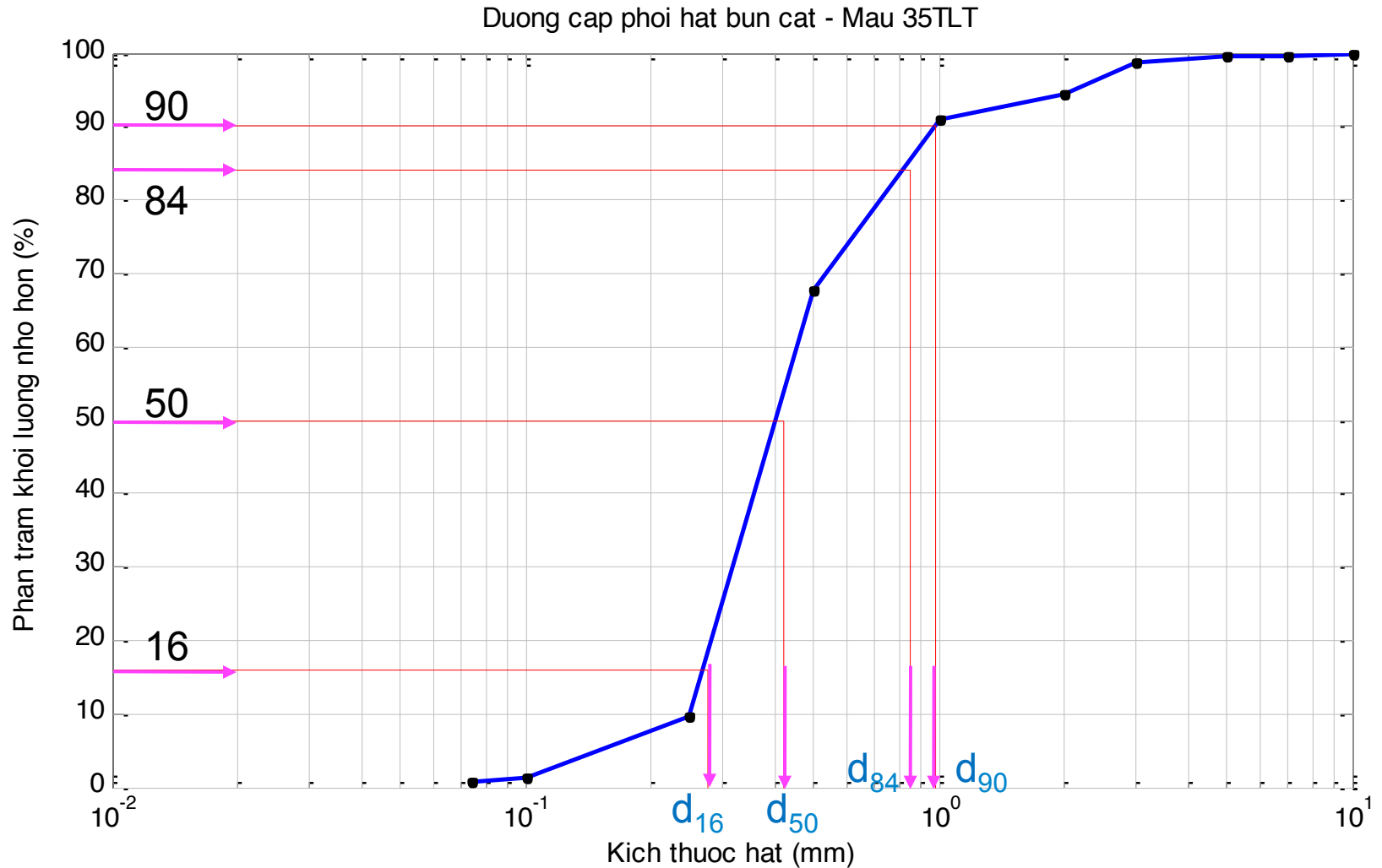
(Hội Địa Vật lý Hoa Kỳ, USGS)

Loại hạt	Kích thước hạt (d, mm)	Thang ϕ
Đá tảng	> 256	< -8
Cuội	$64 - 256$	$-8 - -6$
Sỏi	$2 - 64$	$-6 - -1$
Cát rất thô	$1 - 2$	$-1 - 0$
Cát thô	$0.5 - 1$	$0 - +1$
Cát trung	$0.25 - 0.5$	$+1 - +2$
Cát mịn	$0.125 - 0.25$	$+2 - +3$
Cát rất mịn	$0.062 - 0.125$	$+3 - +4$
Bụi thô	$0.031 - 0.062$	$+4 - +5$
Bụi trung	$0.016 - 0.031$	$+5 - +6$
Bụi mịn	$0.008 - 0.016$	$+6 - +7$
Bụi rất mịn	$0.004 - 0.008$	$+7 - +8$
Sét thô	$0.002 - 0.004$	$+8 - +9$
Sét trung	$0.001 - 0.002$	$+9 - +10$
Sét mịn	$0.0005 - 0.001$	$+10 - +11$
Sét rất mịn	$0.00024 - 0.0005$	$+11 - +12$
Keo	< 0.00024	$> +12$

§3.2. Thành phần hạt

Loại đất	Cỡ hạt (mm)		
	ASTM D422	TCVN 5747-1993	TCVN 8217-2009
Đất dính:			
- Sét	< 0,002	< 0,002	< 0,005
- Bụi (bùn)	0,002 - 0,06	0,002 - 0,06	0,005 – 0,05
Đất không dính:			
- Cát	0,06 - 2	0,06 - 2	0,05 – 2
- Sỏi (sạn)	2 - 63	2 - 150	2 – 60
- Cuội (dăm)	> 63	150 - 300	60 – 200
- Tảng lăn (đá tảng)	-	> 300	> 200

§3.2. Đường cấp phối hạt



§3.2. Đường cấp phối hạt

- Đường kính trung bình (d_{50}, M_d) : 50% khối lượng lọt sàng

- Đường kính trung bình hình học (d_g) $d_g = \sqrt{d_{16} \cdot d_{84}}$

- Đường kính hạt chính (d_m) $d_m = d_g \exp(0.5 \ln^2 \sigma_g)$

- Độ lệch chuẩn hình học (σ_g) $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$

- Hệ số cấp phối (gradation coefficient) (Gr) $Gr = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right)$

- Độ chọn lọc (S_o) $S_o = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$

§3.3. Hình dạng hạt

- Hầu hết các hạt có cạnh khá tròn do các góc, cạnh bị mài mòn trong quá trình chuyển động
 - Mức độ mài mòn trong sông phụ thuộc vào khoảng cách
 - Mức độ mài mòn do sóng phụ thuộc vào thời gian
- Hệ số hình dạng (tỷ số độ dẹt):
 - a,b,c: kích thước 3 trục (dài nhất, trung bình và ngắn nhất)
 - Cát tự nhiên có $SF \approx 0.7$
- Để tương quan giữa diện tích bề mặt và thể tích
 - d_s : đường kính hạt hình cầu có cùng diện tích bề mặt
 - d_n : đường kính hạt hình cầu có cùng thể tích
 - Hạt càng tròn có SF^* càng gần 1, thể hiện khả năng lăn

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

$$SF^* = SF \frac{d_s}{d_n}$$

§3.4. Độ rỗng

- Độ rỗng (n): tỷ lệ khe rỗng theo thể tích
- Độ rỗng thường từ 15% - 90%, đa số bùn cát tự nhiên có độ rỗng 25% - 50%.

$$\text{Komura (1963): } n = 0.245 + \frac{0.0864}{(0.1d_{50})^{0.211}}$$

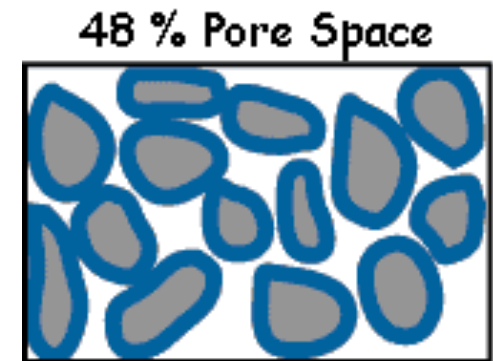
- Hạt đồng đều có độ rỗng cao.

Loại hạt	Độ rỗng
Cát thô	39% - 41%
Cát trung	41% - 48%
Cát mịn	44% - 49%
Đất thịt pha cát	50% - 54%

§3.5. Dung trọng riêng

- Dung trọng riêng (dung trọng hạt, dung trọng rắn) (ρ_s , kg/m³): trọng lượng vật liệu bùn cát trong một đơn vị thể tích
- Phần lớn bùn cát tự nhiên là thạch anh (quartz) có $\rho_s = 2650$ kg/m³.

- Tỷ trọng riêng:
$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \approx 2,65$$
$$\Delta = s - 1 \approx 1,65$$



- Dung trọng khô: $\rho_d = (1 - n)\rho_s$
- Dung trọng ướt: $\rho_w = n\rho + (1 - n)\rho_s$



§3.5. Tỷ trọng riêng

Khoáng chất	Cấu tạo hóa học	Màu sắc	Độ cứng	Tỷ trọng
Fenspat (Feldspar)	$KAlSiO_3$ $NaAlSi_3O_3, CaAl_2Si_2O_3$	Đỏ, hồng Trắng, xám	6.0	2.56 2.6-2.8
Thạch anh (Quartz)	SiO_2 $CaMg(SiO_3)_2$	Trắng, trong	7.0	2.66 3.2-3.6
Piroxen (Pyroxene)	$(Mg,Fe)SiO_3$ $(Al, Fe)SiO_3$	Lục, đen	5.6	3.3-3.5 3.2-3.4
Hocblen (Hornblende)	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$ $Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Lục, đen	5.6	2.9-3.1 3.0-3.2
Mica	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ $K_2(Mg,Fe)_6(SiAl)_8O_{20}(OH)_2$	Trong Đen, nâu, lục sẫm	2.5-3.0	2.8-2.9 3.0-3.1
Olivin (Olivine)	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ $CaCO_3$	Lục, vàng	5.6-7.0 3.0	3.2-3.6 2.72
Carbonate	$CaMg(CO_3)$ $FeCO_3$	Trong, trắng, xám, nâu, xám vàng	3.5-4.0	2.87 3.8-3.9
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Trắng, xám, nâu, đen	1 – 2.5	2.6
Ôxit sắt III (Ferric Oxide)	Fe_2O_3 $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	Đỏ, nâu, xám Vàng, nâu	5.5-6.0 5-5.5	4.3 3.8

§3.6. Các đặc trưng vật lý khác

- Dung trọng hạt $\rho_s = (1 + e)\rho_d = \rho_d / (1 - n)$
- Dung trọng khô $\rho_d = \rho_s / (1 + e) = (1 - n)\rho_s = \rho_n / (1 + W)$
- Dung trọng tự nhiên $\rho_n = (1 + W)\rho_d$
- Độ rỗng $n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} = \frac{e}{1 + e}$
- Hệ số rỗng $e = \frac{n}{1 - n} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$
- Độ ẩm $W = \text{klg nước} / \text{klg đất}$: $W = \frac{\rho_n - \rho_d}{\rho_d} = \frac{eG\rho_n}{\rho_s}$
- Độ bão hòa $G = \frac{\rho_s W}{\rho e}$
- Nồng độ hay hàm lượng bùn cát $c = \rho_d$

§3.7. Góc nghỉ

- Giá trị góc của mái dốc lớn nhất mà hạt (khô) có thể nằm im trên đó. Còn được gọi là góc ma sát trong (φ).
 - φ liên hệ với kích thước hạt.
VD Zhang (1989): $\varphi = 32,5 + 1,72d$ với $0,2 \text{ mm} < d < 4 \text{ mm}$
 - Góc nghỉ càng lớn nếu tỷ trọng càng nhỏ, hoặc hạt càng góc cạnh
 - Có thể khác với góc nghỉ tự nhiên (φ_n): góc của mái dốc cân bằng khi chất đông
- Liên quan đến ứng suất tiếp đáy
 - $\tau_{b,cr,\beta}$: Ứng suất tiếp tới hạn trên đáy dốc
 - $\tau_{b,cr,0}$: Ứng suất tiếp tới hạn trên đáy ngang
 - φ : Góc nghỉ
 - β : Góc của đáy dốc
$$\tau_{b,cr,\beta} = \tau_{b,cr,0} \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin \varphi}$$



§3.9. Tốc độ chìm lắng

- Tốc độ lắng chìm đều (Độ thô thủy lực) (w_s , m/s): Tốc độ hạt rơi trong nước tĩnh khi lực cản cân bằng với trọng lực

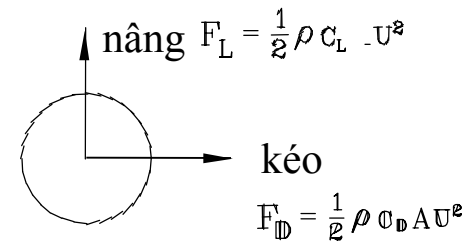
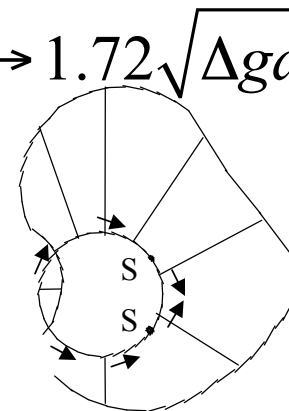
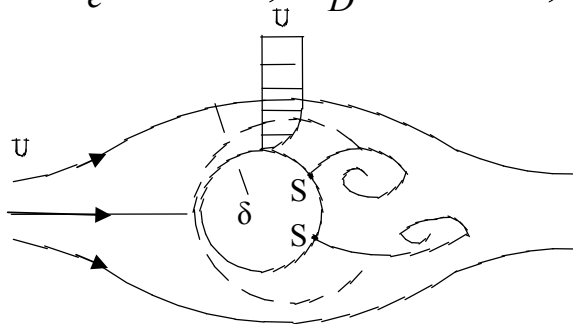
- Hạt hình cầu
$$w_s = \sqrt{\frac{4\Delta g d}{3C_D}}$$

– Hệ số kéo C_D phụ thuộc số Reynolds R_e và thông số hình dạng

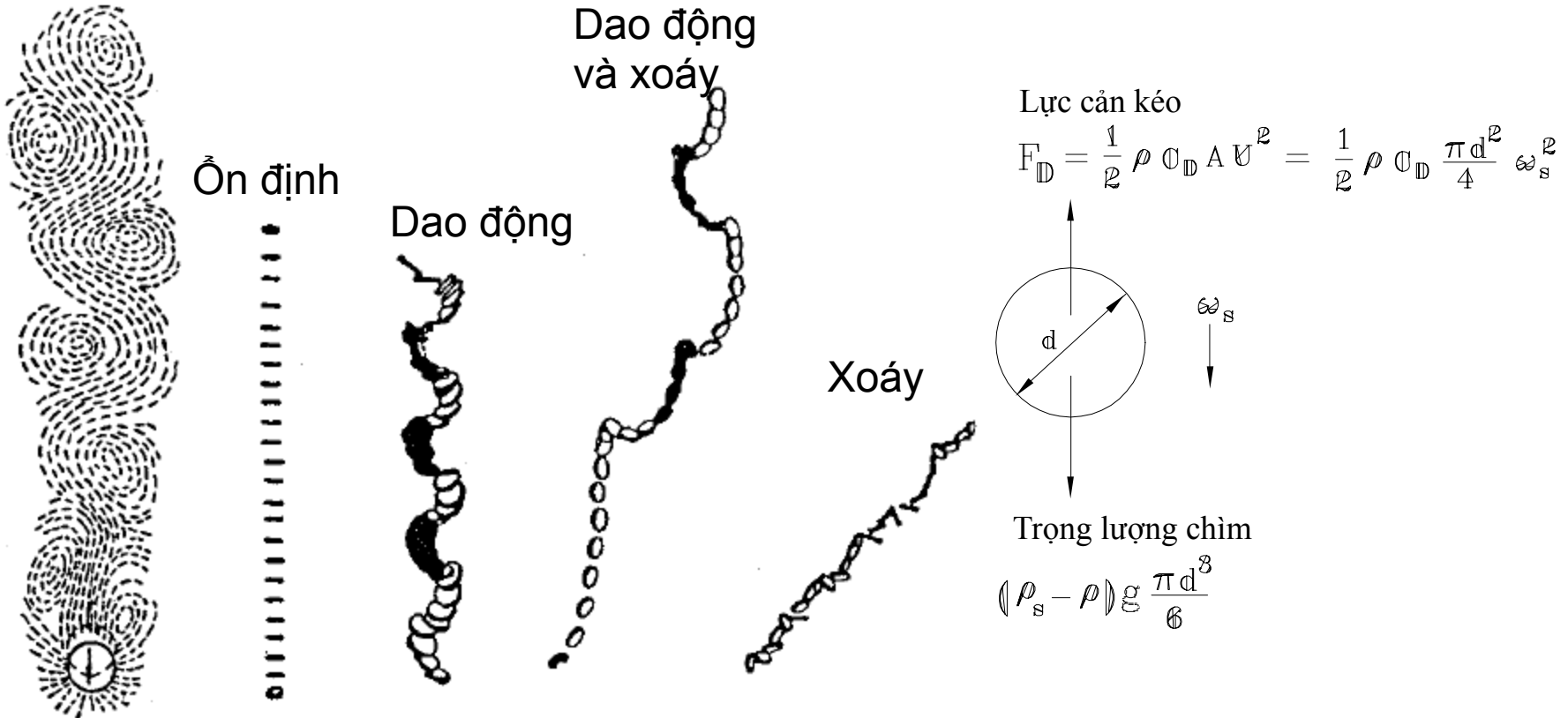
– Với $R_e < 1$ (khu vực chảy Stokes) $C_D = 24/R_e$

– Với $R_e > 1$, C_D suy giảm nhanh, tiến gần đến hằng số. $w_s = \Delta g d^2 / 18\nu$
 – VD Oseen: $C_D = \frac{24}{R_e} \left(1 + \frac{3}{16} R_e \right)$ hay Fredsoe & Deigaard $C_D = 1.4 + \frac{36}{R_e}$

– Với $R_e > 1000$, $C_D \rightarrow \text{const}$, $w_s \rightarrow 1.72 \sqrt{\Delta g d}$

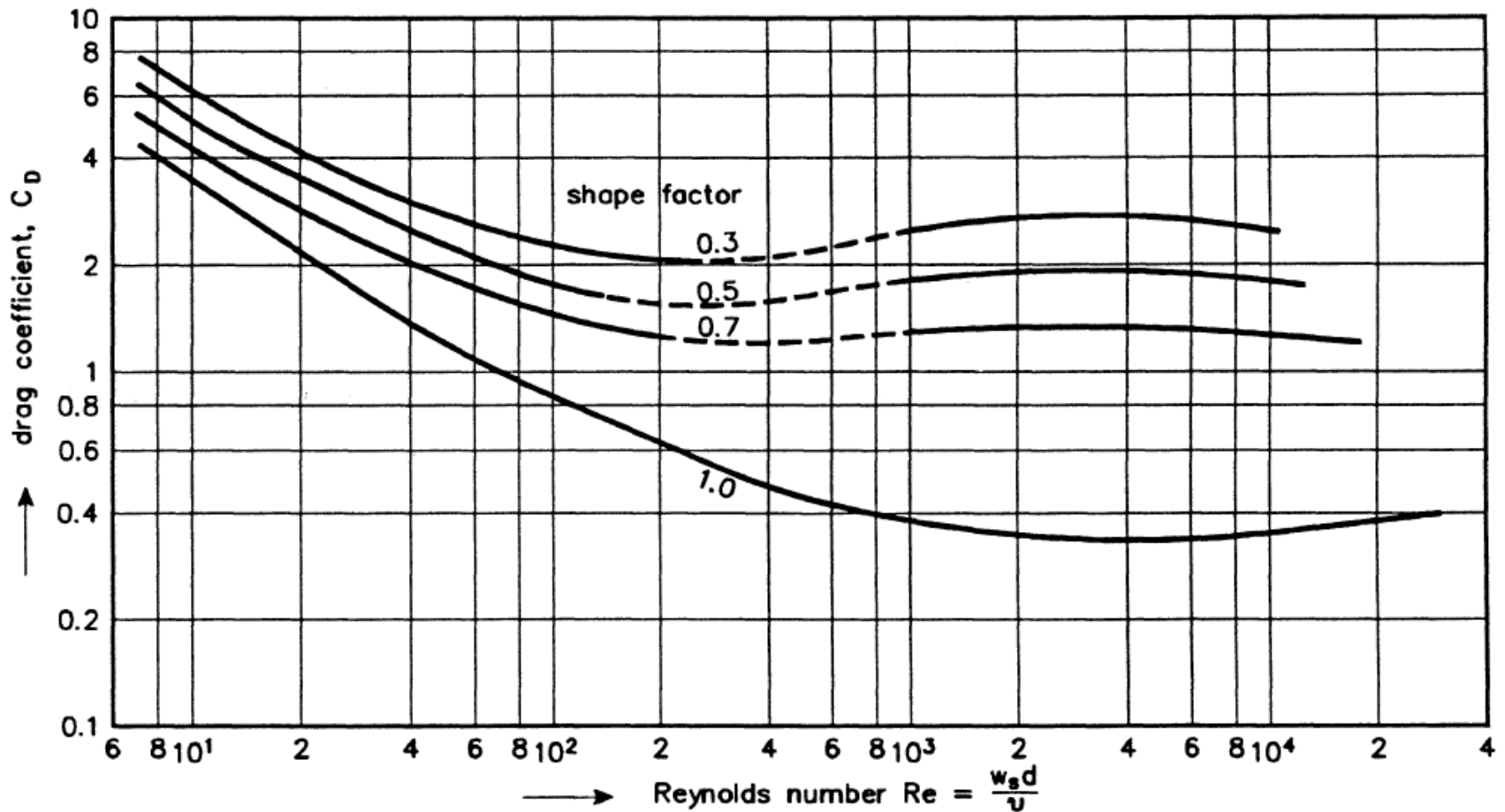


§3.9. Tốc độ chìm lắng



Quan hệ giữa C_D với SF và R_e

(Albertson, 1953)



§3.9. Tốc độ chìm lắng

- Với hạt không phải hình cầu, hình dạng đóng vai trò quan trọng với hạt lớn ($d > 300 \mu\text{m}$)

$$w_s = \frac{\Delta g d^2}{18\nu}$$

$$1 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$$

$$w_s = \frac{10\nu}{d} \left[\sqrt{1 + 0.01 D_*^3} - 1 \right]$$

$$100 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m} \text{ (Zanke 1977)}$$

$$w_s = 1.1 \sqrt{\Delta g d} \approx 42 \sqrt{d}$$

$$d \geq 1000 \mu\text{m}$$

§3.10. Các thông số đặc trưng

- Thông số đường kính hạt (parametric grain size) D_* thể hiện tỉ số giữa trọng lực và lực nhớt tác dụng lên hạt

$$D_* = \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{\nu^2}} d_{50}$$

- d_{50} (m): đường kính trung bình của bùn cát đáy
- $\Delta = s - 1 = \rho_s / \rho - 1$: tỷ trọng riêng đẩy nổi của bùn cát
- ν (m²/s): hệ số nhớt động học
- g (m/s²): gia tốc trọng trường

§3.10. Các thông số đặc trưng

- Thông số chuyển động của hạt (thông số Shields, θ): tỷ số giữa các lực thủy động (lực kéo và lực nâng) và trọng lượng của hạt chìm trong nước

$$\theta = \frac{\rho d_{50}^2 u_*^2}{(\rho_s - \rho) g d_{50}^3} = \frac{u_*^2}{\Delta g d_{50}} = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} = \frac{hI}{\Delta d_{50}}$$

- τ_b (N/m²): ứng suất tiếp ở đáy trung bình thời gian đối với đáy phẳng hoặc ứng suất tiếp ở đáy hiệu quả (liên quan đến hạt) ($\tau'_b = \mu \tau_b$, μ = hệ số hiệu ích đáy) đối với đáy gồ ghề.
- u_* (m/s): vận tốc ma sát
- h (m): độ sâu dòng chảy
- I = độ dốc năng lượng

§3.10. Các thông số đặc trưng

- Thông số dư thừa ứng suất đáy, transport-stage parameter (T): tỷ số giữa các lực thủy động (lực kéo và lực nâng) và trọng lượng của hạt chìm trong nước

$$T = \frac{\tau'_b - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} = \frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}$$

- $\tau_{b,cr}$ (N/m²): ứng suất tiếp tới hạn ở đáy trung bình thời gian (Shields, 1936)
- τ' (N/m²): ứng suất tiếp hiệu quả ở đáy, xem trang 61.

§3.10. Các thông số đặc trưng

- Thông số lơ lửng của hạt (Z): thể hiện tỷ số giữa trọng lực hướng xuống và lực thủy động hướng lên tác động vào hạt bùn cát lơ lửng trong nước

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*}$$

- w_s (m/s): vận tốc lắng chìm đều trong nước trong
- u_* (m/s): vận tốc ma sát
- $\kappa = 0.4$: hằng số Von Karman
- β : tỷ số hòa trộn giữa bùn cát và nước, xem §5.6.

§3.10. Các thông số đặc trưng

- Lưu lượng chuyển tải bùn cát phi thứ nguyên (ϕ):

$$\phi = \frac{q_t}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}}$$

$$\phi = \frac{q_t}{w_s d_{50}}$$

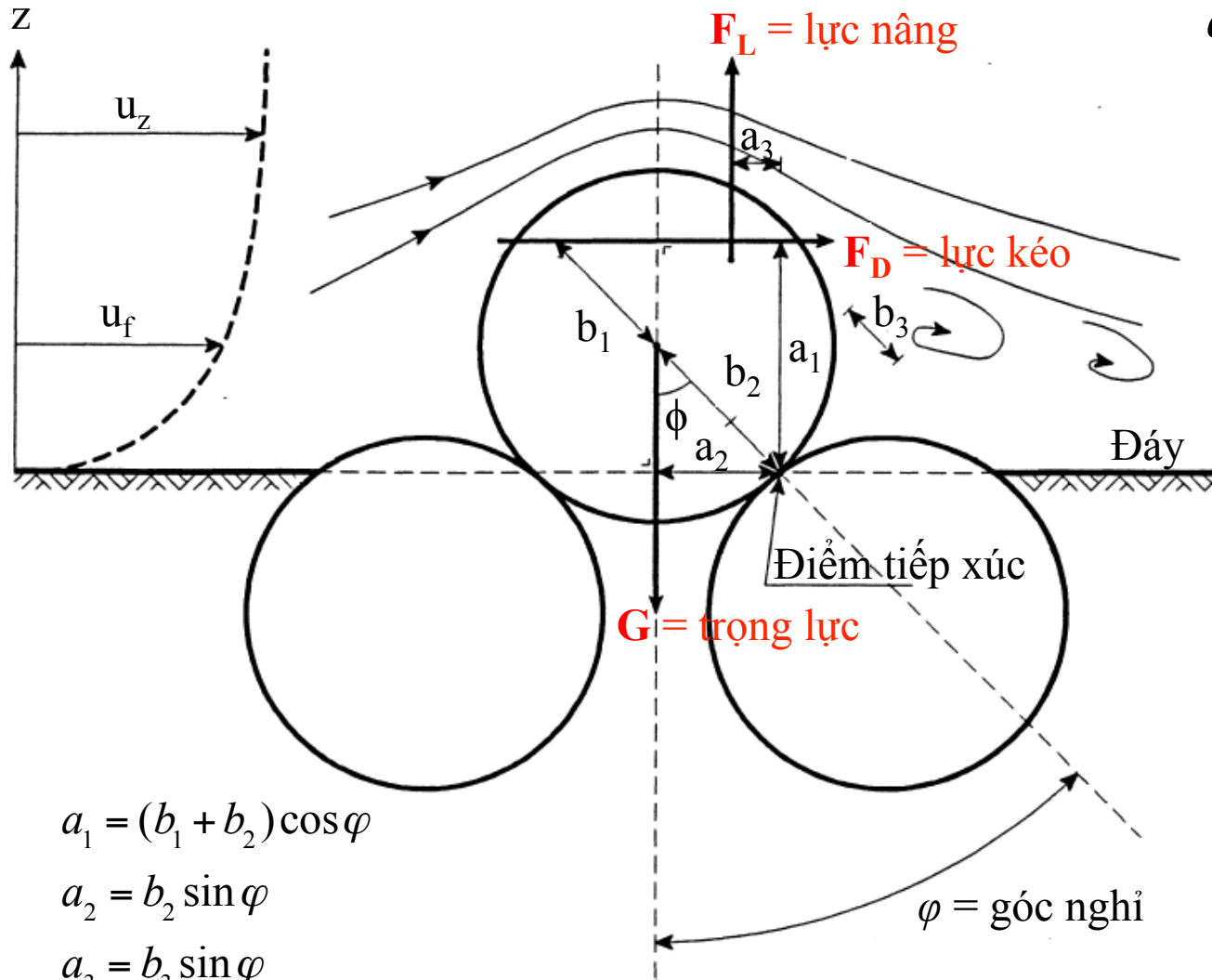
- q_t (m²/s): lưu lượng đơn vị của chuyển tải bùn cát tổng cộng
- w_s (m/s): vận tốc lắng chìm đều trong nước trong
- d_{50} (m): đường kính trung bình của bùn cát
- s : tỷ trọng riêng của bùn cát
- Nồng độ chuyển tải bùn cát

$$c_t = \frac{q_t}{q}$$

- q (m²/s): lưu lượng đơn vị của dòng chảy

Chương 4
**Chuyển động của
bùn cát đáy**

§4.1. Ngưỡng chuyển động



$$a_1 F_D + a_3 F_L \geq a_2 G$$

$$F_L \ll G$$

$$F_D \geq \alpha_1 G \tan \varphi$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D \left(\frac{1}{4} \pi d^2 \right) u_f^2$$

$$u_f = \alpha_2 u_*$$

$$F_D = \alpha_3 \rho d^2 u_*^2$$

$$G = \alpha_4 (\rho_s - \rho) g d^3$$

$$\frac{u_*^2}{\Delta g d} \geq \alpha_5 \tan \varphi$$

$$a_1 = (b_1 + b_2) \cos \varphi$$

$$a_2 = b_2 \sin \varphi$$

$$a_3 = b_3 \sin \varphi$$

$\varphi = \text{góc nghỉ}$

§4.1. Ngưỡng chuyển động

- Chuyển động xảy ra khi $\theta \geq \theta_{cr}$

$$\theta = \frac{u_*^2}{\Delta g d} = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g d}$$

Thông số chuyển động (Shields)

$$\theta_{cr} = \alpha_5 \tan \varphi = \frac{4\alpha_1 \tan \varphi}{3\alpha_2^2 C_D}$$

Thông số Shields giới hạn

- θ_{cr} phụ thuộc vào điều kiện thủy lực gần đáy (biểu thị qua R_e), hình dạng hạt, vị trí tương đối của hạt so với các hạt khác.

$$\theta_{cr} = f(R_{e*}), \text{ với } R_{e*} = du_*/\nu$$

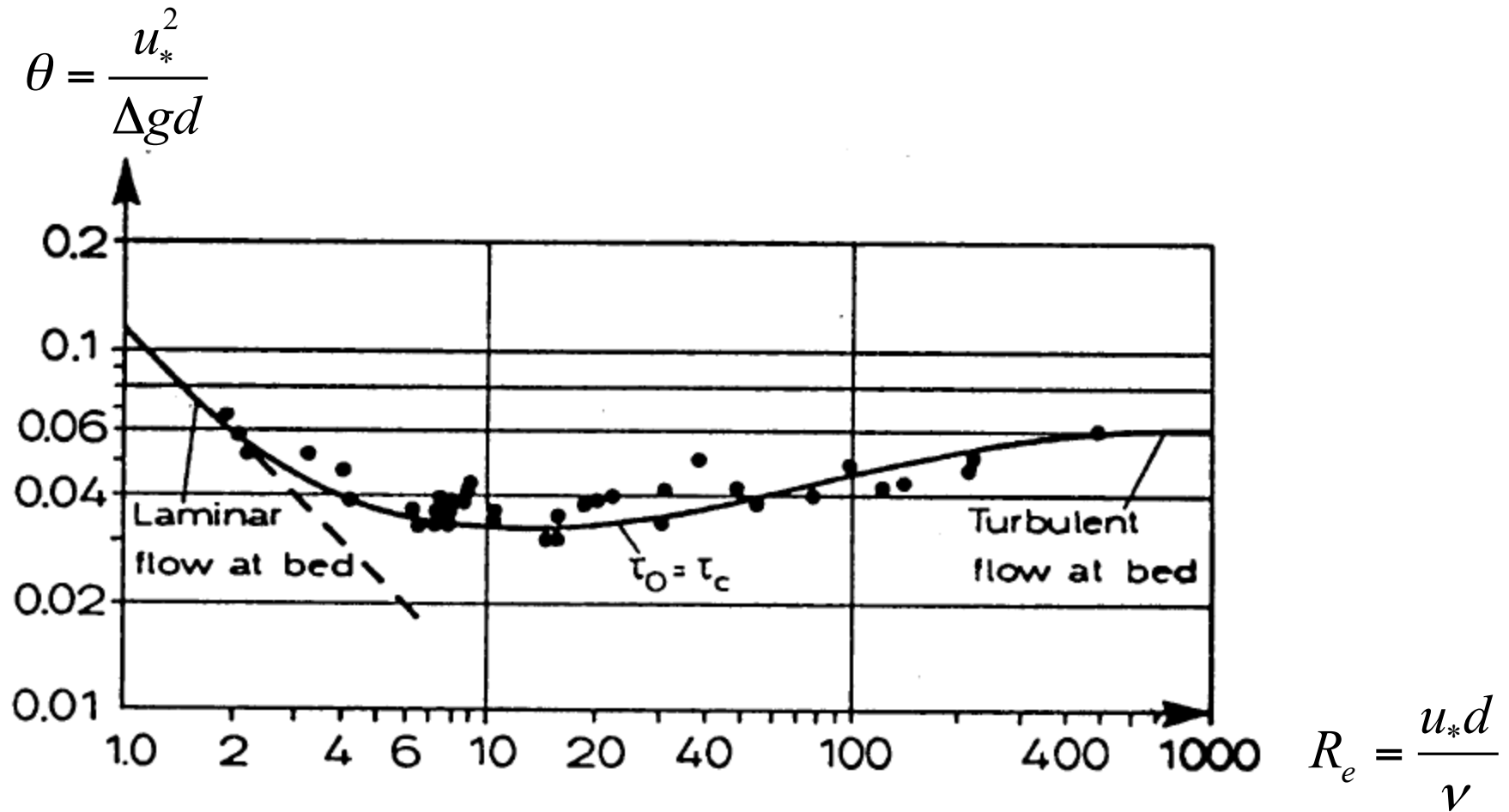
- Các thí nghiệm của Shields (1936)

$$\theta_{cr} \geq 0.035 \quad \text{với } R_{e*} \leq 5 \text{ (chảy rối thành trơn)}$$

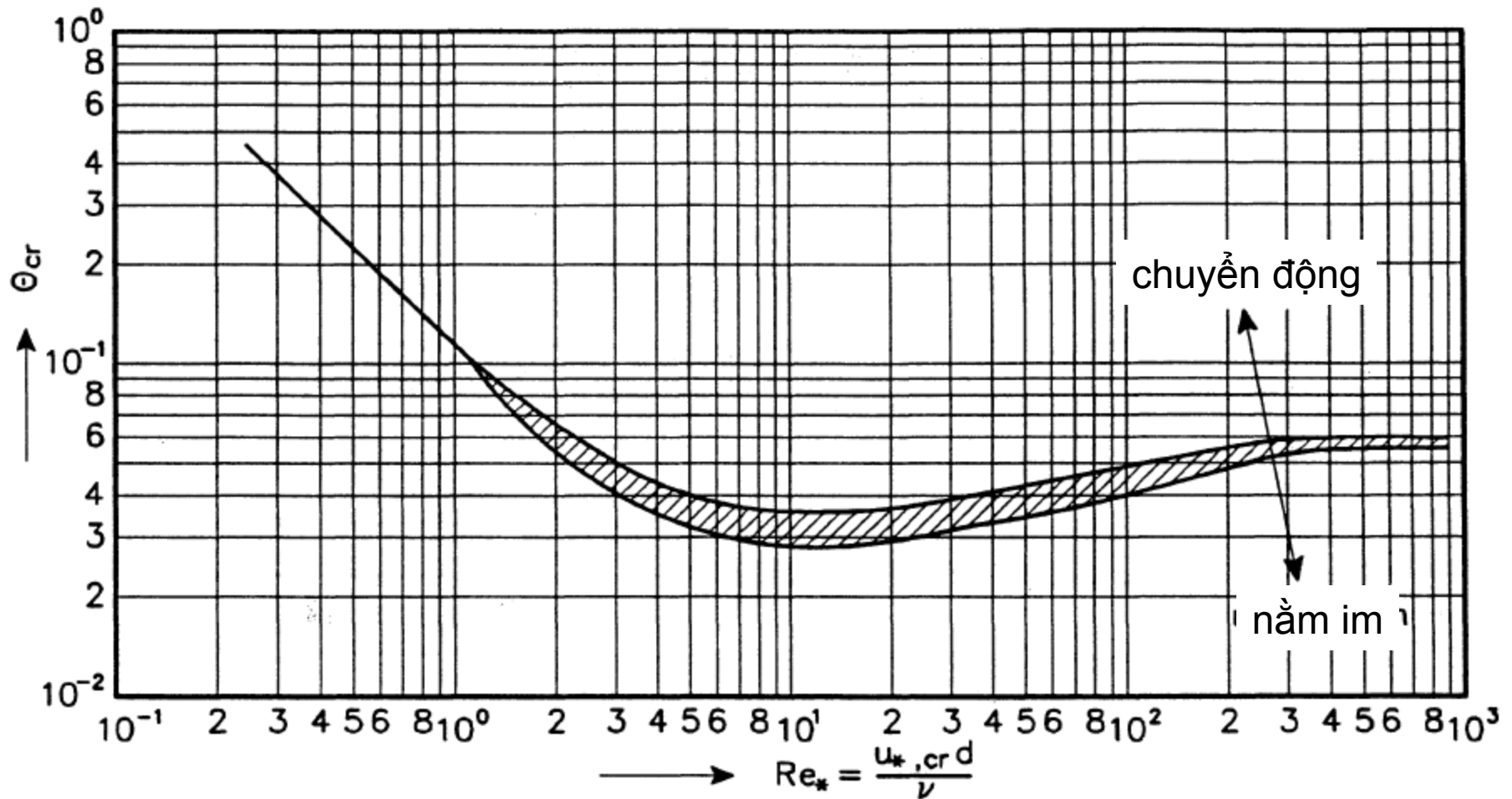
$$0.03 \leq \theta_{cr} \leq 0.04 \quad \text{với } 5 \leq R_{e*} \leq 70 \text{ (vùng chuyển tiếp)}$$

$$0.04 < \theta_{cr} \leq 0.06 \quad \text{với } R_{e*} \geq 70 \text{ (chảy rối thành nhám)}$$

§4.1. Ngưỡng chuyển động trên đáy phẳng (Shields, 1936)

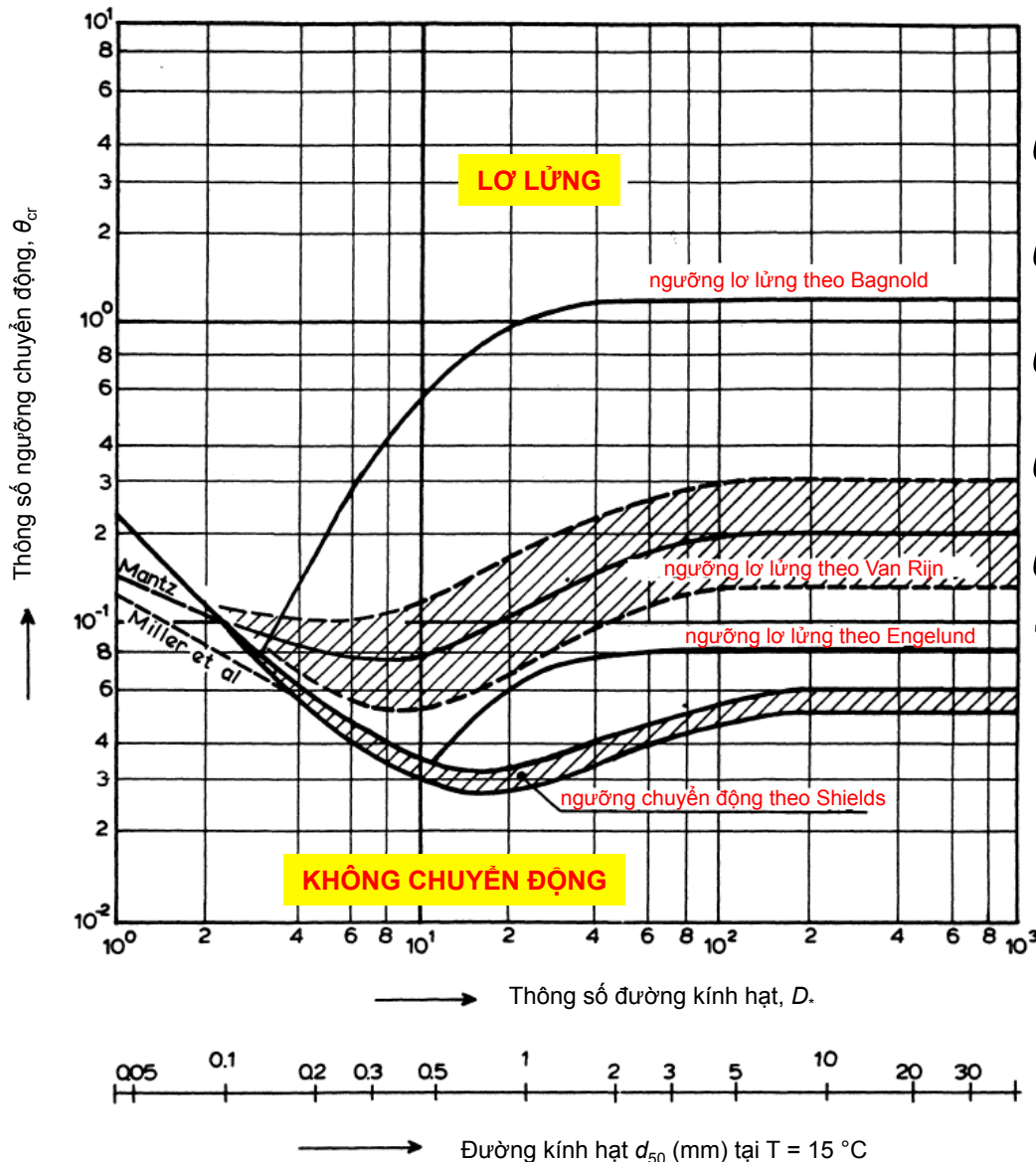


§4.1. Ngưỡng chuyển động trên đáy phẳng (Shields, 1936)



§4.1. Ngưỡng chuyển động trên đáy phẳng

(Van Rijn, 1989)



$$\theta_{cr} = 0.24D_*^{-1} \quad \text{với} \quad 1 < D_* \leq 4$$

$$\theta_{cr} = 0.14D_*^{-0.64} \quad \text{với} \quad 4 < D_* \leq 10$$

$$\theta_{cr} = 0.04D_*^{-0.1} \quad \text{với} \quad 10 < D_* \leq 20$$

$$\theta_{cr} = 0.013D_*^{0.29} \quad \text{với} \quad 20 < D_* \leq 150$$

$$\theta_{cr} = 0.055 \quad \text{với} \quad D_* > 150$$

Thông số Shields giới hạn

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}$$

Thông số đường kính hạt

$$D_* = \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{\nu^2} d_{50}}$$

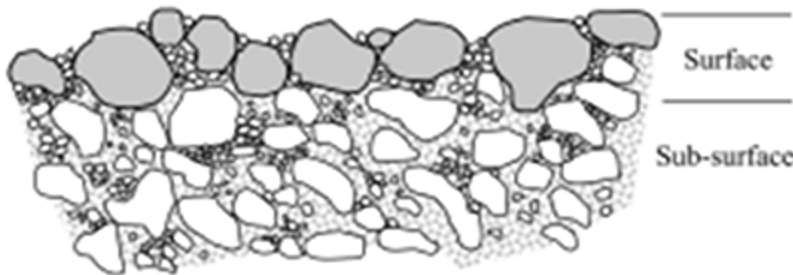
$\tau_{b,cr}$: Ứng suất tiếp đáy tới hạn trung bình thời gian

§4.2. Ảnh hưởng của hình dạng, cấp phối và kích thước hạt

- Thông Shields θ_{cr} giới hạn ít bị ảnh hưởng bởi hình dạng hạt nếu D_* tính toán dựa trên d_n . Hạt rất dẹt có θ_{cr} lớn ($1.5 \rightarrow 2$).
- Cấp phối hạt phân tán rộng ($d_{90}/d_{50} > 3$) có ảnh hưởng đến θ_{cr} do hiện tượng các hạt lớn tạo thành lớp bảo vệ cho các hạt nhỏ. Ứng suất tới hạn cho từng cấp hạt (Egiazaroff, 1965):

$$\tau_{b,cr,i} = \xi_i \cdot \tau_{b,cr}$$

$$\xi_i = \left[\frac{\log(19)}{\log(19d_i / d_m)} \right]^2$$



d_m : Đường kính trung bình

d_i : Đường kính của cấp hạt i

ξ_i : Hệ số lộ diện của cấp hạt i

$\xi_i = \theta_i / \theta_c$ với θ_c tính theo d_m

$\tau_{b,cr}$: Ứng suất tiếp tới hạn ứng với d_m

$\tau_{b,cr,i}$: Ứng suất tiếp tới hạn của cấp hạt i

§4.3. Ảnh hưởng của độ dốc đáy

- Đáy dốc dọc phương dòng chảy β

- Trạng thái giới hạn $F_{D,cr} + G \sin \beta = G \cos \beta \tan \varphi$
- Trường hợp đáy nằm ngang $F_{D,cr,0} = G \tan \varphi$

$$\left. \begin{array}{l} F_{D,cr} + G \sin \beta = G \cos \beta \tan \varphi \\ F_{D,cr,0} = G \tan \varphi \end{array} \right\} \rightarrow \frac{F_{D,cr,\beta}}{F_{D,cr,0}} = \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin \varphi}$$

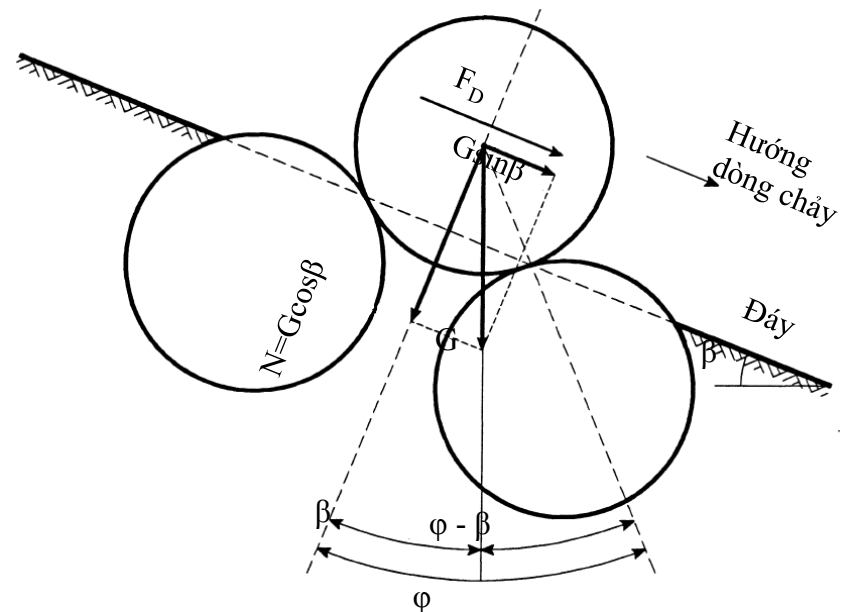
$$\rightarrow F_{D,cr,\beta} = k_{\beta} F_{D,cr,0}$$

- Schoklitsh (1914):

$$\tau_{b,cr,\beta} = k_{\beta} \tau_{b,cr,0}$$

- Dốc xuôi dòng: $k_{\beta} = \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin \varphi}$

- Dốc ngược dòng: chỉ cần lấy $\beta < 0$.



§4.3. Ảnh hưởng của mái dốc bên

- Mái dốc bên γ

– Trạng thái giới hạn

$$\sqrt{F_{D,cr,\gamma}^2 + G^2 \sin^2 \gamma} = G \cos \gamma \tan \varphi$$

$$\rightarrow \left[\frac{F_{D,cr,\gamma}}{F_{D,cr,0}} \right]^2 = \cos^2 \gamma \left[1 - \frac{\tan^2 \gamma}{\tan^2 \varphi} \right] \rightarrow F_{D,cr,\gamma} = k_\gamma F_{D,cr,0}$$

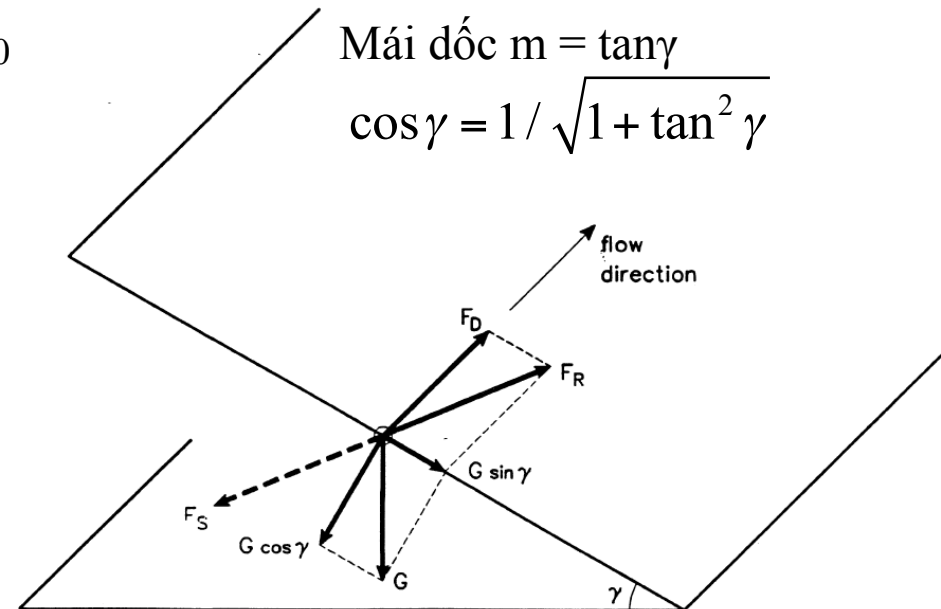
– Lender (1912):

$$\tau_{b,cr,\gamma} = k_\gamma \tau_{b,cr,0}$$

$$k_\gamma = \cos \gamma \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \gamma}{\tan^2 \varphi}}$$

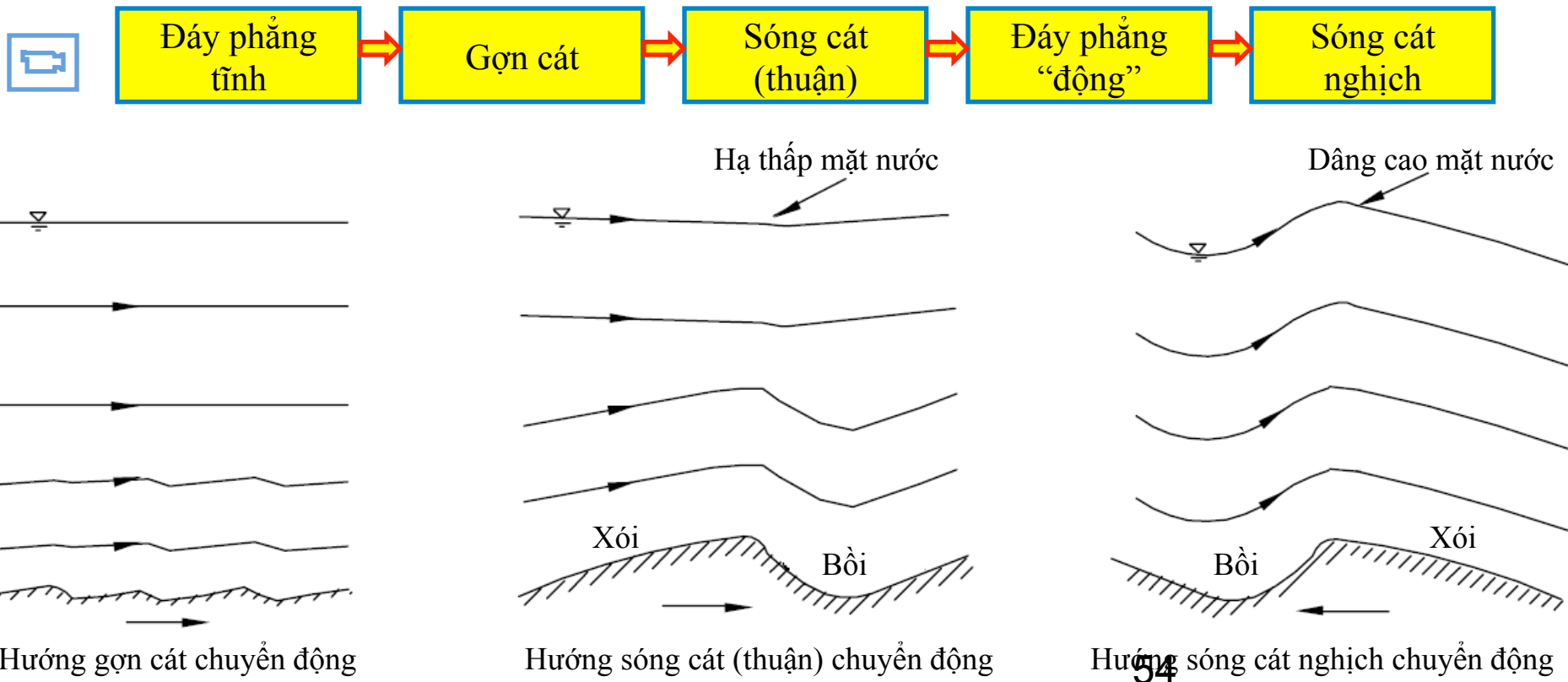
- Kết hợp cả độ dốc đáy và độ dốc mái bên

$$\tau_{b,cr} = k_\beta k_\gamma \tau_{b,cr,0}$$

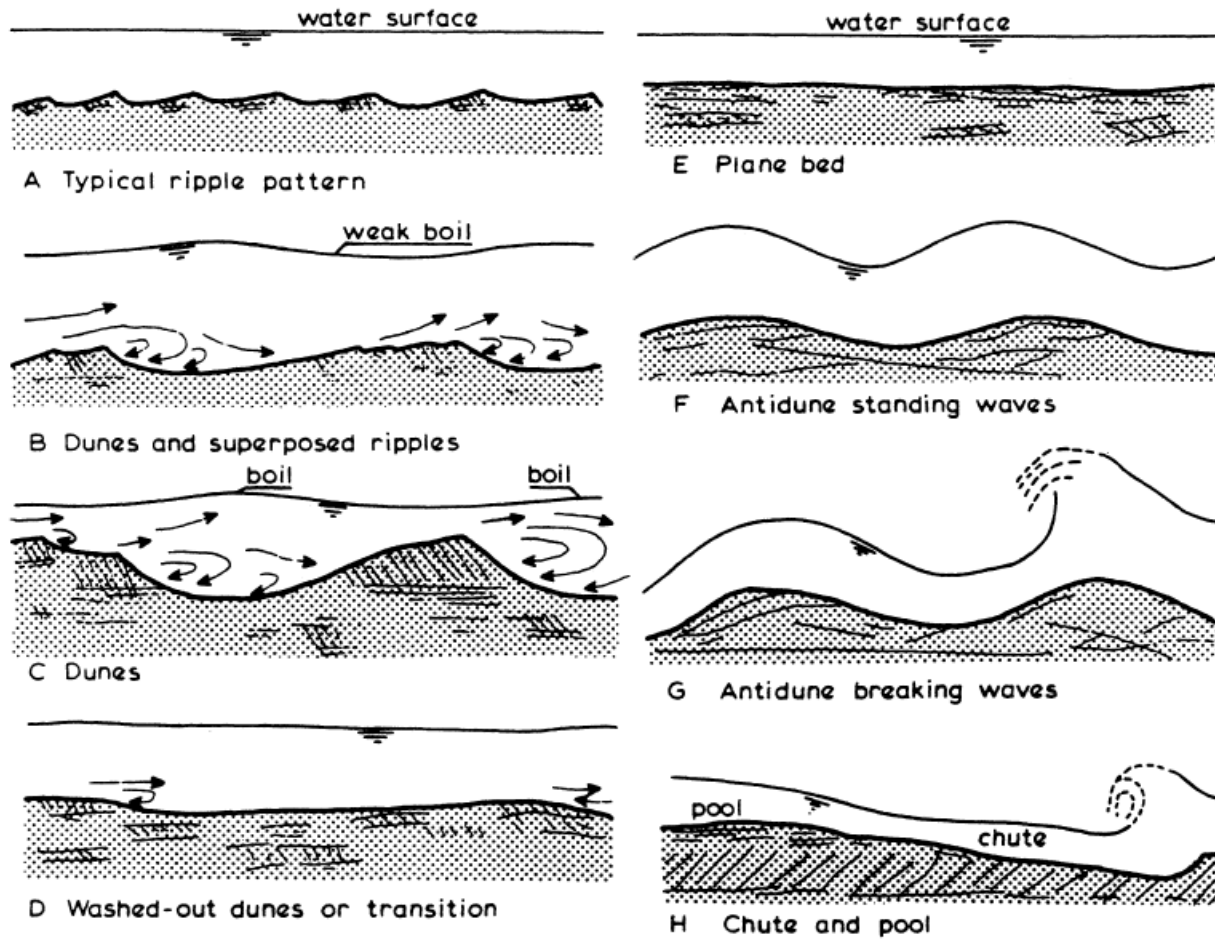


§4.4. Ảnh hưởng của dạng đáy

- Khi bùn cát bắt đầu chuyển động, hình dạng đáy sẽ thay đổi. Cùng với sự gia tăng của vận tốc dòng chảy, có thể xuất hiện các dạng đáy khác nhau:



§4.4. Sự phát triển của các dạng đáy



Gợn cát (ripples)

- Hình thành khi vận tốc dòng chảy tương đối yếu và bùn cát mịn ($d_{50} < 0.7 \text{ mm}$).
- Dòng chảy yếu: tương đối đều đặn, có mái thượng lưu 6° , mái hạ lưu 32° .
- Dòng chảy tăng: hình thành gợn cát 3 chiều.
- Kích thước gợn cát phụ thuộc đường kính hạt, điển hình (Yalin, 1985)
Chiều cao: $\Delta_r \approx (50 \div 200)d_{50}$
Chiều dài: $\lambda_r \approx (50 \div 1000)d_{50}$



Kích thước gợn cát

- Chiều cao gợn cát (Δ_r , m)

$$\frac{\Delta_r}{h} = 0.02(1 - e^{-0.1T})(10 - T)$$

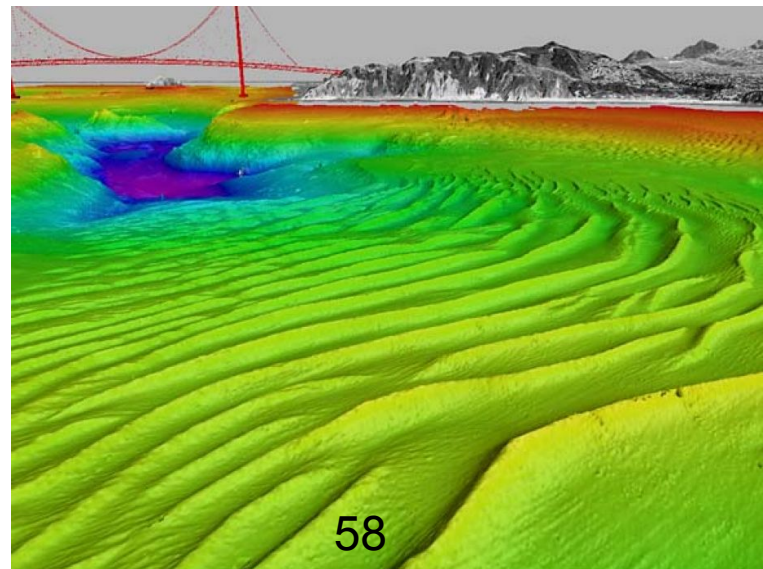
- Chiều dài gợn cát (λ_r , m)

$$\lambda_r = 0,5h$$

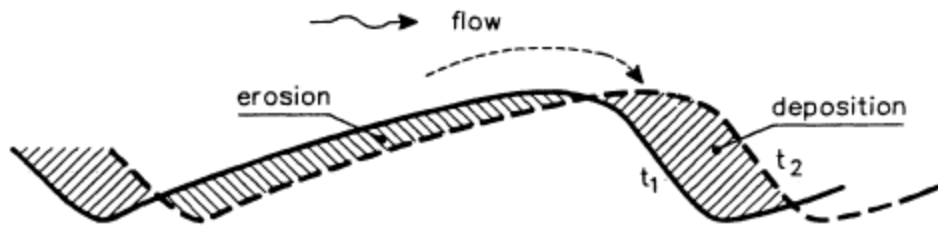
Cách tính T → xem trang 61 hoặc 42.

Sóng cát

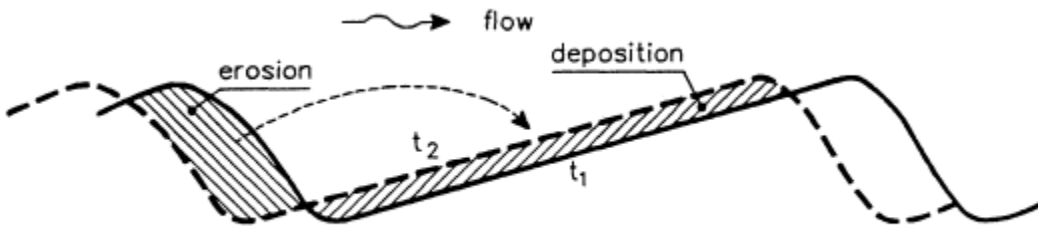
- Sóng cát (dunes) có hình dạng tương tự gợn cát, nhưng bùn cát thô hơn ($d_{50} > 0.6 \text{ mm}$) và kích thước lớn hơn.
- Kích thước phụ thuộc độ sâu nước. Kích thước tăng khi vận tốc dòng chảy tăng \rightarrow độ sâu nước trên đỉnh giảm \rightarrow vận tốc trên đỉnh lớn \rightarrow đỉnh bị xói \rightarrow là phẳng đỉnh \rightarrow đáy phẳng khi vận tốc rất lớn.
- Sóng cát nghịch (antidunes) hình thành khi $F_r > 1$. Có kích thước tương tự sóng cát, song kém ổn định, bị vỡ và chuyển dịch ngược chiều dòng chảy



Sóng cát



DUNES IN LOWER REGIME



ANTI-DUNES IN UPPER REGIME



Kích thước sóng cát

- Chiều dài sóng cát (λ_d , m)

- Van Rijn (1982, 1984)

$$\lambda_d = 7.3h$$

- Fredsøe (1980, 1982)

$$\lambda_d = f(\theta'_{\text{đinh}}, d_{50})h$$

- Allen (1968)

$$\lambda_d = h^{0.6}$$

- Ranga Raju-Soni (1976)

$$\lambda_d = f(\theta', d_{50}, F_r, h)$$

- Yalin (1972)

$$\lambda_d = 6.3h$$

- Gill (1971)

$n = 3 \div 6$: hệ số mũ của vận tốc trong công thức chuyển tải bùn cát

$\alpha = 0.5 \div 0.7$: hệ số hình dạng sóng cát

- Chiều cao sóng cát (Δ_d , m)

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0.11 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T)$$

$$\Delta_d / h = f(\theta'_{\text{đinh}}, d_{50})h$$

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0.086h^{0.19}$$

$$\Delta_d / h = f(\theta', F_r)$$

$$\frac{\Delta_d}{h} = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\tau_{b,cr}}{\tau_{b,c}} \right)$$

$$\frac{\Delta_d}{h} = \frac{1 - F_r^2}{2n\alpha} \left(1 - \frac{\tau_{b,cr}}{\tau_{b,c}} \right)$$

Các yếu tố ảnh hưởng và phân loại dạng đáy

- Liu (1957) $f\left(\frac{u_*}{w_s}, \frac{u_* d_{50}}{\nu}\right)$

- Simons-Richardson (1966) $f(\tau_b \bar{u}, d_f)$

- Van den Berg – Van Gelder (1989) $f(\theta', D_*)$

- Van Rijn (1984, 1989) $f(T, D_*)$

- u_* : vận tốc ma sát gần đáy do dòng chảy

- τ_b : ứng suất tiếp tổng cộng ở đáy do dòng chảy

- θ' : thông số chuyển động của hạt

- T : thông số ứng suất tiếp đáy

- τ'_b : ứng suất tiếp tổng cộng ở đáy liên quan đến hạt

- C' : hệ số nhám Chézy liên quan đến hạt

- D_* : thông số đường kính hạt

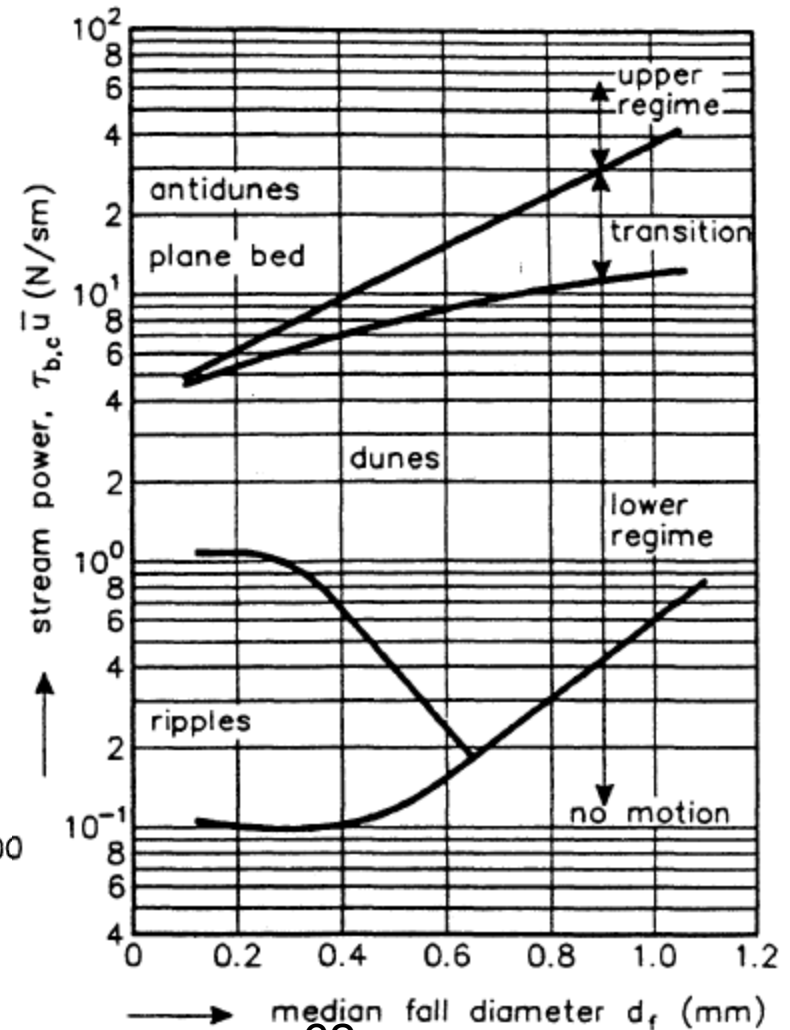
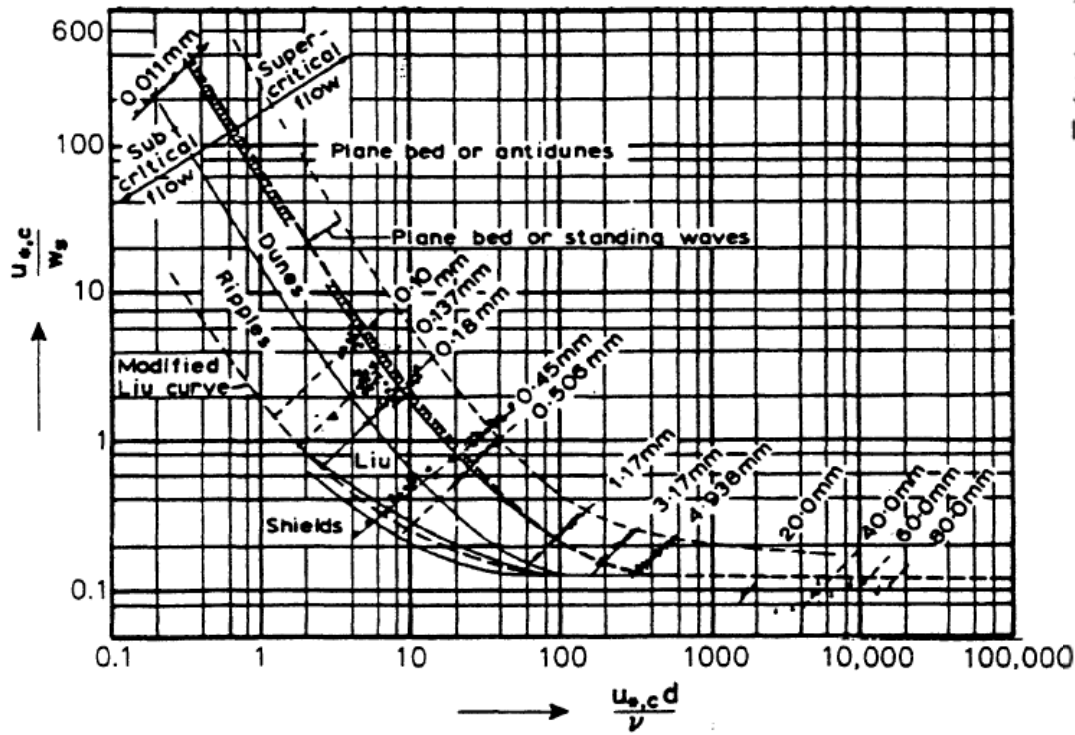
$$\theta' = \tau'_b / [(\rho_s - \rho)gd_{50}]$$

$$T = (\tau'_b - \tau_{b,cr}) / \tau_{b,cr}$$

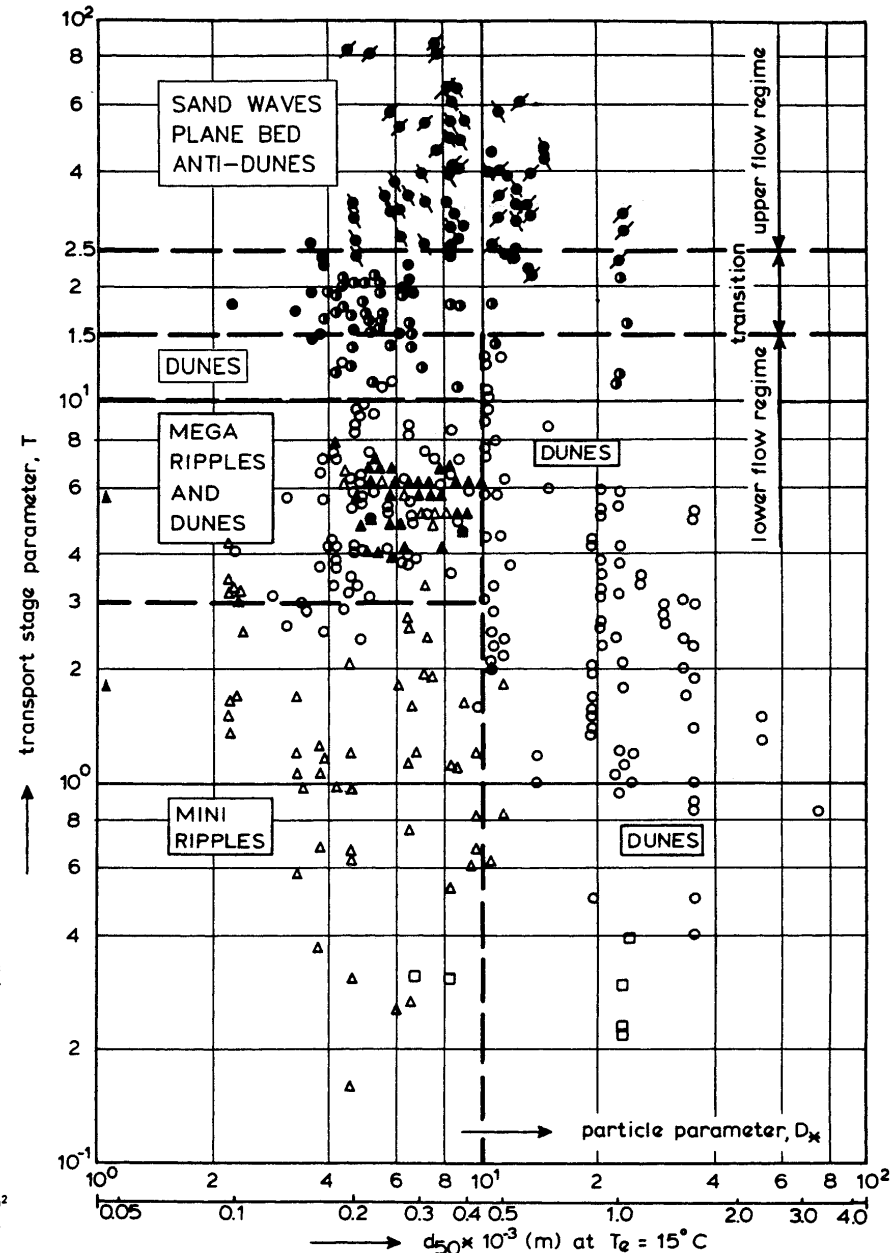
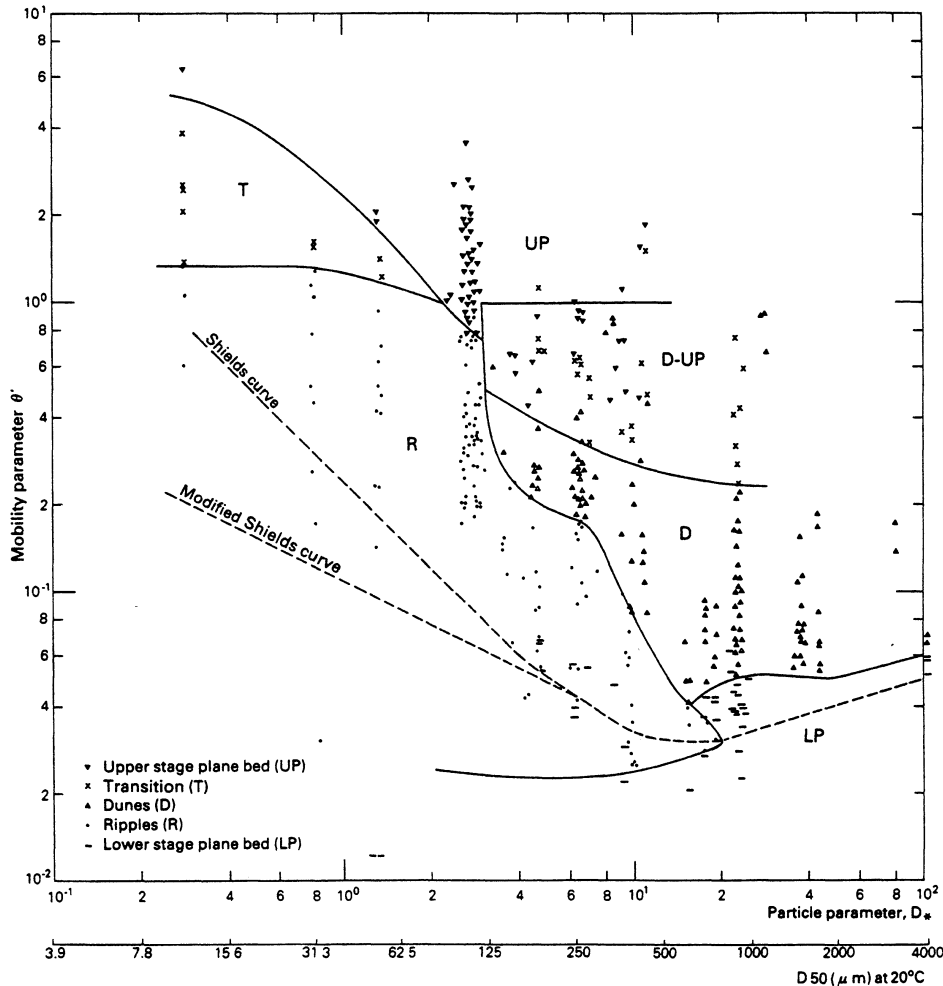
$$\tau'_b = \rho g(\bar{u} / C')^2$$

$$C' = 18 \log[12h / (3d_{90})]$$

Phân loại dạng đáy theo Liu (1957) (trái), Simmons-Richardson (1966) (phải)



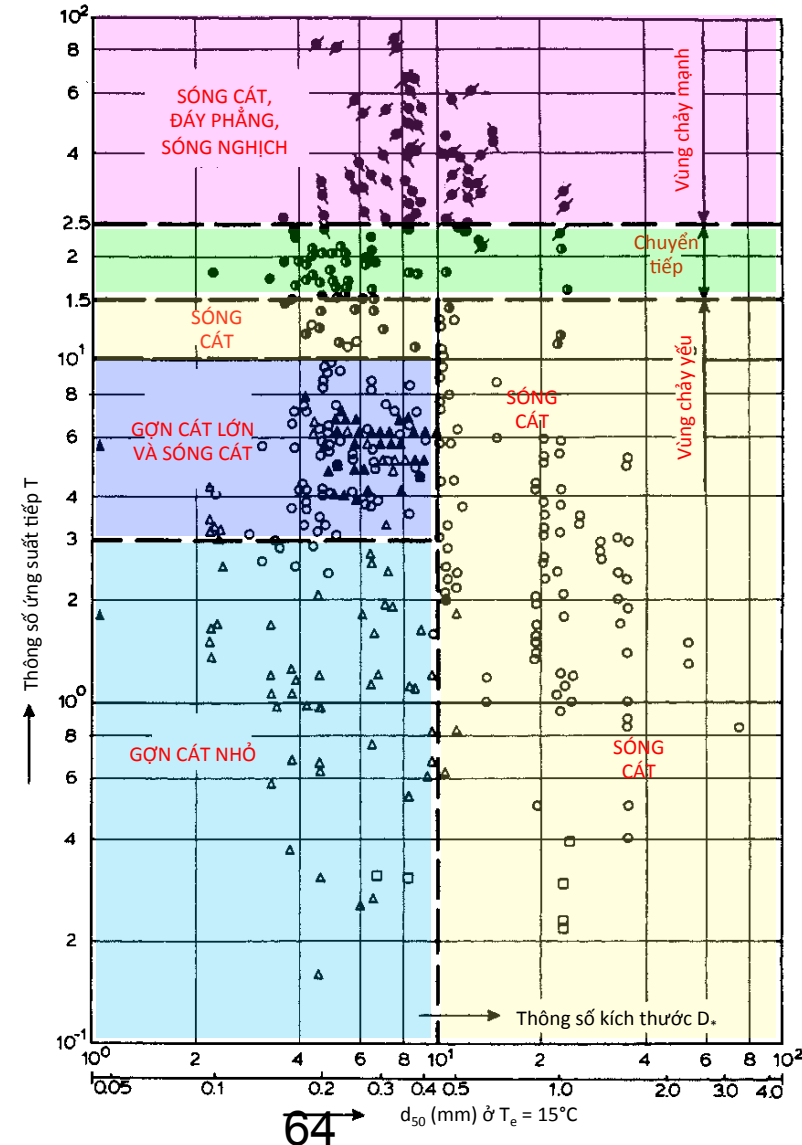
Phân loại dạng đáy theo Van den Berg –
 Van Gelder (1989) (trái),
 Van Rijn (1984, 1989) (phải)



Phân loại dạng đáy Van Rijn (1984, 1989)

Chế độ chuyển tải		Kích thước hạt	
		$1 \leq D_* \leq 10$	$D_* > 10$
Yếu	$0 \leq T \leq 3$	Gợn cát nhỏ	Sóng cát
	$3 < T \leq 10$	Gợn cát lớn và sóng cát	
	$10 < T \leq 15$	Sóng cát	
Chuyển tiếp	$15 < T < 25$	Sóng cát bị rửa trôi đỉnh	
Mạnh	$\frac{T}{F_T} \geq 25, F_T < 0.8$	Sóng cát (đối xứng)	
	$\frac{T}{F_T} \geq 25, F_T \geq 0.8$	Đáy phẳng / Sóng cát nghịch	

- Đáy phẳng (không chuyển động)
- ▲ Gợn cát nhỏ
- ▲ Gợn cát lớn và sóng cát
- Sóng cát
- Sóng cát bị rửa trôi ở đỉnh (chuyển tiếp)
- Đáy phẳng
- Sóng cát nghịch (sóng đứng)
- Sóng cát nghịch (sóng vỡ)



§4.5. Độ nhám hiệu quả của đáy

(Phương pháp Van Rijn, 1984b, 1989)

- Độ nhám đáy biểu thị bởi độ nhám hạt tương đương (độ nhám hiệu quả, Nikurase) k_s . Với đáy phẳng và hạt đồng đều: $k_s =$ đường kính hạt.
- Độ nhám hiệu quả của đáy bao gồm độ nhám do hạt k'_s và độ nhám do dạng đáy k''_s .

$$k_s = k'_s + k''_s$$

- Độ nhám hiệu quả do hạt (k'_s):

$$k'_s = 3d_{90} \quad \text{với } \theta < 1 \text{ (chảy yếu)}$$

$$k'_s = 3\theta d_{90} \quad \text{với } \theta \geq 1 \text{ (chảy mạnh)}$$

$$\theta = u_*^2 / [\Delta g d_{50}] \quad \text{thông số cơ động (đáy phẳng có } \theta = \theta')$$

$$u_* = \sqrt{g\bar{u}} / C \quad \text{vận tốc ma sát (đáy phẳng có } u_* = u'_*)$$

$$C = 18 \log[12h / (k'_s + 3.3\nu_m / u_*)] = 18 \log[12h / (k'_s + \nu_m C / \bar{u})]$$

ν_m : hệ số nhớt động học của hỗn hợp nước + bùn cát ($\approx 10^{-5}$ m²/s ở gần đáy)

§4.5. Độ nhám hiệu quả do dạng đáy

(Phương pháp Van Rijn, 1984b, 1989)

- Độ nhám hiệu quả do dạng đáy (k''_s): $k''_s = k''_{s,r} + k''_{s,d} + k''_{s,sw}$
- k''_s : độ nhám hiệu quả tổng cộng do dạng đáy
- $k''_{s,r}$: độ nhám hiệu quả do dạng đáy gây ra bởi gợn cát
- $k''_{s,d}$: độ nhám hiệu quả do dạng đáy gây ra bởi sóng cát phi đối xứng
- $k''_{s,sw}$: độ nhám hiệu quả do dạng đáy gây ra bởi sóng cát đối xứng

$$k''_{s,r} = 20\gamma_r \Delta_r (\Delta_r / \lambda_r)$$

γ_r : thông số hiện diện gợn cát
($\gamma_r = 1$: chỉ có gợn cát không,
 $\gamma_r = 0.7$: gợn cát xuất hiện trên mặt sóng cát)

$$k''_{s,d} = 1.1\gamma_d \Delta_d (1 - e^{-25\Delta_d / \lambda_d})$$

γ_d : thông số dạng sóng cát
($\gamma_d = 0.7$: các điều kiện hiện trường)

$$k''_{s,sw} = 0$$

đối số với sóng cát đối xứng

§4.6. Ứng suất tiếp tại đáy

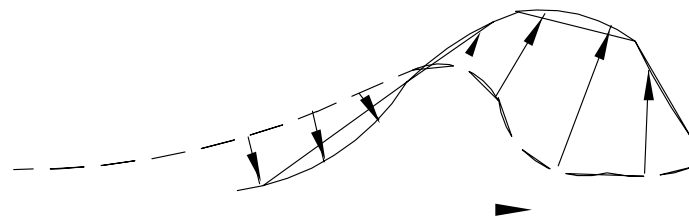
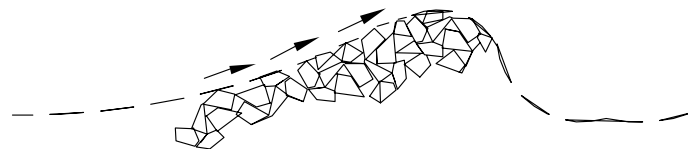
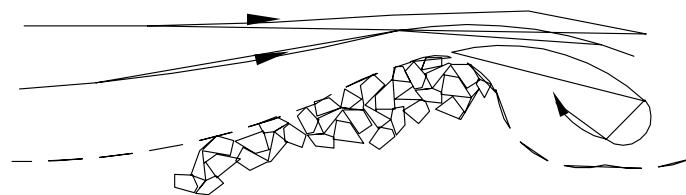
(Phương pháp Engelund và Hansen 1967)

- Ứng suất tiếp tổng cộng với đáy có gợn cát $\tau_b = \tau'_b + \tau''_b$
- τ'_b : ứng suất do ma sát bề mặt tác dụng trực tiếp lên hạt (ứng suất hiệu quả).
- τ''_b : ứng suất gây ra do hình dạng của gợn cát ($\tau''_b =$ lực kéo F_D tác dụng lên gợn / diện tích mặt bằng)

$$\tau'_b = \rho g h' I = \frac{1}{8} \rho f' \bar{u}^2$$

$$\tau''_b = \rho g h'' I = \frac{1}{8} \rho f'' \bar{u}^2$$

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b$$



§4.6. Ứng suất hiệu quả do hạt

(Phương pháp Engelund và Hansen 1967)

- Engelund và Hansen (1967):

$$\tau'_b = \rho g h' I = \frac{1}{8} \rho f' \bar{u}^2 \quad \longrightarrow \quad u'_* = \sqrt{g h' I}$$

- Với $\frac{\theta'}{\theta} = \frac{h'}{h}$

- Chảy yếu $\theta' = 0.06 + 0.4\theta^2$ với $\theta \leq 0.7$

- Chảy mạnh $\theta' = \theta$ với $0.7 < \theta < 1.0$

$$\theta' = (0.3 + 0.7\theta^{-1.8})^{-0.56} \quad \text{với } \theta \geq 1$$

$$\bar{u} = C\sqrt{hI} = 2.5u'_* \ln\left(\frac{12h'}{2.5d_{50}}\right) \quad \longrightarrow \quad C = 2.5\sqrt{g\frac{h'}{h}} \ln\left(\frac{12h'}{2.5d_{50}}\right)$$

§4.6. Tính toán hệ số nhám Chézy

(Phương pháp Engelund và Hansen 1967)

- Cho h và I . Tính C và \bar{u}

1. Tính u_* và θ
2. Tính θ'
3. Tính $h' = (\theta'/\theta)h$
4. Tính C
5. Tính $\bar{u} = C\sqrt{(hI)}$

- Cho h và \bar{u} . Tính C và I

1. Giả thiết $h' = 0.33h$
2. Tính u'_*
3. Tính θ'
4. Tính θ
5. Tính $h' = (\theta'/\theta)h$
6. Quay lại 2 cho đến khi h' không đổi
7. Tính C
8. Tính I từ $\bar{u} = C\sqrt{(hI)}$

Cách khác (Van Rijn)
Không giả thiết h'
Làm giống §4.5 được $k_s \rightarrow C$
 $C = 18 \log(12h/k_s)$

VD $h = 5 \text{ m}$, $\bar{u} = 1 \text{ m/s}$, $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$, $d_{90} = 1 \text{ mm}$

§4.6. Ứng suất liên quan đến dạng đáy

(Phương pháp Engelund và Hansen 1967)

- Engelund và Hansen (1967):

$$\tau_b'' = \rho g h'' I = \frac{1}{8} \rho f'' \bar{u}^2 \quad \longrightarrow \quad u_*'' = \sqrt{g h'' I}$$

- Hệ số ma sát cho sóng cát Engelund (1977):

$$f_c'' = 10 \frac{\Delta_d}{h \lambda_d} e^{-2.5 \Delta_d / h}$$

- Hệ số ma sát cho sóng cát và gợn cát Vanoni-Hwang (1967):

$$(f'')^{-0.5} = 3.5 \log \left(\frac{h}{e \Delta} \right) - 2.3$$

- h: độ sâu nước
- Δ : chiều cao của dạng đáy
- λ : chiều dài của dạng đáy
- e: tỷ số giữa diện tích sườn hạ lưu của mái dốc và tổng diện tích của dạng đáy

§4.7. Vận tốc khởi động trung bình độ sâu

- Giả thiết khu vực chảy rối thành nhám ($u_* k_s / \nu > 70$), vận tốc khởi động trung bình theo độ sâu cho đáy phẳng

$$\bar{u}_{cr} = 5.75 u_* \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$$

- Vận tốc ma sát giới hạn $u_* = \sqrt{\theta_{cr} \Delta g d_{50}}$
- Độ cao nhám tương đương $k_s = \alpha d_{90}$ $\bar{u}_{cr} = 5.75 \sqrt{\Delta g d_{50} \theta_{cr}} \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$
- Hệ số $\alpha = 1$ với đá có $d_{50} \geq 0.1$ m, $\alpha = 3$ cho cát và sỏi
- Với $k_s = 3d_{90}$, $d_{90} = 2d_{50}$, dựa trên đường cong Shields cho cát từ 0.1 mm – 2 mm có

$$\bar{u}_{cr} = 0.19 d_{50}^{0.1} \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad \text{với } 0.1 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 0.5 \text{ mm}$$

$$\bar{u}_{cr} = 8.50 d_{50}^{0.6} \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad \text{với } 0.5 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 2 \text{ mm}$$

§4.8 Đặc điểm chuyển động của bùn cát đáy

- Chuyển động của nước

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

- Chuyển động nhảy cóc của hạt

- Độ cao $\delta_b = 0.3 D_*^{0.7} T^{0.5} d_{50}$

- Chiều dài $\lambda_b = 3 D_*^{0.6} T^{0.9} d_{50}$

- Vận tốc

- Van Rijn (sai số 10%) $u_b = \left[9 + 2.6 \log D_* - 8 \sqrt{\theta_{cr} / \theta} \right] u_*$

- Van Rijn (sai số 50%) $u_b = 1.5 T^{0.6} \sqrt{\Delta g d_{50}}$

- Engelund và Fredsoe $u_b = \left[10 - 7 \sqrt{\theta_{cr} / \theta} \right] u_*$

§4.9 Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

- Các phương pháp tính vận chuyển bùn cát được chia thành 5 nhóm tùy thuộc các thông số thủy lực:

- Vận tốc dòng chảy $q_b \propto (\bar{u} - \bar{u}_{cr})^m$ với $m = 3 \div 5$

- Ứng suất tiếp đáy $q_b \propto (\tau - \tau_{cr})^n$ với $n \approx 1.5$

- Xác suất hạt chuyển động

- Tốc độ chuyển động của dạng đáy

- Năng lượng dòng chảy $q_b \propto \tau \bar{u}$

§4.9 Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

- Meyer-Peter-Mueller (1948) dựa trên kết quả thí nghiệm cho

$$\phi_b = 8(\theta' - 0.047)^{1.5}$$

- ϕ_b : Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy phi thứ nguyên $\phi_b = q_b / \sqrt{\Delta g d_m^3}$
- θ : Thông số khởi động Shields của hạt $\theta = \tau_b / [(\rho_s - \rho) g d_m]$
- $\theta' = \mu\theta$: Thông số Shields hiệu quả $\tau_b = \rho g h I$
- 0.047: giá trị thông số Shields giới hạn $\mu = (C / C')^{1.5}$
- q_b (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy $C = 18 \log(12h / k_s)$
- τ_b (N/m²): Ứng suất tiếp của dòng chảy $C' = 18 \log(12h / d_{90})$
- d_m (m): Đường kính hạt trung bình $d_m = \sum p_i d_i \approx (1.1 \div 1.3) d_{50}$
- μ : Hệ số dạng đáy, hệ số hiệu quả
- C (m^{0.5}/s): Hệ số nhám Chézy tổng thể
- C' (m^{0.5}/s): Hệ số nhám Chézy do hạt
- I : Độ dốc năng lượng
- k_s (m): Hệ số nhám hiệu quả

§4.9. Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

- Einstein-Brown (1950)

$$\phi_b = 40K (\theta')^3$$

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{D_*^3}} - \sqrt{\frac{36}{D_*^3}}$$

- Kalinske-Frijlink (1952) xấp xỉ công thức của Meyer-Peter Müller (1948) và Einstein (1950)

$$q_b = 5\mu^{0.5} u_* d_{50} e^{-0.27/(\mu\theta)}$$

- Bijker (1970): giống công thức KF (1952) trên, thay $5\mu^{0.5} = b$, xem §5.11.
- Bagnold (1966)

$$q_b = \frac{e_b \tau_b \bar{u}}{(\rho_s - \rho) g \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta)}$$

- $e_b = 0.1 \div 0.2$: hệ số hiệu ích
- $\tan \varphi = 0.6$: hệ số ma sát động lực
- $\tan \beta = I_b$: độ dốc đáy

§4.9. Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

- Van Rijn (1984a)

$$q_b = 0.053 \sqrt{\Delta g} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} \quad \text{với } T < 3$$

$$q_b = 0.1 \sqrt{\Delta g} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{1.5} \quad \text{với } T \geq 3$$

- q_b (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy
- T : Thông số ứng suất tiếp phi thứ nguyên
- τ'_b (N/m²): Ứng suất tiếp hiệu quả
- C' (m^{0.5}/s): Hệ số nhám Chézy do hạt
- d_{50}, d_{90} (m): Các đường kính hạt
- D_* : Thông số kích thước hạt phi thứ nguyên
- \bar{u} (m/s): Vận tốc dòng chảy trung bình độ sâu
- $\tau_{b,cr}$: Ứng suất giới hạn/khởi động theo Shields

$$T = (\tau'_b - \tau_{b,cr}) / \tau_{b,cr}$$

$$\tau'_b = \rho g (\bar{u} / C')^2$$

$$C' = 18 \log [(12h) / (3d_{90})]$$

$$D_* = \sqrt[3]{\Delta g / \nu^2} d_{50}$$

Khác
công thức
MPM →
slide 74

§4.9. Tính toán lưu lượng bùn cát đáy

- Giả thiết $u_b = 7u'_*$: $q_b = 0.25d_{50}u'_*D_*^{-0.3}T^{1.5}$
 vận tốc ma sát hiệu quả $u'_* = \sqrt{\tau'_b / \rho} = \bar{u} \sqrt{g} / C'$

- Nếu sử dụng các thông số trung bình theo độ sâu

$$q_b = 0.005\bar{u}h \left[\frac{\bar{u} - \bar{u}_{cr}}{\sqrt{\Delta g d_{50}}} \right]^{2.4} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2}$$

Vận tốc giới hạn (giống tr 71):

$$\bar{u}_{cr} = 0.19d_{50}^{0.1} \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad \text{với } 0.1 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 0.5 \text{ mm}$$

$$\bar{u}_{cr} = 8.50d_{50}^{0.6} \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad \text{với } 0.5 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 2 \text{ mm}$$

§4.10. Vận chuyển bùn cát đáy khi dòng chảy yếu

- Paintal (1971) đề nghị cho $\theta < 0.06$ và $d_{50} = 1 \div 25$ mm

$$\phi_b = \alpha \theta^\beta$$

- ϕ_b : Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy phi thứ nguyên
- θ : Thông số khởi động của hạt (phi thứ nguyên)
- $\alpha = 6.56 \times 10^{18}$
- $\beta = 16$

$$\phi_b = q_b / \sqrt{\Delta g d_m^3}$$
$$\theta = u_*^2 / [\Delta g d_{50}]$$

§4.11. Ảnh hưởng của đáy dốc

- Bagnold (1966) đề xuất
$$q_{b,\beta} = q_{b,0} \frac{\tan \varphi}{\cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta)}$$
 - $q_{b,s}$ (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy cho đáy dốc với góc β
 - $q_{b,0}$ (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy cho đáy nằm ngang
 - φ : Góc nghỉ ($\tan \varphi = 0.6$)
 - β : Góc của mái dốc dọc dòng chảy (dốc ngược dòng, lấy $\beta < 0$)

- Smart (1984) đề xuất

$$\phi_b = 4\sigma (\tan \beta)^{0.6} Cg^{-0.5} \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr})$$

- ϕ_b : Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy phi thứ nguyên
- θ : Thông số khởi động của hạt (phi thứ nguyên)
- θ_{cr} : Thông số Shields được điều chỉnh cho đáy dốc
- σ : Hệ số chọn lọc của đường cấp phối hạt

$$\rightarrow q_{b,\beta} = q_{b,0} \frac{0.5\sigma C (\tan \beta)^{0.6}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{\theta}{\theta - \theta_{cr}}}$$

$$\phi_b = q_b / \sqrt{(s-1)gd_m^3}$$

$$\theta = h \tan \beta / [\Delta d_m]$$

$$\theta_{cr} = k_\beta \theta_{cr,0}$$

$$\sigma = (d_{90} / d_{30})^{0.2}$$

§4.12. Ảnh hưởng của độ dốc ngang

- Ikeda (1982, 1988) đề xuất

$$q_{b,\gamma} = \left[\tan \delta + \varepsilon \tan \gamma \sqrt{\frac{\tau_{b,cr}}{\tau_b}} \right] q_{b,\beta}$$

- $q_{b,\gamma}$ (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy cho đáy có độ dốc ngang
- $q_{b,\beta}$ (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy cho đáy có dốc dọc
- γ : Góc của mái dốc ngang
- δ : Góc uốn cong của dòng chảy ($\tan \delta = 0$: chảy thẳng)
- $\varepsilon = 1 + \alpha \mu / \mu \approx 1.5$: Hệ số
- $\mu = 0.5 \div 0.8$: Hệ số ma sát động lực Coulomb
- α : Tỷ số giữa hệ số nâng và hệ số kéo

§4.13. Ảnh hưởng của cấp phối hạt

- Dựa trên Meyer-Peter-Müller (1948) với $d_{90}/d_{50} \geq 5$

$$q_b = 8\sqrt{\Delta g} \sum_{i=1}^N p_i d_i^{1.5} (\mu\theta_i - \xi_i \theta_{cr})^{1.5}$$

- q_b (m³/s/m): Lưu lượng vận chuyển bùn cát đáy tổng hợp
- d_i : Đường kính hạt của nhóm i
- p_i : Phần trăm khối lượng của nhóm i
- θ_i : Thông số Shields của nhóm i
- θ_{cr} : Thông số Shields giới hạn
- μ : Hệ số dạng đáy (slide 74)
- ξ_i : Hệ số hiệu chỉnh cho nhóm i , lấy $\xi_i = 1$ nếu $d_i = d_m$.

$$\text{Egiazaroff (1965)} \quad \xi_i = \left[\frac{\log(19)}{\log(19d_i / d_m)} \right]^2$$

§4.14. Đánh giá các công thức

- Tỷ số sai lệch giữa suất chuyển cát đáy tính toán và 500 giá trị thực đo trong phòng thí nghiệm và hiện trường

Formula	Percentage of r-values in range		
	$0.75 \leq r \leq 1.5$	$0.5 \leq r \leq 2$	$0.33 \leq r \leq 3$
Van Rijn	34%	63%	85%
Meyer-Peter-Mueller	31%	60%	81%
Frijlink	31%	62%	89%

Chương 5
**Chuyển động của
bùn cát lơ lửng**

§5.1. Giới thiệu về bùn cát lơ lửng

- Khi vận tốc ma sát lớn hơn vận tốc lắng chìm ($u_* \geq w_s$, theo Bagnold, 1966), bùn cát chuyển động dưới dạng lơ lửng (tùy lúc và ngẫu nhiên phụ thuộc vào rối động của dòng chảy). Vận tốc chuyển động của bùn cát gần bằng vận tốc dòng chảy.
- Vận chuyển bùn cát lơ lửng được tính bằng nồng độ bùn cát lơ lửng. Nồng độ bùn cát biểu thị theo khối lượng chất rắn (c_g , kg/m³ hoặc mg/l), hoặc biểu thị theo thể tích chất rắn (c_v , m³/m³ hoặc %) so với thể tích nước

$$c_g = \rho_s c_v$$

- Một số sông có nồng độ bùn cát mịn ($d < 50 \mu\text{m}$) rất cao, được gọi là bùn cát rửa trôi
- Nồng độ bùn cát lơ lửng giảm khi cách xa đáy. Tốc độ suy giảm phụ thuộc vào tỷ số w_s/u_* .
- Bùn cát mịn làm tăng sức tải bùn cát của dòng chảy ($\rightarrow \rho \uparrow \ \& \ v \uparrow \rightarrow w_s \downarrow$).
- Nhiệt độ giảm làm tăng sức tải bùn cát của dòng chảy.

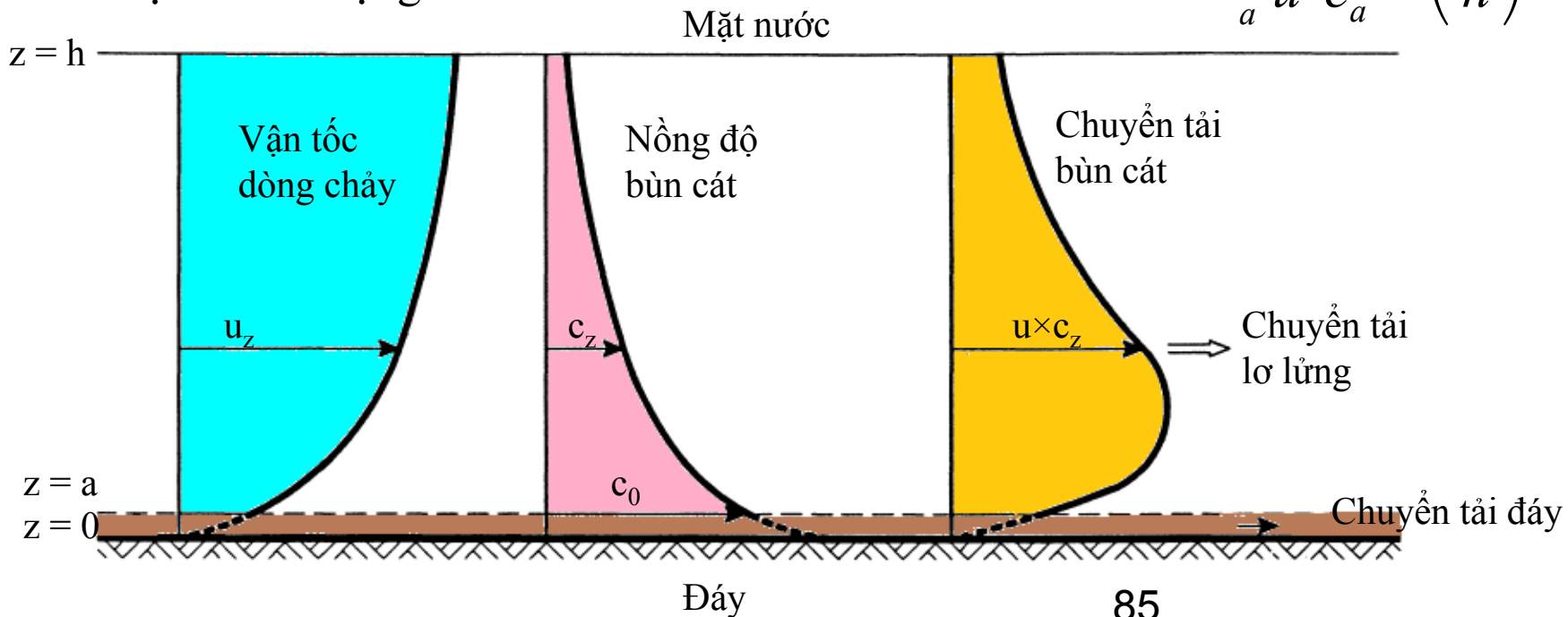
§5.2. Chuyển tải bùn cát lơ lửng

- Chuyển tải bùn cát lơ lửng tích phân theo độ sâu

$$q_s = \int_a^h uc \cdot dz = c_a \bar{u} h \frac{1}{h} \int_a^h \frac{u}{\bar{u}} \frac{c}{c_a} dz = c_a \bar{u} h F$$

- c_a = nồng độ tham chiếu tại mực tham chiếu $z = a$
 F = hệ số hình dạng

$$F = \int_a^h \frac{u}{\bar{u}} \frac{c}{c_a} d \left(\frac{z}{h} \right)$$



§5.3. Nồng độ bùn cát

- Nồng độ bùn cát trung bình

$$c_m = \frac{q_s}{q}$$

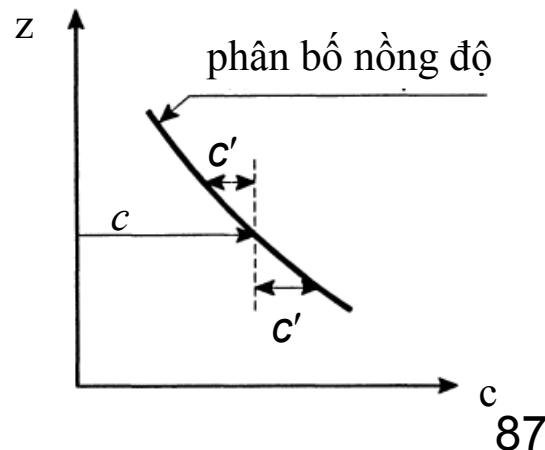
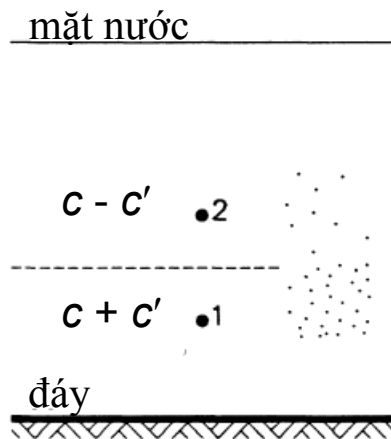
- q (m³/s): lưu lượng đơn vị của dòng chảy
- c_m xấp xỉ bằng nồng độ bùn cát trung bình theo độ sâu của bùn cát mịn

$$c_m \approx \bar{c}$$

- Các phương pháp tính toán chia thành 3 nhóm
 - Nhóm phương pháp khuếch tán
 - Nhóm phương pháp năng lượng
 - Nhóm phương pháp thống kê

§5.4. Lý thuyết khuếch tán

- Xét dòng chảy đều, rối và ổn định, cỡ hạt bùn cát đồng đều
 - nồng độ bùn cát tại 1 là $c + c'$, tại 2 là $c - c'$
 - c : nồng độ trung bình theo thời gian
 - c' : nồng độ biến động (dòng đều ổn định có $\bar{c}' = 0$)
 - vận tốc chuyển động thẳng đứng của bùn cát tại 1 là $w' - w_s$, tại 2 là $w' + w_s$
 - w' : dao động vận tốc thẳng đứng (dòng đều ổn định có $\bar{w}' = 0$)



§5.4. Lý thuyết khuếch tán

- Vận chuyển bùn cát thẳng đứng trung bình thời gian ($w_s = \text{const}$)

- hướng lên $q_u = \overline{(w' - w_s)(c + c')} = -cw_s + \overline{c'w'}$

- hướng xuống $q_d = \overline{(w' + w_s)(c - c')} = cw_s - \overline{c'w'}$

- Với dòng đều ổn định $q_u = q_d \longrightarrow cw_s - \overline{c'w'} = 0$

- cw_s : chuyển động hướng xuống do trọng lực

- $\overline{c'w'}$: chuyển động hướng lên do rối động

- Theo lý thuyết khuếch tán (Định luật Fick): $\overline{c'w'} = -\varepsilon_s \frac{dc}{dz}$
chuyển tải bùn cát theo phương đứng do rối động

tỷ lệ với gradient nồng độ theo phương đứng

- ε_s : hệ số khuếch tán (hệ số pha trộn) $\longrightarrow cw_s + \varepsilon_s \frac{dc}{dz} = 0$

§5.4. Vận tốc lắng chìm

- Giả thiết $w_s = \text{const}$ chỉ đúng với c nhỏ.
- Khi nồng độ lớn $w_{s,m} = (1 - c)^\gamma w_s$
- $w_{s,m}$: vận tốc lắng chìm của hạt trong hỗn hợp nước và bùn cát
- w_s : vận tốc lắng chìm của hạt trong nước sạch (trong)
- γ : hệ số ($\gamma = 4 \div 5$ với hạt $50 \div 500 \mu\text{m}$)

Theo (Richardson & Zaki 1954)

$$\gamma = 4.35 \text{Re}^{-0.03} \quad \text{với } 0.2 < \text{Re} < 1$$

$$\gamma = 4.45 \text{Re}^{-0.10} \quad \text{với } 1 < \text{Re} < 500$$

$$\gamma = 2.39 \quad \text{với } 500 < \text{Re}$$

- Thực tế, với nồng độ nhỏ, có thể lấy $w_{s,m} \approx (1 - \gamma c)w_s$

§5.5. Hệ số khuếch tán của chất lỏng

- Các dạng phân bố hệ số pha trộn của chất lỏng

- Dạng không đổi $\varepsilon_f = \frac{1}{\alpha_1} \kappa u_* h$ $\alpha_1 = 1/6$ theo Lane & Kalinske

- Dạng tuyến tính $\varepsilon_f = \frac{1}{\alpha_2} \kappa u_* h \frac{z}{h}$

- Dạng parabolic $\varepsilon_f = \kappa u_* h \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right)$

- Dạng parabolic và hằng số, Van Rijn $\varepsilon_f = \begin{cases} \kappa u_* h \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right), & z/h < 0.5 \\ 0.25 \kappa u_* h, & z/h \geq 0.5 \end{cases}$

- α_1, α_2 : hệ số

§5.6. Hệ số khuếch tán của bùn cát

- Hệ số khuếch tán của bùn cát $\varepsilon_s = \beta \cdot \phi \cdot \varepsilon_f$
- Hằng số β biểu thị sự khác biệt giữa sự khuếch tán của chất lỏng (có cấu trúc liên kết) và hạt bùn cát rời rạc

$$\beta = 1 + 2(w_s / u_*)^2 \quad \text{với} \quad 0.1 < w_s / u_* < 1$$

- Hệ số ϕ biểu thị sự ảnh hưởng của các hạt bùn cát lên cấu trúc rối của chất lỏng.

§5.7. Phân bố bùn cát lơ lửng theo chiều sâu dòng chảy

- Tích phân các dạng phân bố hệ số pha trộn của chất lỏng

– Dạng không đổi $\frac{c}{c_a} = e^{-\alpha_1 Z(z-a)/h}$

– Dạng tuyến tính $\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{z}\right)^{\alpha_2 Z}$

– Dạng parabolic (Rouse)

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^Z$$

– Dạng parabolic và hằng số

$$\frac{c}{c_a} = \begin{cases} \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^Z, & z/h < 0.5 \\ \left(\frac{a}{h-a}\right)^Z e^{-4Z(z/h-0.5)}, & z/h \geq 0.5 \end{cases}$$

– Z: thông số lơ lửng

$$Z = w_s / (\beta \kappa u_*')$$

§5.8. Nồng độ bùn cát tại mức tham chiếu

- Đa số giả thiết mức tham chiếu bằng cận trên của lớp vận chuyển bùn cát đáy ($z = a = \delta_b$) \rightarrow nồng độ bùn cát tham chiếu bằng nồng độ chuyển tải bùn cát đáy ($c_a = c_b$)
- Van Rijn (1984a)

$$c_b = 0.18c_0T / D_* \quad \text{tại} \quad z = \delta_b = 0.4d_{50}D_*^{0.7}T^{0.5}$$

- $c_0 = 0.65$: nồng độ thể tích lớn nhất
- Einstein (1950) giả thiết $\delta_b = 2d_{35}$ \rightarrow vận tốc hạt trung bình $u_b = 11.6u_*$, sử dụng $q_b = c_b u_b \delta_b$:

$$c_b = q_b / (23.2u_*d_{35}) = \phi_b / (23.2\sqrt{\theta}) \quad \text{tại} \quad z = \delta_b = 2d_{35}$$

§5.8. Nồng độ bùn cát tại mức tham chiếu

- Engelund và Fredsøe (1976) giả thiết $\delta_b = 2d_{50}$:

$$c_b = 0.65 \frac{1}{(1 + 1/\lambda)^3} \quad \text{tại} \quad z = \delta_b = 2d_{50}$$

với

$$\lambda = 4.3 \sqrt{(\theta - \theta_{cr} - 0.26p) / \theta} \quad p = \left\{ 1 + \left[0.26 / (\theta - \theta_{cr}) \right]^4 \right\}^{-0.25}$$

$$\theta = u_*^2 / [\Delta g d_{50}] \quad u_* = \bar{u} / \left\{ 6 + 2.5 \ln [h / (2.5d_{50})] \right\}$$

- Zyserman và Fredsøe (1993) đề nghị tại $z = a = 2d_{50}$:

$$c_b = \frac{0.331(\theta' - \theta_{cr})^{1.75}}{1 + 0.72(\theta' - \theta_{cr})^{1.75}} \quad (\text{trường hợp đáy phẳng có } \theta' = \theta)$$

§5.8. Nồng độ bùn cát tại mức tham chiếu

- Smith và McLean (1977) giả thiết độ dày lớp chuyển tải bùn cát đáy bằng mức 0 vận tốc: $\delta_b = z_0$, và độ nhám do hạt $k'_s = 3d_{90}$:

$$a = k'_s + 26.3(\theta - \theta_{cr})d_{50}$$

$$c_b = \frac{0.004S}{1 + 0.004S} c_0 \quad \text{tại } z = \delta_b$$

- với

$S = (\theta - \theta_{cr}) / \theta_{cr}$ thông số trạng thái chuyển tải

$c_0 = 0.6$: nồng độ thể tích lớn nhất

§5.9. Ảnh hưởng của dạng đáy

- Trường hợp có sóng cát, bùn cát lơ lửng được gia tăng khi bùn cát đáy được chuyển tải trên sườn thượng lưu. Tốc độ bốc lên từ chuyển tải bùn cát đáy thành chuyển tải bùn cát lơ lửng đạt lớn nhất ở đỉnh sóng cát.
- Xoáy do rối trộn ở chân sóng cát cũng làm bùn cát đáy được lấy lên.
- Van Rijn (1984b) đề xuất xác định nồng độ bùn cát tham chiếu hiệu quả trên đỉnh của sóng cát và gợn cát

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

- c_a : nồng độ tham chiếu (theo thể tích)
- a (m): độ cao tham chiếu so với đáy bình quân ($a = \frac{1}{2}\Delta$ nếu biết Δ hoặc $a = k_s$ nếu không biết Δ)

§5.10. Ảnh hưởng của kích thước bùn cát đáy không đồng đều

- Van Rijn (1984) sử dụng kích thước hạt bùn cát lơ lửng đại diện d_s và phương pháp nhóm hạt đề xuất bởi Einstein (1950) để xét ảnh hưởng của kích thước hạt không đồng đều

$$d_s = \begin{cases} [1 + 0.011(Gr - 1)(T - 25)]d_{50}, & 0 < T < 25 \\ d_{50}, & T \geq 25 \end{cases}$$

Hệ số cấp phối của bùn cát đáy

$$Gr = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right)$$

§5.11. Sức tải cát lơ lửng của dòng nước (Einstein 1950)

- Einstein (1950) sử dụng phân bố parabolic của ε_f và phân bố logarit của vận tốc

$$q_s = 11.6u'_*c_a a \left[I_2 + I_1 \ln(30.2eh / d_{65}) \right]$$

- q_s (m²/s): suất chuyển tải bùn cát lơ lửng
- u'_* (m/s): vận tốc ma sát liên quan đến hạt
- c_a (–): nồng độ tham chiếu (theo thể tích)
- $a = 2d$ (m): độ cao tham chiếu
- e (–): hệ số hiệu chỉnh (phi thứ nguyên)
- I_1, I_2 : các tích phân Einstein

§5.11. Sức tải cát lơ lửng của dòng nước (Bagnold 1966)

- Bagnold (1966) sử dụng phương pháp năng lượng (công) của dòng chảy

$$q_s = \frac{e_s(1-e_b)\tau_b\bar{u}}{(\rho_s - \rho)g \cos \beta[(w_s/\bar{u}) - \tan \beta]} = \frac{e_s(1-e_b)\theta d_{50}\bar{u}}{\cos \beta[(w_s/\bar{u}) - \tan \beta]}$$

- q_s (m²/s): suất chuyển tải bùn cát lơ lửng
- β : góc giữa đáy và mặt phẳng nằm ngang ($\tan\beta$: độ dốc đáy)
- $e_s = 0.01 \div 0.02$: hệ số hiệu ích của chuyển tải lơ lửng
- $e_b = 0.1 \div 0.2$: hệ số hiệu ích của chuyển tải đáy

§5.11. Sức tải cát lơ lửng của dòng nước (Bijker 1971)

- Bijker (1971) dựa trên ý tưởng của Einstein (1950), nghĩa là dùng công thức Rouse cho phân bố $c(z)$ và công thức loga cho phân bố $u(z)$:

$$q_s = 1.83q_b \left[I_2 + I_1 \ln(33h / k_s) \right] = 1.83Qq_b$$

$$q_b = bu_* d_{50} e^{-0.27/(\mu\theta)}$$

$$\mu = (C / C')^{1.5} \quad (\text{xem slide 74})$$

$$C' = 18 \log(12h / d_{90})$$

- q_s (m²/s): suất chuyển tải bùn cát lơ lửng
- q_b (m²/s): suất chuyển tải bùn cát đáy
- θ : thông số cơ động Shields
- $b = 1 \div 5$: hệ số hiệu chỉnh (1 = sóng không vỡ, 5 = sóng vỡ)

r/h	z*=1.00		z*=1.50		z*=2.00		z*=3.00		z*=4.00	
	Q	q_s/q_b	Q	q_s/q_b	Q	q_s/q_b	Q	q_s/q_b	Q	q_s/q_b
$1 \cdot 10^{-5}$	20.0	36.6	2.33	4.26	0.973	1.781	0.432	0.790	0.276	0.505
$2 \cdot 10^{-5}$	17.9	32.8	2.31	4.23	0.973	1.781	0.432	0.790	0.276	0.505
$5 \cdot 10^{-5}$	14.4	28.2	2.28	4.17	0.967	1.770	0.432	0.790	0.276	0.505
$1 \cdot 10^{-4}$	13.6	24.9	2.25	4.11	0.967	1.770	0.432	0.790	0.276	0.505
$2 \cdot 10^{-4}$	11.9	21.8	2.21	4.04	0.967	1.770	0.431	0.789	0.275	0.504
$5 \cdot 10^{-4}$	9.8	17.9	2.13	3.90	0.962	1.760	0.431	0.788	0.275	0.504
$1 \cdot 10^{-3}$	8.4	15.3	2.05	3.76	0.951	1.740	0.430	0.787	0.275	0.503
$2 \cdot 10^{-3}$	7.0	12.8	1.96	3.58	0.940	1.720	0.428	0.784	0.274	0.502
$5 \cdot 10^{-3}$	5.4	9.8	1.78	3.26	0.907	1.660	0.424	0.776	0.273	0.499
$1 \cdot 10^{-2}$	4.3	7.8	1.62	2.96	0.869	1.590	0.417	0.763	0.270	0.494
$2 \cdot 10^{-2}$	3.3	6.0	1.42	2.59	0.809	1.480	0.404	0.740	0.264	0.483
$5 \cdot 10^{-2}$	2.2	4.0	1.10	2.02	0.694	1.270	0.374	0.684	0.249	0.456
$1 \cdot 10^{-1}$	1.5	2.7	0.84	1.53	0.568	1.039	0.339	0.620	0.236	0.432
$2 \cdot 10^{-1}$	0.9	1.6	0.55	1.01	0.414	0.758	0.317	0.548		
$5 \cdot 10^{-1}$	0.3	0.6	0.17	0.48						
1	0	0	0	0						

§5.11. Sức tải cát lơ lửng của dòng nước (Van Rijn 1984b)

- suất chuyển tải bùn cát lơ lửng (q_s , m²/s):

$$q_s = F \bar{u} h c_a$$

- nồng độ tham chiếu (theo thể tích)

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

- hệ số hình dạng phân bố bùn cát

$$F = \frac{(a/h)^{Z'} - (a/h)^{1.2}}{(1-a/h)^{Z'} (1.2 - Z')}$$

- thông số kích thước hạt

$$D_* = \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{\nu^2}} d_{50}$$

- thông số ứng suất tiếp đáy

$$T = \frac{\tau'_b - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} = \frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}$$

- ứng suất tiếp đáy hiệu quả (N/m²)

$$\tau'_b = \rho g (\bar{u} / C')^2$$

- vận tốc ma sát tổng thể (m/s)

$$u_* = \bar{u} \sqrt{g} / C$$

- hệ số nhám Chézy liên quan đến hạt (m^{0.5}/s) theo Van Rijn

$$C' = 18 \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right)$$

§5.11. Sức tải cát lơ lửng của dòng nước (Van Rijn 1984b)

- hệ số nhám Chézy tổng thể
($m^{0.5}/s$)

$$C = 18 \log(12h / k_s)$$

- thông số lơ lửng

$$Z' = Z + \psi$$

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*}$$

Dòng chảy yếu có $\beta = 1$ và $\psi = 0$

- thông số hiệu chỉnh phân tầng

$$\psi = 2.5 \left(w_s / u_* \right)^{0.8} \left(c_a / c_0 \right)^{0.4}$$

- tỷ số xáo trộn bùn cát và nước
($\beta \leq 2$)

$$\beta = 1 + 2 \left(w_s / u_* \right)^2$$

- đường kính đại diện của bùn cát lơ lửng, tr. 97.

$$d_s = \left[1 + 0.011(Gr - 1)(T - 25) \right] d_{50}$$

với $0 < T < 25$

$$d_s = d_{50} \quad \text{với } T \geq 25$$

§5.12. Sức tải cát tổng cộng

- Einstein (1950), Bagnold (1966), Bijker (1971), Van Rijn (1984b)

$$q_t = q_b + q_s$$

- Engelund-Hansen (1967) sử dụng cân bằng năng lượng (công)

$$q_t = \frac{0.05\bar{u}^5}{\Delta^2 \sqrt{gd_{50}} C^3}$$

- q_t (m²/s): suất chuyển tải bùn cát tổng cộng
- \bar{u} (m/s): vận tốc dòng chảy trung bình độ sâu
- C (m^{0.5}/s): hệ số nhám Chézy
- Δ : tỷ trọng đẩy nổi tương đối của bùn cát

§5.12. Sức tải cát tổng cộng (Yang 1973)

- q_t (kg/s/m): suất chuyển tải bùn cát tổng cộng

$$q_t = 10^{-3} c_t \bar{u} h$$

- c_t (ppm hay g/m³): nồng độ bùn cát tổng cộng

$$\log(c_t) = \alpha_1 + \alpha_2 \log\left(\frac{\bar{u} I - \bar{u}_{cr} I}{w_s}\right)$$

$$\alpha_1 = 5.435 - 0.286 \log(w_s d_{50} / \nu) - 0.457 \log(u_* / w_s)$$

$$\alpha_2 = 1.799 - 0.409 \log(w_s d_{50} / \nu) - 0.314 \log(u_* / w_s)$$

- \bar{u}_{cr} (m/s): vận tốc khởi động trung bình độ sâu

$$\bar{u}_{cr} = \left[\frac{2.5}{\log\left(\frac{u_* d_{50}}{\nu}\right) - 0.06} + 0.66 \right] w_s \quad \text{với } 1.2 < u_* d_{50} / \nu < 70$$

$$\bar{u}_{cr} = 2.05 w_s \quad \text{với } u_* d_{50} / \nu \geq 70$$

§5.12. Sức tải cát tổng cộng (Ackers-White 1973)

- q_t (m²/s): suất chuyển tải bùn cát tổng cộng

$$q_t = K \bar{u} d_{35} \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^n \left(\frac{Y - Y_{cr}}{Y_{cr}} \right)^m$$

- Y: thông số cơ động của hạt
$$Y = \frac{u_*^n}{\sqrt{\Delta g d_{35}}} \left(\frac{\bar{u}}{5.66 \log(10h / d_{35})} \right)^{1-n}$$

- Y_{cr} : thông số cơ động giới hạn của hạt

- K, n, m: các hệ số

– với $1 < D_* < 60$:
$$K = 10^{-3.53 + 2.86 \log D_* - (\log D_*)^2} \quad n = 1 - 0.56 \log D_*$$

$$m = 9.66 / D_* + 1.34 \quad Y_{cr} = 0.23 / D_*^{0.5} + 0.14$$

$$D_* = \sqrt[3]{\Delta g / \nu^2} d_{35}$$

– với $D_* \geq 60$:
$$K = 0.025, \quad n = 0, \quad m = 1.5, \quad Y_{cr} = 0.17$$

§5.12. Sức tải cát tổng cộng (HR Wallingford, 1990)

- Điều chỉnh lại các hệ số của Ackers-White (1973)

– với $1 < D_* < 60$:

$$K = 10^{-3.46 + 2.79 \log D_* - 0.98 (\log D_*)^2}$$

$$m = 6.83 / D_* + 1.67$$

– với $D_* \geq 60$:

$$K = 0.025$$

$$m = 1.78$$

§5.13. Đánh giá các công thức

- Tỷ lệ cho kết quả nằm trong phạm vi hệ số 2 của số liệu đo đạc
 - Voogt et al. (1989)

Method	297 thí nghiệm	486 sông	120 cửa sông
Engelund-Hansen (1967)	68%	64%	33%
Ackers-White (1973)	68%	63%	26%
Yang (1973)	89%	39%	-
Van Rijn (1984)	76%	76%	89%

- White et al. (1973)

Method	thí nghiệm & thực tế (1260)
Ackers-White (1973)	68%
Engelund-Hansen (1967)	63%
Einstein (1950)	46%
Bagnold (1966)	22%

- Van Rijn (1984c)

Method	thực tế (266)
Van Rijn	75%
Engelund-Hansen	44%
Ackers-White	44%

Chương 6

VCBC ven biển

- Khái niệm lớp biên sóng
- Lớp biên tầng trên đáy nhẵn
- Độ dày lớp biên sóng
- Hệ số ma sát sóng
- Cơ chế vận chuyển bùn cát ven biển
- Lớp biên của sóng không đều
- Lớp biên sóng + dòng chảy: mô hình Bijker

§6.1 Khái niệm lớp biên sóng

- Theo lý thuyết sóng tuyến tính, biên độ dao động phần tử nước tại đáy:

$$A = \frac{H}{2} \frac{1}{\sinh(2\pi h / L)} \quad L = 1.56T^2 \tanh(2\pi h / L)$$

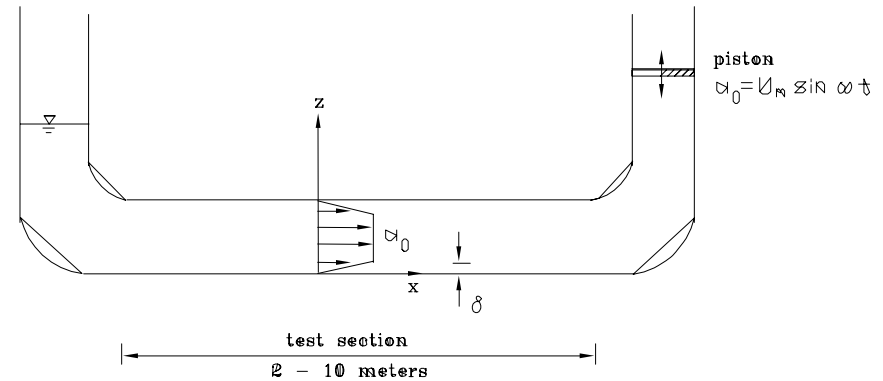
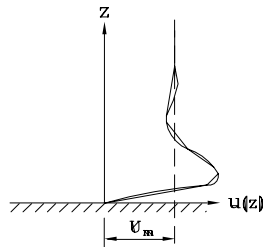
vận tốc hướng ngang của phần tử nước: $u_b = U_m \sin(\omega t)$

với U_m là biên độ vận tốc hướng ngang, $U_m = A\omega = A \times 2\pi/T$.

- Lý thuyết sóng tuyến tính giả thiết chất lỏng lý tưởng, không nhớt. Chất điểm nước “trên” đáy có thể di chuyển tự do: không giống thực tế. → Lớp biên sóng
- Theo lý thuyết lớp biên tổng quát của Prandtl: chất lỏng ν nhỏ → tác động của ma sát lên dòng chảy chỉ đáng kể ở một lớp mỏng sát biên.

§6.2 Lớp biên sóng chảy tầng trên đáy nhẵn

- Đường ống nước dao động (Lundgren và Sørensen 1956)



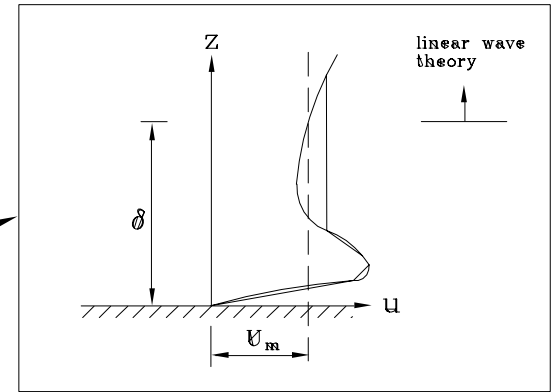
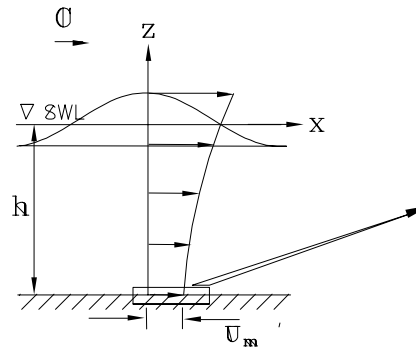
$$A = \frac{H}{2} \frac{1}{\sinh(2\pi h / L)}$$

$$\tau_b = \frac{\rho \nu U_m}{\sqrt{2\nu / \omega}} \left[\sin(\omega t) + \cos(\omega t) \right] = \tau_{b,m} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$$

- Lệch pha: giá trị cực đại của τ_b xuất hiện trước cực đại U_b là 45° .

§6.3 Độ dày lớp biên sóng

- Xét profile vận tốc dưới đỉnh sóng
- Vị trí của lớp biên: nhiều quan điểm

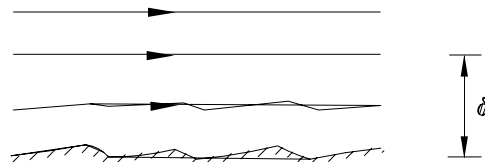


- (Jonsson 1966):
vị trí thấp nhất tại đó biên độ vận tốc = U_m
- (Sleath 1987):
tại đó biên độ vận tốc = $95\% U_m$
- Với dòng chảy trên đáy gồ ghề, bề dày lớp biên bị ảnh hưởng bởi độ nhám đáy (Sleath 1987)

$$\delta_j = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

$$\delta_{0,05} = 3 \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

$$\frac{\delta_{0,05}}{k_s} = 0,26 \left(\frac{A}{k_s} \right)^{0,70}$$



§6.4 Ví dụ tính lớp biên sóng

- Cho chiều cao sóng $H = 2$ m, chiều dài sóng $L = 80$ m, độ sâu nước $h = 5$ m, độ gồ ghề đáy $k_s = 15$ cm.
- Tính độ dày lớp biên $\delta_{0,05}$.
- Nhận xét: độ dày lớp biên đó thay đổi theo thời gian không?
- Suy luận: so với dòng chảy trong kênh hở thì sóng tạo nên lớp biên dày hay mỏng hơn; tại sao?
 - Biết rằng độ dày δ của lớp biên dòng chảy tính bởi công thức (Độ dày này sẽ tăng theo chiều dòng chảy.)

$$\frac{\delta}{x} = 0,4 \left(\frac{Ux}{\nu} \right)^{-0,2}$$

§6.5 Hệ số ma sát sóng

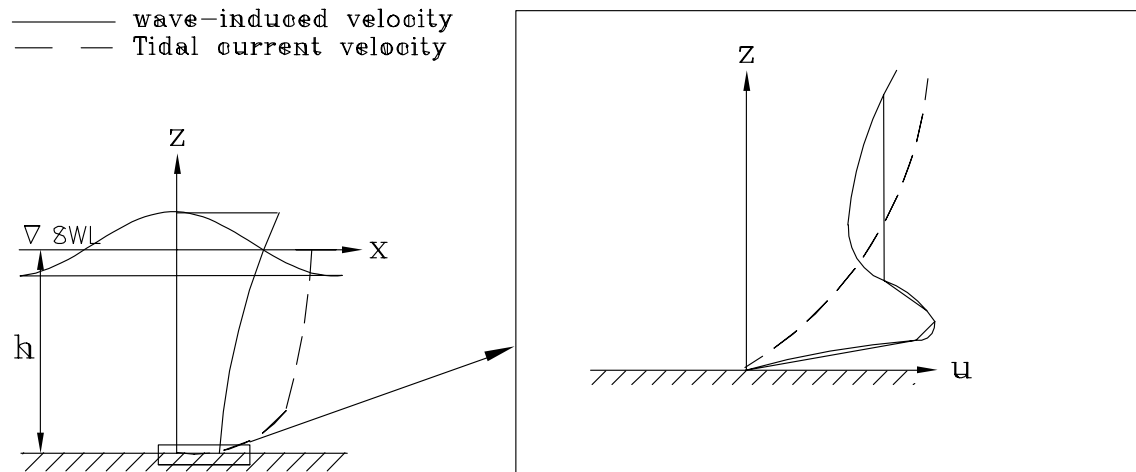
- Tương tự như hệ số ma sát dòng chảy f : $\tau_{b,max} = \frac{1}{2} \rho f_w U_m^2$
 hệ số ma sát sóng f_w (theo Jonsson 1966):
- Vận tốc ma sát sóng: $u_{*,w} = \sqrt{\frac{\tau_{b,max}}{\rho}} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_m$
- Giá trị hệ số ma sát sóng ứng với các trường hợp:
 - Với lớp biên tầng, đáy nhẵn: $f_w = 2 \sqrt{\frac{\nu}{A^2 \omega}}$ với $A^2 \omega / \nu < 3 \times 10^5$
 công thức lý thuyết
 - Với lớp biên rối, đáy nhẵn: $f_w = 0,024 \left(\frac{\nu}{A^2 \omega} \right)^{-0,123}$ với $10^6 < \frac{A^2 \omega}{\nu} < 10^8$
 Justesen (1988)
 - Với lớp biên rối, đáy nhám: $f_w = \exp \left(5,213 \left(\frac{k_s}{A} \right)^{0,194} - 5,977 \right)$
 - Swart (1974)
 - Nielsen (1992) chỉnh lý công thức Swart để phù hợp với tỉ số k_s/A nhỏ $f_w = \exp \left(5,5 \left(\frac{k_s}{A} \right)^{0,2} - 6,3 \right)$

§6.6 Ví dụ tính hệ số ma sát sóng

- Cho chiều cao sóng $H = 2$ m, chiều dài sóng $L = 80$ m, độ sâu nước $h = 5$ m, độ gồ ghề đáy $k_s = 15$ cm.
- Tính hệ số ma sát sóng.
- So sánh với hệ số ma sát dòng chảy?

§6.7 Cơ chế vận chuyển bùn cát ven bờ

- Sóng khuấy động bùn cát và dòng chảy vận chuyển lượng bùn cát này.



- Ví dụ: Cho chiều cao sóng $H = 2$ m, chiều dài sóng $L = 80$ m, độ sâu nước $h = 5$ m, độ gồ ghề đáy $k_s = 15$ cm. Tính các ứng suất đáy do dòng chảy và do sóng.

§6.8 Trường hợp sóng không đều

- Các công thức trước đây được thiết lập cho sóng đều.
- Để áp dụng cho sóng ngẫu nhiên trên thực tế, cần tìm ra sóng đại diện.
- Theo Madsen và nnk. (1988):
 - Chiều cao sóng đại diện = H_{rms}
 - Chu kì sóng đại diện = T_s (chu kì sóng ý nghĩa)

§6.9 Ứng suất tổng hợp ở đáy

- Feddersen & nnk. (2000):

$$\overline{\tau_{wc}} = \frac{\rho g}{C^2} \bar{u} \sqrt{(1.16 U_{rms})^2 + \bar{u}^2}$$

$$U_{rms} = U_b / \sqrt{2}$$

- Bijker (1971):
- sóng yếu \rightarrow không ảnh hưởng độ dày của lớp biên nhớt của dòng chảy. Giả thiết có 1 lớp nhớt từ $z = 0 \rightarrow z_0$: tại đó phân bố vận tốc dạng tuyến tính, tiếp xúc với đường phân bố loga. Tại tiếp điểm, ta có $U_r = u_* / \kappa$.
- Khi có cả sóng: vận tốc tổng hợp
- Độ lớn và giá trị trung bình ứng suất đáy tổng hợp:

$$\tau_{wc} = \rho \kappa^2 U_r^2$$

$$\overline{\tau_{wc}} = \frac{1}{T} \int \tau_{wc} dt = \tau_c + \frac{1}{2} \tau_{w,max}$$

$$\tau_{w,max} = \tau_{b,max} \quad (\text{slide 116})$$

