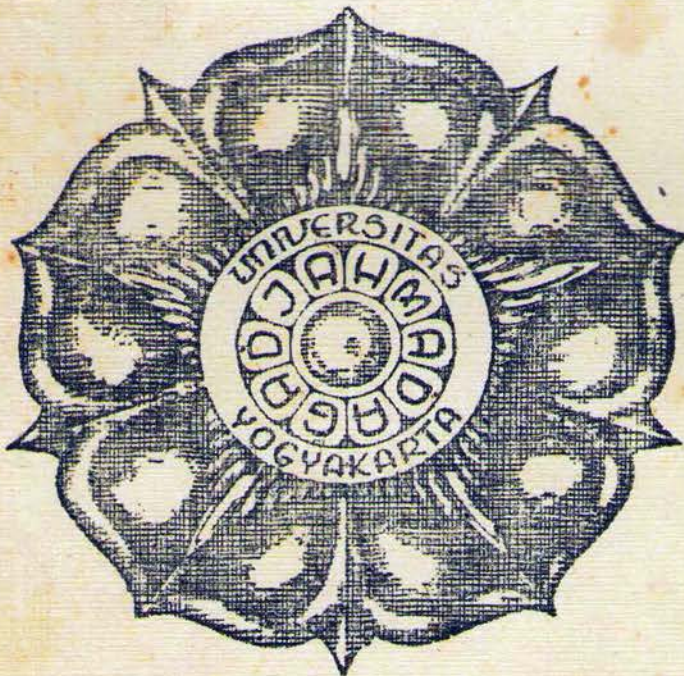


**PENGANGKUTAN
SEDIMEN
(SEDIMENT TRANSPORTATION)**

SEBUAH CATATAN
BERDASARKAN KULIAH
PADA BAGIAN SIPIL
FAK. TEKNIK — UGM



UNTUK
KALANGAN SENDIRI



DIUSAHAKAN OLEH DEPARTEMEN PENDIDIKAN
KELUARGA MAHASISWA TEKNIK SIPIL - UGM.

[Handwritten signature]

9216 / 782101 / 7081979 .

KATA - PENGANTAR

Dengan rendah hati kami persembahkan kepada Andika sebuah catatan tentang " PENGANGKUTAN SEDIMEN ".

Catatan ini kami susun berdasarkan kuliah yang diselenggarakan pada Bagian Sipil fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

Pada cetakan kedua kami adakan perbaikan - perbaikan. Meskipun demikian kami menyadari, bahwa dalam cetakan ini mungkin masih terdapat beberapa kekurangan ataupun kealihan - kesalahan, karena cetakan ini hanyalah disusun dari beberapa catatan rekan - rekan mahasiswa. Juga sempitnya waktu yang tersedia bagi kami berhubung dengan kesibukan - kesibukan ujian. Oleh karena itu kami selalu mengharapkan kritik-kritik atau saran - saran yang akan dapat menyempurnakan catatan ini.

Akhirnya kami mengucapkan diperbanyak terima kasih kepada rekan - rekan sekalian dan siapa saja yang telah membantu usaha penerbitan ini.-

Cetakan pertama : 25 Pebruari 1971.

Cetakan kedua : 15 Oktober 1972.

Yogyakarta, 15 Oktober 1972.

Departemen Pendidikan K.M.f.S

Departemen Pendidikan K.M.T.S.

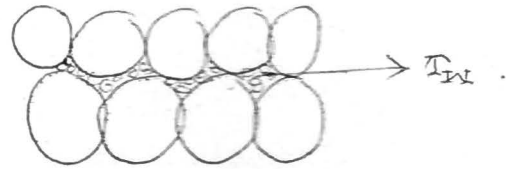
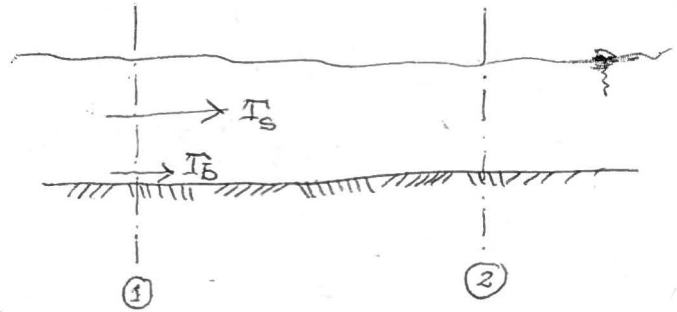
Periode 1972.

Dolak ukur titik T : - berat/det.
 - volume/det.
 - massa/det.

MESS \rightarrow Meter.
 Kilogram massa
 Sekon.

• Rolling
 Jumping
 Sliding } BED. LOAD

dihitung $\rightarrow I_b = \text{bed load}$
 diukur $\rightarrow I_s = \text{suspended load}$
 diestimasi $\rightarrow I_w = \text{wash load}$ } $I_t = \text{total load}$.



TRANSPORTASI
SEDIMEN (SEDIMENT TRANSPORTATION)

- Jang dipeladjar: I. Pendahuluan
 II. Sifat-sifat air
 III. Sifat-sifat bahan jang diangkut
 IV. Permulaan gerak ~~partikel~~/butiran
 V. Mekanisme ~~perangkutan~~ transport
 VI. Saluran stabil
 VII. ~~Perhitungan~~ hitungan angkutan sedimen
 VIII. Gerusan (scour) dan pengendapan (siltting)
 IX. Teknik pengambilan tjontoh (sampling)
 X. Variasi Dasar Sungai

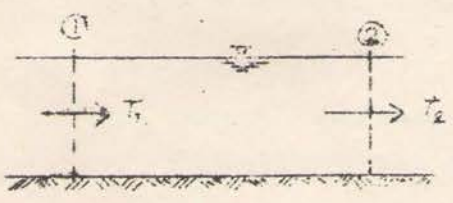
I. PENDAHULUAN

→ pasir, kerik, batu dsb

Jang akan dipeladjar adalah perpindahan tempat bahan sedimen granular (non-cohesive) oleh air jang sedang mengalir. Gerak umum dari bahan adalah searah dengan aliran air. Banjaknja angkutan ~~sedimen~~ ^{TP} (jang dijabarkan dengan berat massa, atau volume persatuan waktu) dapat ditentukan dari perpindahan tempat netto dari pada bahan jang melalui suatu penampang lintang selama periode waktu jang tjukup.

Satuannya T bisa dalam N/det (Newton) --- sistim Georgi. (MKSS)
 1 kg (gaja) = 9,78 N. T disini adalah netto. Kalau massa dalam kg/detik, volume m³/detik. Banjaknja angkutan T dapat diukur atau dihitung. Kedua tjara mempunjai derajat keseksamaan jang rendah.

Tudjuan pokok pengetahuan 'Transportasi Sedimen' adalah guna mengetahui pada keadaan tertentu apakah akan terdjadi angkutan seimbang (equilibrium transport), erosi ataukah pengendapan dan guna memrakamkan kuantitas jang terangkut dalam proses itu.



- a) Bila $T_1 < T_2$ → ~~erosi~~ atau erosi
 - b) Bila $T_1 = T_2$ → equilibrium
 - c) Bila $T_1 > T_2$ → pengendapan / deposisi
- T = Transporting capacity

a) djuga disebut degradation dan b) disebut aggradation.

Kondisi-kondisi jang menentukan pengangkutan adalah :

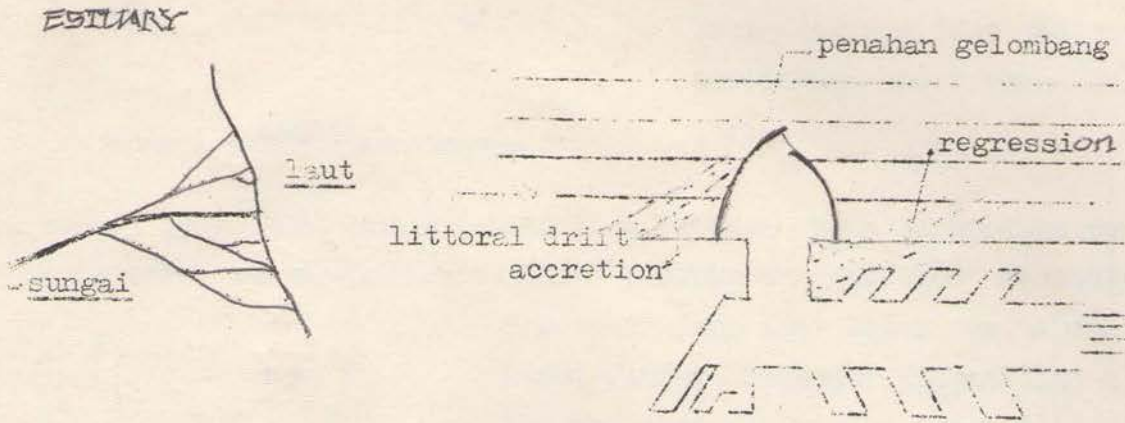
1. Sifat-sifat aliran air (hydraulic characteristic)
2. Sifat-sifat sedimen
3. Pengaruhnja timbal balik (inter-~~relationship~~ ^{action})

Masalah-2

~~yang berkaitan~~ jang berhubungan dengan ~~perangkutan~~ ^{transportasi} sedimen :

(A). Kondisi alamiah.

1. Pengendalian erosi tanah (konservasi tanah)
2. Perkiraan angkutan sedimen di sungai-sungai
3. Pembentukan delta
4. Gerak sedimen di estuaries (cabang² sungai di muara)
5. Angkutan sedimen sepanjang pantai (Littoral drift)



(B). Gangguan-gangguan keadaan alaminya oleh bangunan-bangunan buatan :

1. Agradasi dan degradasi ~~sebelum~~ dan sesudah bangunan.
misal pilar djembatan.
2. Pengendapan sedimen dalam waduk-waduk.
3. Pengeluaran sedimen dari pintu-pintu pengambilan pada sungai²
4. Bangunan-bangunan pengendap.
5. Perentjanaan bangunan pelindung terhadap gerusan.
6. Pengendapan lokal pada tempat-tempat tertentu,
misal : pelabuhan dan sebagainya.

(C). Pengangkutan air :

- perentjanaan saluran-saluran jang stabil.

(D). Pengangkutan sedimen :

- pengangkutan benda-benda padat dalam pipa-pipa dan sebagainya

Ada 2 hal jang penting :

1. Penentuan kuantitas secara keseluruhan dari pada sedimen
2. Penentuan gerak lokal dari pada sedimen

Status hidrolika sedimen pada waktu sekarang untuk sungai umumnya dipandang

2 tjara pengangkutan : a). suspended load

b). bed load

Perbandingan antara a). dan b). menunjukkan variasi jang besar, tergantung sifat2 bahanja dan alirannya. Pada "suspended load" partikel bergerak di atas dasar (melajang), dimana berat partikel setjara terus menerus dikompensir oleh gerak turbulensi air. Pada "bed load" partikel bergerak didasar dengan djalan menggelinding, menggeser atau melompat.

c). Ada lagi wash load; jaitu butiran-butiran jang demikian ketjilnja sehingga berlindung dibelakang bed load.

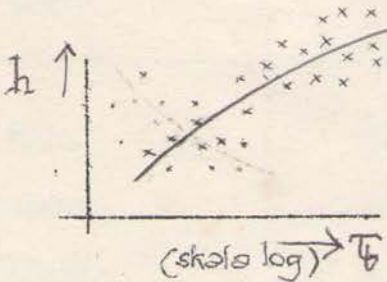
"Suspended load" dapat diukur setjara wajar., tapi perhitungan-perhitungannya mendapatkan kesukaran-kesukaran, sedang bed load dapat dihitung dengan rumus-rumus :

Utk menghitung I_b → parameter yg penting adalah diameter =?



semi-empiris yang didjabarkan dari pertjobaan-pertjobaan dalam laboratorium.

Untuk sungai yang sama, rumus-rumus yang berbeda-beda memberikan penjimpangan yang besar dalam hasil-hasilnya. Hasil pengukuran "bed load" menunjukkan



"scatter" yang luas dalam pengukuran yang berturut-turut. Prosedur pengambilan tjontoh untuk bed-material belum dapat ditentukan dengan memuaskan untuk memperoleh data-data yang representatif.

Hal-hal yang masih dalam penelitian :

SELASA 14081979
02091980

1. Erosi bed-material yang cohesive (lempung)
2. Pengaruh ukuran bed-material yang beraneka ragam
3. Pengaruh adanya sedimen yang halus dalam air atau adanya bahan koloidal dalam air
4. Pengaruh matjam-matjam garis masa debit
5. Gerusan dan pengendapan lokal
6. Stabilisasi sungai-sungai (tebing-tebing dan dasarnya)
7. Tjara-tjara pengambilan tjontoh (sampling)

Untuk mengetahui persoalannya setjara lengkap, diperlukan observasi sistematis dari pada proses-proses dalam alam maupun study yang sistematis dibawah kondisi-kondisi yang terkendalikan dalam laboratoriu guna dapat dipisahkan pengaruh-pengaruh dari pada tiap-tiap parameter.

II. SIFAT-SIFAT AIR

Dimensi dan satuan

Setiap besaran dapat ditulis dimensinya dengan kombinasi 3 besaran pokok, ialah: massa (m), pandjang (l) dan waktu (t).

Misal: Luas (A) : l^2 ; ketjepatan (v) : $l \cdot t^{-1}$; pertjepatan (a) : $l \cdot t^{-2}$;
 gaya : mlt^{-2} ; tekanan (p) : $ml^{-1}t^{-2}$; debit (Q) : l^3t^{-1}
 dan seterusnya.

Selanjutnya kita pakai sistim Georji (mks) sebagai berikut :

BESARAN	DIMENSI	SATUAN (UNIT)
massa	m	kg
pandjang	l	meter
waktu	t	detik
gaya	mlt^{-2}	1 U (ewton) = 1 kg m/det ²
usaha	ml^2t^{-2}	1 J (oule) = 1 N . m
tenaga	ml^2t^{-2}	
daya	ml^2t^{-3}	1 W (att) = $\frac{1 N \cdot m}{\text{detik}}$
tekanan	$ml^{-1}t^{-2}$	1 N / m ² = 1 Po (esal)

Konversi dari satuan teknis kesatuan mks :

	satuan teknis	mks	
gaya	1 kg force	g N	
usaha	1 kg m	g J	1 N = 10 ⁵ dynes
tenaga			
daya	1 kg m/det	g W	$g = 9,78 \text{ m/detik}^2$ (Jk Indonesia)
	1 HP (= 1 DK)	75 g W = 734 W	

(1) Rapat massa (density).

- simbol : ρ
- dimensi : ml^{-3}
- satuan : kg/m^3 atau slug/ft³

- 1 slug = 14,6 kg (massa)
- 1 feet = 0,305 m
- 1 slug/ft³ = 514 kg/m³

Rapat massa = ρ adalah suatu fungsi dari pada suhu, untuk keperluan teknik bangunan air variasinya $\approx 1\%$.

Untuk keperluan teknik :

$(4^\circ C) \rho_{\text{air murni}} = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1,94 \text{ slug/ft}^3 = \rho_w \rightarrow \text{yg dipakai}$

$\rho_{\text{air laut}} = 1026 \text{ kg/m}^3 = 1,99 \text{ slug/ft}^3$

$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$



$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

= apparent relative density
(semua)

Δ kecil $\rightarrow I_b$ besar

Δ besar $\rightarrow I_b$ kecil

(2) Berat djenis (unit weight ; specific weight)

simbol : $\gamma \longrightarrow \gamma = \rho \cdot g$

dimensi : $m l^{-2} t^{-2}$

satuan : N / m^3 atau lbs/ft^3

$g = 9,73 \text{ m/det}^2 = 32,2 \text{ ft/sec}^2$

(3) Specific gravity

simbol : $s \longrightarrow s = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\delta}{\delta_w}$

dimensi : -

satuan : -

$\rho_w = \rho \text{ air murni} = 1000 \text{ kg/m}^3$

Misal : $\rho \text{ pasir kwarts} = 2650 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow s = 2,65.$

(4) Kekentalan (viscosity)

a). Kekentalan dinamik (absolut) = dynamic viscosity

simbol : $\mu (\eta)$

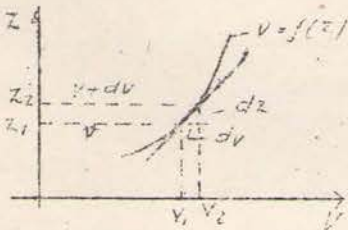
dimensi : $m l^{-1} t^{-1}$

satuan : $N \text{ sec/m}^2 = N \text{ det/m}^2 = N \text{ det m}^{-2}$

atau poise = dyne sec cm^{-2} atau $lbs \text{ sec ft}^{-2}$

$1 N \text{ det/m}^2 = 10 \text{ poise}$; $478 \text{ poise} = 1 \text{ lb sec/ft}^2$
(poise)

$\tau = \mu \frac{dv}{ds} \longrightarrow$ rumus ini hanya berlaku untuk pengaliran laminair.



τ = tegangan geser

$\frac{dv}{dz}$ = gradient ketjepatan

μ = faktor perbandingan

Tjepatan : Hanya berlaku untuk pengaliran laminair

b). Kekentalan kinematik (kinematic viscosity)

simbol : ν

dimensi : $l^2 t^{-1}$

satuan : $m^2 \text{ det}^{-1}$ atau stokes

stokes = cm^2/det atau ft^2/sec

$1 \text{ m}^2/\text{det} = 10^4 \text{ stokes}$; $1 \text{ ft}^2/\text{sec} = 929 \text{ stokes}.$

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

ν adalah fungsi dari suhu. Pengaruh suhu terhadapnya tjukup berarti ; untuk keperluan teknik dipakai :

suhu	$^{\circ}C$:	0	10	20	30
ν	($10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$)	:	1,8	1,3	1,0	0,8

DAFTAR

1. Rapat massa air murni dalam kg/m^3 sebagai fungsi dari pada suhu dalam $t^\circ \text{C}$.

t	ρ	t	ρ	t	ρ	t	ρ
0	999,8679	10	999,7277	20	998,2323	30	995,6756
2	999,9267	12	999,5247	22	997,7993	32	995,0542
4	1000,0000	14	999,2712	24	997,3256	34	994,3991
6	999,9081	16	998,9701	26	996,8128	36	993,7119
8	999,8762	18	998,6232	28	996,2623	38	992,9956

2. Kekentalan dinamik air dalam 10^{-2} poises sebagai fungsi dari suhu dalam $t^\circ \text{C}$.

t	μ	t	μ	t	μ	t	μ
0	1,7921	10	1,5077	20	1,0050	30	0,8007
2	1,6728	12	1,2363	22	0,9579	32	0,7679
4	1,5674	14	1,1709	24	0,9142	34	0,7371
5	1,5200	15	1,1400	25	0,9000	35	0,7200
6	1,4728	16	1,1111	26	0,8737	36	0,7085
8	1,3860	18	1,0559	28	0,8360	38	0,6814
						40	0,6500

jika tanpa pemberitahuan pakai

$\mu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ det/m}^2$

3. Nilai perbandingan untuk air dan udara

	10° C, Tekanan atmosfer			60° F, Tekanan atmosfer		
	Air	Udara	Satuan	Air	Udara	Satuan
ρ	1000	1,37	kg/m^3	1,94	0,00237	slug/ft^3
μ	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-4}$	poise	$2,3 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-7}$	lbs sec/ft^2
ν	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	m^2/det	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$	ft^2/sec

(5) Tegangan permukaan (surface tension)

simbol : σ

dimensi : m t^{-2}

satuan : N/m

Air/udara $\sigma = 0,074 \text{ N/m}$ pada tekanan atmosfer

praktis tak dipengaruhi suhu.

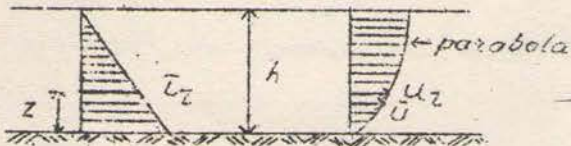
Pengaliran Q tetap dan profil tetap

(stationer) (beraturan)

(steady) (uniform)

$$\frac{dU}{dt} = 0$$

$$\frac{dU}{dx} = 0$$

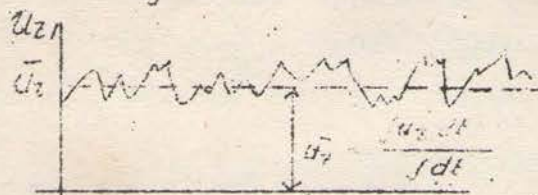
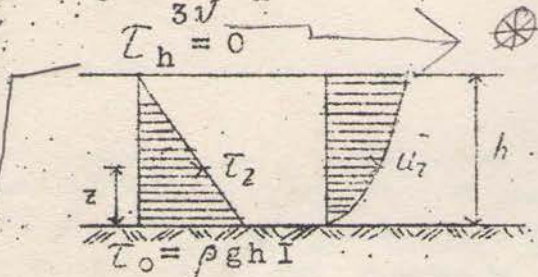


$$u_z = \frac{gI}{2\nu} \left\{ h^2 - (h-z)^2 \right\}$$

$$= \frac{gI}{\nu} \left(hz - \frac{1}{2} z^2 \right) \rightarrow \text{parabola}$$

$$\bar{U} = \frac{gI}{3\nu} h^2$$

$$\tau_h = 0$$



TURBULEN :

$$\bar{\tau}_z = (h-z) \rho g I$$

$$\bar{\tau}_z = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{U}}{dz} \right)^2 \rightarrow \text{Prandtl}$$

$$l = \kappa z \quad (= \text{mixing length})$$

$$\kappa = 0,4 \quad (\kappa = \text{kappa} = \text{konstante universal dari von Karman})$$

$$\bar{U}_z = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{cz}{k}$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{ghI}$$

(= ketjepatan geser)

$$\bar{U}_z = \frac{2,3}{0,4} U_* \log \frac{33z}{k} = 5,75 U_* \log \frac{33z}{k}$$

$$z = 0,37 h \rightarrow \bar{U}_z = \bar{U}$$

$$\bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12h}{k}$$

Oleh Colebrook dan White : $k = 2 \left(a + \frac{\delta}{7} \right)$

$$\rightarrow \bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12h}{2 \left(a + \frac{\delta}{7} \right)}$$

Hydraulik litjin

$$a \ll \text{atau } a < \frac{\delta}{3}$$

$$\bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12h}{2 \left(\frac{\delta}{7} \right)}$$

$$= 5,75 U_* \log \frac{6h}{\delta/7}$$

Hydraulik kasar

$$a \gg \text{atau } a > 3\delta$$

$$\bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12h}{2a}$$

$$= 5,75 U_* \log \frac{6h}{a}$$

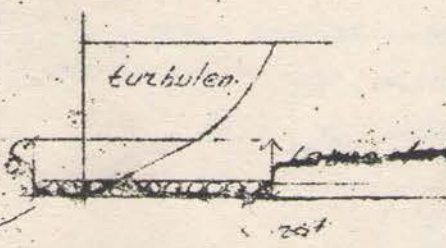
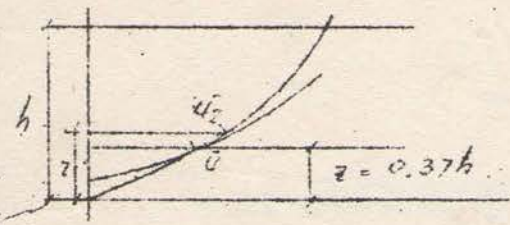
Pers teg gesek sbb :

~~parabola~~ :

$$\tau_z = (h-z) \rho g I \rightarrow \text{pers utk steady uniform flow}$$

$$\tau_z = \mu \frac{dU}{dz} \quad (\text{Newton}) \rightarrow \text{pers utk laminar flow}$$

Handwritten notes: $d z / dt$ and other scribbles.



Penjabaran:

Menurut Prandtl: $\bar{\tau}_z = \rho_\omega \ell^2 \left(\frac{d\bar{u}_z}{dz}\right)^2$

$\ell = \alpha z$

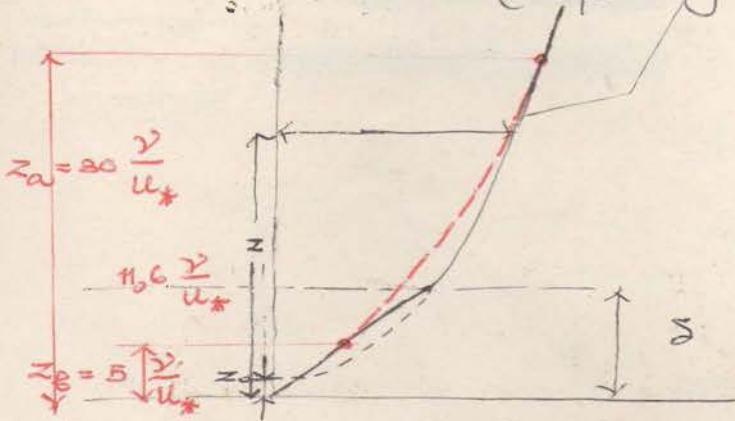
Asumsi: di dekat dasar $\bar{\tau}_z = \tau_0 = \rho_\omega g h I$

$\rho_\omega g h I = \rho_\omega \alpha^2 z^2 \left(\frac{d\bar{u}_z}{dz}\right)^2$

$\sqrt{g h I} = \alpha z \frac{d\bar{u}_z}{dz}$

$d\bar{u}_z = \frac{u_*}{\alpha} \frac{dz}{z} \rightarrow \bar{u}_z = \frac{u_*}{\alpha} \ln \frac{z}{z_0}$

(tk pembagian kecep. universal von Karman)



baik utk dd licin maupun kasar

walaupun rumus logaritmik itu dipbarkan dari kecd. dekat dasar, tetapi experiment membuktikan bahwa rumus (I) berlaku utk kedalaman I_z (berlaku seluruti kedlm I_z)
 Kiri dijabarkan dr pers. Prandtl utk aliran turbulen, maka rumus tsb tdk ber-
 laku utk lapisan batas laminar (debetah δ) dimana gaya viskositas
 lebih penting stg. pembagian kecep. disitu masih linier. Jadi gaya nya
 rumus logaritmik di lap. batas laminar hanyalah fiktif belaka.

Mencari pers linier dr grs pembagian kecep. di daerah lap. batas laminar
 adalah sbb: $\tau_z = \mu \frac{du_z}{dz}$; $\tau_0 = \rho_\omega g h I = \rho_\omega u_*^2$

Asumsi: di lapisan batas laminar $\tau_z = \tau_0 = \text{tetap}$

sehingga $d\bar{u}_z = \frac{\tau_0}{\mu} dz$

$u_z = \frac{\tau_0}{\mu} z = \frac{u_*^2}{\mu/\rho} z$

$u_z = \left(\frac{u_*}{\nu}\right) z$ (linier)

↳ tetap utk kondisi tertentu.

Adapun ditepi atas lapisan batas laminar besar kecep dpt dihit. sbb:

$\bar{u}_\delta = \frac{u_*^2}{\nu} \cdot \delta = \frac{u_*^2}{\nu} \cdot 11.6 \frac{\nu}{u_*} = 11.6 u_*$

Sesungguhnya ditepi atas δ tidak mungkin terjadi perubahan mendadak ke
 dr linier ke log. .. melainkan terjadi suatu transisi spt digambarkan
 pd gbr detail dg batas $z_b = 5 \frac{\nu}{u_*}$ dan batas atas $z_a = 20 \frac{\nu}{u_*}$

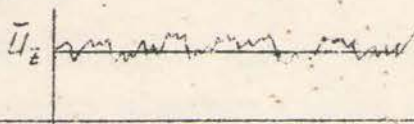
(spt hal 12 bawah)

Chezy :

$$U_* = \sqrt{ghI} \rightarrow \bar{U} = 5,75 \sqrt{g} \log \frac{12 h}{2(a + \delta/7)} \sqrt{hI}$$

Untuk saluran lebar (B = ∞) → h = R

dengan C = 5,75 √g · log $\frac{C R}{a + \delta/7}$ → $\bar{U} = C \sqrt{R I}$



TURBULENT FLOW :

Rumus pokok : $\bar{\tau}_z = (h - z) \rho \omega g I$
 $\bar{\tau}_z \rightarrow$ rata2 karena ada fluktuasi.

Prandtl : $\bar{\tau}_z = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}_z}{dz} \right)^2$

$$\bar{u}_z = \frac{u_*}{\alpha} \ln \frac{z}{z_0} \quad (I)$$

$z_0 = z$ pada mana \bar{u}_z menurut (I) adalah nol.

$\delta =$ tebal lapisan laminar (laminar sublayer)

Untuk hydraulik litjin :

$z_0 = \frac{\delta}{104}$ dimana $\delta = \frac{11,6 \nu}{U_*}$; $z_0 = \frac{\delta}{100 \approx 104}$

$$\bar{u}_z = \frac{U_*}{\alpha} \ln \frac{104 z}{\delta} \quad (\ln x = 2,3 \log x)$$

$$\bar{u}_z = 5,75 U_* \log \frac{104 z}{\delta} \quad (II)$$

$$\bar{u}_z = \bar{U} \text{ (pada } z = 0,4 h \text{)} \rightarrow \bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{42 h}{\delta} \quad (III)$$

Untuk hydraulik kasar :

$z_0 = \frac{1}{30 a^{33}} k_s$ (dari pertjobaan dapat ditjek dengan data - data Nikuradse) Nikuradse's sand roughened pipe experiment.

$$\bar{u}_z = \frac{U_*}{\alpha} \ln \frac{33 z}{k} \quad \bar{u}_z = 5,75 U_* \log \frac{33 z}{k} \quad (IV)$$

$$\bar{u}_z = \bar{U} \text{ (pada } z = 0,37 h \text{)} \quad \bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12 h}{k} \quad (V)$$

Kedua rumus diatas terakhir (IV dan V) digabung oleh Colebrook dan White.

Rumus (III) ditulis : $\bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12 h}{2 \delta/7}$ sehingga untuk hydraulik smooth dan rough berlaku :

$$\bar{U} = 5,75 U_* \log \frac{12 h}{k + 2 \delta/7} \quad (VI)$$

Mengingat $U_* = \sqrt{ghI}$; rumus (VI) dapat ditulis :

$$\bar{U} = 5,75 \sqrt{g} \cdot \log \frac{12 h}{k + 2\delta} \sqrt{h I}$$

$$= 18 \log \frac{12 h}{k + 2\delta} \sqrt{h I}$$

karena $\bar{U} = C \sqrt{h I}$ maka :

$$C = 18 \log \frac{12 h}{k + 2\delta} \quad (\text{VII})$$

Karena $k = 2a$ dan $R = h$, maka

$$C = 18 \log \frac{6 R}{a + \delta} \quad (\text{VII a})$$

Tjatatatan :

↳ kelas hal 7 bag. bawah

1. Hubungan antara C dan R , a (k), δ , Re diberikan dalam grafik H - 5.
2. Untuk smooth boundary (batas licin), yaitu dimana $a \ll \delta$ karena pengaruh viscositas lebih menentukan dari pada kekasaran dinding, hingga dalam rumus-rumus (VI) dan (VII) dianggap k dan $a \approx 0$.
3. Untuk rough boundary $a \gg \delta$, karena pengaruh kekasaran dinding lebih menentukan dari pada viscositas, sehingga dalam rumus (VII) dan (VIII) dianggap $\delta \approx 0$.

Laminair	Angka Reynold : $Re = \frac{\bar{U} R}{\nu}$	Turbulen
$Re < 250$	Saluran terbuka	$Re > 600$ dihubungkan dengan dalamja air : $Re = \frac{U h}{\nu}$
$Re < 1500$	Pipa	$Re > 3000$ dihubungkan dengan diameter pipa : $Re = \frac{U D}{\nu}$
Tidak dipengaruhi kekasaran dinding atau batas, hanya tergantung pada ν		Dipengaruhi oleh kekasaran dinding atau batas

Tjontoh : (dianggap kasar)

1. Suatu sungai sangat lebar, dalam air 5 meter, $a = 0,08$ meter landai $I = 1,5 \times 10^{-4}$, suhu air $20^\circ C$, $g = 9,8 \text{ m/det}^2$ Ditanjakan berapa ketjepatan rata-rata.

Djawab :

Dianggap turbulen sempurna atau hydraulik kasar, sehingga menurut

$$\text{rumus jang sederhana : } C = 18 \log \frac{6 \cdot 5}{0,08} = 18 \log 6 \cdot 62,5$$

$$= 18 \cdot 2,57 = 46 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{detik}$$

$$B = \infty \rightarrow R = h = 5 \text{ meter. } \bar{U} = C \sqrt{h I}$$

$$\bar{U} = 46 \sqrt{5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 1,26 \text{ meter/detik}$$

Kontrol : $t_{\text{air}} = 20^{\circ}\text{C} \rightarrow \nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det} \quad (\text{H} - 2)$

$$Re = \frac{\bar{U} R}{\nu} = \frac{1,26 \cdot 5}{1 \cdot 10^{-6}} = 6,3 \cdot 10^6$$

$$\frac{R}{k} = \frac{5}{0,16} = 31,2$$

grafik H-5 diketahui
pengaliran hidraulik kasar

Djadi rumus sederhana acc.

Djika karena suatu hal diagram tidak ada, maka dikerdjakan sebagai berikut :

$$\delta = \frac{11,6}{U_*} = \frac{11,6 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{9,8 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}}} = 1,35 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$3 \delta = 3 \cdot 1,35 \cdot 10^{-4} = 4,05 \cdot 10^{-4} \rightarrow a > 3 \delta \quad (8 \cdot 10^{-2} > 4,05 \cdot 10^{-4})$$

atau $\delta/7 \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ m} \rightarrow \delta/7$ dapat diabaikan terhadap a
($2 \cdot 10^{-5} < 8 \cdot 10^{-2}$)

• • • Hidraulik kasar.

($U_* = 0,086 \text{ m/detik} \rightarrow$ tak ada arti physisnja)

2. Sebuah pipa berdiameter 1,8 m sangat halus (diaspal)

$a = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}, \quad \bar{U} = 1 \text{ m/det}, \quad \nu = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}.$

Berapa kerugian daja akibat geseran tiap km pandjang pipa ($\Delta P/\text{km}$ pipa) ?

Djawab : $R = \frac{D}{4} = \frac{1,8}{4} = 0,45 \text{ m} ; \quad \frac{R}{k} = \frac{0,45}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 1 \cdot 10^4$

$$Re = \frac{\bar{U} R}{\nu} = \frac{1 \cdot 0,45}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^5$$

Dari grafik H-5, ternjata : $C = 82 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{detik}$

$$\rightarrow I = \frac{\bar{U}^2}{C^2 \cdot R} = \frac{1}{82^2 \cdot 0,45}$$

Dari grafik H-5 ternjata, bahwa pengaliran ada didaerah transisi dekat pada hidraulik litjin.

Djadi-rumus sederhana : $C = 18 \log \frac{6R}{a} = 91 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{det}$ akan memberikan kerugian daja jang terlampau rendah. Hal tersebut dapat diperhitungkan sebagai berikut :

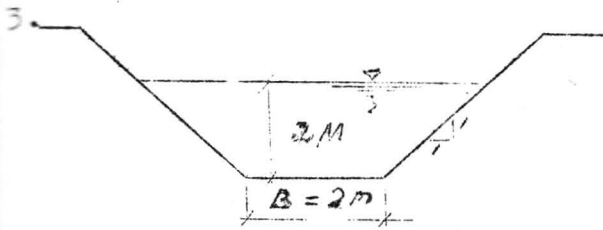
$$\begin{aligned} \text{Dihitung dari rumus lengkap} \rightarrow C &= 18 \log \frac{6R}{a + \delta/7} \\ &= 18 \log \frac{6 \cdot 0,45}{2,25 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-4}/7} \end{aligned}$$

Kesimpulan : Tebal lapisan laminar lebih besar dari a , tapi tak boleh diabaikan karena δ dan a dalam orde jang sama.

Untuk menghitung daja hilang perlu debit Q .

$$Q = \frac{1}{4} \pi (1,8)^2 (1) = 2,55 \text{ m}^3/\text{det}.$$

$$\begin{aligned} \Delta P = \rho g Q h_f \rightarrow \Delta P/\text{km} &= 10^3 \cdot 9,8 \cdot 2,55 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \\ &= 7,5 \cdot 10^5 = 7,5 \text{ kW}. \end{aligned}$$



Saluran dari beton berpenampang seperti pada gambar.

Ketjepatan rata-rata = 0,3 m/detik.

I=miring= 10^{-4} . Suhu air $20^{\circ} C$.

Ditanyakan : Berapa a ?

Mungkin hasil a terlampau kecil, hingga penyelesaian permukaan beton - menjadi mahal. Hingga dipertimbangkan untuk memperbesar (memperlebar) B. Hitung berapa a ? djika B = 2,5 m dan h = 3 m.

Djawab :

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= 0,3 \text{ m/detik.} \\ I &= 10^{-4} \\ \mathcal{V} &= 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik.} \end{aligned} \right\} \longrightarrow a = ?$$

$$A = (2 + 2) 3 = 12 \text{ m}^2$$

$$P = 2 + 2 (2 \sqrt{2}) = 7,65 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{12}{7,65} = 1,57 \text{ m}$$

$$C = \frac{\bar{U}}{\sqrt{R I}} = \frac{0,30}{\sqrt{1,57 \cdot 10^{-4}}} = 73 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{det.}$$

$$R_e = \frac{\bar{U} R}{\mathcal{V}} = \frac{0,30 \cdot 1,57}{10^{-6}} = 0,47 \cdot 10^6$$

$$k = \frac{1,57}{2200} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ atau } a = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m (sangat halus).}$$

Grafik: H - 5

R/k = 2200.

-----> flushed up concrete cement sesuai dengan H - 6 ----->
adalah sangat mahal pelaksanaannya.

Ditjoba memperbesar B dengan maksud memperbesar a, dengan pengertian bahwa: Q dan I tetap.

Pjataan :

Dalam air h harus tetap 3 m, tetapi \bar{U} jangan berubah supaya C tetap, djadi djuga a berubah (menjadi lebih kasar).

Sebab bila diambil A tetap, \bar{U} akan tetap, sedang perubahan R - adalah ketjil, hasilnya C tetap ---> C = $73 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{det.}$

$$a). \text{ Maka diambil : } \left. \begin{aligned} h &= 3 \text{ m (tetap)} \\ B &= 2,5 \text{ m} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} A &= (2,5 + 2) 3 = 13,5 \text{ m}^2 \\ P &= 2,5 + 2(2\sqrt{2}) = 8,14 \text{ m} \end{aligned}$$

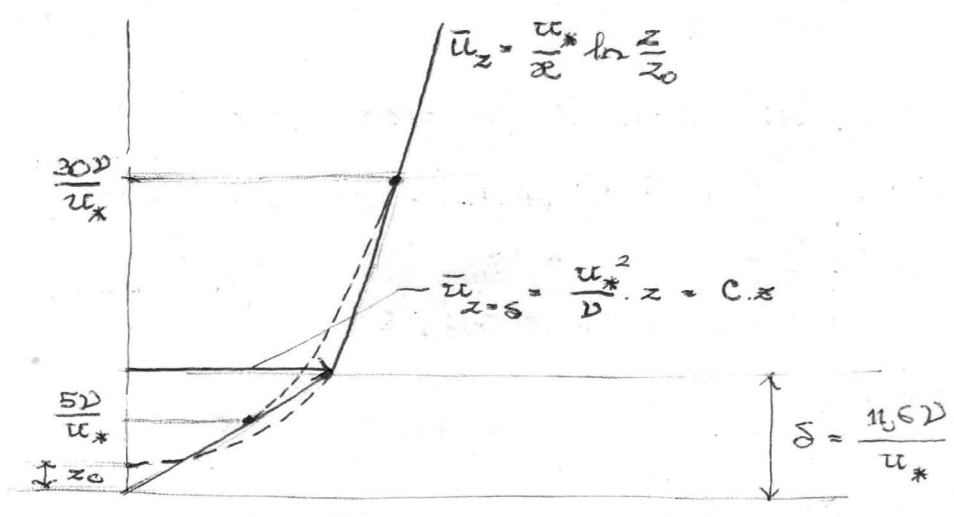
$$R = \frac{A}{P} = \frac{13,5}{8,14} = 1,65 \text{ m.}$$

$$Q \text{ tetap} = 8 \cdot 0,3 = 2,4 \text{ m}^3/\text{detik.}$$

$$\bar{U} = \frac{2,4}{13,5} = 0,177 \text{ m/det.} \longrightarrow C = \frac{\bar{U}}{\sqrt{R I}} = \frac{0,177}{\sqrt{1,65 \cdot 10^{-4}}} = 68 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{det.}$$

$$R_e = \frac{\bar{U} R}{\mathcal{V}} = \frac{0,177 \cdot 1,65}{10^{-6}} = 2,92 \cdot 10^5$$

Dengan : H - 5 ---> R/k = 600 (transisi hidraulik kasar).



$$k = \frac{1,10}{600} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m atau } a = 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

H-6 → mendekati unfinished concrete cement

b). Diambil $h = 2 \text{ m (tetap)}$ } $A = (3+2)2 = 10 \text{ m}^2$
 $B = 3 \text{ m}$ } $P = 3 + 2(2\sqrt{2}) = 8,64 \text{ m}$ } $R = \frac{10}{8,64} = 1,16 \text{ m}$

$$\bar{U} = \frac{6,4}{10} = 0,64 \text{ m/detik}$$

$$C = \frac{0,64}{\sqrt{1,16 \cdot 10^{-4}}} = 60 \text{ m}^{1/2}/\text{detik}$$

$$Re = \frac{0,64 \cdot 1,16}{10^{-6}} = 7,4 \cdot 10^5$$

$$H-5 : \rightarrow R/k = 180$$

$$k = \frac{1,16}{180} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m} \rightarrow a = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

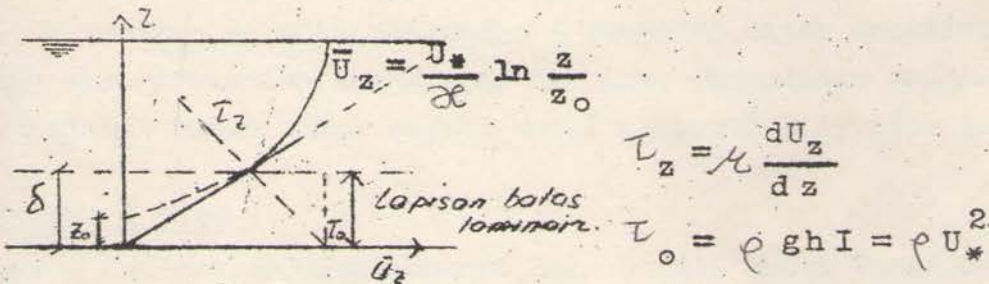
H-6 : antara unfinished dan old concrete cement .

Tjatanan : Nilai k dapat kita peroleh setjara lebih teliti dengan grafik H-5, dari mana dapat diketahui bahwa sifat pengaliran adalah hydraulik kasar (grafik C mendatar)

Hydraulik kasar → simple formula : $C = 18 \log \frac{6R}{a}$

$$\rightarrow a = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ m. } \quad \text{DIF III}$$

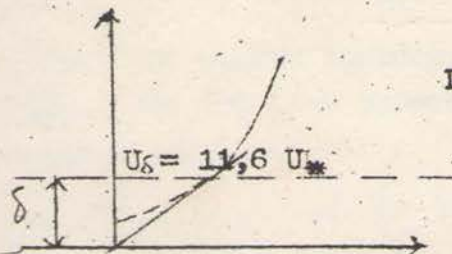
Rekasaran dinding/batas . Roughness Boundary



Anggapan : di lapisan batas laminair $\tau_z = \tau_0$

$$\tau_z = \mu \frac{dU_z}{dz} \rightarrow dU_z = \frac{\tau_0}{\mu} dz \rightarrow$$

$$U_z = \frac{\tau_0}{\mu} \int dz = \frac{\tau_0}{\mu} z = \frac{\rho U_*^2}{\mu} z = \frac{U_*^2}{\nu} z$$

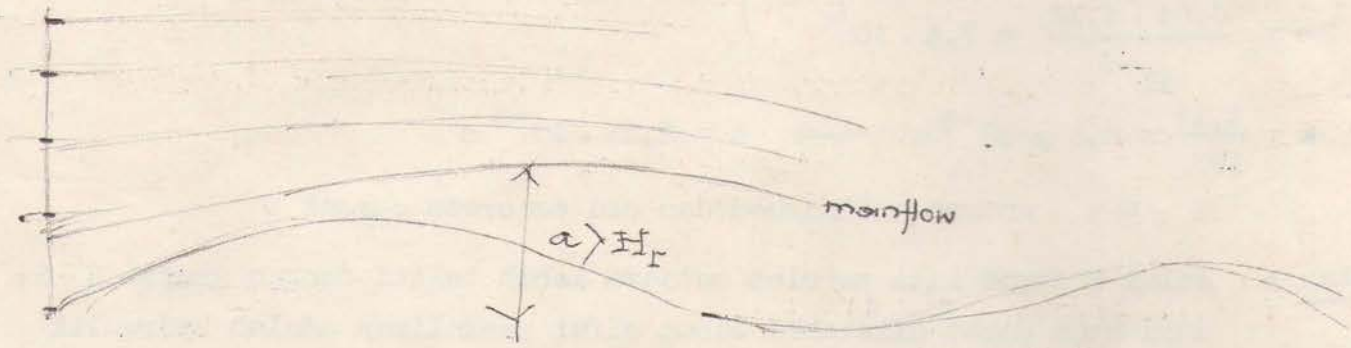
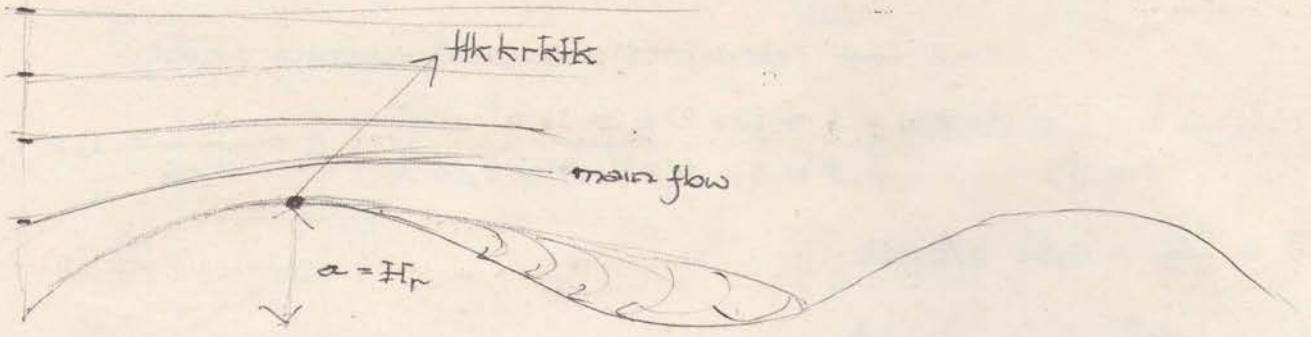


Dititik perpotongan : $\delta = \frac{11,6 \nu}{U_*}$

maka \bar{U}_z untuk $z = \delta$

$$\text{atau } \bar{U}_\delta = \frac{U_*^2 \delta}{\nu} = \frac{U_*^2}{\nu} \cdot \frac{11,6 \nu}{U_*} = 11,6 U_*$$

$$\bar{U} = C \sqrt{R I} \rightarrow C = f(R/\delta, R/k) = f(R/\delta, R/a) . \quad (H-5)$$



Relasi antara batas a :

(A). Dasarnya Batas datar
(Lihat H-6)

(1). Sedimen beraturan $a = \frac{d}{2}$

(2). Sedimen tjumpuran $a = \frac{d_{65}}{2}$

(3). $a = H_T$

Djari-djari butiran jang representatif ialah ukuran kisi pada mana 65 % berat dari pada tjumpuran adalah lebih halus. $a = \frac{d}{2}$; $a = \frac{d_{65}}{2}$

(B). Dimana terdjadi pemisahan arus pada titik-titik karakteristik (gelombang-gelombang pasir).
 $a \approx H_T$; tapi kemungkinan $a > H_T$

III. SIFAT - SIFAT BAHAN JANG DIANGKUT .

Karakteristik bahan - bahan sedimen :

1. Ukuran (size)
 2. Bentuk (shape)
 3. Rapat massa (density)
 4. Ketjepatan djatuh dalam fluida statis
(fall velocity in static fluids)
 5. Porositas sesudah mengendap (porosity after deposition)
6. Bulk Density .

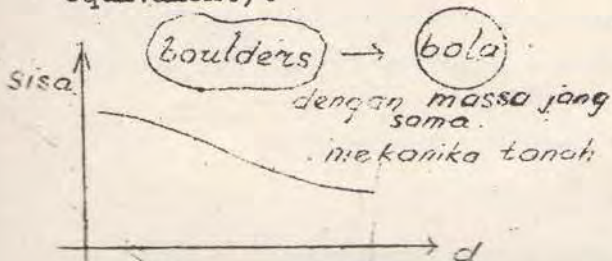
Lazimnja karakteristik - karakteristik harus dianalisis dengan djalan statistik. Perlu ditjatat bahwa sukar sekali untuk memperoleh tjontoh jang representatif.

(1). Ukuran (size)

Skala butiran sedimen menurut Sub - Komite Untuk Terminologi Sedimen A.G.U adalah sebagai berikut :

Boulders	4000 - 250	mm (batu)	} Masih diadakan sub - pembagian lagi :
Cobbles	250 - 64	mm (kerakal)	
Gravel	64 - 2	mm (kerikil)	
Sand	2000 - 62	μ	
Silt	62 - 4	μ	
Clay	4 - 0,24	μ	

Penentuan ukuran boulders, cobbles dan gravel dengan pengukuran langsung dari pada isi atau beberapa diameter (conversi kepada diameter bola jang equivalent).



Gravel dan sand dengan memakai analisa saringan biasanja memberikan garis hubungan jang hamolatif. Silt dan clay dengan tjara mikroskopis atau tjara - tjara sedimentasi.

Clay mungkin dalam keadaan suspensi colloidal (melajang tapi mengelompok). Maka ukuran tidak dapat dipisahkan dari bentuk. Jang penting adalah meratakan gei k sedimen dalam air jang mengalir. Akan diperlukan ukuran jang karakteristik, tergantung dari bentuk dan pembagian ukurannya.

(2). Bentuk (shape) .

Variasi bentuk sedimen alam adalah tidak terbatas. Pengaruh bentuk terhadap karakteristik hydraulis dari pada partikel atau butiran (jaitu ketjepatan djatuh ataupun hambatan/drag) tergantung dari pada angka Reynolds. Parameter-parameter untuk bentuk adalah perbandingan sumbu-sumbu utama roundness, luas permukaan dibandingkan terhadap volume massa atau ketjepatan djatuh jang equivalent.

- Diameter nominal = d_n

ialah diameter bola dengan massa dan isi jang sama dengan butiran.

Volume butiran = $\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_n^3$

- Diameter sedimentasi = d_s

ialah diameter bola kwarts dengan ketjepatan djatuh jang sama dengan butiran.

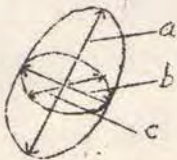
ϕ_w = butiran

ϕ_w = bola kwarts (kwarts sphere)

- Faktor bentuk (shape factor) = S_f dirumuskan sebagai

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$$

dimana a, b dan c adalah 3 sumbu jang tegak lurus satu sama lain.



a = sumbu terpanjang

c = sumbu terpendek

Tjatakan : S_f untuk bola = 1 → (grafik S - 2)

(3). Rapat massa (density)

Unuanja sedimen berasal dari desintegrasi atau dekomposisi dari pada batu-batuan. Misal : clay adalah fragmen2 dari feldspat dan mica. Silt adalah silikat, pasir adalah kwarts. Kerikil adalah petjahan-petjahan jang tjukup berarti dari batu-batu asal. Boulders adalah segala komponen dari batu asal (batu-batu besar).

Rapat massa butiran-butiran sedimenter jang unun (< 4 cm) tidaklah banjak berselisih. Karena kwarts adalah jang paling banjak terdapat dalam sedimen alam, maka rapat massa rata-rata dapat diambil $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$. Kadangkadangkang djatakan sebagai specific gravity = s.

$$s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\rho_s \cdot g}{\rho_w \cdot g} = \frac{\rho_s}{\rho_w} = 2,65$$

$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ (solid)
 $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$
 (bulk density)

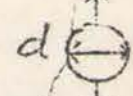
~~Ada mineral-mineral jang lebih berat atau lebih ringan~~

Untuk clay ρ berkisar antara 2500 - 2700 kg/m^3 .

(4). Ketjepatan djatuh (fall velocity).

Ketjepatan djatuh sangat penting untuk sedimentasi reservoir dan proses-proses pengendapan lain. Selain dari itu merupakan salah satu parameter jg menentukan gerak sedimen dalam suspensi. Ketjepatan arus jang diperlukan (ketjepatan kritik) untuk menggerakkan butiran-butiran sepanjang dasar saluran ^{serta perkembangan konfigurasi dasar seluas} sering djuga dihubungkan dengan ketjepatan djatuh → grafik S-4. Gaja jang dialami oleh sebuah butiran dalam gerak relatifnja dalam air dapat dilukiskan sebagai berikut :

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot A \cdot w^2$$

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho_w \frac{1}{4} \pi d^2 w^2$$


$$W - B = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho_w) g$$

- W = berat butir diudara
- F = gaja hambatan
- ρ_w = rapat massa air
- A = luas proyeksi butiran // arah gerak
- w = ketjepatan djatuh.
- C_d = drag coefficient, tidak berdimensi.
- $C_d = f(S_f, Re)$ dimana S_f = faktor bentuk.

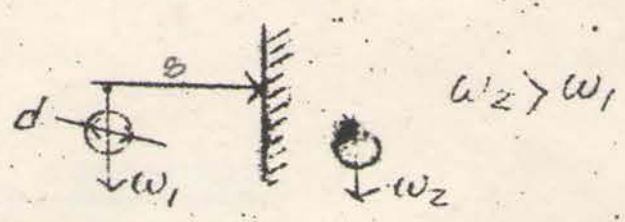
B = gaya apung (buoyant force)

$Re < 1 \rightarrow C_d = \frac{24}{Re}$

$Re > 1 \rightarrow$ grafik S-2.

Pada umumnya ketjepatan djatuh dapat dilukiskan sebagai berikut :

$W = f(Re, S_f, \rho_s, \mu, s/d, \rho_w)$ dimana s/d = djarak relatif terhadap batas jang padat atau butiran-butiran didekatnja.



$$Re = \frac{w d}{\nu}$$

Rumus - rumusnja

Ketjepatan djatuh bola tunggal dalam air dengan ukuran tak terhingga adalah :

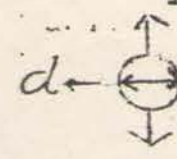
a). $Re = \frac{w d}{\nu} < 1$ $w = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} g d^2$ Hukum Stokes

b). $Re > 1$ $w^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{g d}{C_d} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ Rumus umum

Tjatatatan ;

$Re < 1$; Djika untuk C_d diberi nilai $\frac{24}{Re}$, maka rumus ini mendjadi rumus a).

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho_w \frac{1}{4} \pi d^2 w^2$$

$$W - B = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho_w) g$$


disamakan maka didapat rumus :

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{g d}{C_d} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

din kead. setimbang

ρ_s = berat satuan air bukan diudara.
rapat massa butir diudara

Untuk bentuk bola dapat dilihat grafik S - 1, sedang jang bukan bola harus dilihat grafik S - 2. Dengan mengetahui C_d , kemudian masukkan dalam rumus :

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{g d}{C_d} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Untuk butiran-butiran jang bukan merupakan bola dapat dipakai diameter nominal (d_n) untuk menentukan $Re = \frac{w d_n}{\nu}$ lalu C_d .

~~Pengaruh bentuk dapat ditakar dengan faktor bentuk (S_f), dapat dilihat pada grafik S - 2.~~

Ruang sekeliling butiran jang terbatas (misal : ukuran kolam, bedjana dan sebagainya) akan menghambat ketjepatan djatuh butiran. Pelepasan butir-butiran tjontoh (sample grain) untuk pemeriksam, harus dikerdjakan dengan hati-hati untuk mentjegah terdjadinja arus-arus dalam air jang akan mempertjepat gerak kebawah dari butiran. (maksudnja djangan diaduk).

Dalam grafik S - 1 diberikan hubungan antara diameter butiran dengan ketjepatan djatuh dalam air pada suhu jang bematjam-matjam. Didalamnja terdapat djuga curve dari Rubey untuk air jang bersuhu $20^{\circ} C$ jang lebih disukai oleh Einstein. Sebenarnya curve Rubey ^{tidak} untuk bola kwarts ($S_f \neq 1$), ~~tetapi~~ dan dikatakan tjukup baik untuk butiran-butiran kwarts pada umumnja.

Untuk tanah liat (clay) ketjepatan djatuhnja dapat berbeda-beda dari pada hitungan, disebabkan karena sifat-sifat colloidal. Djuga dalam air jang mengalir terdapat kondisi-kondisi keseimbangan jang lain, disebabkan adanya turbulensi.

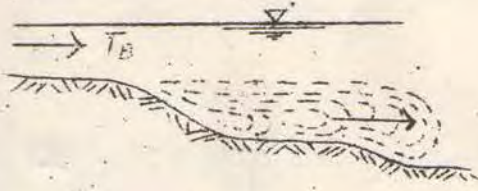
(5). Porositas sesudah mengendap.

Untuk menaksir umur suatu reservoir atau hal-hal serupa, hasil perhitungan berat sedimen jang diangkut kedalam reservoir, harus diubah dalam bentuk volume. Untuk itu harus ditaksir berat kering tiap satuan volume dari pada sedimen ditempat. Misalnja untuk sedimen jang kering udara berlaku $1200 - 2000 \text{ kg/m}^3$. Bahan jang sama diendapkan dalam keadaan terus menerus terendam air dapat bernilai antara $300 - 1000 \text{ kg/m}^3$.

Dalam soal-soal gerusan (scour), matjam pemadatan dari pada butiran -

butiran pun adalah faktor jang sangat penting.

Porositas (α) ialah volume dari pada rongga (voids) dibagi volume rongga + bahan padat x 100 %



atau $\alpha = \frac{\text{volume rongga (voids)}}{\text{volume rongga + bahan padat}} \times 100 \%$

djuga : Voids ratio = $\frac{\text{volume rongga (voids)}}{\text{volume bahan padat}} \times 100 \%$

6) Bulk Density (ρ_b)

Definisi: adalah massa bahan sedimen kering dlm satu satuan volum.

Kadang² disebut juga dry density atau unit dry weight.

Satuan: $\text{kg massa} / \text{m}^3$

Volum sedimentasi tpt pd kondisi penyendapan & mungkin juga dipengaruhi oleh waktu korn adanya proses konsolidasi.

a) Rumus empirik LANE & KOELZER (1953) utk menaksir bulk density endapan dlm reservoir waduk ada sbt:

$$\rho_{bT} = \rho_{b_1} + B \log I$$

I = waktu dlm tahun.

ρ_{b_1} = bulk density sesudah konsolidasi 1 Th.

B = koef. Konsolidasi.

Type	Spesifikasi Waduk	pasir (sand)		lumpur (silt)		lempung (clay)	
		ρ_{b_1}	B	ρ_b	B	ρ_{b_1}	B
I	Sedimen spt terendamb atau hampir terendamb	1500	0	1050	90	500	250
		1550		1120		420	
IIa	Umumnya draw down waduk sekejap	1500	0	1185	45	750	170
		1550		1135		560	
IIb	Umumnya draw down waduk cukup berarti	1500	0	1275	15	950	150
III	Umumnya waduk kosong	1500	0	1320	0	1250	0
		1550		1150		640	
IV	River bed sediments	1500					
		1550		1170		960	

b) LARA & HEMBERION (1963)

dari 1316 sampel memperoleh nilai ρ_{b_1} (dlm kg/m^3) yg agak berbeda berdasarkan kelas.

lempung < 4 μm

lumpur 4 - 6,25 μm

pasir > 6,25 μm

Nilai ρ_{b_1} warna merah.

Contoh: Sedimen dlm waduk tipe I mengandung 30% pasir, 20% lempung dan 45% lumpur. Maka rapat massa kering (bulk density) sedimen sesudah mengalami konsolidasi 1 Th adalah:

$$\rho_{b_1} = 0,35 (1550) + 0,45 (1120) + 0,20 (420) = 1130 \text{ kg/m}^3 \text{ LARA \& HEMBERION}$$

$$\text{atau} \quad \rho_{b_1} = 0,35 (1500) + 0,45 (1050) + 0,20 (500) = 1100 \text{ kg/m}^3 \text{ Lane \& Koel.}$$

Tjontoh :

Baluan	α (%)	Bahan	α (%)
1. soil	50 - 60	6. fine to medium mixed sand	30 - 35
2. clay	45 - 55	7. gravel	30 - 40
3. silt	40 - 50	8. gravel and sand	20 - 35
4. medium to coarse mixed sand	35 - 40	9. sand stone	10 - 20
5. uniform sand	30 - 40	10. lime stone	1 - 10

dari Groundwater Hidrology

Soal : Butiran pasir ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$) berdiameter nominal = $d_n = 1 \text{ mm}$ dilepas dalam air bersuhu 20°C ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$).

- Berapakah ketjepatan djatuhnja djika butiran dianggap bola ?
- Berapakah ketjepatan djatuhnja menurut Rubey ?
- Hitunglah shape factor butiran pasir jang ketjepatan djatuhnja sesuai dengan nilai menurut Rubey. $g = 9,8 \text{ m/det}^2$.

Jawab :

- Dari grafik S - 1 (20°C) $\rightarrow w = 15 \text{ a } 16 \text{ cm/det}$.
- Dari grafik S - 1 $\rightarrow w = 10 \text{ cm/det}$.
- $t = 20^\circ \text{C} \rightarrow$ grafik H - 2 : $v = 1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{det}$.

$$Re = \frac{wd}{v} = \frac{10 \cdot 0,1}{10^{-2}} = 100 > 1$$

maka dipakai rumus $w^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d}{C_d} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

$$\rightarrow 1 \cdot 10^{-2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{9,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{C_d} \cdot \frac{2650 - 1000}{1000}$$

$$C_d = \frac{4}{3} \cdot 0,98 \cdot 1,65 = 2,156 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Grafik S - 2} \\ \\ S_f = 0,4 \end{array}$$

$$Re = 100$$

Bingkasan :

Diketahui I; ditanjakan \bar{U}

Diketahui \bar{U} , ditanjakan I

- Anggap pengaliran turbulen sempurna

$$Re = \frac{\bar{U} R}{v} > 600$$

- Taksir harga a (H - 6)

- Tentukan v sebagai fungsi dari pada suhu (H - 2).

- Hitunglah $U_* = \sqrt{gRI}$

$$\text{Hitunglah } \delta = \frac{11,6 v}{U_*}$$

- Hitunglah h

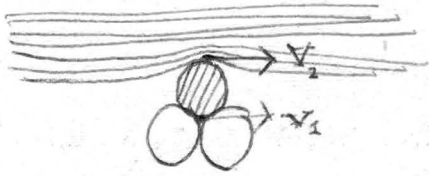
$$C = 18 \log \frac{6 R}{a + 0,7}$$

$$\text{Hitunglah } Re = \frac{\bar{U} R}{v}$$

Tjari C dari H - 6

Hitung

$$I = \frac{\bar{U}^2}{2R}$$



v_2 besar krn ada aliran

$$v_1 = 0$$

Bernoulli $p_1 > p_2 \rightarrow$ butir terangkat

5. Hitunglah $\bar{U} = C \sqrt{R I}$

7. Periksa $Re = \frac{\bar{U} R}{\nu}$

Petatan : Djika telah diketahui (atau ditentukan) bahwa pengaliran adalah berdinding hydraulis kasar, tjukup dilakukan operasi 3 dan 6 sadja, sedang untuk 5 dipakai rumus sederhana $C = 18 \log \frac{6 R}{a}$

IV. PERMULAAN GERAK DARI PADA BUTIRAN (TEORI **SHIELDS**)

Pandanglah sebuah butiran diatas dasar jang litjin dan datar jang terdiri dari sedimen berukuran sama (uniform grain size), sedang pengaliran air diatas dasar tersebut adalah "parallel" (bukan laminair flow).

Gaja-gaja jang bekerdja pada butiran tersebut adalah :

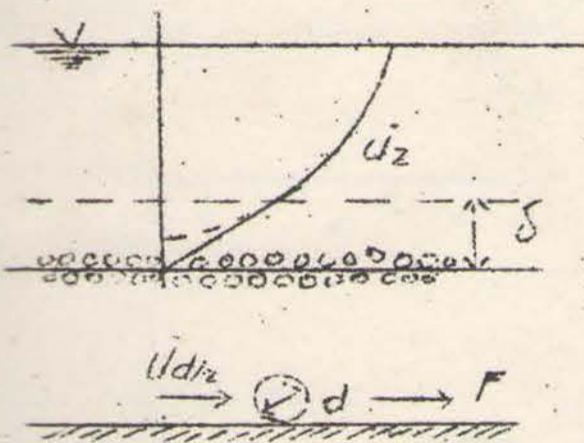
1. jang vertikal :
 - gaja berat (W)
 - gaja apung (B)
 - gaja angkat hydro dinamis (hydro dynamic lift force)
2. jang horizontal:
 - gaja geseran (F_{gr}) gr = angle of repose = sdt lereng alam
 - gaja hambatan hydro dinamis (hydro dynamic drag force) ($F_d = drag force$)

- 2 konsep : (a) Penerusan tegengan geser total \rightarrow tidak dibitjarkan
 (b) Pengaruh langsung pengaliran kepada butiran.

Sifat-sifat pengaliran turbulen dinjatakan dengan harga rata-rata.

Butiran-butiran ditentukan oleh diameter-equivalent = d.

b). Permulaan gerak butiran oleh tekanan aliran.



$$\bar{U}_z = 5,75 U_* \log \frac{104 z}{\delta} \quad (II)$$

$$c = \frac{11,6 \nu}{U_*} \rightarrow Re_* = \frac{U_* d}{\nu} = \frac{11,6 d}{\delta}$$

$$\bar{U}_{d/2} = \bar{U}_z \text{ jang bekerdja pada } z = c \cdot d \quad (z = \text{constante dari } d)$$

Kalau dianggap butiran ini sebagai benda jang mengalami tekanan karena pengaliran, gaja jang

gaja jang bekerdja pada butiran: $F = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \bar{U}_{d/2}^2$

Dari persamaan (II) diatas $\bar{U}_{d/2} = f (\dots)$

$$\bar{U}_{d/2} = U_* f \left(\frac{d}{\delta} \right) = U_* f' \left(\frac{U_* \cdot d}{\nu} \right) \rightarrow \text{dimana } Re_* = \frac{U_* \cdot d}{\nu}$$

$$= \sqrt{g h I} f' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right)$$

$C_d = f (Re)$, nestinja $C_d = f (Re, Fr)$ (dihitung)

$$= f'' (Re_*) = f'' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right)$$

Djadi : $F = \rho_w g h I d^2 f'' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right)$

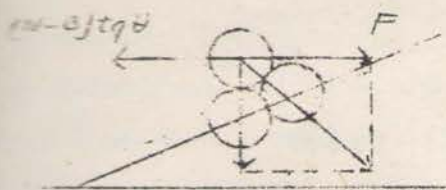
$$= \tau_0 d^2 f'' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right) = \tau_0 d^2 f_3 \left(\frac{U_* d}{\nu} \right)$$

terlalu sukt dipenutn (jaki talE)

Grafik G-3 dibuat utk suhu 12°C , ~~XXXXXX~~ & $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$
utk yg lain maka u_* dihitung (grafik tetap dipakai, tanpa Re dan

$$\left(\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d} \right) u_*$$

angle of repose = sudut alam = talud = natural slope.



$$(W - B) = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho_w) g$$

W = berat butiran diudara

B = gaya apung butiran

θ = sudut alam (natural slope)

Equilibrium :

$$F = (W - B) \operatorname{tg} \theta$$

F = gaya jang bekerdja pada butiran karena air jang mengalir.

$$\tau_o d^2 f''' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right) = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho_w) g \operatorname{tg} \theta$$

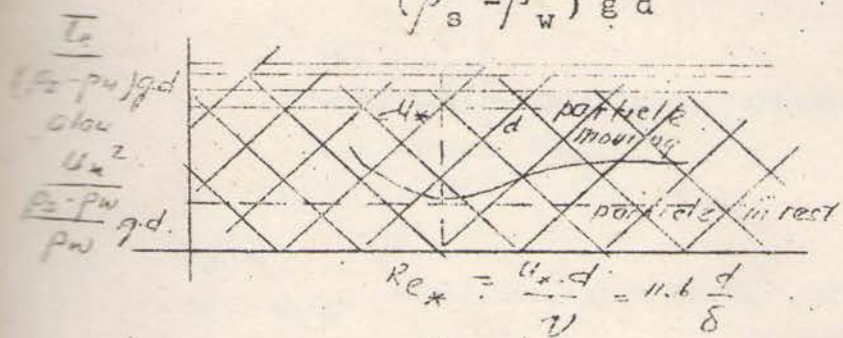
Djika pada keadaan kritik $\tau_o \rightarrow \tau_c$ maka

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d} = f''' \left(\frac{U_* d}{\nu} \right) = f''' \left(\frac{d}{\delta} \right) \rightarrow \text{Shields.}$$

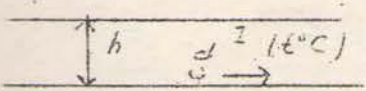
Sudut tersebut ditentukan setjara experimental (grafik S - 3). Hal tersebut berlaku untuk pengaliran paralel dengan pembagian ketjepatan logaritmis.

Catatan : Grafik Shields (S - 3) berlaku djuga untuk ρ_s dan ν pada harga jang lain dari 2650 dan $1,25 \cdot 10^{-6}$, tetapi nilai-nilai jang tetap

ialah hanja $\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d}$ dan d .



$d > 8 \text{ mm} \rightarrow \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d} = 0,055$
 $d > 60 \text{ mm}$
 → S3



Diketahui: h, I, t^0 , d
 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6}$
 Ditanya : $\tau_c = ?$

$$U_* = \sqrt{g h I} \rightarrow Re_* = \frac{U_* d}{\nu}$$

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g d} = \dots \quad \tau_c = \dots \text{ J N/cm}^3$$

$$\tau_o = \dots \text{ N/cm}^3 = \rho_w g h I$$

Ujatan :

Selain memandang harga rata-rata dari pada besaran-besaran, dapat djuga ditinjau ketjepatan saat $U = f(t)$. Hal tersebut khususnya penting djika $d \gg \delta$.

Gaya akibat aliran : $F = \frac{1}{2} \rho_w C_d A_n U^2$

Gaya akibat berat : $W - B = (\rho_s - \rho_w) g v$

$$A_n = \frac{1}{4} \pi d^2$$

Kedadaan statis bila : $\frac{d^3}{W - B} \leq \text{tg } \theta$

Sebetulnja $\text{tg } \theta$ mudah berubah dengan faktor 2, misalnja tergantung dari letak butiran. $\text{tg } \theta = 0,35 - 0,70$.

Permulaan gerak butiran tidak setjara otomatis menghasilkan pengangkutan sedimen. Gaja impuls mungkin berlangsung sesaat sadja dan butiran akan kembali kepada posisi semula. Sebaliknya bila gaja impuls kuat sekali, butiran mungkin akan bergerak melintasi djarak jang tjukup besar.

Dari $\frac{d^3}{W - B} \leq \text{tg } \theta$ dapat didjabarkan $(\frac{U}{\dots} \rightarrow \bigcirc)$
 $d \text{ (:) } U^2 \text{ ----} \rightarrow d^3 \text{ (:) } U^6 \text{ ----} \rightarrow W \text{ (:) } U^6$

jang berarti, bahwa berat butiran (batu) jang akan digerakan oleh aliran berubah menurut ketjepatan berpangkat 6. Ini berlaku pada Re_c jang tjukup tinggi.

Pjataan :

Menurut Njalström (1939) ---- $d \text{ (:) } \bar{U}^2$ dimana \bar{U} adalah ketjepatan rata.² Khususnja untuk $d \geq 8 \text{ mm}$. (Grafik Shields S - 3).

Pjontoh : $h = 3 \text{ m}$; $t = 12^\circ \text{C}$; $I = 10^{-4}$; $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
 $g = 9,8 \text{ m/det}^2$; $d = 2 \text{ mm}$.

Pertanjaan : a). Butiran-butiran didasar bergerak ataukah berhenti ?

b). Hitung : τ_o ; τ_c ; U_{*c} ; Re_{*c} .

c). Djika $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$ dan $t = 20^\circ \text{C}$ berapakah τ_c pada mana butir-butir mulai bergerak (anggap $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) dan berapa Re_{*c} ?

Djawab :

a). $t = 12^\circ \text{C}$
 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ } ----> Nilai 2 pada grafik Shields dapat dipakai seluruhnja.
 $= 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det}$.

$U_{*c} = \sqrt{ghI} = \sqrt{9,8 \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 0,0542 \text{ m/det}$.

$Re_{*c} = \frac{U_{*c} d}{\nu} = \frac{0,0542 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 10^{-6}} = 86,8$.

Dari grafik Shields djelas bahwa : "butiran bergerak"

b). Dari grafik S - 3 (Shields) $\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)gd} = 0,04$.

Checking: $\tau_c = 0,04 (2650 - 1000) \cdot (9,8) \cdot (2 \cdot 10^{-3}) = 1,294 \text{ N/m}^2$.

$\tau_o = \rho_w ghI = 1000 \cdot 9,8 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 2,94 \text{ N/m}^2$.

$\tau_o > \tau_c$ ----> "butiran bergerak"

Catatan

Jika butir² tak seragam ada pengaruh thd stabilitas butiran yg disebut gradation effect ; jika butiran tak sama jobes T_c akan diperpendek. Menurut Koroos (1971) dlm proyekts gradasi butiran berpengaruh thd T_c jika $d_{90}/d_{5} > 5$, seolah² butir² kecil berlindung diantara butiran besar.

Seron : utk hit T_c total lebih diambil d_{50} .

Jika gradasi butiran sangat besar ada pengaruh yg disebut ARMOURING EFFECT artinya butir² kecil akan tererosi dan terbentuk cup permukaan t. a butiran kasar yg menghalangi terkernanya dasar sungai lebih lanjut. Effect ini sangat penting pd proses degradasi setelah hilir bendungan [Livesey (1963) dan Gessler (1970)]-

Dlm hal spt itu d_{85} & d_{95} dpt diambil sbg nilai yg representatif utk camp. bed. material.

STOKHASTIKS = SEMEN GUE

3 - 3

$$\frac{U_{*c}^2}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g d} = 0,04 \rightarrow U_{*c}^2 = 0,04 \cdot \frac{2650 - 1000}{1000} \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$= 12,93 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{det}^2$$

$$U_{*c} = 0,036 \text{ m/det} \quad \times \quad U_* = 0,054 \text{ m/det.}$$

∴ butir - butir bergerak.

$$Re_{*c} = \frac{U_{*c} \cdot d}{\nu} = \frac{0,036 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 10^{-6}} = 57,5$$

- $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$
- $t = 20^\circ \text{C}$
- $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

Grafik Shields : untuk $d = 2 \text{ mm}$

$$\tau_0 = \frac{(\rho_s - \rho_w) g d}{\tau_0} = 0,04$$

$$\tau_0 = 0,04 (3000 - 1000) 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1,57 \text{ N/m}^2$$

$$\frac{U_{*c}^2}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g d} = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)}$$

$$\rho_w \cdot U_{*c}^2 = \tau_0 \rightarrow U_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} = \sqrt{\frac{1,57}{1000}} = 0,0396 \text{ m/det}$$

$$\neq 0,036 \text{ m/det}$$

$$Re_{*c} = \frac{U_{*c} \cdot d}{\nu} = \frac{0,0396 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 72,9 \neq 57,5$$

(Perhatikan skala jang lain dari pada 3 - 3)

* Catatan

V. MEKANISME PENGANGKUTAN.

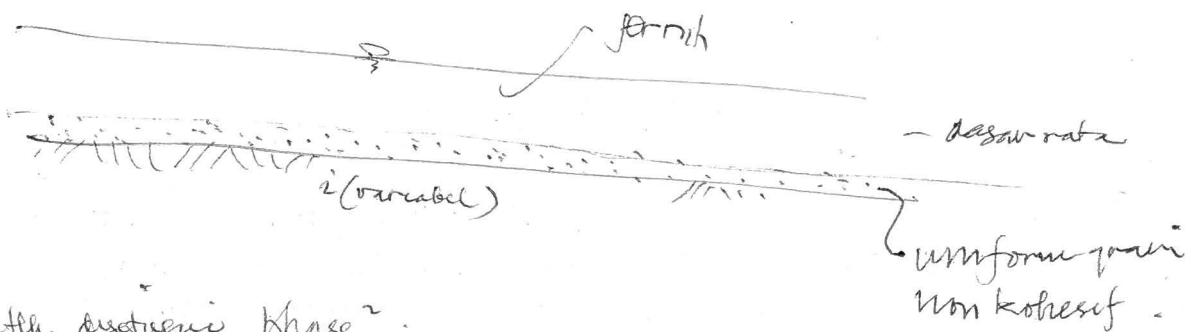
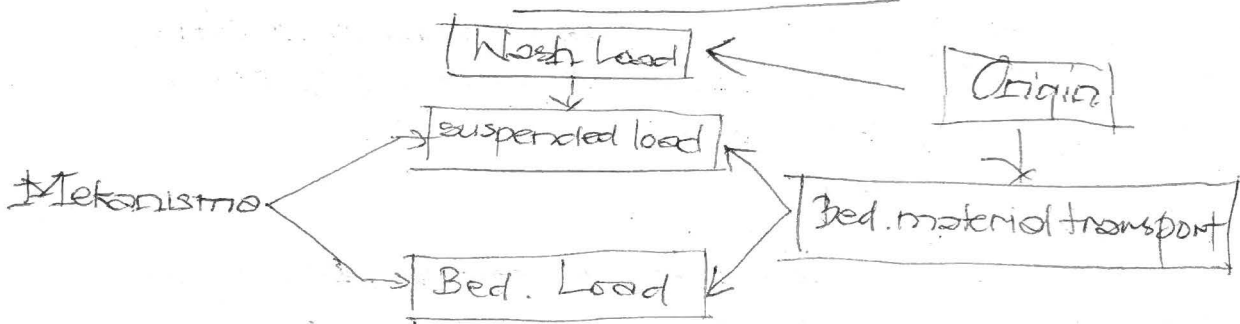
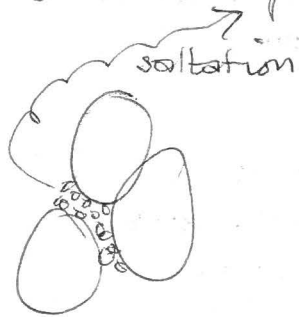
Dengan mengintrodusir hypotesa-hypotesa tertentu tentang gerak turbulen air jang mengalir (Prandtl dan Von Karman), pembagian ketjepatan dari nilai rata-rata dari pada ketjepatan dapat didja barkan, hal mana sesuai dengan hasil-hasil pertjobaan. Dalam proses tersebut keadaan batas atau dinding sangat menentukan. Dalam hidrolika sedimen batas atau dinding tersebut jang terdiri dari bahan jang dapat bergerak akan mengalami pengaruh dari pada aliran turbulan dan sebagai akibatnya dinding / dasar dapat berubah.

Dengan demikian terdjadi pengaruh timbal-balik antara dasar aliran jang terlihat dari perubahan kekasaran dinding. Djika pengaliran permanen beraturan telah tercapai, dapat diharapkan telah terdjadi keseimbangan dinamis dari pada batas/dasar. Hingga kini untuk peristiwa tersebut belum berhasil didjabarkan suatu formulasi matematik, jang didasarkan pada sifat-sifat air dan sedimen. $Re = f(u_*, d, \rho_s)$. Parameter-parameter jang berpengaruh pada, dalam proses pengangkutan sedimen telah diketahui, dan hubungan jang satu dengan lainnja telah ditentukan setjara empiris. Seperti telah ditundjukan dimuka, nilai-nilai kritik harus dilampaui supaya butiran mulai bergerak.-

Mencurukannya bhm dasar yg ditransport Apt dikedokan sbb :
(Bed material)

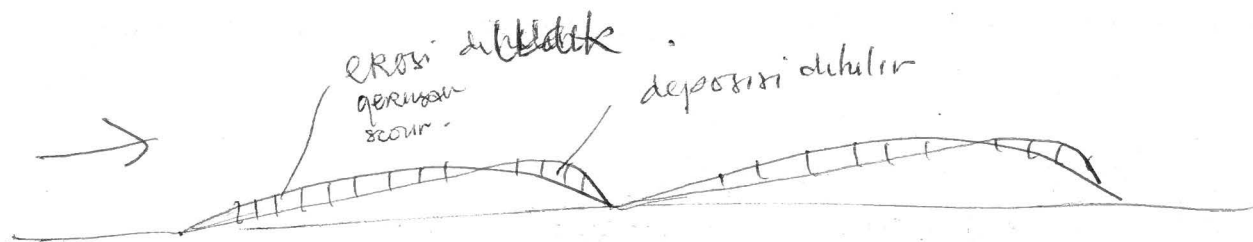
a) Bed material transport = asal bhm yg ditransport ada di dasar sungai artinya transportnya ditentukan oleh kead. dasar & aliran. Dapat berupa bed load atau suspended load.

b) Wash load [Cyg NB suber dihitung $\rho \cdot k_{in}^2 \cdot v_{20}^2$ dari I_{total}]: bahan yg diangkut tdk stau utk sebagian kecil berasal dari dasar sungai setempat. Bahan transport berasal dari sumber lain (akar-
bed erosi dan tidak mempunyai turb. Crysol & kumulasi lokal). Hanya dapat berupa suspended load / tdk sbg bed load. Biasanya halus sekali dg $d < 50 \mu m$ dan berlandung dicampur butir yg lebih besar dan kasar terangkat jika exposed. Tdk mempengaruhi permbahan dasar sungai dan hanya penting pd sedi-
mentasi reservoir.



waktu disatugai phase²:

A) Lower Flow Regime $F_r < 0,4$



Dalam kondisi \neq kondisi non permanent (dalam alam) nilai-nilai tersebut akan berubah-ubah tergantung kepada keadaan bentuk dasar. Dalam alam sukar diharapkan hanya keseimbangan antara aliran dan dasar setjara terus menerus.

Pengangkutan sedimen terdjadi dalam bentuk-bentuk sebagai berikut :

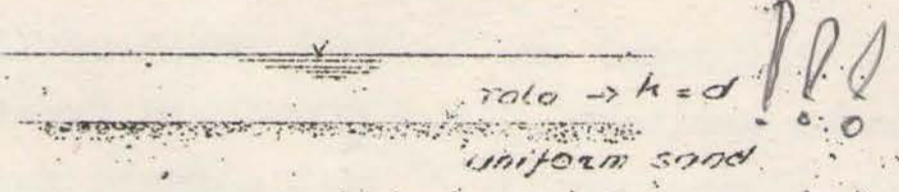
- 1. Bed load : Gerak butiran terdjadi "pada dasar saluran" setjara menggelinding, menggeser atau melontjat.
- 2. Suspended load : Gerak butiran terdjadi "diantas dasar saluran", berat butiran setjara terus menerus dikompensir oleh gerak turbulenti dari pada aliran.

Perkembangan konfigurasi dasar sebagai fungsi ketjepatan arus pada pengaliran yang lambat laun bertambah. Kondisi awal "air bersih" dan "dasar rata", terdiri dari "bed material" yang granulair dan "non cohesive" dengan ukuran sama.

A) Lower Flow Regime $Fr < 0.4 - 1.0$

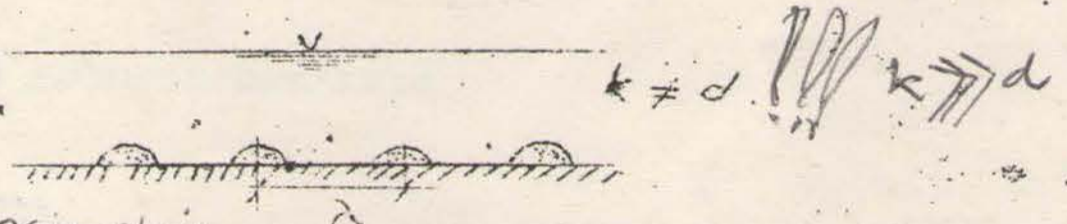
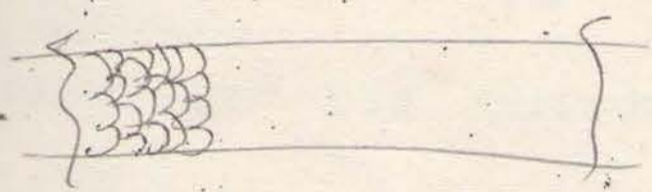
Phase 1 : Plain bed

Gerak butiran masing-masing setjara menggelinding atau menggeser dengan berganti-ganti pada tempat sembarang. Dengan bertambahnya pengaliran, frekuensinya bertambah pula. Untuk bahan yang sangat halus terdjadi saltasi (saltation) dengan membentuk awan dan akhirnya suspensi. Dasar dm mengalami deformasi.



Phase 2 : Ripples

Dasar berbentuk serupa gelombang teratur dengan amplitudo yang relatif kecil terhadap panjang gelombang. Kekasaran bertambah, symmetris. Berdimensi tiga.



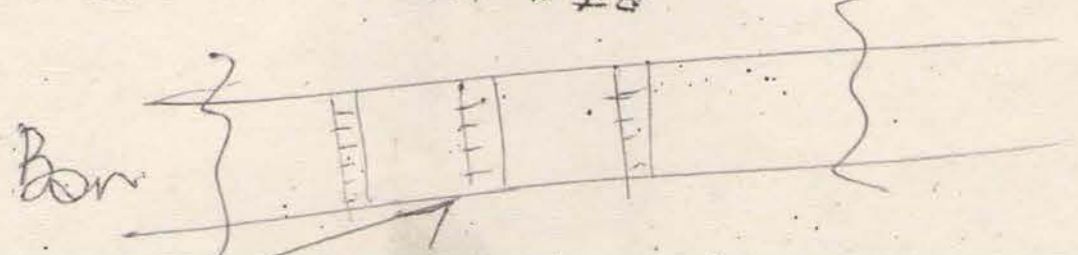
Phase 3 : Dunes -> 3 dimensi, asimetris

Sisi sebelah muka/udik lebih landai, sedang sisi sebelah belakang/hilir lebih tjuram. Erosi terdjadi sepanjang sisi sebelah udik dan endapan terdjadi dibagian bawah sisi sebelah hilir. Bentuk-bentuknya kurang teratur dibanding dengan ripples. Kekasaran makin bertambah.

"Bars" (Dunes yang telah menggandeng mendjadi satu) adalah perpandjangan dari pada jarak-jarak dunes sedang puntjaknya makin mendatar. Kekasaran makin berkurang. Perubahan dunes ke "bars" inilah yang memberikan friction mulai berkurang.



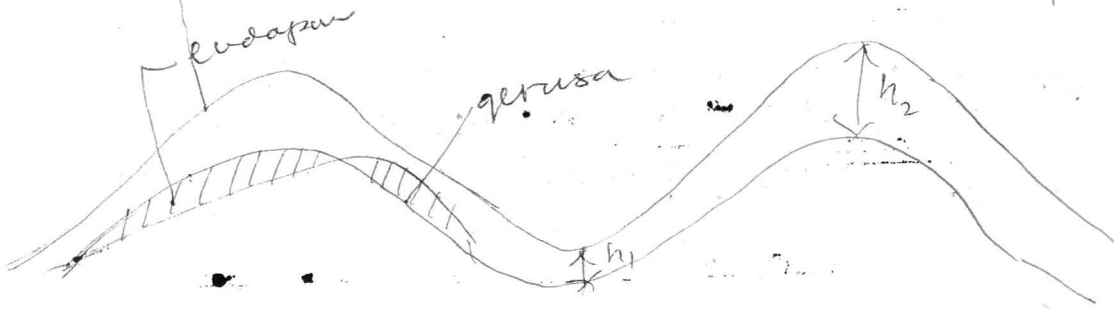
Dunes > Ripples



ANTI DUNE

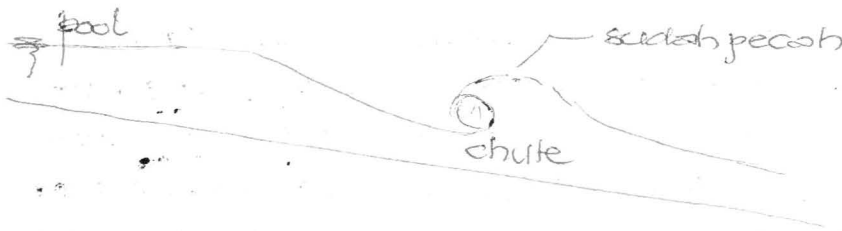
Flow line

$$h_1 < h_2$$



Phase 6 : Chute and Pool

Pd kecep yg lebih besar lagi akan terbentuk chute & pool sbb :
(F_r lebih besar) $\rightarrow F_r > 1$



3) Upper Flow Regime $Fr \approx 1$

Phase 4 : Sheet flow

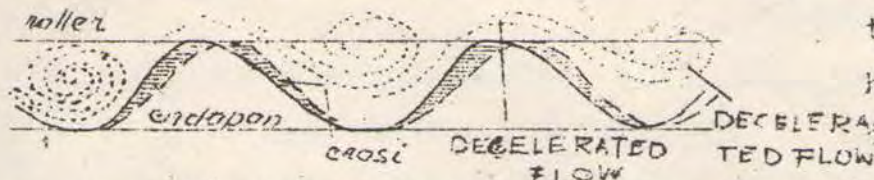
Dasar menggelombang menjadi litjin rata dengan daya angkut yang sangat besar,



sedang kekasaran ketjil. Stadium (phase) ini dapat dikatakan suatu stadium transisi dan tertjapai pada $Fr \approx 1 \rightarrow k=d$

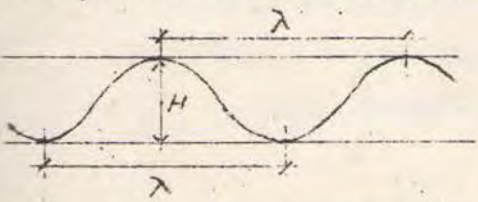
Phase 5 : Anti dunes

Endapan bahan-bahan terjdjadi pada sebelah udik dari pada dunes, sedang erosi



terjdjadi pada sisi sebelah hilir. Bentuk gelombang sedikit banjak symmetris.

Orang mengatakan bahwa gelombang anti dunes bergerak kearah udik, terjdjadi pada $Fr > 1$. (Pengamatan sulit).



Sifat-sifat ripples dan dunes jaitu tinggi ripples ($= H$), panjang gelombang ripples ($= \lambda$), ketjepatan pondjalaran ($= C_r$) dan daya angkut antara

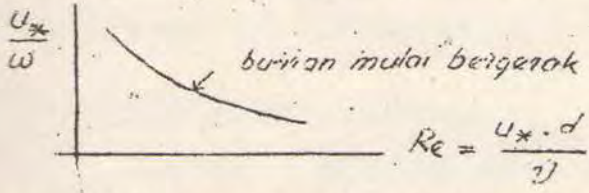
lain telah dihubungkan dengan parameter $\frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)gd}$ dan h (dalamja air)

Anggapan bahwa suatu butiran dari lapisan teratas akan berada dalam sus-
pensi setelah butiran tersebut mulai tergerakkan. Orang telah memperoleh hubung-

an dengan memakai parameter $\frac{U_*}{w}$.

Menurut Tsubaki djikalau $\frac{U_*}{w} > \frac{5}{3}$ maka butiran ada gejala untuk bergerak dalam suspensi.

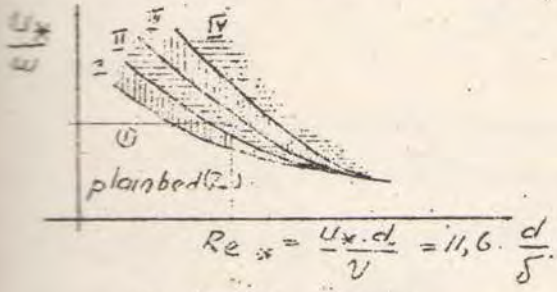
Tahun 1957 : LIH bikin hubungan sebagai berikut :



Tahun 1958 : Albertson, Simons dan Richardson memperluas hubungan tersebut

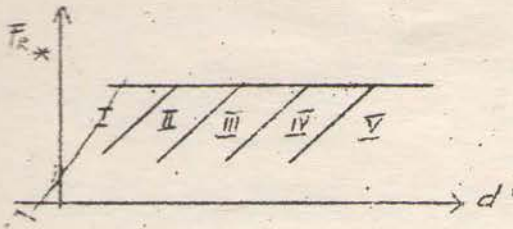
dengan memasukkan kedalam grafik berbagai-bagai phase dari pada konfigurasi dasar sa-
luran (phase pengangkutan sedimen)

→ lihat S - 4 .



- I. daerah ripple
- II. daerah dunes
- III. daerah transisi
- IV. daerah anti dunes

Bogardi (Hongaria) membuat grafik dengan parameter-parameter $\frac{gd}{U_*^2}$ dan d



jang hasilnja : $Fr_* = \frac{U_*^2}{gd}$

- I : daerah plain
- II : daerah ripple
- III : daerah dunes
- IV : daerah transisi
- V : daerah anti dunes

Menurut grafik Albertson es (S - 4) kemungkinan terdjadinja phase-phase pengangkutan dapat djuga dihubungkan dengan $\frac{d}{\delta}$.

Djika dasar saluran terdiri dari sedimen jang halus, butiran-butiran akan berada dalam suspensi, segera setelah butiran pada dasar mulai tergerakkan dan intensitas komponen-komponen vertikal dari pada fluktuasi ketjepatan akibat turbulensi adalah lebih besar dari pada ketjepatan djatuh butiran tersebut.

Pada $U_* = \frac{5}{3} w$ mulai terlihat butiran-butiran dalam suspensi dekat pada dasar (Tsubaki).

Contoh : Sebuah sungai lebar 100 m, dalam air = 5 m, dilalui $Q = 400 \text{ m}^3/\text{det}$, $I = 5,12 \cdot 10^{-5}$. Bahan dasarnya adalah pasir dengan $d = 1,7 \text{ mm}$. Suhu air 20° C . $g = 9,8 \text{ m/det}^2$. (anggap bulat)

- Fertanjaan : a). Bagaimana phase pengangkutan sedimen ?
 b). Hitunglah coefficient kekasaran dasar sungai ($= k'$).

Djawab :

a). $U_* = \sqrt{ghI} = \sqrt{9,8 (5) (5,12 \cdot 10^{-5})} = 0,05 \text{ m/det}$

Alternatif I :

Menurut grafik Schulz (S - 1) untuk pasir dengan $d = 1,7 \text{ mm}$ dan t air 20° C terdapat $w = 25 \text{ cm/det}$, hingga $\frac{U_*}{w} = \frac{0,05}{0,25} = 0,2$

Dari grafik Albertson es (S - 4) untuk $d = 1,7 \text{ mm}$ dan $\frac{U_*}{w} = 0,2$ terdapat konfigurasi dasar berupa " dunes "

Alternatif II :

$$Re_* = \frac{0,05 \times 1,7 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 85$$

Dari Albertson es (S - 4) dengan $d = 1,7 \text{ mm}$ dan $Re_* = 85$ terdapat konfigurasi dasar berupa " dunes "

b). $\bar{U} = \frac{Q}{A} = \frac{400}{100 \cdot 5} = 0,8 \text{ m/det}$

$\bar{U} = C \sqrt{hI} \rightarrow C = \frac{0,8}{\sqrt{5 \cdot (5,12 \cdot 10^{-5})}} = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{det}$

$C = 18 \log \frac{12 h}{k'} \rightarrow \log \frac{12 \cdot 5}{k'} = \frac{50}{18} = 2,778$

$\frac{60}{k'} = 600 \rightarrow k' = 0,10 \text{ m} \rightarrow d = 1,7 \text{ mm}$



$$I = I' + I''$$

$$R = R' + R''$$

$$k_s = k_s' + k_s''$$

Dispersi → membur mis. zat warna dimasukkan ke air → perlu waktu utk. menata.

$T_0 = \rho_w g R I$ = unit tractive force (sat. yg lurus) juga → lumpur jika sungai lebar T diorganisir sama.



dlm mentransfer air dg debit Q .
 T_c - bed material (S_3 atau S_{11} / S_{alam})
 T_c - suspended material

$T_c < T_0 < T_c$
 ↳ bed material
 ↳ suspended material

$$T = \rho_w l^2 \left(\frac{du_z}{dz} \right)^2$$

↳ $l = \alpha z$

↓
 0,4 (utk air yg jernih only)
 utk sungai yg mengangkut lumpur → $\alpha = 0,4$ terlalu besar

catatan : Djelas dasar sungai tidak datar, karena $k' \gg d$.

Coeffisien kekasaran $k' = 0,10$ m disebabkan terutama oleh adanya dunes yang oleh Einstein disebut ripples (dunes) atau shape roughness (kekasaran bentuk) disamping grain roughness (kekasaran butir) ($d = k$).

→ hal 20

ripple roughness } kekasaran akibat
dune roughness } dasar yg tergelombang
shape roughness }

VI. SALURAN JANG STABIL

Sedjarah mengenal dua teori penting tentang saluran-saluran jang stabil jang berpangkal pada prinsip-prinsip jang berlainanialah :

1. Teori rezim (regime-theory) berasal dari India; dikembangkan oleh Kennedy, Lacey, Lindley, Inglis, Bose, Blench dan sebagainya.
2. Teori gaja geseran (tractive force theory) dipakai di USA, USSR dsb. Di Amerika diperbaharui oleh E.W. Lane.

Salah satu teori itu bertudjuan untuk memperoleh penampang lintang saluran tanah jang mendjamin keadaan jang stabil selama pemakaian.

Dalam teori rezim rumus-rumus terutama didasarkan kepada pengalaman2 dengan saluran-saluran pengaliran dan data-data dari praktek jang diperoleh dari sungai-sungai. *Terutama di India & Pakistan, Kanada*

Dalam teori gaja geseran, pembagian gaja geseran sepanjang dasar dan tebing-tebing saluran dipilih sebagai kriterium. Penampang saluran ditentukan sedemikian rupa sehingga gaja geseran disemua tempat akan tjukup besarnya untuk mentjegah endap sedimen dalam djumlah jang ^{berarti} ~~menyebabkan~~ dan disamping itu ^{hub. ant} gaja geseran harus tjukup ketjil untuk mentjegah gerusan-gerusan, jang berarti hubungan antara geseran dan bahan dasarnya ditentukan setjara experimentil.

Tanah dapat berupa :

1. Kasar non-cohesive
 2. Fine (halus) non-cohesive
 3. Cohesive
- Sudut alam (angle of repose) θ adalah tertentu. Kekasaran berhubungan dengan butiran, ripple dan dunes. → S_0
- Kekasaran berhubungan dengan ketidak terturan akibat penggalian (tergantung alat). Dasar dan tebing-tebing tidak perlu terdiri dari komposisi jang sama.

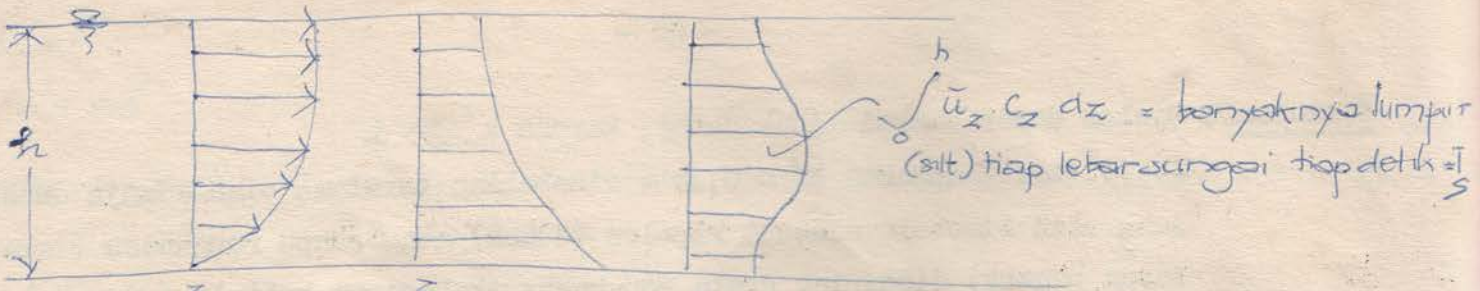
Air dapat berupa :

1. Air djernih
2. Air dengan kandungan sedimen halus tertentu (dalam suspensi)
3. Air mengandung kolloida (slib)
4. Air dengan suhu jang bematjam-matjam.

Saluran dapat berupa :

1. Garis lurus
2. Garis jang berbelok-belok

~~Saluran dengan konsep saluran jang stabil, bahan-bahan jang dimasukkan dalam saluran harus diangkut oleh air.~~



pembagian kecepatan

konsentrasi lumpur

ppm (mg/l, g/l, etc)

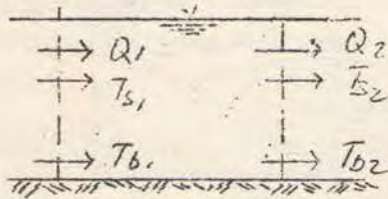
$$T_{cs} < T_0 < T_{cb}$$

batas bawah

hubungan T_0, u_c, \bar{u}, H

Kita mengenal :

1. Saluran tanpa angkutan. → air jernih
2. Saluran yang mengangkut bahan sedimen yang sedang (suspended load dan bed load).
3. Saluran yang mengangkut bahan sedimen yang besar.



- (1). $T_{s1} = T_{s2} = 0$, tanpa suspended flow
 $T_{b1} = T_{b2} = 0$, MFI → tanpa bed load suspended load
- (2). $T_{s1} = T_{s2} \neq 0$, ada suspended load → stabil
 $T_{b1} = T_{b2} \neq 0$, stabil

Saluran stabil bila $T_{s1} + T_{b1} = T_{s2} + T_{b2}$

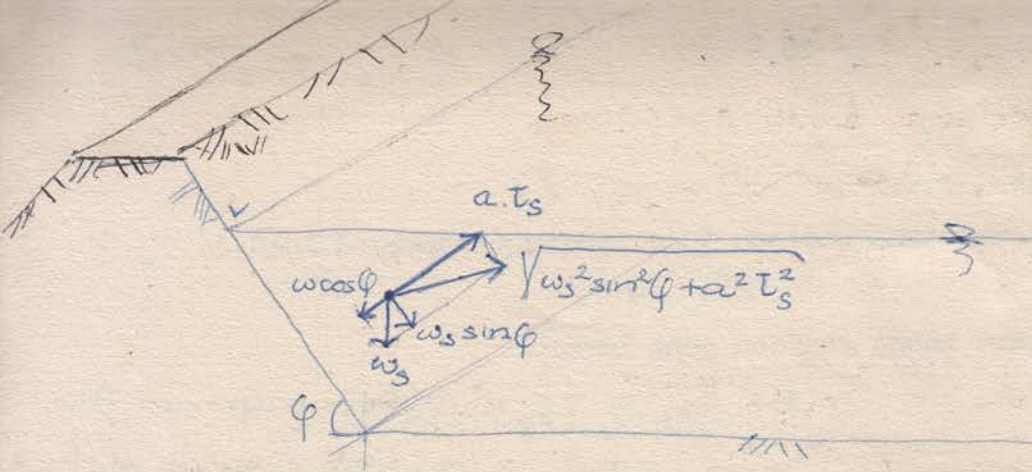
Didalam praktek perlu disadari, bahwa yang diangkut tidak perlu ada hubungan dengan tanah dimana sungai itu mengalir. Selain dari pada itu sifat air dan bahan-bahan yang diangkut tidaklah selalu tetap, tetapi bisa menunjukkan perubahan-perubahan karena musim. Debit Q pun bisa berubah-ubah.

ad.2. Theori gaja geseran

Saluran harus direntjangkan sedemikian rupa hingga bahan-bahan yang masuk dalam saluran akan betul-betul diangkut. Djika tidak ada bahan yang terangkut, maka gaja geser akan lebih ketjil dari gaja geseran kritik ($\tau_0 < \tau_c$). Djika ada bahan yang terangkut, maka perhitungan suspended load dan bed load harus dikerdjakan agar dikotahui kondisi-kondisi pengaliran saluran pada mana terjadi pengangkutan sedimen yang sesuai. Dalam rumus-rumusnya mungkin tegangan geser timbul sebagai salah satu variable. Tergantung kepada keadaan tanah dasar dan tebing saluran, ada kemungkinan bahwa sedimen (djika halus) diangkut dalam suspensi seluruhnya ($T_b = 0$). Dalam hal demikian batas bawah dari pada gaja geseran sama pentingnja dengan batas atas gaja geseran. Perlu ditekankan, bahwa gaja geseran telah dipilih sebagai parameter yang menentukan gerak sedimen. Sudah barang tentu ada parameter-parameter lain yang dapat dipakai djuga. Misalnja: ketjepatan geseran ($= U_*$), ketjepatan sesungguhnya ($= U$). Dari gaja geseran yang diperbolehkan harus dihitung ketjepatan rata-rata ($= \bar{U}$) dan $[\tau]$ dan seterusnya, ditjari penampang lintang ($= A$) yang memberikan debit Q yang dikehendaki.

Konsep gaja geseran menghendaki peninjauan hal-hal sebagai berikut :

- a. Pembagian gaja geseran. → teg. gesek (τ)
- b. Pengaruh tebing/talud/dasar.
- c. Gaja geseran kritik untuk bahan-bahan non-cohesive.
- d. Gaja geseran kritik untuk bahan-bahan cohesive.
- e. Pengaruh tracee saluran. → lurus / ber-belok



$a = luas$

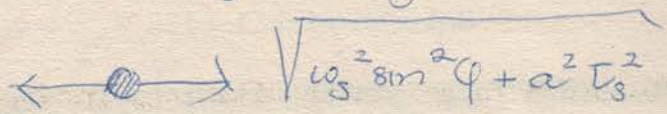
t_c (shields) dititung dir S_3

Open Channel Hyd.
 V.T. Chow, Mc Graw Hill
 1959, p 170.

$W = FN$

$w_3 \cos \phi \rightarrow$ yg menghambat $W_3 \cos \phi \text{ tg } \theta$

$\sqrt{w_3^2 \sin^2 \phi + a^2 t_s^2} =$ yg menggerakkan



$W \cos \phi \text{ tg } \theta$

pasang kritis $t_s \approx t_{sc}$

$W_3^2 \cos^2 \phi \text{ tg}^2 \theta = w_3^2 \sin^2 \phi + a^2 t_{sc}^2$

$t_{sc} = \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}} \cdot \frac{w_3}{a} \text{ tg } \theta \cos \phi$

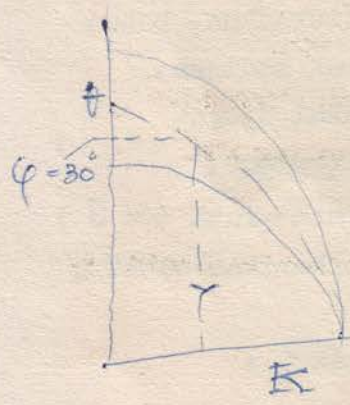
pasang kritis

$a t_c = w_3 \text{ tg } \theta$
 $t_c = \frac{w_3}{a} \text{ tg } \theta$

$\rightarrow t_{sc} = t_c \cos \phi \cdot \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}}$

$K = \frac{t_{sc}}{t_c} = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}} \rightarrow S_6$

$K < 1 \rightarrow$ EW Lane & Carter 1953



$t_{s \text{ max}} = 0,76 t_{0 \text{ max}}$

\rightarrow $\rho \cos \theta R I$

$t_{sc} \leq t_{s \text{ max}} \rightarrow ?$

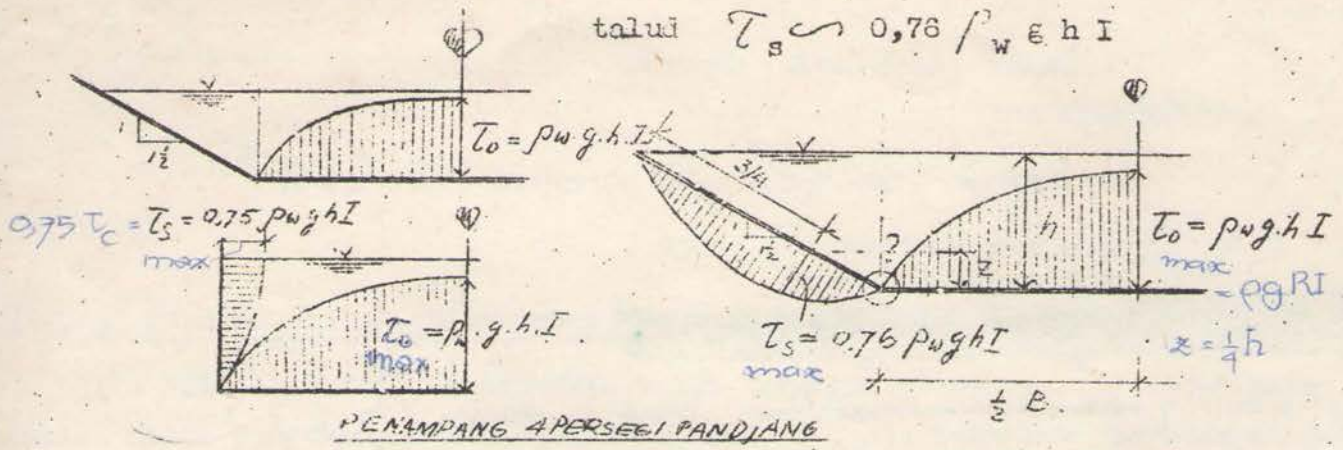
$t_{sc} = t_{\text{side critic}}$

GH BAINI (1947) TRANSITION

$K = \frac{t_{sc}}{t_s} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{\sin^2 \theta}}$

(a). Pembagian gaya geseran (Lihat grafik S - 5).

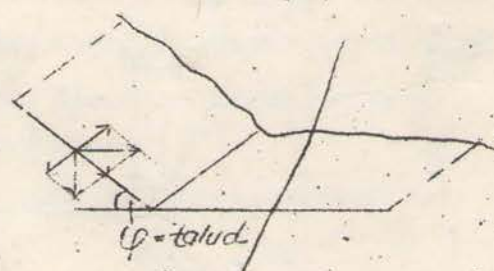
Untuk penampang trapesium : dasar $\tau_0 \approx \rho_w g h I$
 talud $\tau_s \approx 0,76 \rho_w g h I$



(b). Pengaruh tebing/talud.

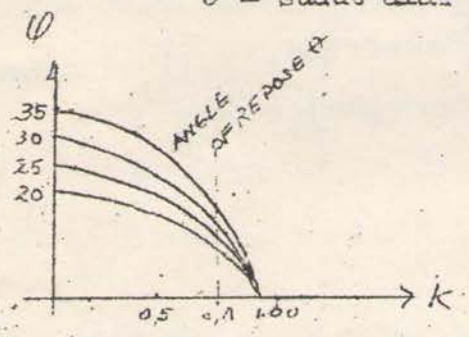
Andaikan 2 matjam gaya bekerdja pada butiran ditebing, ialah gaya geseran pada arah pengaliran dan gaya akibat gravitasi, maka perbandingan antara gaya geseran kritis sepanjang tebing/talud dan gaya geseran kritis pada dasar jang datar dapat ditulis sebagai fungsi dari sudut talud dan sudut alam butiran.

$$K = \frac{\tau_c \text{ talud}}{\tau_c \text{ dasar (datar)}} = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \phi}{\tan^2 \theta}}$$



(lihat S - 6 Fig. B)

dimana : ϕ = sudut talud
 θ = sudut alam (angle of repose)
 $\phi < \theta$



τ_c - dari Shield
 τ_0 - dengan $\rho_w g h I$

Selain itu $\tau_{\text{talud}} = \alpha \tau_{\text{dasar}}$

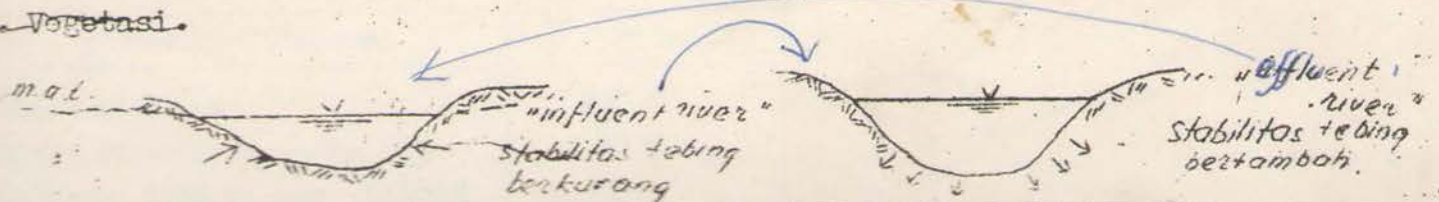
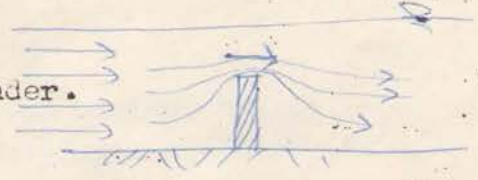
dimana: $\alpha = 0,76$ (profil trapesium)
 $\alpha = 0,75$ (profil persegi)

θ dapat bernilai dari $50^\circ - 40^\circ$ (lihat S - 6 Fig. C)

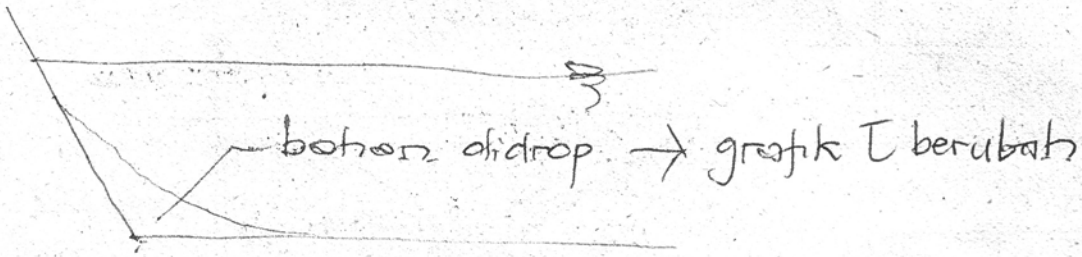
Djika sudut alam ini tidak dapat ditentukan dengan seksama, maka akan berakibat ketiakk pastian jang tjukup besar.

Sebab - sebab lain adalah :

1. Penjirpangan dari arah aliran karena arus - arus sekunder.
2. Gaya - gaya akibat rembesan kedalam ataupun keluar.
3. Dan djuga pengaruh galombang angin, ^{oleh} atau kapal.
4. Vegetasi.



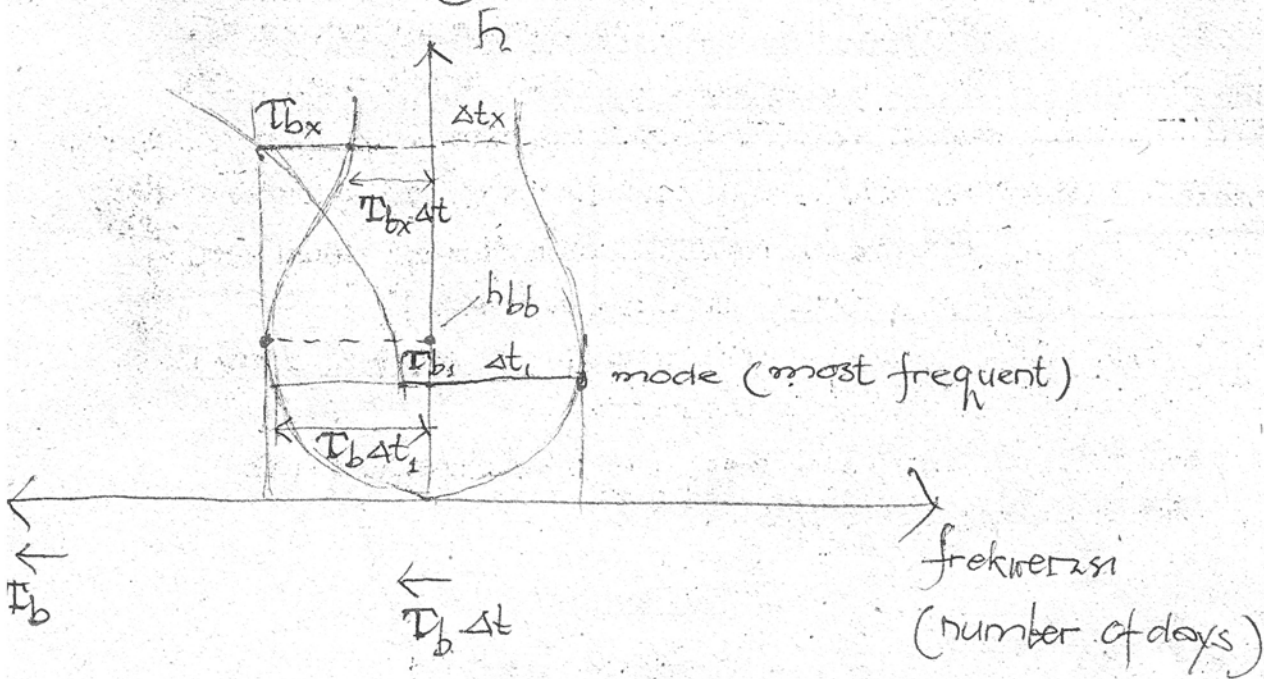
$T_c < T_o \uparrow < T_c$
 ↳ bed material
 ↳ suspended material



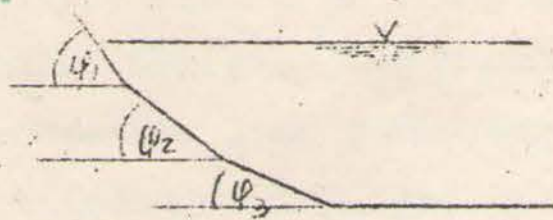
Metode bed material water level

h yg paling besar memberikan bentuk dasar (h_{bb}):
 suatu m.a yg mengakibatkan pertit. ant. Δt & T_b terbesar = se-
 dimen tertentu.

Sediment rating curve



Penampang jang ideal/keadaan jang ideal dapat didjabarkan setjara analitis (jaitu oleh von Bretting - 1958 - Denmark).



berubah - ubah \rightarrow mahal
tak dilaksanakan

$$\tau_{c1} < \tau_{c2} < \tau_{c3} < \tau_c$$

(djadi τ_c mengikuti pertambahan ϕ)
 ϕ makin besar $\rightarrow \tau$ makin kecil

(c). Gaja gesekan kritik untuk bahan - bahan non - cohesive .

Djika istilah kritik dimaksudkan bahwa tegangan geser (τ) tidak boleh melebihi nilai jang menjebakkan gerak butiran (τ_c), maka kita berhadapan dengan suatu kondisi dimana tidak ditolerir adanya bed-load. Djadi untuk air bersih $\tau_0 < \tau_c$ bed material. Untuk air jang mengandung sedimen halus, τ_0 harus lebih ketjil dari τ_c bed material jang sesuai dengan bahan dasar saluran dan haruslah lebih besar dari τ_c suspended load jang sesuai dengan sedimen halus. Harus diusahakan supaja τ_0 sedekat mungkin pada τ_c dasar, tetapi masih lebih ketjil djika ingin ditjapai keadaan dimana sedimen halus akan tetap dalam suspensi.

Dalam keadaan itu penting sekali ditjapai pembagian tegangan geser sepanjang dinding - dinding/dasar dengan keseragaman optimum. Perlu disadari bahwa beberapa faktor lain (selain τ_0) ikut pegang peranan didalam menetapkan $[\tau]$. Misalnja komposisi bahan dasar (pembagian ukuran dan bentuk butiran), muatan sedimen dari pada air, penampang lintang dan sebagainya.

Suatu ringkasan dari pada data - data tentang τ_c telah diberikan oleh E. W. Lane dalam bentuk suatu grafik (1955).

Kesimpulan : $[\tau_c] = d$
 kg force/m^2 $\pm 10 \text{ N/m}^2$

misalnja : $d = 0,01 \text{ cm}$, maka $\tau_c = 0,01 \text{ kg/m}^2$.

(d). Gaja geseran kritik untuk bahan cohesive

Masih banyak study diperlukan dalam bidang ini. Khususnja jang sulit adalah sifat - sifat dari pada tanah. Guna memperoleh besar dan variasinja dengan sifat - sifat tertentu telah dibuntkan grafik dari data - data Lane (1955).

(e). Pengaruh tracee saluran .

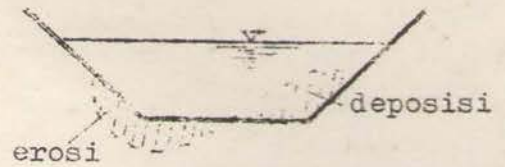
Tergantung kepada topografi, saluran dapat terdiri atas bagian - bagian jang lengkung. Maka diandjarkan untuk mengurangi tegangan geser jang diperbolehkan $[\tau]$. Menurut Lane reduksi adalah sebagai berikut :

Deradjat belokan	τ_c relatif
Saluran lurus	100 %
Saluran agak ber - belok2	90 %
Saluran tjukup ber - belok2	75 %
Saluran sangat ber - belok2	60 %

$$\text{Hydraulic mean depth} = \frac{\text{Luas penampang basah}}{\text{Lebar muka air}}$$

Usaha-usaha untuk mentjegah terdjadinja gerusan pada belokan tunggal (nanja satu belokan sadja):

1. Djari2 belokan $> 6 \times$ lebar muka air ($R > 6B$)
2. Djari2 belokan $> 15 \times$ dalamnja air ($R > 15h$)
3. Perbesaran luas penampang lintang.
4. Perlindungan tebing-tebing (talud)



Untuk ini harus ditjari tempat jang tepat sesudah gerusan mulai terdjadi.

Tjontoh : Diredjatkan suatu saluran lebar dengan talud 1 : 2; dalam air 5 m, $I = 10^{-4}$. Sebagai bahan pelindung dasar dan tebing-tebing dipilih krikil kwart jang bulat dengan $d = 7$ mm.

Diminta : Untuk memeriksa apakah penampang tersebut stabil atau tidak.

Penjelesaian : Djika tidak diberitahukan apa-apa, saluran dianggap lurus dan air bersih. $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$.

Tegangan geser jang terdjadi :

- pada dasar : $\tau_o = \rho_w g h I = 1000 (9,8) \cdot (5) \cdot (10^{-4}) = 4,9 \text{ N/m}^2$

- pada tebing: $\tau_s = 0,76 \rho_w g h I = 0,76 \cdot 4,9 = 3,72 \text{ N/m}^2$.

Tegangan geser kritik :

- pada dasar : dari Shields (S - 3) untuk $d = 7$ mm

$$\tau_{o_c} = 0,055 (\rho_s - \rho_w) g d$$

$$= 0,055 (2650 - 1000) (9,8) (0,007) = 6,22 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_o < \tau_{o_c} \text{ ----- dasar stabil.}$$

- pada tebing: dari grafik S - 6 Fig. C

untuk $d = 7$ mm } sudut alam $\theta = 31^\circ$
krikil bulat }

dari grafik S - 6 Fig. B

untuk $\theta = 31^\circ$ } $k = 0,48 = \frac{\tau_{s_c}}{\tau_{o_c}}$
talud 2 : 1 }

$$\tau_{s_c} = 0,48 \tau_{o_c} = 0,48 \cdot 6,22 = 2,99 \text{ N/m}^2$$

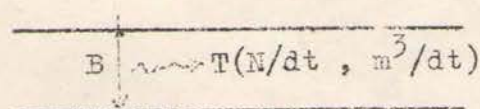
$$\tau_s > \tau_{s_c} \text{ -----> tebing tidak stabil.}$$

VII. PERHITUNGAN SEDIMEN TRANSPORT.

Intensitas angkutan sedimen total pada suatu penampang saluran/sungai adalah banjaknja sedimen jang lewat penampang tersebut persatuan waktu.

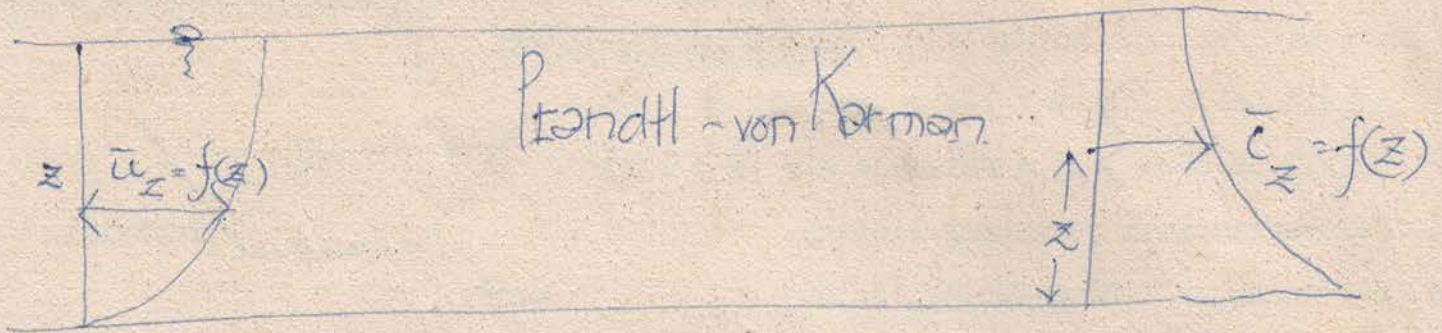
Intensitas angkutan dapat dinjatakan dalam berat atau volume persatuan waktu.

$$(\text{N/det} ; \text{m}^3/\text{det})$$



$$T_t = T_b + T_g$$

Rumus universal jang berlaku, baik buat suspended load maupun bed load tidak dapat diharapkan, karena mekanisme angkutan memang berlainan.-



$$\frac{q_b \left(\frac{p_s - p_w}{p_w} \right)}{q_I} = 10 \cdot \frac{\rho_w g h I}{(p_s - p_w) g d} \rightarrow q_b (c) (hI)^{2\frac{1}{2}}$$

$$q_b (c) \bar{u}^5$$

$$q_I = \bar{u} h I = (hI)^{3\frac{1}{2}}$$

Intensitas total dari pada angkutan (T) harus dianggap sebagai jumlah angkutan bed load (T_b) dan suspended load (T_s).

$$T = T_b + T_s$$

Bed-load

Suatu formulasi yang lengkap tentang gerak bed load harus mencakup semua variable dari pada pengaliran dan sedimen. Rumus-rumus umumnya tidaklah demikian.

- Parameter-parameter untuk pengaliran adalah : ρ_w, V, h, R, I , kekasaran dasar, intensitas turbulensi dll.

$$\bar{U}_z = f(z); \quad C_z = \psi(z)$$

- Parameter untuk bahan dasar adalah : ρ_s , ukuran karakteristik, pembagian ukuran, bentuk, sifat-sifat cohesive dan bentuk dasar (konfigurasi).

Sebagian besar rumus-rumus memakai parameter yang menentukan keadaan batas untuk mana tidak terjadi angkutan. Misalnja :

1. $\tau_o - \tau_c$ (tegangan geser kritik)
2. $Q_o - Q_c$ (debit kritik)
3. $U_o - U_c$ (ketjepatan kritik)

Rumus tertua tahun 1879 dari DU BOIS (Perantjis) :

$$q_b = C_s \cdot \tau_o (\tau_o - \tau_c)$$

= volume angkutan bed-load per satuan lebar per satuan waktu.

atau :

$$T_b = \rho_s \int q_b$$

$T_b = \text{berat}$

material

C_s = Coef. yang merupakan fungsi dari d (diameter)

τ_c = nilai τ pada mana $q_b = 0$.

Ringkasan dari pada besarnya C_s dan τ_c didasarkan pada pertjobaan banjak-penjelidik, telah diberikan oleh STRAUB (dalam bukunya Rouse: Engineering Hydraulic). Banjak rumus-rumus lain dari pada type DU BOIS telah diperkembangkan dengan memasukkan pengaruh kekasaran (roughness), kemiringan (I), debit, ukuran butiran, dalamnja air dan lain-lainnja.

Rumus homogeem yang berdimensi diusulkan oleh SHIELDS (1927) :

$$\frac{q_b \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)}{q \cdot I} = 10 \cdot \frac{\tau_o - \tau_c}{(\rho_s - \rho_w)^{0.5} d} \quad \text{dimana } \tau_c \text{ dari grafik Shields. (3)}$$

$q_b (:) (k I)^{2.5} \longrightarrow q_b - \text{bed load}$

$q (:) U^5 \longrightarrow q_b - \text{air}$

Praktis tidak ada rumus-rumus tersebut yang telah ditjek setjukupnja dengan keadaan dalam alam. Coefisien-coefisien dan nilai-nilai kritik telah diperoleh dari pertjobaan di laboratorium yang kadang-kadang ukurannya terlalu ke-

tjil, sehingga extra polasi kepada keadaan alam tidak selalu dapat dibenarkan. Batas-batas dimana pertjobaan-pertjobaan tersebut dilakukan pun sering kali terlalu terbat. Hingga pemakaiannya diluar batas-batas itu akan menghasilkan penjimpangan-penjimpangan jang berarti (djuga didalam pertjobaan-pertjobaan di laboratorium). Hingga kini rumus-rumus tersebut tidak berhasil melukiskan fenomena-fenomena fisik dari pada mekanisme pengangkutan bed-load. Hubungan-hubungan jang diperoleh setjara empiris tidak mentjakup semua variable jang mempengaruhi prosesnja. Selain dari pada itu evaluasi dari pada coeffisien tergantung kepada interpretasi pribadi.

Rumus MEYER-PETER dan MÜLLER (Zurich) - tahun 1934.

Pada mulanja rumus untuk menghitung bed-load (bahan agak kasar) diperoleh berdasarkan pertjobaan-pertjobaan dengan bahan butiran berukuran sama dan rapat massa $\rho_s = 2680 \text{ kg/m}^3$.

Hubungan berikut adalah jang paling sesuai :

$$\frac{q^{2/3} I}{d} = a + b \frac{T_b^{2/3}}{d}$$

q = debit air per satuan lebar dan per satuan waktu, jang menentukan bed load
 ($\frac{\text{kg (gaja)}}{\text{m} \cdot \text{det}}$)

T_b = berat dari bed load (diudara) tiap satuan lebar dan tiap satuan waktu.
 Djuga dipakai T_b' = berat dari bed-load (dalam air) tiap satuan lebar dan tiap satuan waktu ($\frac{\text{kg (gaja)}}{\text{m} \cdot \text{det}}$)

d = diameter butiran (m).

I = miringnja garis energi (tenaga).

a dan b = coeffisien.

Keadaan batas (kritik) untuk angkutan ($T_b = 0$) adalah :

$$\frac{q^{2/3} I}{d} = a = 17 \quad \text{dan} \quad b = 0,4$$

Djika berdasarkan T_b' : $a' = 17 \rightarrow b' = 0,55$

Dalam beberapa handbook rumus tersebut ditulis sebagai berikut :

$$T_b = (A \cdot q^{2/3} I - B \cdot d)^{3/2}$$

Penjelidikan lebih lanjut dilakukan dengan berbagai-bagai rapat-massa dan tjampuran sedimen dengan rapat massa $\rho_s = 2680 \text{ kg/m}^3$. Hasilnja ialah bahwa kehilangan tenaga total harus dianggap terdiri dari dua bagian, ialah :

1. Kehilangan tenaga akibat bentuk dasar.

2. Kehilangan tenaga akibat geseran dengan butiran-butiran didasar (partikel, grain roughness).

$$I \begin{cases} I' \\ I'' \end{cases}$$

$$\frac{I'}{I} = \left[\frac{k_s}{k_s'} \right]^{1/2 - 2} \quad (\text{mubanya pangkat dua} \rightarrow \text{teoritis})$$

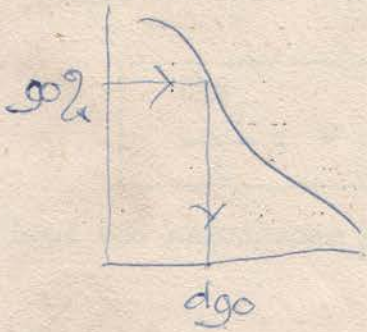
$$\text{menurut percobaan} \quad \frac{I'}{I} = \left[\frac{k_s}{k_s'} \right]^{1/2}$$

* Graf NHI p 139.

Hydraulic of sediment transport Mc Gravo Hill 1971.

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{R}{h} \rightarrow \text{dim kead normal} \quad \frac{Q_s}{Q} < 1$$

$$\frac{I'}{I} = \left(\frac{k_s}{k_s'} \right)^{1/2} = \mu = \left(\frac{c}{c_{dgo}} \right)^{3/2} \approx \left[\frac{18 \log \frac{12R}{k}}{18 \log \frac{12R}{d_{go}}} \right]^{3/2}$$



$$c = 18 \log \frac{12R}{k}$$

$k = d_{65} \rightarrow$ Einstein (Hp tak mutlak)

$$T_b = f(d_{65}) \propto$$

$$T_b = f(d_{25})$$

$$\mathcal{D}_w = \rho_w g$$

$$\mathcal{D}_s - \mathcal{D}_w = (\rho_s - \rho_w) g$$

$$\frac{\mathcal{D}_w}{g} = \rho_w$$

$$\rho_w g \cdot \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k_s'} \right)^{3/2} h I = 0,047 (\rho_s - \rho_w) g d_m + 0,25 (\rho_w)^{1/3} (T_b')^{2/3}$$

$$\text{vol} : \frac{T_b'}{(\rho_s - \rho_w)} \quad \frac{m^3}{m \text{ det}} \quad \text{hmsny} \quad (\mathcal{D}_s - \mathcal{D}_w)$$

$$\text{vol} : \frac{T_b'}{\mathcal{D}_s - \mathcal{D}_w} \quad \frac{m^3}{m \text{ det}} \quad \downarrow \quad \frac{N}{m \text{ det}} \quad \frac{I}{m \text{ det}}$$

Dianggap jang terahir jang lebih menentukan angkutan sedimen, sehingga harus di-introdukir didalam rumus angkutan, dengan rumus Strickler :

$$\bar{U} = k R^{2/3} I^{1/2}$$

Miringnja garis tenaga akibat geseran butiran I' (jang merupakan sebagian dari I total) dapat dinjatakan sebagai fungsi dari I total dengan memakai coeffisien geseran k', sehingga :

$$I' = \left(\frac{k}{k'} \right)^2 I \quad k - \text{Strickler}$$

Dalam rumus bed-load hubungan berikut adalah jang paling sesuai dengan per-tjobaan :

$$\gamma_w \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k'} \right)^{3/2} h I = 0,047 (\gamma_s - \gamma_w) d_m + 0,25 \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{1/3} (T_b')^{2/3}$$

hafal

Rumus ini aslinja untuk diameter kasar (coarse grain).

$\frac{\gamma_s}{Q}$ = faktor koreksi berhubung bentuk penampang sungai/saluran
= 1 (untuk sungai jang lebar) . = $\frac{B}{h}$

$\left(\frac{k}{k'} \right)^{3/2}$ = ripple factor (μ)

untuk dinding jang hydraulik kasar :

$$k' = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

dimana d_{90} = diameter dengan 90 % berat dari tjampuran jang lewat saringan.

d_m = diameter effectif = $d_{50} - d_{60}$ = d_{median}

~~Einstein~~ : $d_m = d_{65}$

Frylink : $d_m = d_{50}$

utk ujoran Meyer Peter

mis data
 $d_{35} =$
 $d_{53} =$
 $d_{70} =$
 $d_{50} =$

γ = berat djenis dalam t/m^3

$$\begin{aligned} \text{tjontoh : } \gamma_w &= \rho_w \cdot g = 1000 \cdot 9,8 \text{ N/m}^3 = 9800 \text{ N/m}^3 \\ &= \frac{9800}{9,8} \frac{\text{kg (air)}}{\text{m}^3} = 1 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

T_b' = berat butiran dalam air tiap satuan lebar dan satuan waktu = $\frac{t}{m \cdot \text{det}}$

volumenja : $v = \frac{T_b'}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{m^3}{m \text{ det}}$

Bila dasarnja rata, maka $\frac{k}{k'} = 1 \rightarrow \mu = 1$.

$\mu \neq \frac{k_s}{k'_s}$

Pada keadaan kritik $T_b' = 0$, rumus Meyer Peter dan Waller mandjadi :

$$\frac{\gamma_w \cdot h \cdot I}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = 0,047$$

B = ∞

dasar rata $\frac{k}{k'} = 1$

Rumus tersebut mirip dengan persamaan Shields untuk permulaan gerak.

Utk sungai $B \gg h$

$$\frac{Q_s}{Q} = 1$$

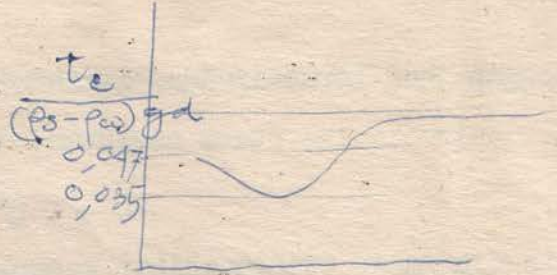
plain bed $k = 1$



$$T_b = 0$$

di rumus yg panjang
didapat

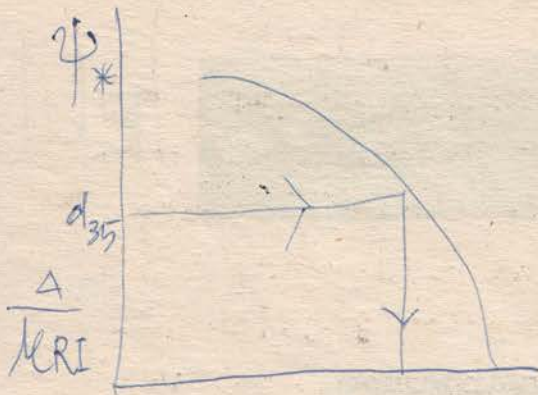
$$\frac{t_e}{(\rho_s - \rho_w) g d} = 0,047$$



$$F(\varphi, \psi) = 0$$

Einstein's non dimensional.

$\varphi - \psi$ function



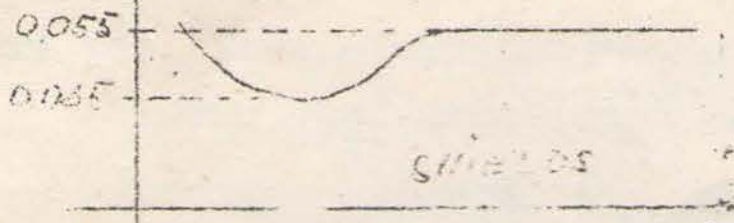
parameter intensitas aliran
rumus ini dipakai d_{35}

$$T_b = \text{bnt diudara } N/m^2$$

$$vol = \frac{T_b}{\rho_s g} \text{ m}^3/m^2$$

$$= \frac{T_b}{\rho_s d_{35} g} (\Delta g d_{35})^{-1/2}$$

$$N = \left(\frac{c}{\rho d g} \right)^{3/2}$$



Perbandingan $\frac{k}{k'}$ berkurang dengan berubahnya bentuk dasar. Ini berarti bahwa angkutan sedimen djuga berkurang jika dasarnya bergelombang.

Umumnya $\frac{k}{k'} = 1,00 - 0,75$, tetapi pernah djuga disyarat $\frac{k}{k'} = 0,50$.

E I N S T E I N

penggunaannya

Konsepnya sangat complex, tetapi tjara ~~penelitian~~ *penggunaannya* adalah sangat mudah dengan adanya grafik-grafik jang beliau sadjikan.

Einstein menetapkan persamaan bed-load sebagai "persamaan jang menghubungkan gerak bahan dasar dengan pengaliran setempat (local flow)". Persamaan itu melukiskan keadaan kesetimbangan dari pada pertukaran butiran dasar antara lapisan dasar (bed-layer) dan dasarnya (pengendapan harus sama dengan gerusan).

Intensitas erosi diambil sebanding dengan djumlah butiran jang bebas (tidak terpendam) dipemukakan dasar tiap satuan luas dan sebanding dengan kemungkinan (probability) butiran itu untuk terangkut setiap detiknya. Kemungkinan pertukaran probability adalah dasar dari pada approach intensitas angkutan dan didefinisikan sebagai berikut :

Bagian dari waktu total selama waktu mana di tiap-tiap tempat kondisi2 pengaliran setempat menjabahkan gaya angkat jang tjakup besar terhadap butiran gma mengangkatja.

Menurut beliau p diperoleh dari perkalian banjaknja pertukaran tiap detik dan waktu jang dibutuhkan untuk tiap pertukaran. Waktu pertukaran dianggap sebanding dengan waktu jang diperlukan oleh sebuah butiran untuk mengendap dalam air se-djauh diameternja $(\frac{d}{w})$. *waktu → dg demikian utk pertama kali approach statistik digunakan dlm rumus bed load*

Lintasan rata-rata dari pada butiran dijatakan = 100 x diameter butiran, dan tidak dipengaruhi oleh kondisi pengaliran, intensitas angkutan dan konfigurasi dasar. Hubungan antara kemungkinan suatu butiran akan terangkut dan intensitas angkutan bed-load telah didjabarkan dalam bentuk sebagai berikut :

$$\frac{p}{1-p} = A_* \phi_*$$

$A_* =$ koefisien.

$$\phi_* = \frac{T_b}{\rho_s g} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{gd^3} \right)^{1/2}$$

HIAHAI

dimana $\phi_* = \phi$ untuk butiran dengan d tertentu
 = intensitas angkutan bed-load

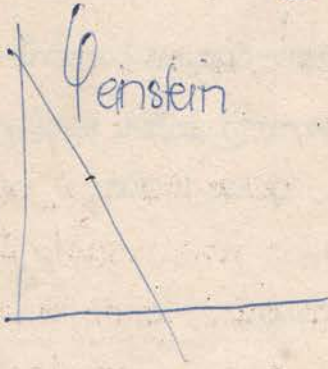
$T_b =$ intensitas angkutan bed-load dijatakan sebagai berat sedimen

tiap satuan lebar dan tiap satuan waktu $(\frac{N}{m \text{ sec}})$

Kemungkinan p serupa dengan kemungkinan gaya angkat dinamik (dynamic lift force) jang bekerja pada butiran untuk melampaui berat butiran dalam fluida.

utk rumus Frijlink

$\rightarrow S_{90}$



$\rightarrow d_{35}$ diganti d_{50}

utk ordinat Frijlink

T_b diganti

$$T_b = \dots \frac{m^3}{m \cdot det} -$$

(volum).

Dari pertjobaan - pertjobaan telah diperoleh hasil - hasil umum, misalnja :

- letak ketjepatan jang menentukan (dihitung dari dasar)
- faktor - faktor koreksi untuk dinding - dinding kasar, litjin dsb.

Gaja angkat dinjatakan sebagai fungsi jang mengandung parameter jang berubah dengan waktu (η) dengan standard deviasi η_0 . Dengan memakai hukum Gauss kemungkinan probability untuk gerak butiran dapat ditulis sebagai integral kemungkinan (integral probability) dengan batas - batas integrasi : $\pm B * \psi * - \frac{1}{\eta_0}$,

jang mengandung angka tak berdimensi $\psi *$.

$$\psi_* = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{d}{R' I}$$

$$R' = \mu R$$

ψ_* = intensitas pengaliran.

R' = radius hydraulik berhubungan dengan kekasaran butiran

μ = ripple factor

Untuk dasar dengan butiran sama: $\phi_* = \phi$ dan $\psi_* = \psi$

Konstante - konstante A_* dan B_* telah ditetapkan.

Dengan mengambil $\frac{1}{\eta_0} = 2$ hubungan: $\phi_* = f(\psi_*) \longrightarrow S - 7$.

Pengetjekan dalam laboratorium memuaskan.

→ dipaken Sg
FRIJLINK O.B.E. (1952)

Setelah perbandingan kedua rumus terdahulu ditambah djuga dengan rumus KALINSKE dan pengetjekanja dengan pertjobaan - pertjobaan di prototype (alam), perhatian khusus diberikan kepada pengaruh konfigurasi dasar sungai terhadap intensitas angkutan seperti telah disadari pula oleh M. P dan M; dengan memakai reduksi kemiringan garis tenaga (I') dan oleh Einstein dengan memakai reduksi radius hydraulik (R'). Perbandingan $\frac{I'}{I}$ dan $\frac{R'}{R} =$ = ripple factor.

Berdasarkan rumus logaritmikis untuk dinding jang hydraulik kasar :

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{d_{90}}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{18 \log \frac{12 R}{k}}{18 \log \frac{12 R}{d_{90}}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

C = C Chezy sesungguhnya (termasuk grain + shape roughness)

$C_{d_{90}}$ = C Chezy karena grain roughness sadja dengan flat bottom d_{90}

Untuk flat bottom ; $\mu = 1^{\frac{3}{2}} = 1$ ($k' = d =$ dasar rata), Frijlink mengusulkan persamaan bed - loadnja sebagai berikut :

$$\frac{T_b}{d_m \sqrt{g \mu R I}} = 5 e^{-0,27} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{d_m}{\mu R I}$$

$$\longrightarrow S - 9$$

$$T_b = \left(\frac{m^3}{m \cdot det} \right)$$

jadi dalam volume

$Q \text{ m}^3/\text{det}$

$I_b \text{ (m}^3/\text{det)}$
 $Q \text{ m}^3/\text{det}$

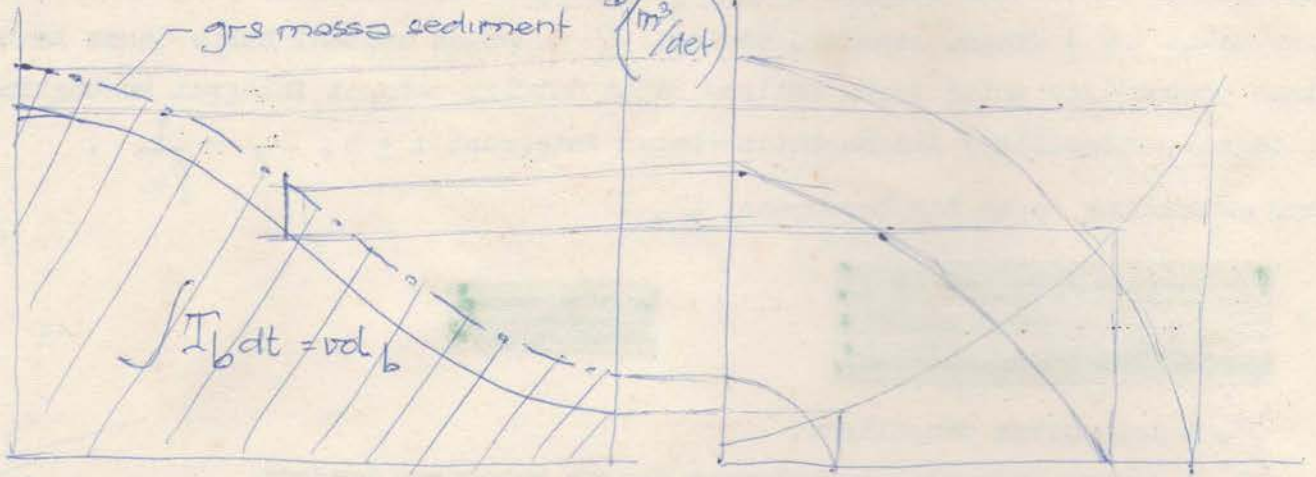
grs massa sediment

$$\int I_b dt = \text{vol}_b$$

1hr

365hr

$I_b \text{ m}^3/\text{det}$



Nilai-nilai ripple factor (μ) yang diperoleh dalam maupun dalam saluran-saluran di laboratorium diperlihatkan dalam grafik S - 10.

Persamaan bed-load dari Frijlink dapat dituliskan sebagai berikut :

$$X = 5 Y^{-\frac{1}{2}} e^{-0,27 Y}$$

$$X = \frac{T_b}{d_m^{3/2} \sqrt{g \Delta}} = \text{parameter bed-load.} \quad \rightarrow d_{50}$$

$$Y = \frac{\Delta d}{\mu R I} = \text{parameter pengaliran.} \quad \rightarrow d_{50}$$

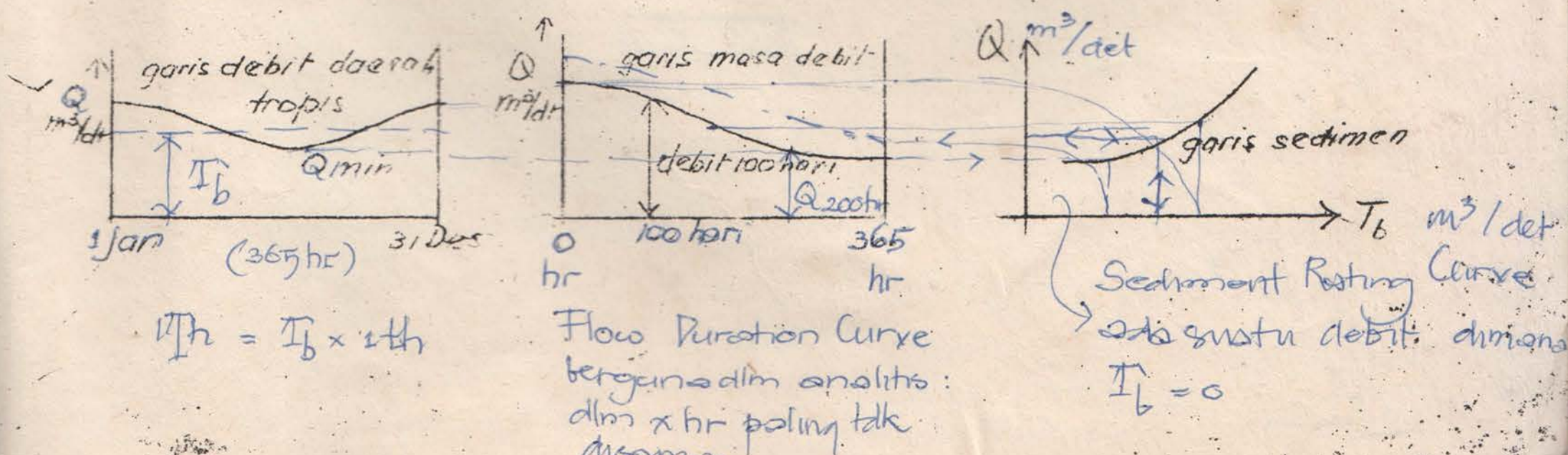
$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = \text{apparent relative density}$$

$$T_b = \frac{m^3}{m \cdot det} \quad m^3 / m \cdot det \quad !!!$$

Perbandingan antara persamaan-persamaan bed-load dari M. P dan M, Kalinske, Einstein dan Frijlink, telah diberikan dalam bentuk grafik — lihat S - 8, dimana T_b dinjatakan dalam volume tiap satuan lebar tiap satuan waktu. (S - 8 djangan dipakai, pakai sadja S - 9)

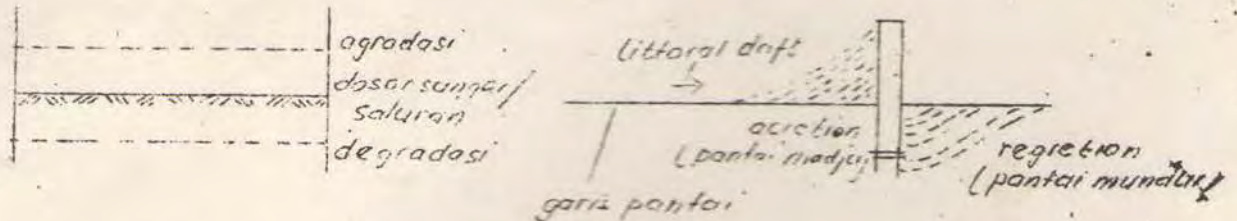
Angkutan sedimen jangka panjang di suatu sungai

Persamaan-persamaan tersebut diatas hanya berlaku pada kondisi-kondisi permanen. Di sungai-sungai sebetulnja terdapat fluktuasi musim dan bed-load total adalah integrasi dari angkutan sedimen sepanjang waktu tertentu. Approach terbaik guna meramalkan intensitas angkutan adalah dengan mempergunakan analisa statistik dari pada data pengaliran. Untuk itu diandjurkan memakai garis masa debit (flow duration curve) yang djika dikombinasikan dengan garis sedimen (ialah garis yang menghubungkan debit dan angkutan sedimen pada kondisi-kondisi permanen) akan diperoleh djumlah sedimen yang diangkut seluruhnja. Djika mungkin supaya dikoreksi berhubung dengan pengaruh-pengaruh musim. Umumnja sebagian besar sedimen yang diangkut sungai, diangkut oleh debit yang melebihi debit median. (debit median = median discharge = Q_m). Dalam hal tersebut diperlukan approach yang teliti dan pentjatatan-pentjataan harus meliputi djangka waktu yang lama. Harus diakui bahwa pengalaman dalam hal tersebut masih kurang.



Degradasi *Agradasi*
VIII. GERUSAN (SCOUR) DAN ENDAPAN (SILTING)

Dalam efek keseluruhannya mungkin terdjadi gerusan ataupun endapan. Yang dimaksud dalam hal ini ialah : "degradasi" dan "agradasi" untuk sungai atau saluran - saluran atau "regressi" dan "akressi" untuk pantai.



Fenomena lain adalah gerusan dan endapan setjara timbal balik.

Gerusan (erosi) disuatu tempat akan mengakibatkan endapan (deposisi) dilain tempat. Fenomena ini mungkin merupakan sebagian dari pada proses pengangkutan sedimen yang setjara keseluruhannya telah mentjapai status keseimbangan. Misalaja sungai - sungai yang bermeander (belok - belok) atau sungai yang dipengaruhi pasang surut. Bila keadaan seimbang dalam alam diganggu dapat diharapkan (bila tidak diambil tindakan - tindakan sewadjaranja) bahwa situasi akan berubah. Ditinjau dari sudut ini setiap perubahan buatan pada sungai memerlukan perentjanaan yang teliti untuk memperoleh penjelesaian yang memuaskan, yang berupa keadaan seimbang djua.

Persoalan - persoalan lain adalah gerusan - gerusan setempat dalam tanah - tanah alluvial disebabkan karena pemusatan tenaga oleh bangunan - bangunan buatan (local scour). Endapan setempat (sedimentasi) disebabkan karena pengurangan ketjepatan air (reservoir) dan endapan sedimen yang disengedja (kolam pengendapan) untuk mentjegah penasukan sedimen kedalam saluran pengaliran, pipa - pipa pesat (pen - stock) dan lain - lainnja. Semua persoalan tersebut hanya dapat dipetjabkan setjara memuaskan dengan pengetahuan dasar setjukupnja tentang pengangkutan sedimen. Adalah sulit untuk mengetahui dengan tepat perubahan hubungan timbal balik antara aliran dan dasar selama perubahan lambat laun dari pada dasar sungai. Dan lebih sulit lagi bila ditinjau setjara 3 dimensional.

Karena sebab - sebab tersebut diatas, penelitian model dalam laboratorium hidrolika akan merupakan alat yang ampuh untuk memetjabkan persoalan - persoalan tersebut diatas.