

ANALISIS DEFORMASI

BANDUNG

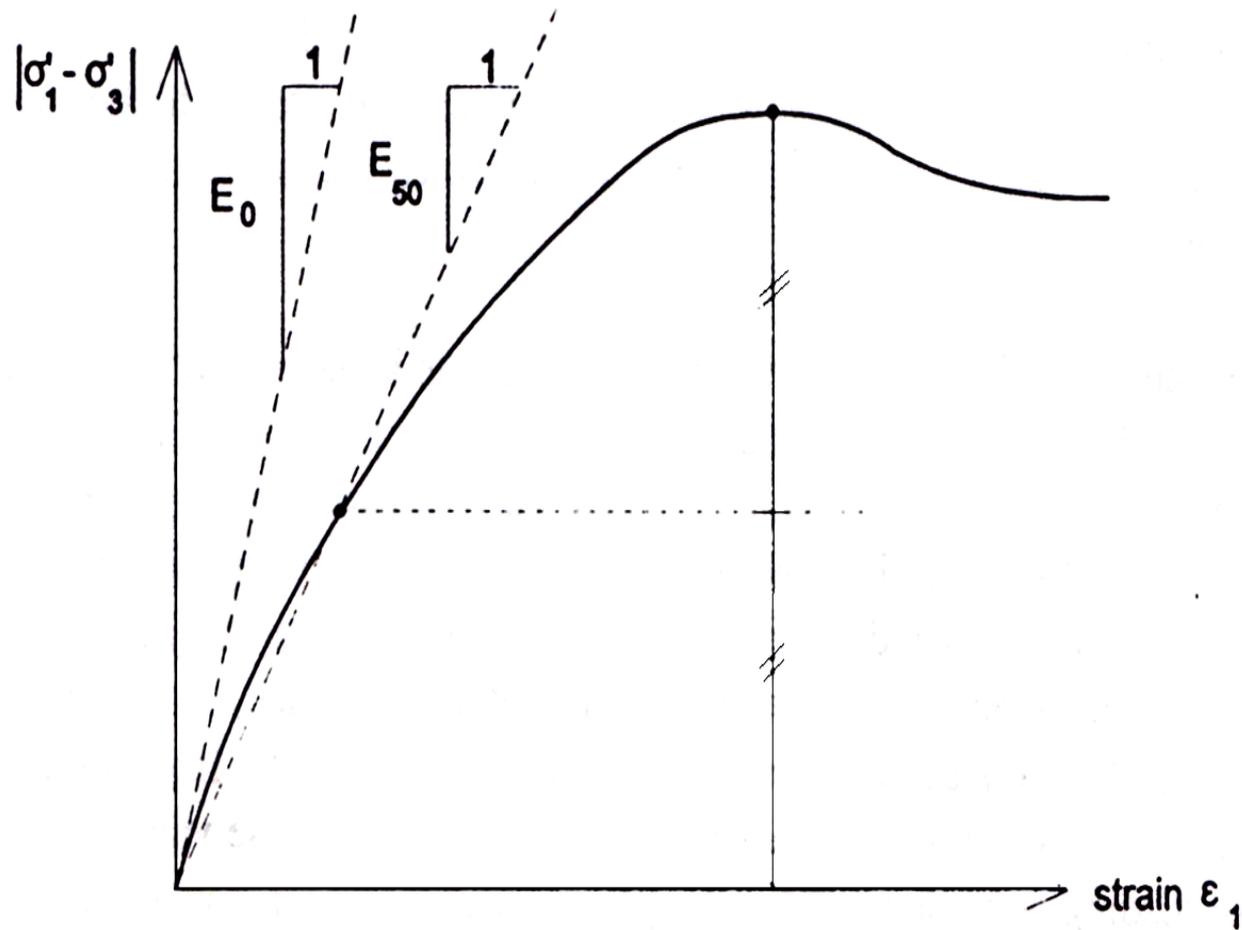
JULI 2019



Parameter Tanah Desain

- Berat isi jenuh dan tak jenuh; Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) digunakan untuk semua material **di atas garis freatik** dan berat isi jenuh (γ_{sat}) digunakan untuk semua material **di bawah garis freatik**.
- Permeabilitas, Parameter permeabilitas yang diperlukan adalah koefisien permeabilitas arah vertikal dan horisontal, terutama pada lapisan tanah yang berlapis-lapis dan yang mengandung gambut (*peat*).
- Angka pori, e , adalah berhubungan dengan porositas, n , yakni $e = n/(1-n)$.
- Modulus Young (E) digunakan sebagai modulus kekakuan dasar pada model elastis dan model *Mohr-Coulomb*. Penentuan modulus Young ini memerlukan perhatian khusus, karena kebanyakan geomaterial menunjukkan perilaku yang non-linier mulai saat pembebanan dilakukan.
- Dari persamaan $\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\nu}{1-\nu}$ dari pengujian kompresi 1-D, dapat dipilih angka Poisson yang sesuai dengan K_0 . Nilai K_0 tergantung dari riwayat pembebanan tanah. Biasanya, nilai diambil antara 0,3 – 0,4.

Penentuan E_0 dan E_{50}



Kuat Geser

Perhitungan kuat geser material di sepanjang permukaan yang berpotensi runtuh, dilakukan berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan konsep tegangan efektif, maka kuat geser “S” (pada saat runtuh) dapat dirumuskan sebagai berikut:

- $$S' = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

dengan:

- c' : kohesi efektif (t/m²);
- ϕ' : sudut geser dalam efektif (derajat);
- u : tekanan air pori pada bidang runtuh selama pembebanan, pada saat runtuh (t/m²);
- σ : tegangan normal total pada bidang runtuh selama pembebanan pada saat runtuh (t/m²);

DEFORMASI VERTIKAL/PENURUNAN

Penyebab dan Faktor Kontrol Deformasi

- o Deformasi suatu timbunan terjadi sebagai akibat dari terjadinya perubahan volume, pergerakan lateral, atau perpindahan geser di dalam material timbunan dan fondasi.
- o Perubahan volumetrik diakibatkan oleh peningkatan tegangan-tegangan normal pada suatu elemen tanah menyebabkan terjadinya pengurangan dalam volume pori-pori.
- o Pergerakan lateral juga diakibatkan oleh adanya distorsi atau keruntuhan geser yang terlokalisir sesuai dengan kondisi-kondisi tegangan yang dipengaruhi oleh pelaksanaan penimbunan dan operasi waduk.
- o Kecepatan terjadinya deformasi tergantung pada laju disipasi tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressures*) dan laju terbentuknya kondisi aliran langgeng (*steady seepage*).
- o Sifat dan properti material yang mengontrol deformasi adalah gradasi, mineralogi, bentuk partikel, kadar air dan kepadatan.
- o Kondisi pembebanan air waduk yang mempengaruhi terjadinya deformasi adalah :
 - Pengisian pertama
 - Siklus operasi
 - Penurunan air waduk secara cepat.

Teori Biot-Terzaghi

- Parameter untuk dalam perhitungan konsolidasi 1-D adalah
- Modulus Young, E (kN/m²)
- Angka poisson, ν
- Berat satuan air, γ_w (biasanya diambil 10 kN/m³)
- Koefisien permeabilitas, k (meter/hari).

- $T = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$

dimana $c_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w (1 - \nu) E}$

dan $E_{oed} = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu) E}{(1 - \nu)}$

T = faktor waktu

c_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (m²/hari)

t = waktu konsolidasi (hari)

H = tebal lapisan tanah yang mengalami konsolidasi (m) γ_w = berat satuan air

k = koefisien permeabilitas (m/hari)

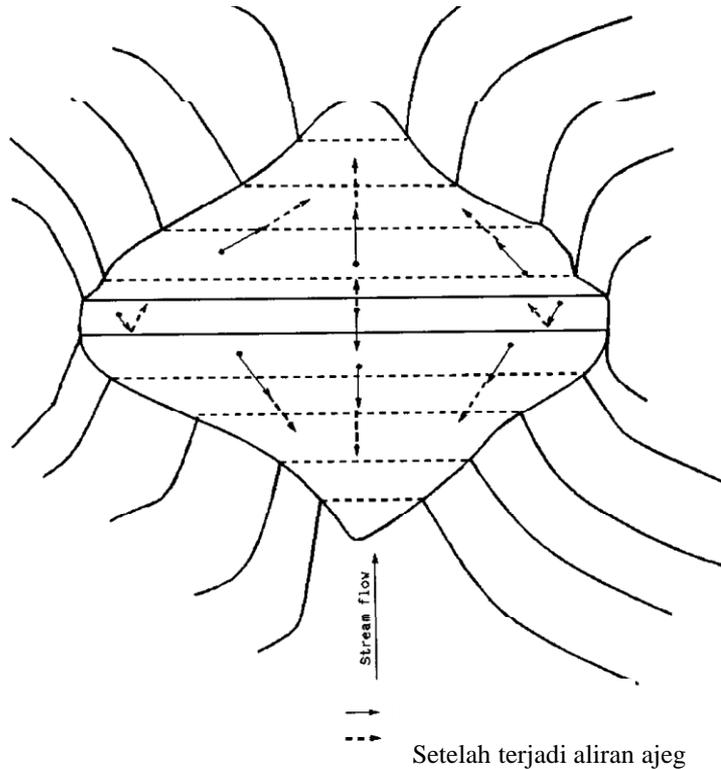
E_{oed} = modulus Oedometer

E = modulus Young (kN/m²)

ν = angka Poisson

γ_w = berat satuan air

Pola Deformasi



- Puncak bendungan bergerak ke arah hulu saat pengisian pertama dan ke arah hilir saat air mulai melakukan penetrasi ke dalam bendungan.
- Pergerakan permukaan ke dua tumpuan merupakan komponen pergerakan horizontal ke arah lembah terdalam

Pergerakan/penurunan bendungan urugan

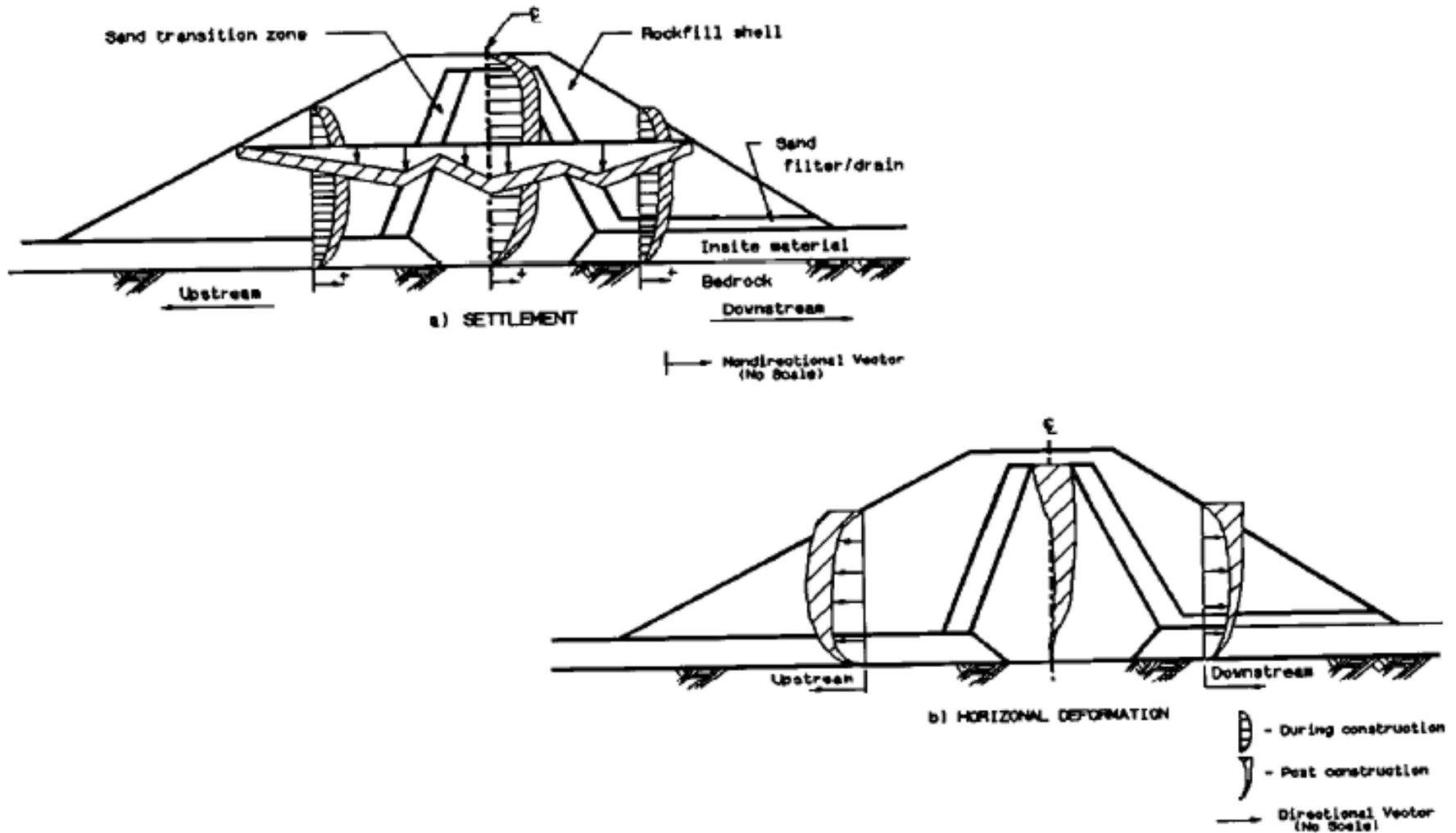
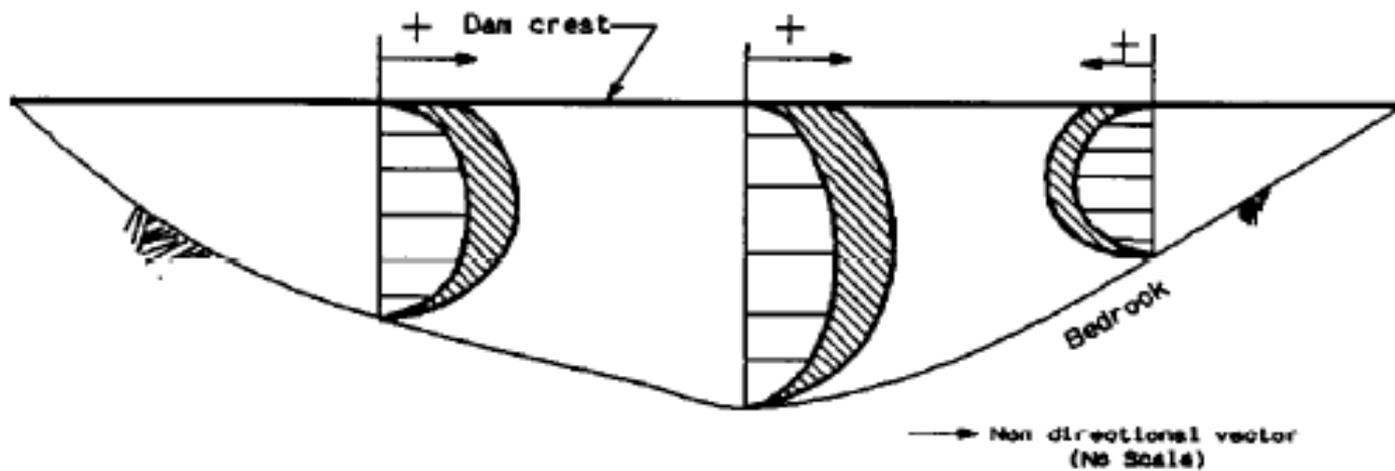
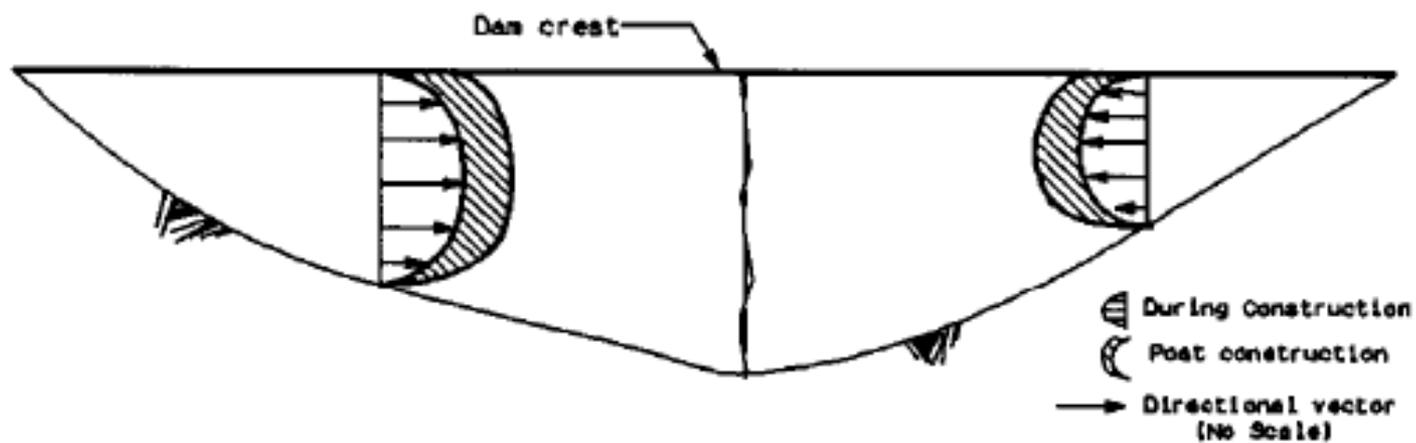


Figure 2. - Generalized Pattern of Movements Along Maximum Section of an Embankment Dam



a) SETTLEMENT



b) HORIZONTAL DEFORMATIONS

Estimasi Pergerakan/Deformasi

- Desain tinggi ekstra puncak (*camber*) hanya diperlukan untuk memperkirakan penurunan vertikal puncak bendungan.
- Berdasarkan data instrumentasi menunjukkan bahwa penurunan **puncak pasca konstruksi** pada umumnya sebesar 0.2 – 0,5 % dari tinggi bendungan. Berdasarkan pengamatan tersebut, dengan menggunakan rumus “*rule of thumb*”, tinggi *camber* secara konservatif didesain sebesar 1% tinggi timbunan (untuk bendungan tinggi < 60 m dengan tingkat resiko rendah).
- Untuk bendungan dengan tingkat resiko sedang-tinggi atau tinggi bendungan > 60 m, aturan jempol 1% tersebut dianggap tidak cukup dan memerlukan analisis yang lebih memadai, misalnya dengan analisis elemen hingga (FEM), karena perbedaan penurunan yang berlebih dapat menimbulkan terjadinya retakan atau rekah hidraulik.

Pembatasan Deformasi

Ada lima cara untuk membatasi deformasi timbunan, yakni :

- Lapisan fondasi yang lunak dibuang seluruhnya dan diganti dengan material yang baik.
- Hindari penggunaan material lunak untuk timbunan.
- Melakukan perbaikan tanah terhadap material fondasi yang lunak.
- Material lunak ditahan dengan "*buttress*".
- Perkuatan tanah lunak (*soil reinforcement*).

- Material fondasi lunak dapat diperkuat dengan menggunakan material geosintetik pada permukaan fondasi. Cara perkuatan ini disarankan untuk bendungan yang rendah dan tidak disarankan untuk bendungan tinggi.
- Pelandaian lereng mungkin akan lebih murah dibandingkan dengan mendatangkan material yang lebih baik yang jaraknya jauh. Deformasi fondasi lapisan lunak dapat dikontrol dengan cara *preloading* dan konstruksi bertahap.
- Pada kasus dimana deformasi akan menyebabkan terjadinya retakan pada zona inti kedap air, perlu dilakukan kajian thd potensi retakan saat tahap desain, misalnya dengan memperlebar inti, menggunakan lempung dengan plastisitas indeks tinggi, memperlebar filter hilir dan zona drainase, membuat "*crack stopper*" di bagian hulu, dll.

Konsep dasar penurunan

- Jika suatu massa lapisan tanah mengalami tambahan beban di atasnya (seperti bangunan gedung, beban jalan, bendungan dan bangunan air lainnya), maka air pori akan mengalir dari lapisan tersebut dan isinya menjadi lebih kecil karena terjadi pemampatan pada massa tanah tersebut (biasanya disebut proses konsolidasi).
- Pada proses pemadatan tanah umumnya udaralah yang keluar dan terjadi penyusunan partikel-partikel padat. Tanah berbutir kasar umumnya dapat menjadi padat dalam waktu yang relatif singkat karena sifat permeabilitasnya tinggi dan udara dalam butir tanah yang mudah keluar dari pori-pori.

Perbedaan antara pemadatan dan konsolidasi

Pemadatan tanah	Konsolidasi
1. Pemampatan terjadi karena keluarnya udara dari pori ² .	Pemampatan terjadi karena keluarnya air dan udara dari pori ² .
2. Membutuhkan wkt singkat.	Membutuhkan waktu yg lama.
3. Terjadi akibat beban yg bekerja dlm waktu singkat.	Terjadi akibat beban yg bekerja terus menerus dlm waktu lama.

Teori Konsolidasi

Proses Konsolidasi

- Pada awalnya, beban yang bekerja akan diterima oleh air yang ada di dalam pori-pori, shg. tekanan air pori berlebih awal (*initial excess pore pressure*) sama dengan tekanan konsolidasinya. Dengan berjalannya waktu, tekanan pori berlebih akan berkurang, dan tekanan efektif rata-rata yang terkait akan meningkat.
- Pada waktu yang lama tekanan pori berlebih akan kembali ke tekanan pori awal dan tekanan konsolidasi menjadi tekanan efektif yang ditransfer dari butiran ke butiran tanah.

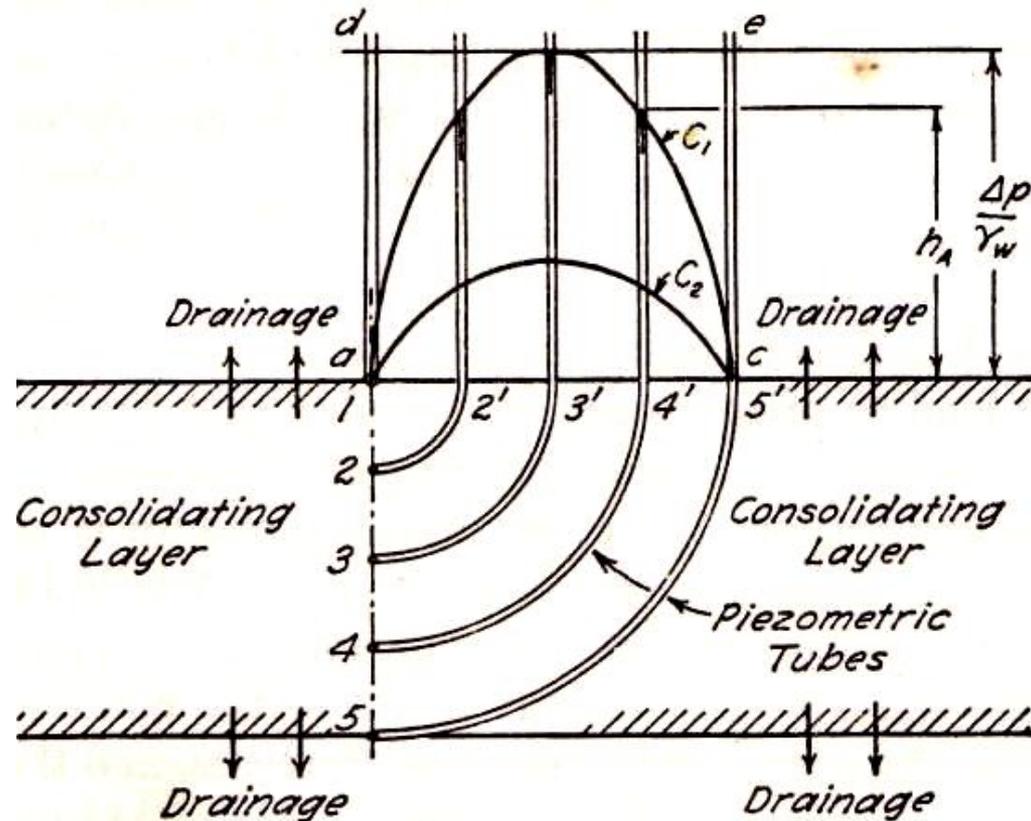
Asumsi yang digunakan dalam teori konsolidasi ini adalah :

- Lapisan tanah yang terkonsolidasi adalah horisontal, homogen dan tebalnya seragam,
- Tanah dalam kondisi jenuh sempurna,
- Butiran tanah dan air bersifat tidak termampatkan,
- Mengikuti hukum Darcy,
- Koefisien permeabilitas konstan pada setiap pembebanan,
- Air hanya terdrainasi dalam arah vertikal, drainasi dan kompresi terjadi pada satu dimensi,
- Tekanan air pori awal akibat beban juga seragam pada seluruh tebal lapisan,
- Lama waktu konsolidasi proporsional dengan permeabilitas tanah,
- Bagian atas dan bawah lapisan tanah bersifat porous, sehingga air mudah terdrainasi.

Progres Konsolidasi

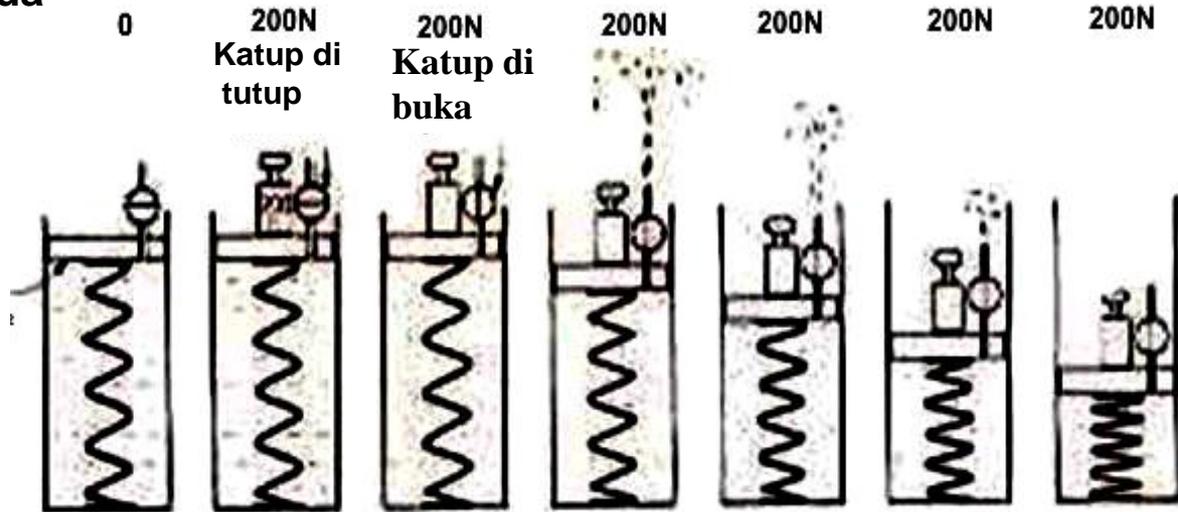
Keluarnya air di dalam pori-pori tanah mengalir vertikal ke bagian atas dan bawah lapisan. Beban atau tekanan konsolidasi Δp yang bekerja diasumsikan tidak berubah/tetap dari atas ke dasar lapisan.

Bila pipa-pipa tegak dg. jarak horisontal 1-2', 1-3' dst sama dengan jarak vertikal 1-2, 1-3 dst, kurva yang ditarik dari muka air di dlm pipa disebut sebagai **isokron** (*isochrone*).



Beban pada piston

Luas mm²



Beban (N) yang dipikul oleh air

0 200 200 150 100 50 0

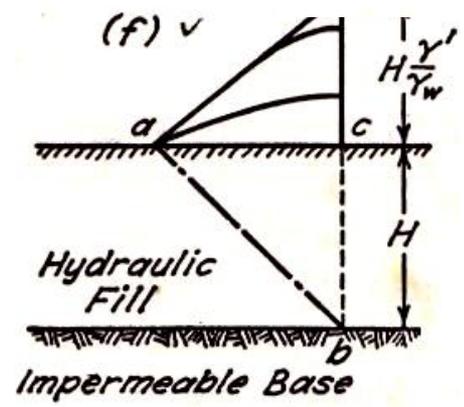
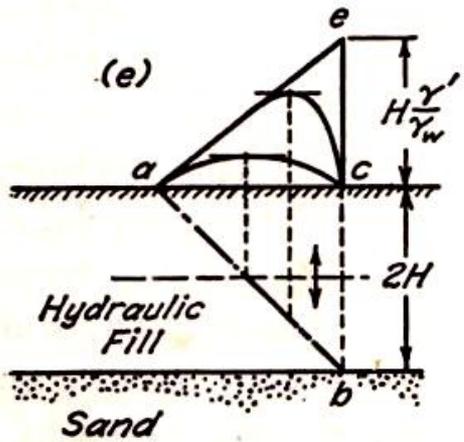
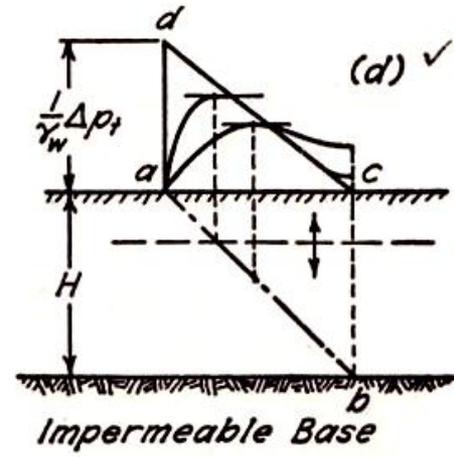
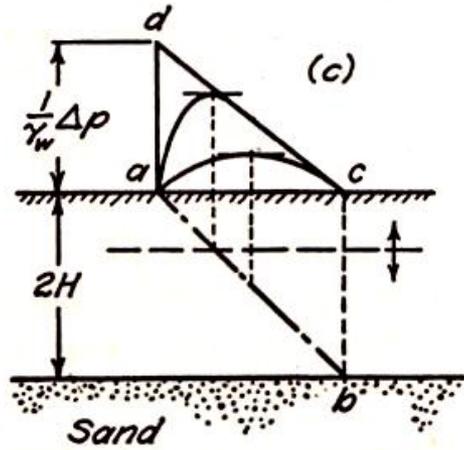
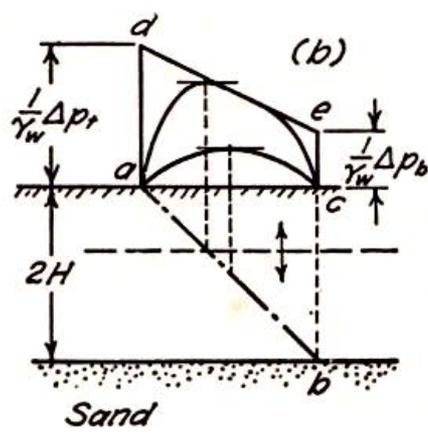
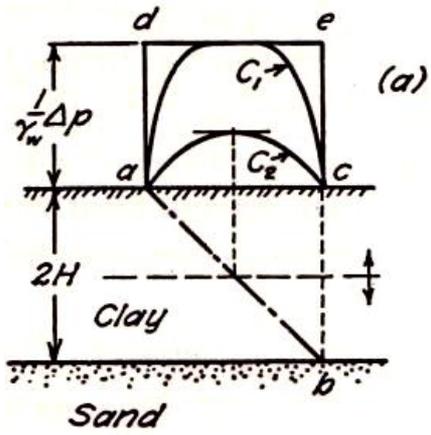
Beban (N) yang dipikul oleh butiran tanah

0 0 0 50 100 150 200

0% 0% 0% 25% 50% 75% 100%

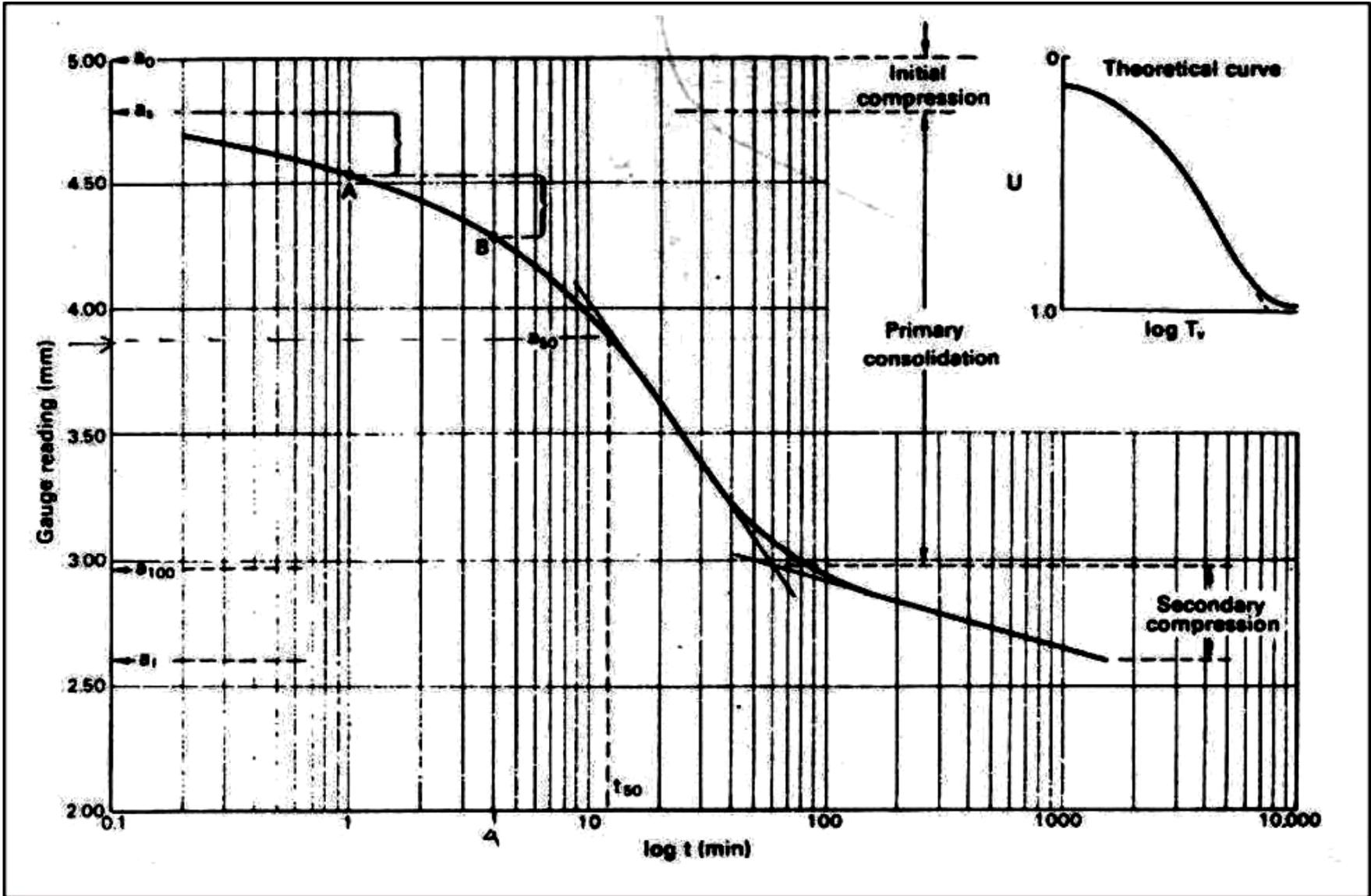
Derajat konsolidasi

(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)



Isokrone berbagai aliran drainase double dan single

After Terzaghi and Frölich



Pengujian di laboratorium

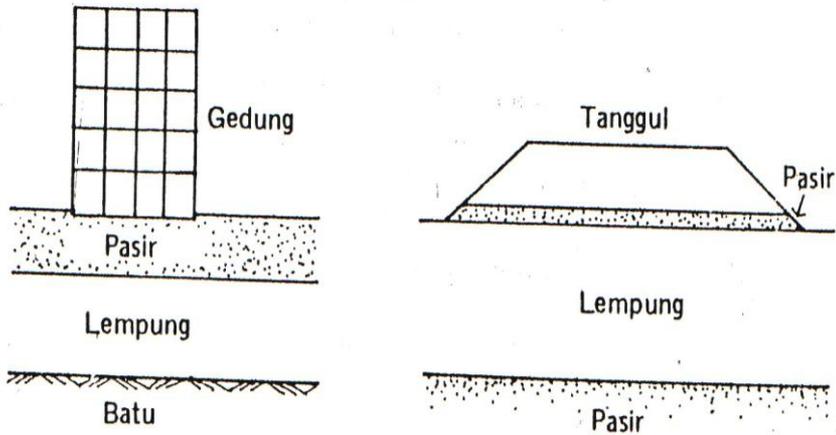
- Tujuan uji konsolidasi satu dimensi adalah untuk menentukan sifat-sifat tegangan prakonsolidasi, karakteristik tekanan, rayapan, kekakuan, dan laju aliran dari tanah akibat pembebanan.
- Pada awalnya, beban tambahan ditahan dan dilakukan pada fase cair tanah, yang berkembang menjadi tekanan air pori berlebih (Δu) dalam pori tanah.
- Bergantung pada kelulusan air dan ketersediaan lapisan drainase berkaitan dengan tanah, air dalam pori mulai berdrainase dan terus sampai Δu terdisipasi.

Percobaan Konsolidasi

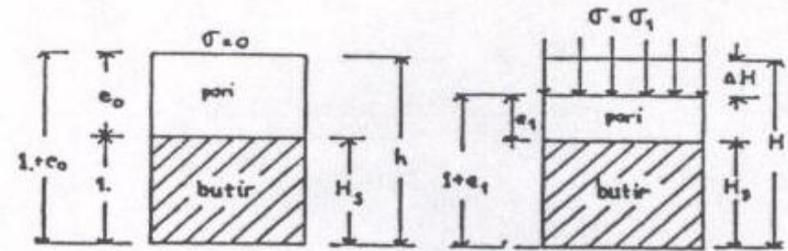
- **Pemampatan (kompresibilitas)**

- Pemampatan tanah adalah perubahan volume yg terjadi ketika tanah diberi beban.
- Tanah berbutir halus lebih mudah mengalami penurunan.
- Tanah berbutir kasar tidak dpt termampatkan pd beban statis, tetapi akan turun (*settle*) akibat goncangan/ getaran.

Percobaan Konsolidasi

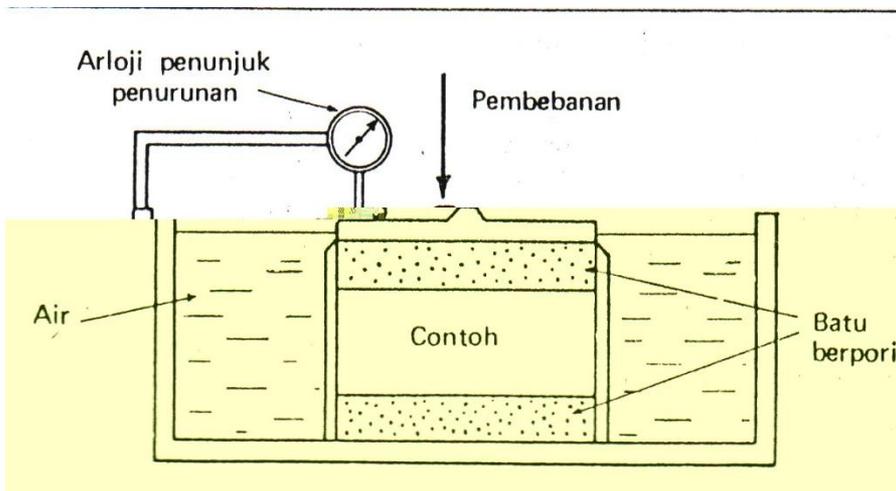


Gbr 1 Konsolidasi satu dimensi

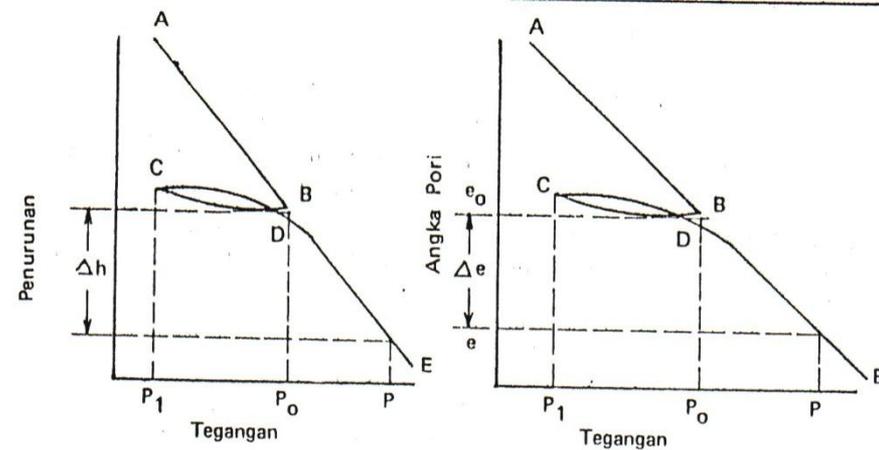


H = tinggi sample semula.
 H_s = tinggi solid.

Gbr 4.4 Model benda uji dlm alat Oedometer



Gbr 2 Pengujian konsolidasi



Gbr 3 Pengujian konsolidasi pada contoh terganggu

Perhitungan penurunan

- Umum
- Penurunan
- Rumus-rumus perhitungan
- Jenis penurunan
- Penurunan primer
- Kecepatan penurunan primer
- Penurunan sekunder
- Korelasi empiris

Lanjutan

Secara umum rumus penurunan adalah :

- $S_t = s_i + s_c + s_s$

- Dimana :

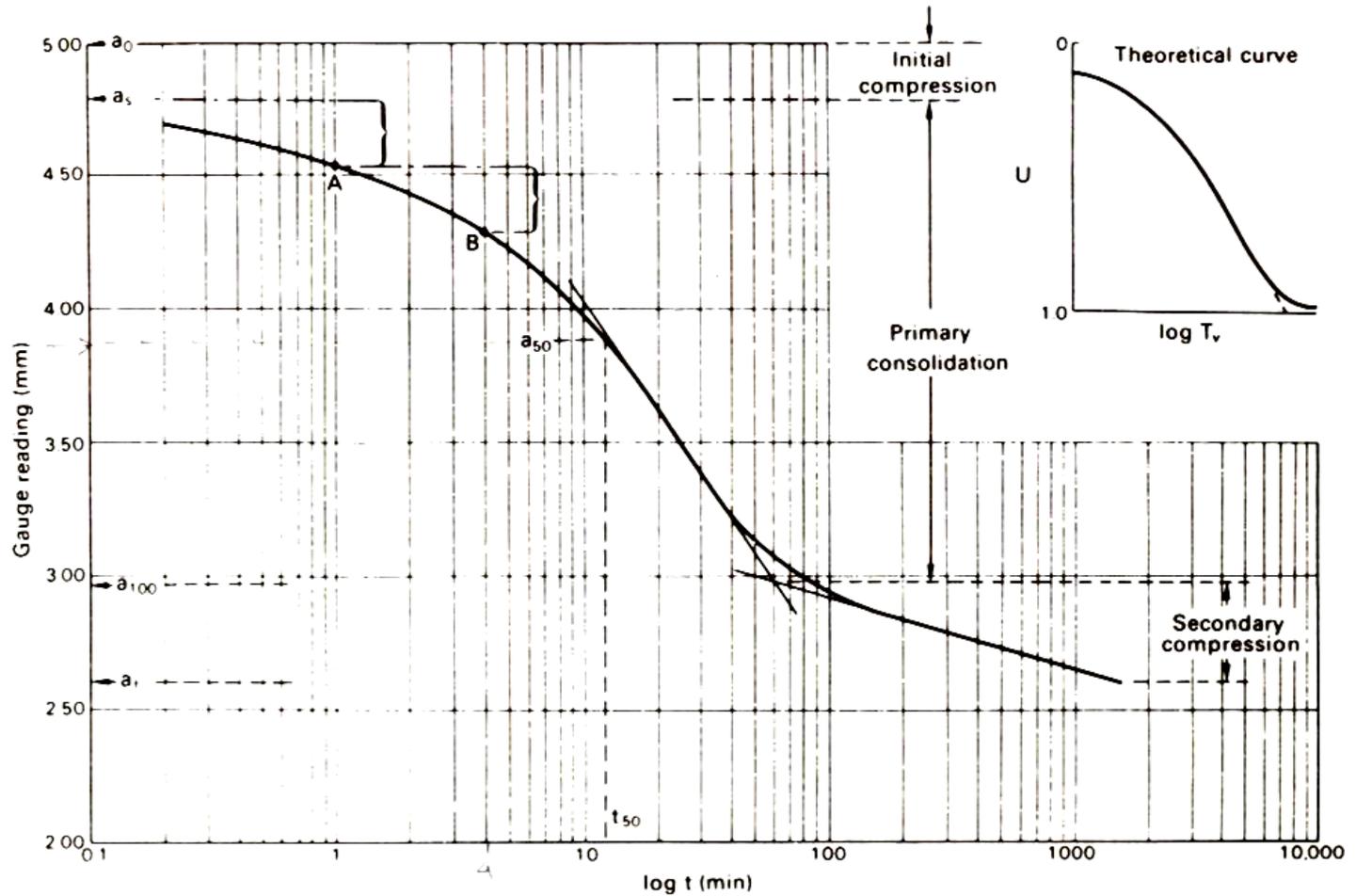
S_t : penurunan total

s_i : penurunan *immediate*

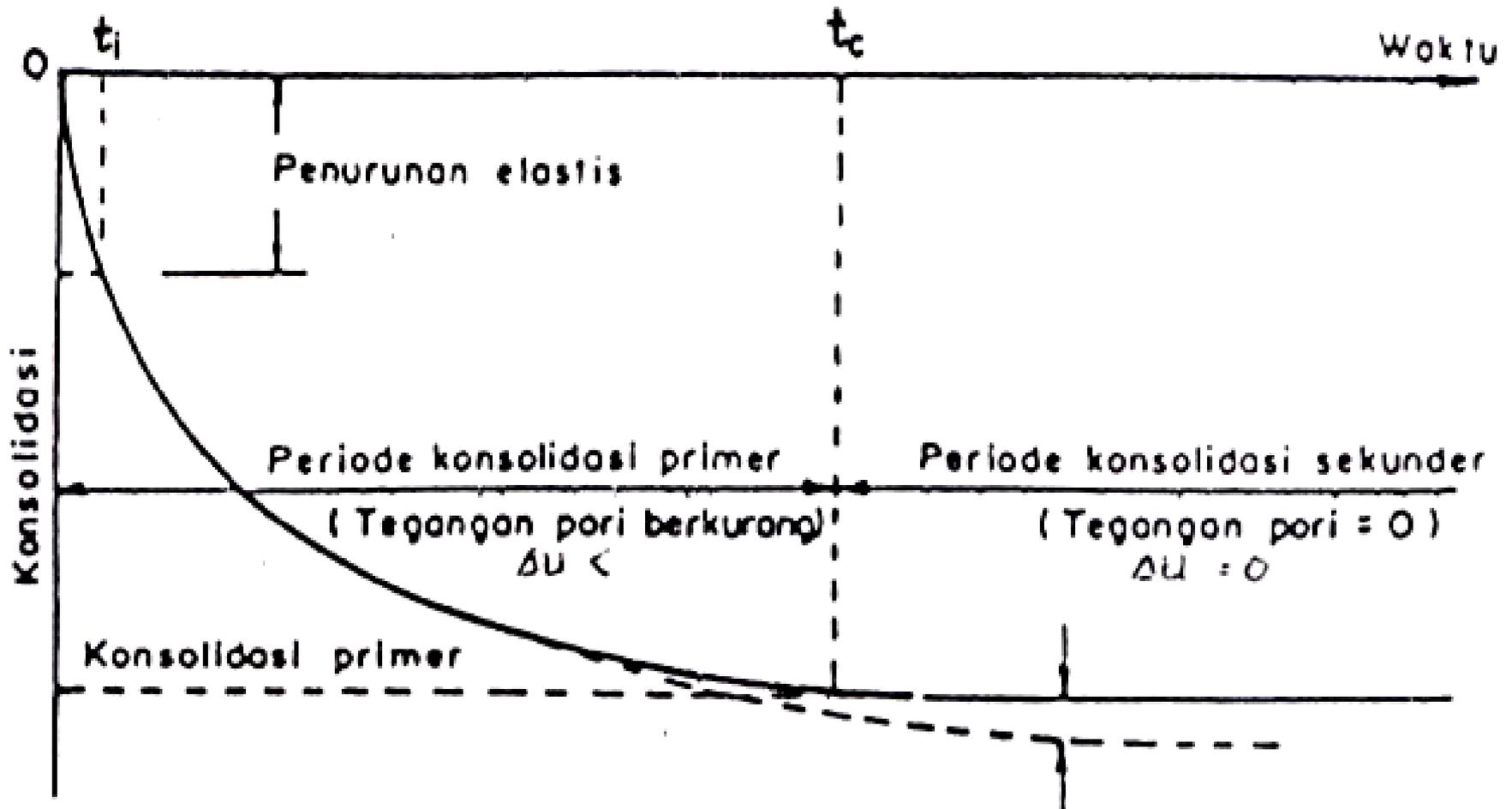
s_c : penurunan konsolidasi

s_s : penurunan sekunder

Penurunan (settlement)



Kurva penurunan thd waktu



Perhitungan Deformasi Vertikal

Tujuan utama analisis deformasi vertikal/penurunan ini adalah :

- Memperkirakan besar penurunan untuk memperkirakan tinggi ekstra (*camber*).
- Menentukan terjadinya potensi retakan dari zona inti kedap air.
- Memperkirakan pergerakan komponen bangunan pelengkap yang ditempatkan di dalam bendungan.

Persamaan untuk perhitungan penurunan tersebut adalah :

$$S_1 = C_{re} \cdot H_0 \log(\sigma'_1 / \sigma'_{vo}) + C_{ce} \cdot H_0 \cdot \log(\sigma'_{vf} / \sigma'_p)$$

dimana :

S_1 = penurunan lapisan

H_0 = Tebal awal lapisan

Rumus di atas berlaku untuk tanah yang terkonsolidasi berlebih (*over consolidated clay*) dan akan dibebani ke kondisi terkonsolidasi normal begitu dilakukan penimbunan.

- Untuk tanah pada kondisi terkonsolidasi normal setelah selesai penimbunan, rumusnya adalah :
- $S_c = C_c \cdot H_0 \cdot \log(\sigma'_{vf} / \sigma'_{vo})$

Waktu konsolidasi

- **Asumsi dari teori konsolidasi (Terzaghi) :**
 1. Tanah isotropis dan homogen
 2. Tanah dalam kondisi jenuh sempurna
 3. Tanah dan air bersifat tidak mampat (incompressible)
 4. Tekanan/kompresi dan aliran adalah 1-D (vertikal)
 5. Regangan yang terjadi kecil
 6. Berlaku hukum Darcy pada semua gradien hidraulis
 7. Koefisien permeabilitas dan koefisien volume kompresibilitas adalah tetap selama proses
 8. Terdapat hubungan yang unik, waktu, antara angka pori dan tegangan efektif

Lanjutan

- Koefisien konsolidasi,
- $c_v = k / (m_v \gamma_w)$; k dan m_v dianggap konstan
- Dimana :
 - k : koefisien permeabilitas
 - m_v : koefisien volume kompresibilitas
 - γ_w : Sp. Gravity air

Waktu konsolidasi, $t = (T_v \cdot d^2) / c_v$

dimana :

- T_v : faktor waktu dari kondisi drainasinya
(lihat kurva T_v vs tingkat konsolidasi, U)
- d : Tebal lapisan kompresibel : *double drainage* = 2d dan
single drainage = d

WAKTU KONSOLIDASI

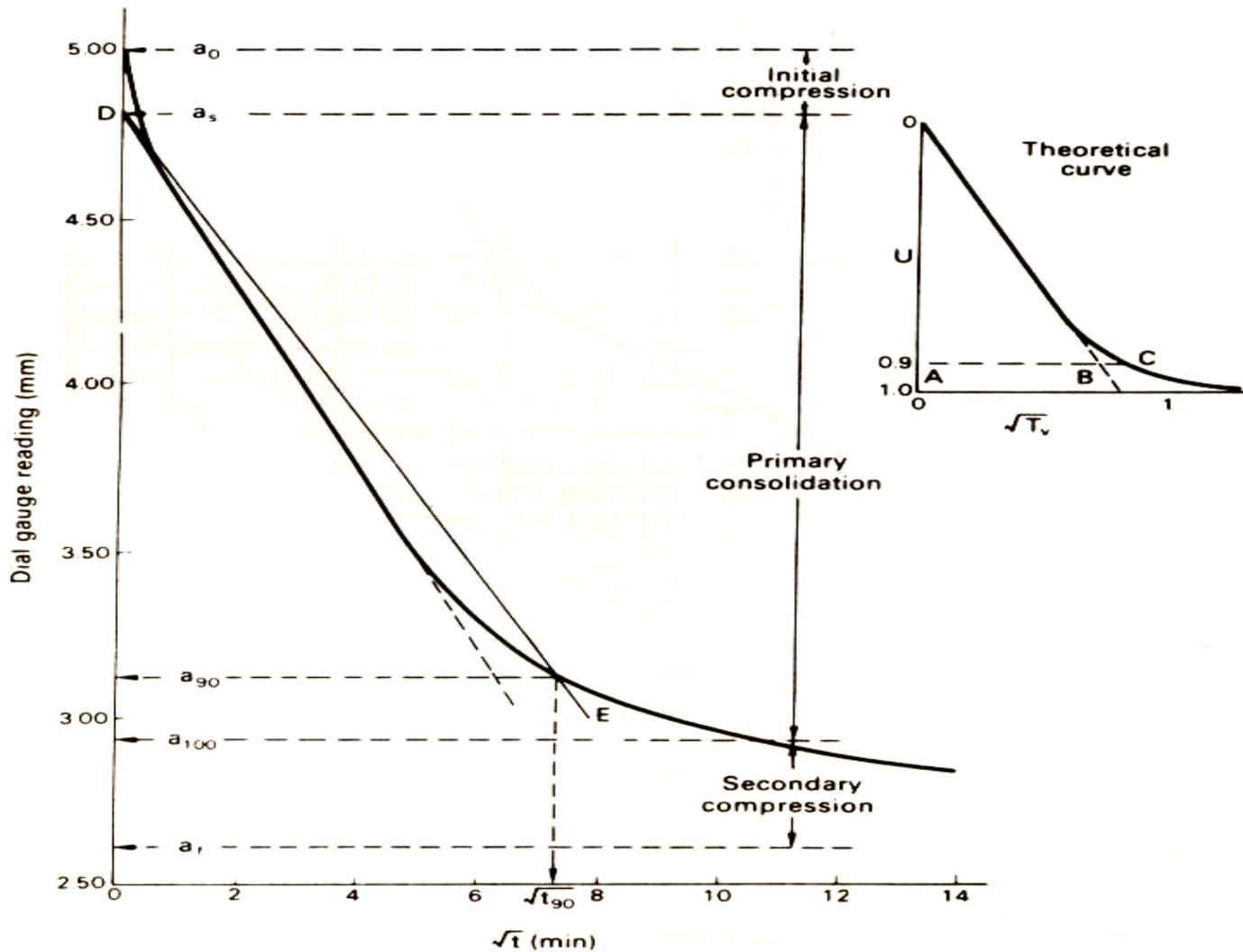


Fig. 7.21 The root time method.

KURVA TIME FACTOR (T_v)

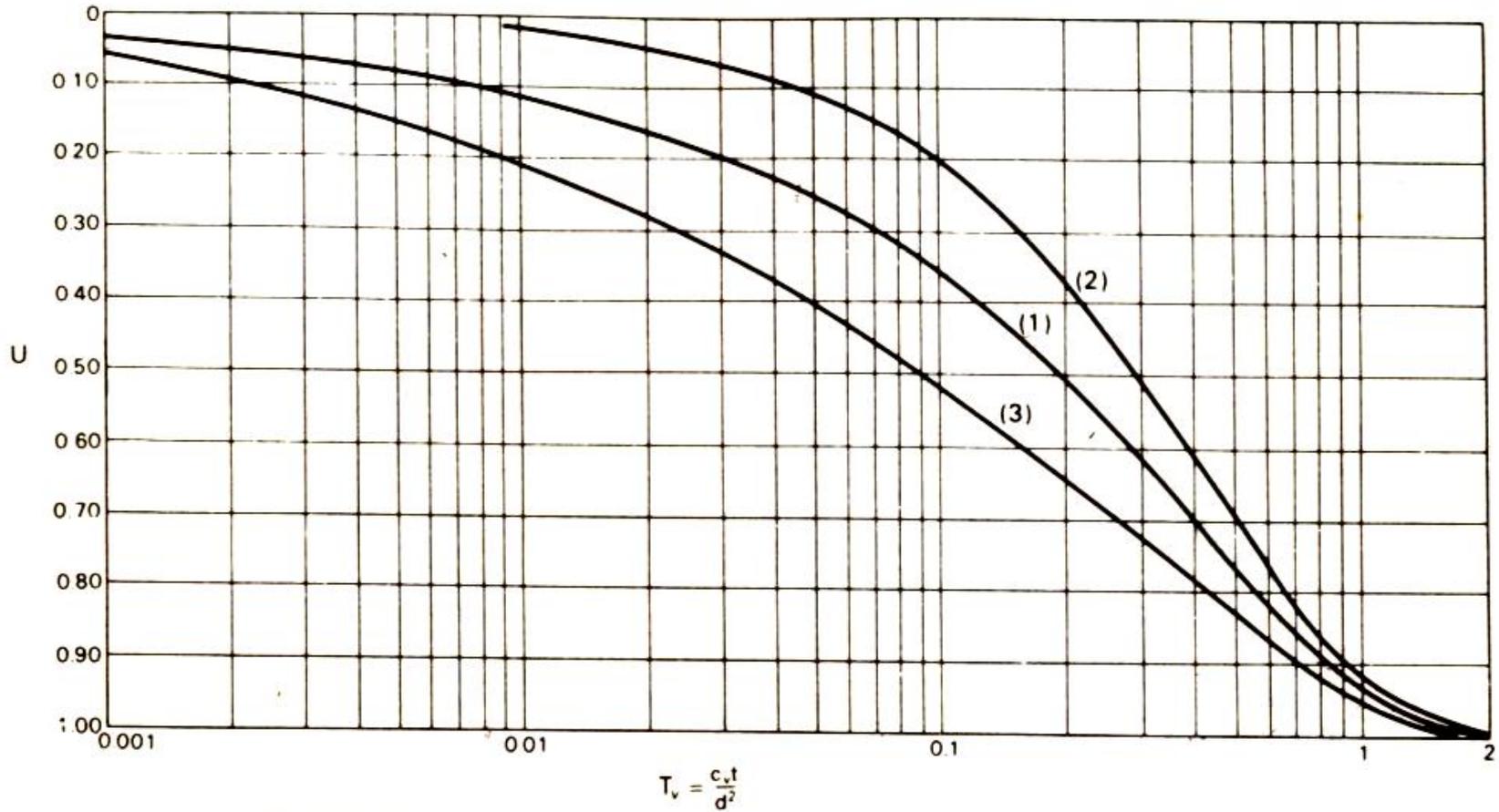
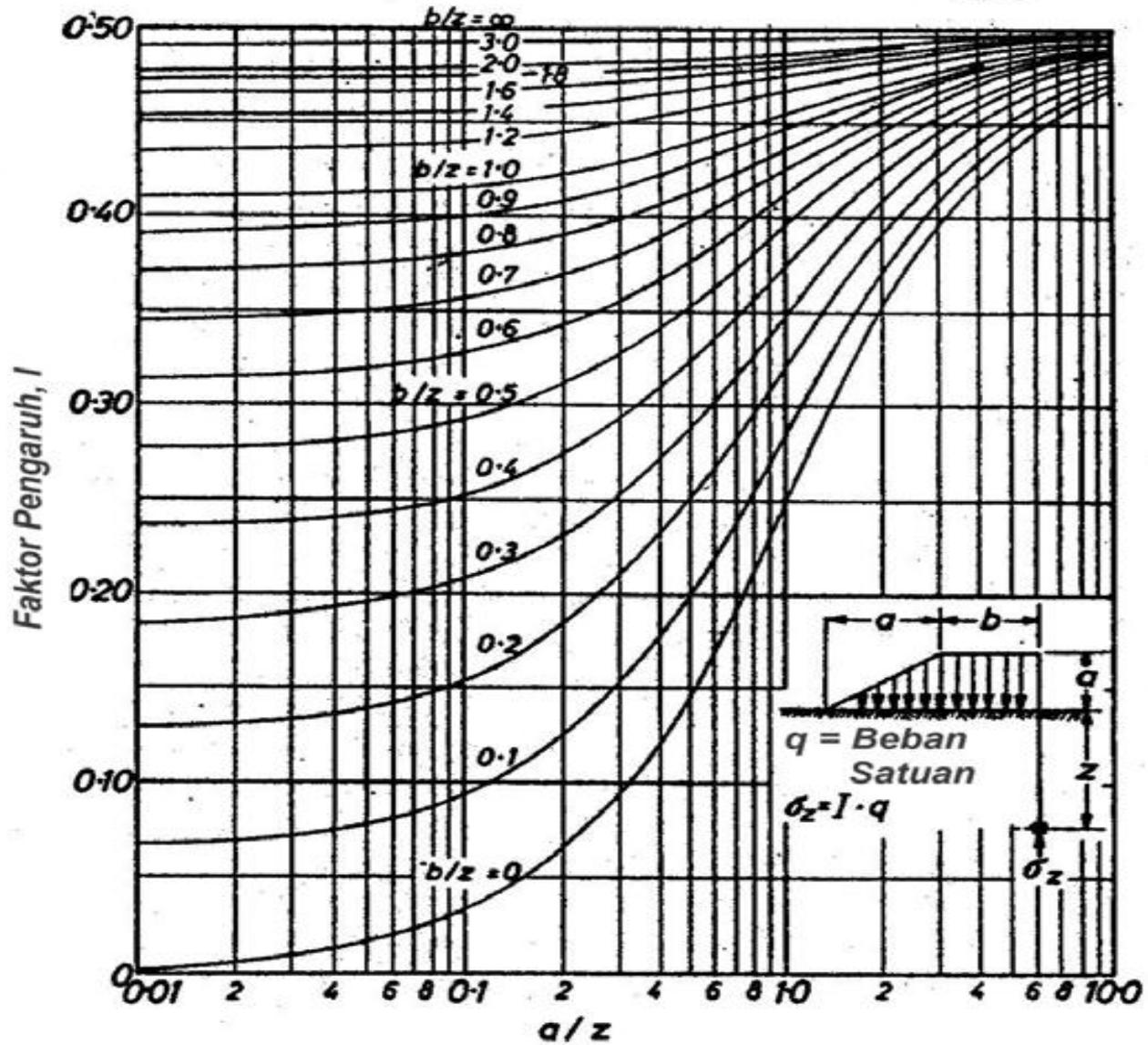


Fig. 7.18 Relationships between average degree of consolidation and time factor.

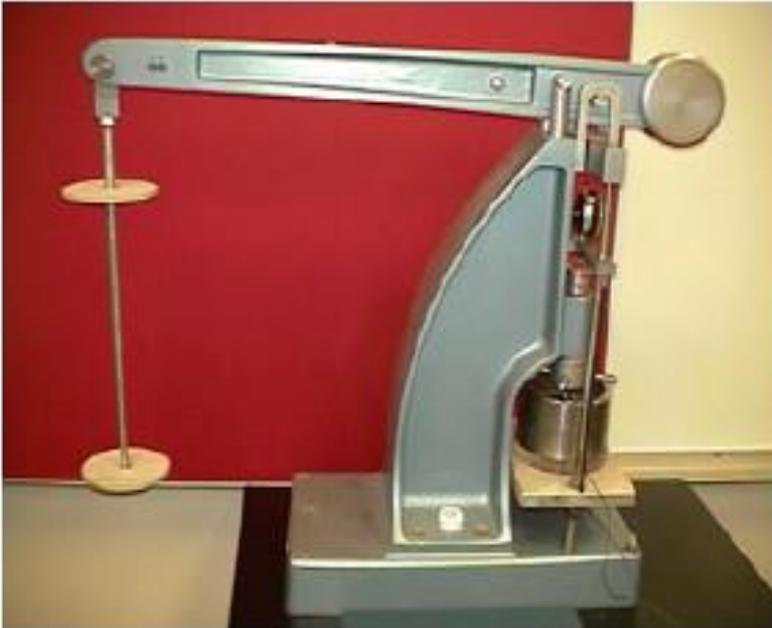
Grafik faktor pengaruh akibat beban timbunan



Parameter untuk analisis penurunan

- Parameter yang diperlukan dalam analisis penurunan antara lain indeks kompresibilitas (C_c), indeks rekompresi (C_r), tekanan prekonsolidasi (σ_p), modulus kompresibilitas (E_s), koefisien konsolidasi (C_v) dan indeks kompresibilitas sekunder (C_a).
- Parameter ini biasanya diperoleh dari hasil uji laboratorium, namun kadang-kadang perlu diperkirakan dari rumus-rumus empiris dari literatur.

ALAT UJI KONSOLIDASI DI LABORATORIUM



(a)



(b)

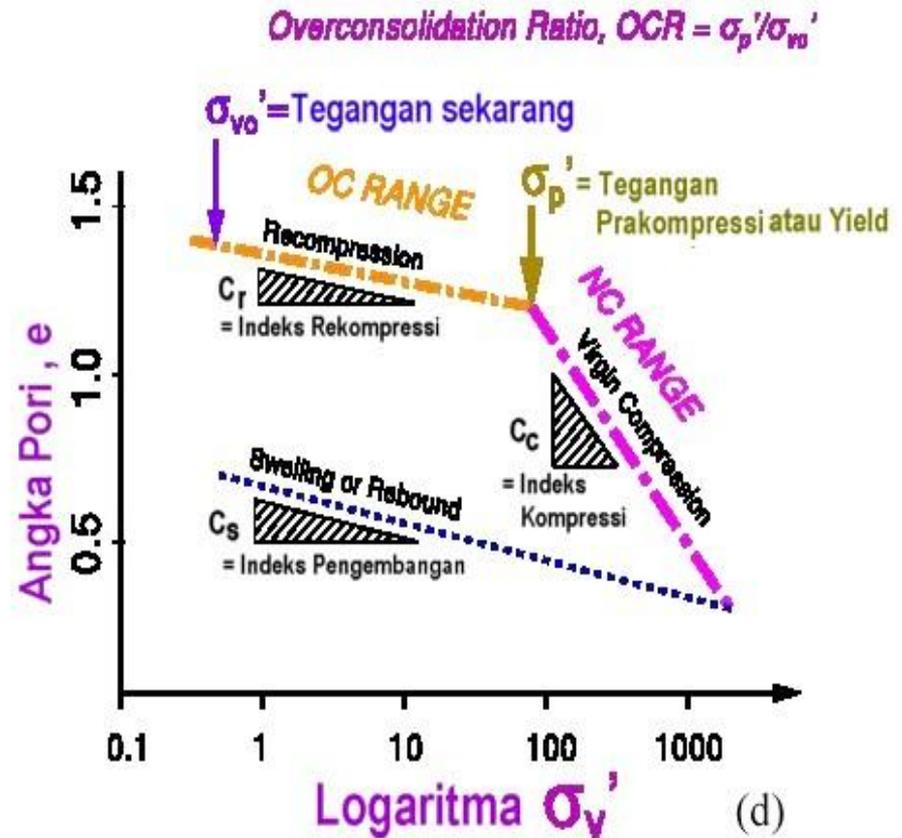
Alat uji konsolidasi 1- dimensi

(a) *Oedometer Wykeham Farrance* dengan lengan beban momen,

(b) Konsolidometer pneumatik (*Anteus*).



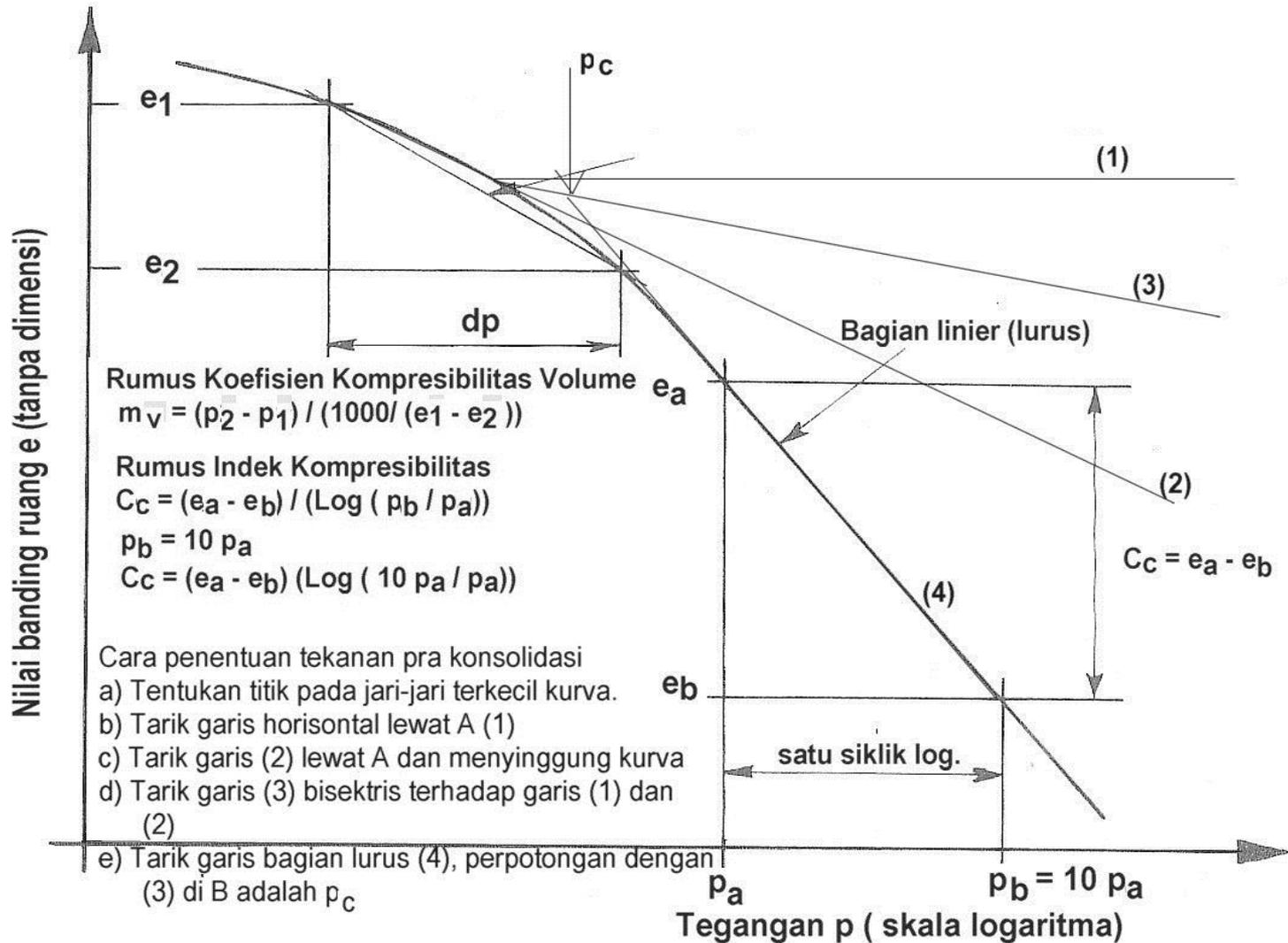
(c)



Alat uji konsolidasi 1- dimensi

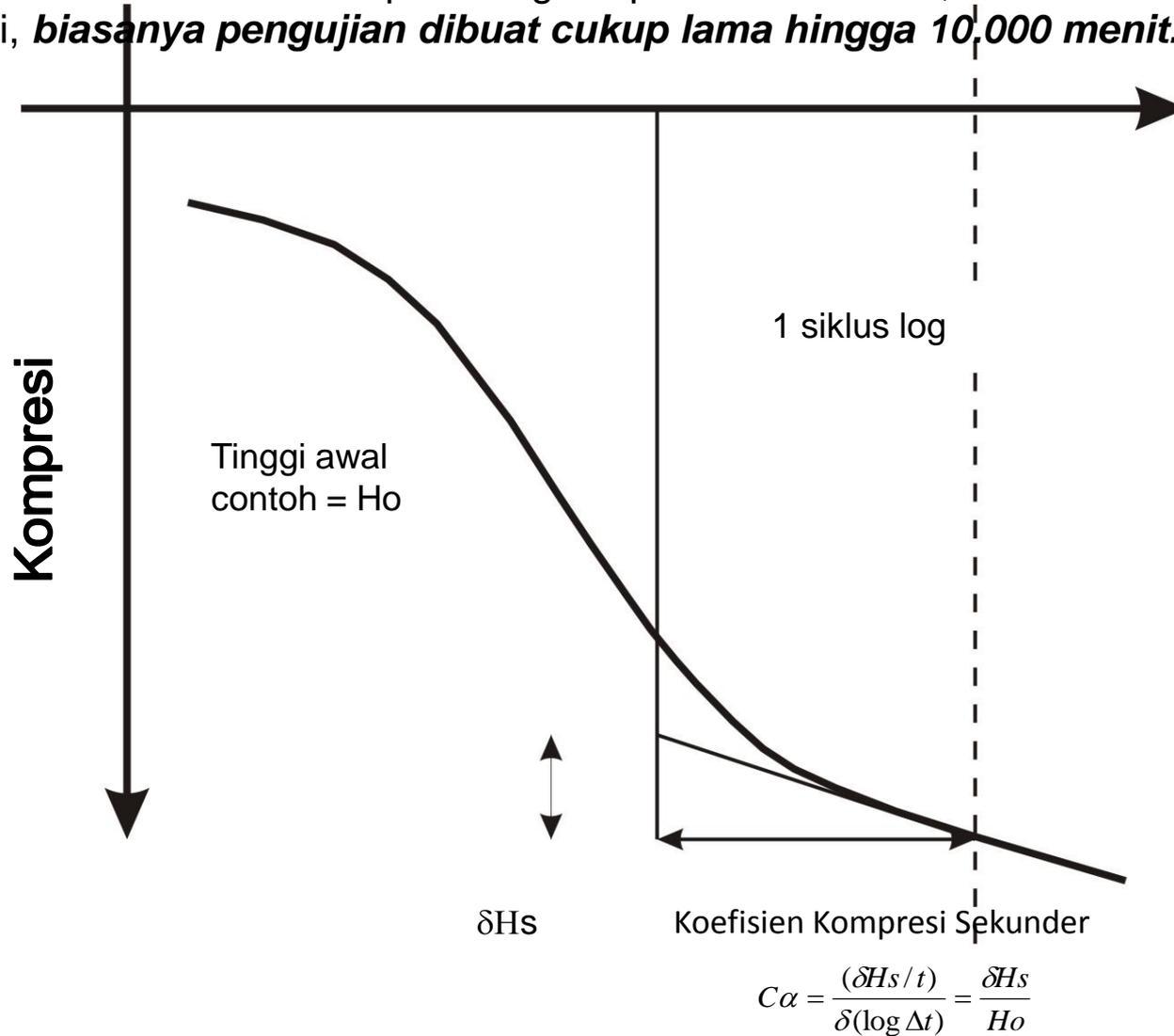
(c) Sel Rowe menggunakan sistem beban hidraulik

(d) Grafik ideal $e-\log \sigma_v'$ untuk memperoleh parameter konsolidasi. (Sumber: "Pedoman penyelidikan geoteknik untuk fondasi bangunan air", Vol. 2 . Pd T-03.2-2005-A)



Kurva hubungan antara log tekanan vs angka pori e untuk perhitungan koefisien kompresibilitas volume, indeks kompresibilitas dan cara penentuan tekanan pra konsolidasi p_c

Kompresi sekunder harus diperhitungkan pada *tanah lunak*, setelah konsolidasi primer selesai, ***biasanya pengujian dibuat cukup lama hingga 10,000 menit.***



Analisis model penurunan yang lebih teliti untuk memperkirakan distribusi penurunan parabolis yang terjadi di dalam timbunan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan penurunan parabolik seperti di bawah. :

$$S = (\gamma_w/E) \cdot (h - y) \cdot (y) / 144$$

dimana :

S = penurunan di dalam bendungan (ft)

h = tinggi bendungan(ft)

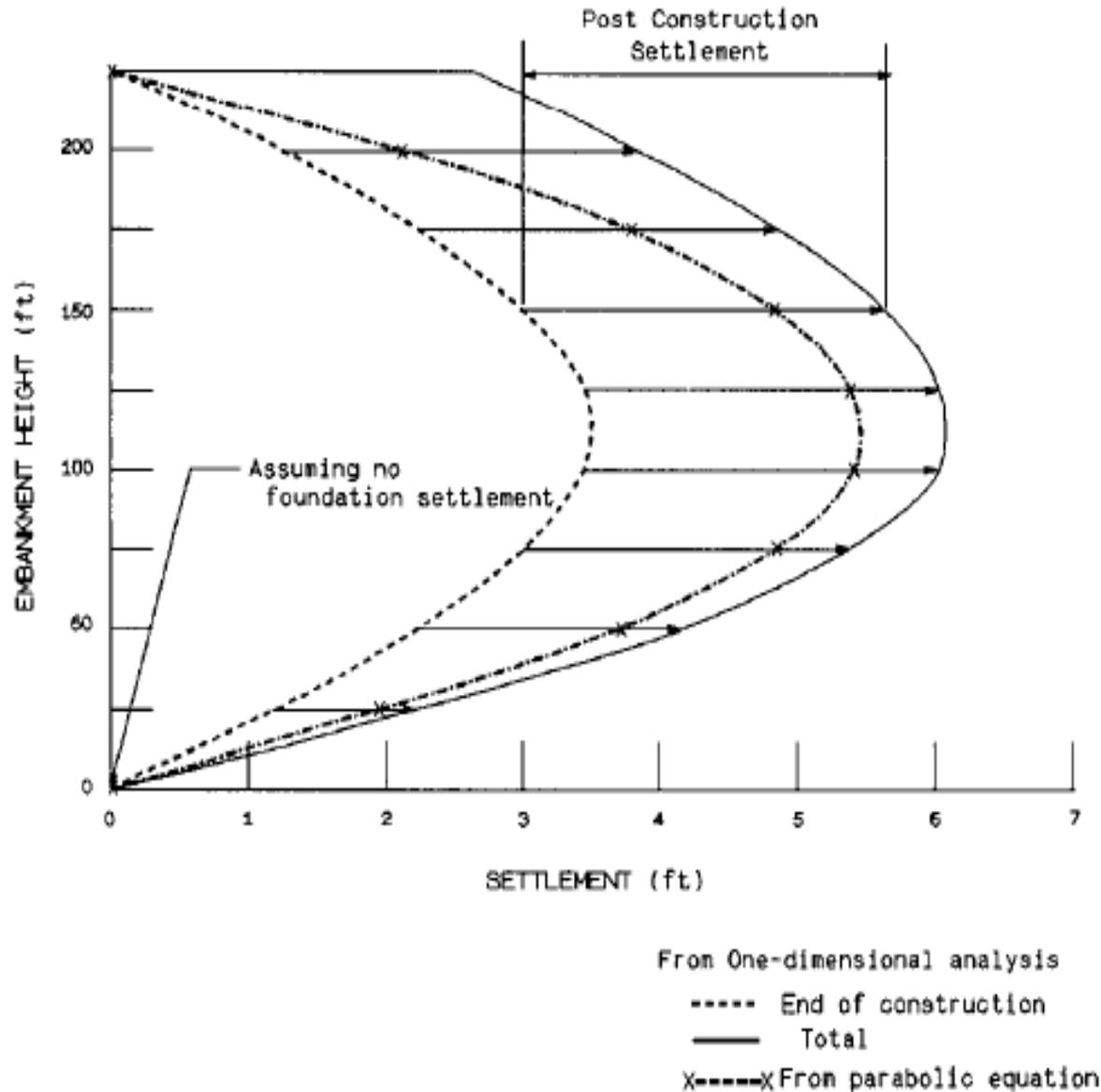
y = kedalaman timbunan di bawah titik yang ditinjau (ft)

E =1-D *secant modulus* ke level tegangan ekuivalen terhadap tengah-tengah tinggi bendungan.

Perhitungan Timbunan Ekstra (*Camber*)

- Analisis tinggi timbunan ekstra (*camber*) secara mudah dapat dilakukan dengan menggunakan aturan jempol (*rule of thumb*).
- Pada metoda ini, nilai sebesar 1% tinggi timbunan dihitung untuk sepanjang penampang bendungan. Kemudian, jumlah tersebut ditambahkan ke penurunan pasca konstruksi.

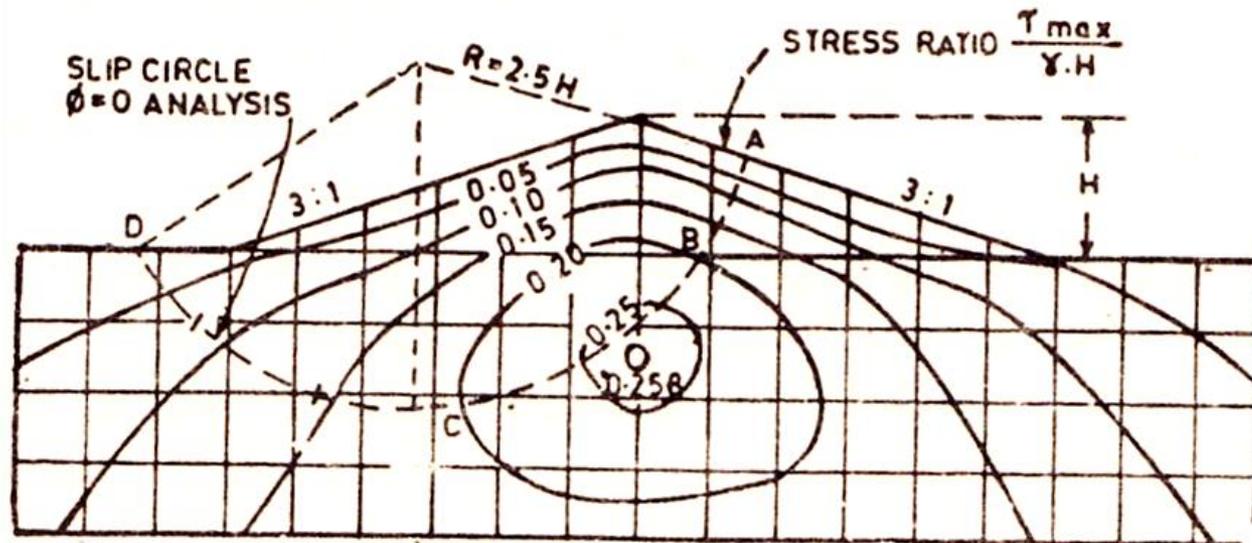
Hasil Perhitungan Penurunan



DEFORMASI HORIZONTAL

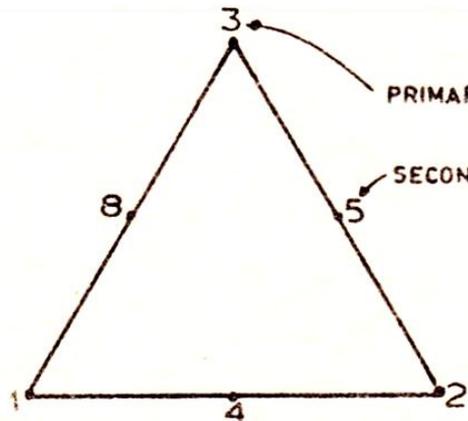
Metoda Konvensional (Bishop)

- Distribusi tegangan-tegangan geser dibandingkan dg tegangan geser rata-rata pada bidang kelongsoran kritis ABCD yang ditentukan dg cara analisis stabilitas $\Phi_u = 0$. Bagian yg mengalami tegangan berlebih (*overstress*) terlihat seperti pada zona BC.
- Keruntuhan geser mulai terjadi di bagian dalam timbunan dan hal ini dpt mengakibatkan keruntuhan di bagian atas dari busur kelongsoran sebelum keruntuhan geser terjadi di bag di bawahnya.



Metoda Elemen Hingga (FEM)

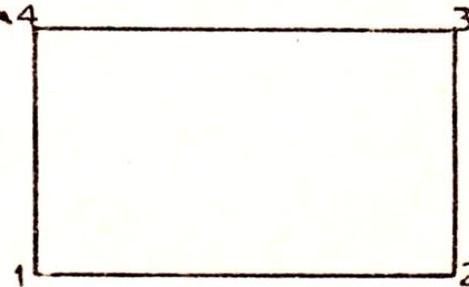
- Analisis elemen 2-D ini umumnya berupa suatu elemen segitiga sederhana yang mempunyai 3 sudut noda, disebut noda luar utama dengan penomoran 1, 2 dan 3. Noda lain juga terdapat disampingnya yang disebut noda luar sekunder dengan penomoran 4,5, dan 6.
- Jenis elemen lain adalah empat persegi panjang dan segi empat. Elemen-elemen tersebut dapat terdiri dari 2 atau 4 segitiga; yang paling umum digunakan adalah 3 nodal bentuk segitiga.



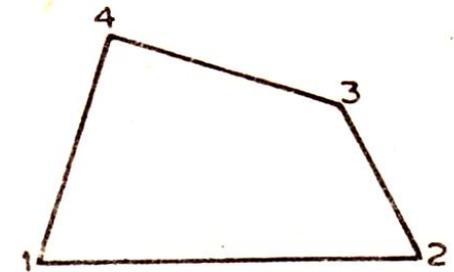
(a) TRIANGULAR ELEMENT

PRIMARY NODE

SECONDARY NODE



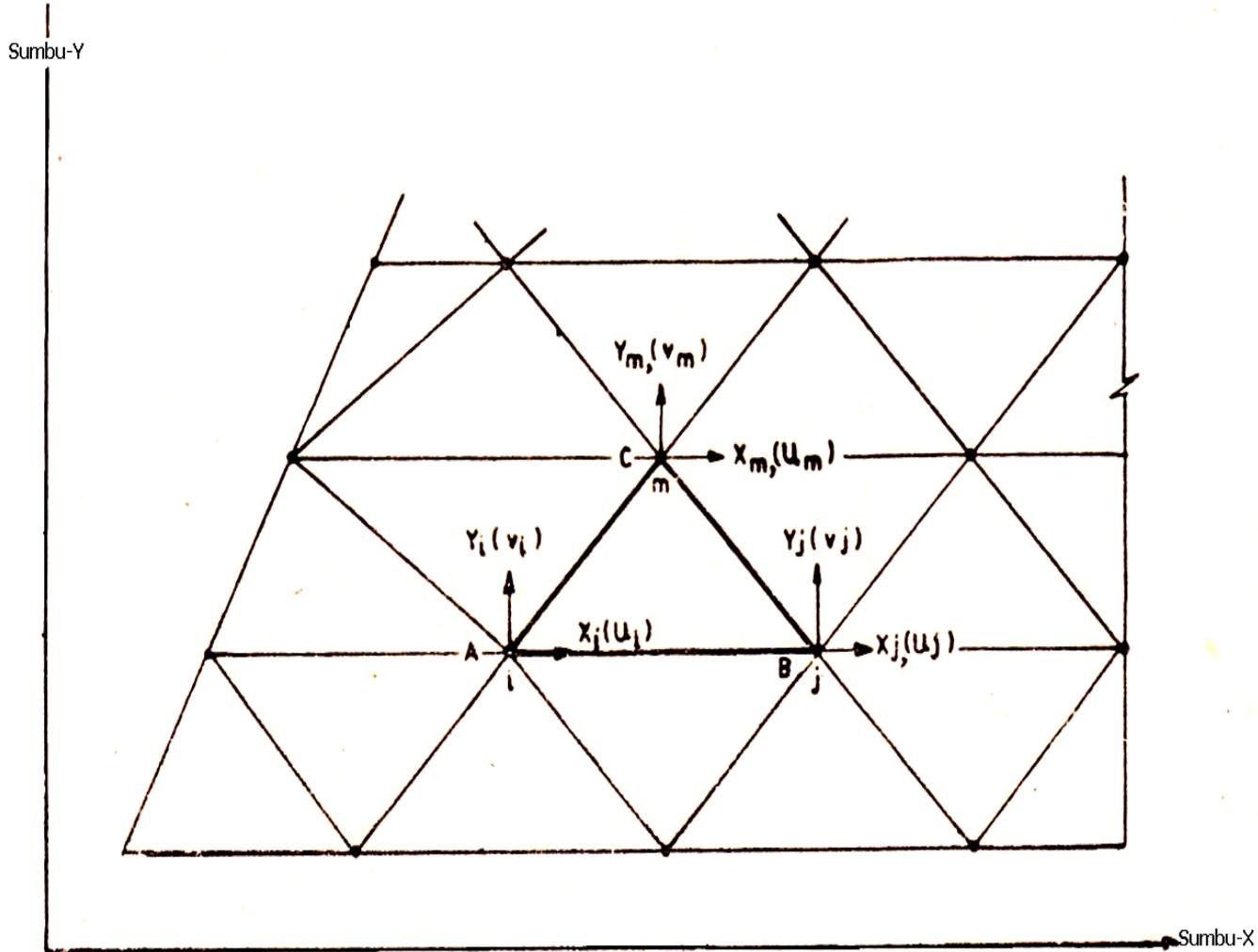
(b) RECTANGULAR ELEMENT



(c) QUADRILATERAL ELEMENT

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 1/2(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

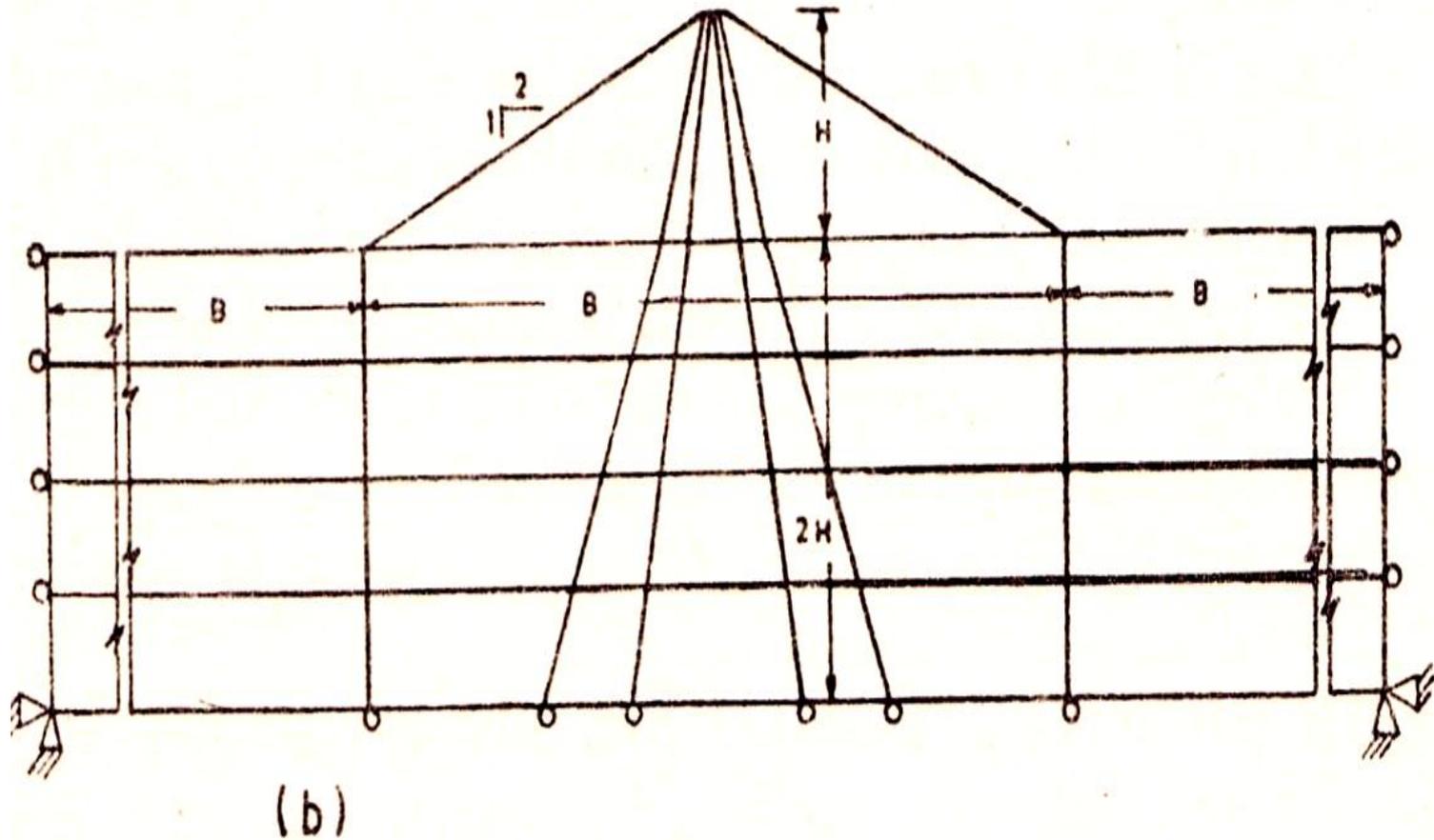
Daerah *plane strain* yang dibagi menjadi elemen hingga yang menunjukkan gaya nodal dan perpindahannya



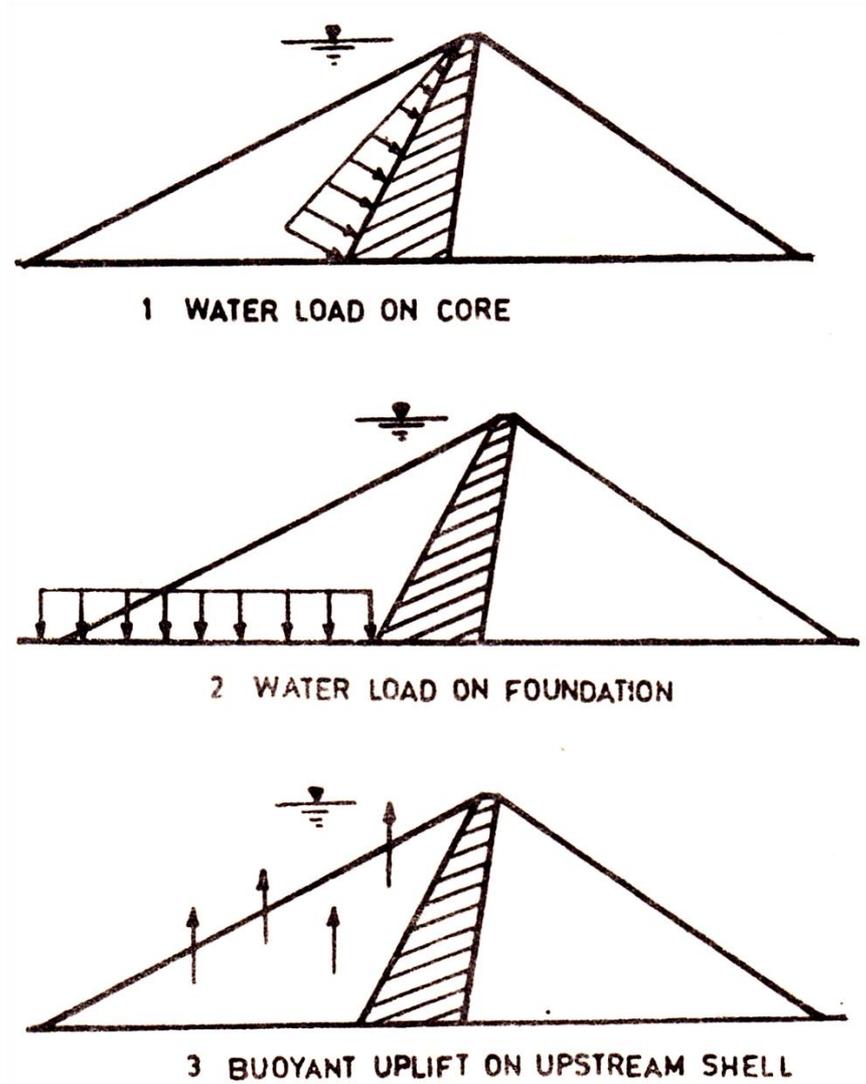
Prosedur analisis struktur dengan metoda elemen hingga (FEM) dapat diringkas sebagai berikut:

- Struktur harus dibagi-bagi secara ideal ke dalam sejumlah elemen-elemen dan nodal dengan posisi yang sesuai. Elemen-elemen dan nodal harus diberi sistim penomoran. Koordinat dari setiap titik nodal dihitung dengan memplotkan pada suatu sumbu koordinat.
- Vektor gaya nodal dihitung dengan cara menjumlahkan beban total yang bekerja pada titik nodal.
- Matriks kekakuan (*stiffness matrix*) dari setiap elemen dihitung dan diatur untuk setiap sistim.
- Kondisi batas (disebut perpindahan pada nodal batas) ditentukan pada semua matriks kekakuan dan yang telah dimodifikasi dan diselesaikan untuk menentukan perpindahan titik nodal.
- Tegangan dan regangan dari setiap elemen kemudian dihitung dari perpindahan titik-titik nodal.

Diskretisasi penampang bendungan urugan Fondasi kompresibel



Pengaruh pengisian waduk pada bendungan zonal





SIGMA/W

- SIGMA/W merupakan program yang digunakan untuk analisis tegangan dan regangan. Aplikasinya pada bendungan urugan adalah untuk menganalisis besarnya deformasi akibat pembebanan secara bertahap, dan deformasi pada saat pengoperasian waduk.
- SIGMA/W mampu memodelkan kondisi-kondisi seperti berikut:
 - ◊ Analisis deformasi dengan model tanah linier elastik atau nonlinier elastik-plastik.
 - ◊ Kondisi batas berupa peralihan atau tegangan, yang berubah sesuai waktu.
 - ◊ Konstruksi timbunan atau galian.
 - ◊ Interaksi tanah-struktur.
 - ◊ Analisis konsolidasi.



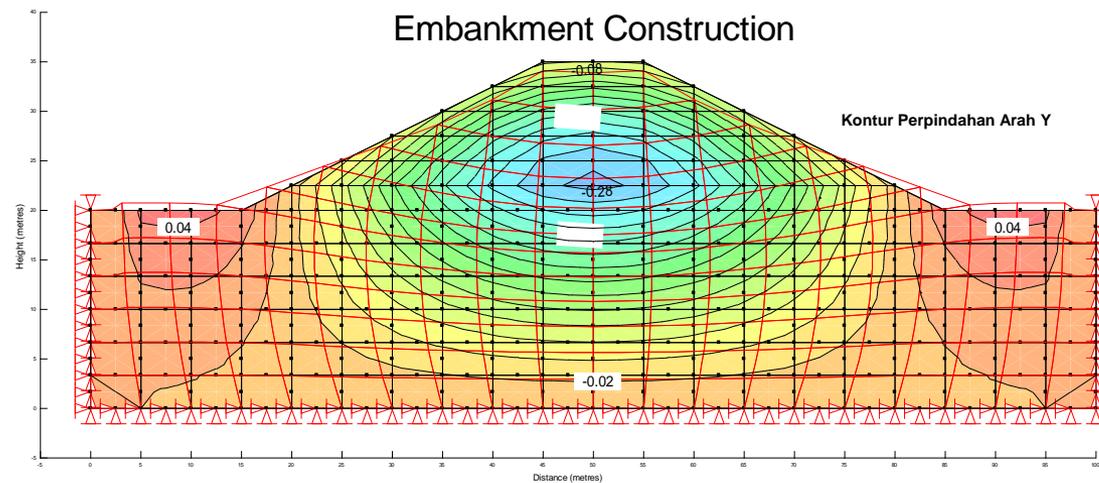
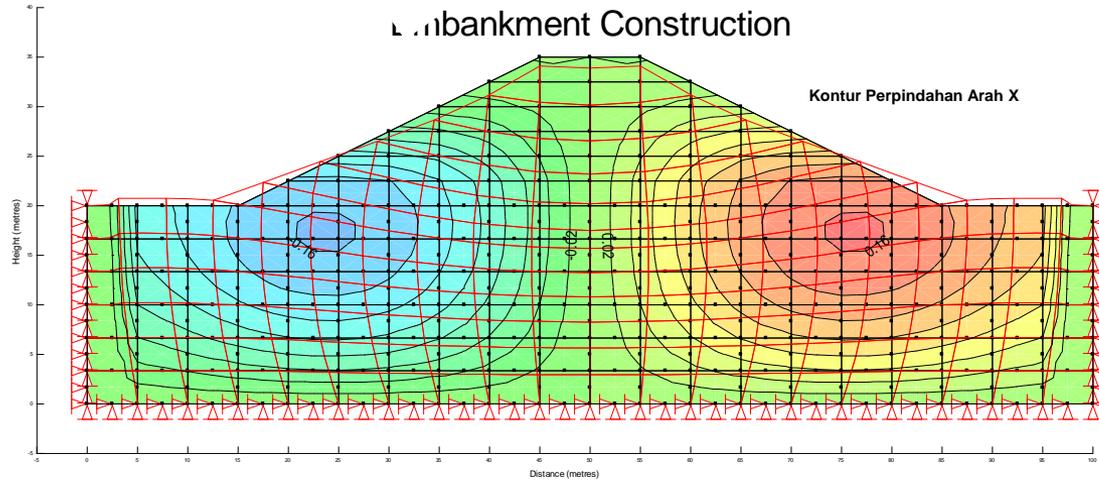
Contour

Hasil output SIGMA/W dapat divisualisasikan dalam bentuk kontur, yaitu Kontur:

- X-Displacement
- Y-Displacement
- X-Total Stress
- Y-Total Stress
- Z-Total Stress
- Maximum Total Stress
- Minimum Total Stress
- Mean Total Stress (p)
- X-Effective Stress
- Y-Effective Stress
- Z-Effective Stress
- Maximum Effective Stress
- Minimum Effective Stress
- Mean Effective Stress (p')
- X-Y Shear Stress
- Maximum Shear Stress
- Deviatoric Stress (q)
- Pore-Water Pressure
- X-Strain
- Y-Strain
- Z-Strain
- X-Y Strain
- Maximum Strain
- Minimum Strain
- Maximum Shear Strain
- Volumetric Strain
- Deviatoric Strain
- Poisson's Ratio
- Undrained Shear Strength
- Void Ratio
- Tangential Modulus (E)

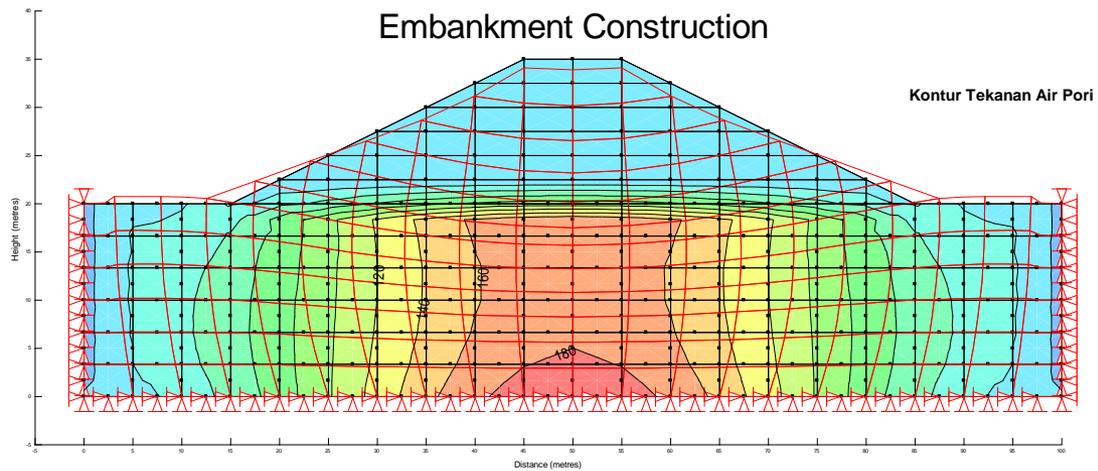
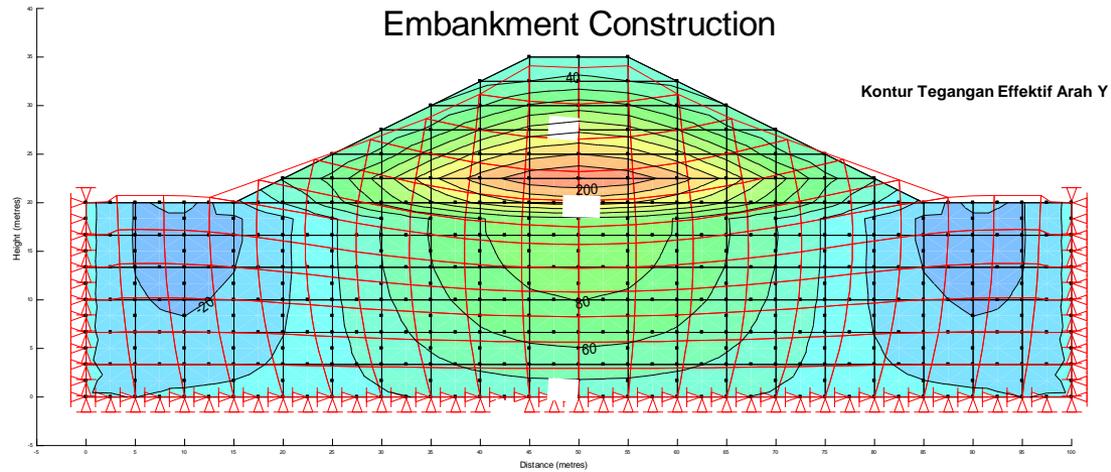


Contour

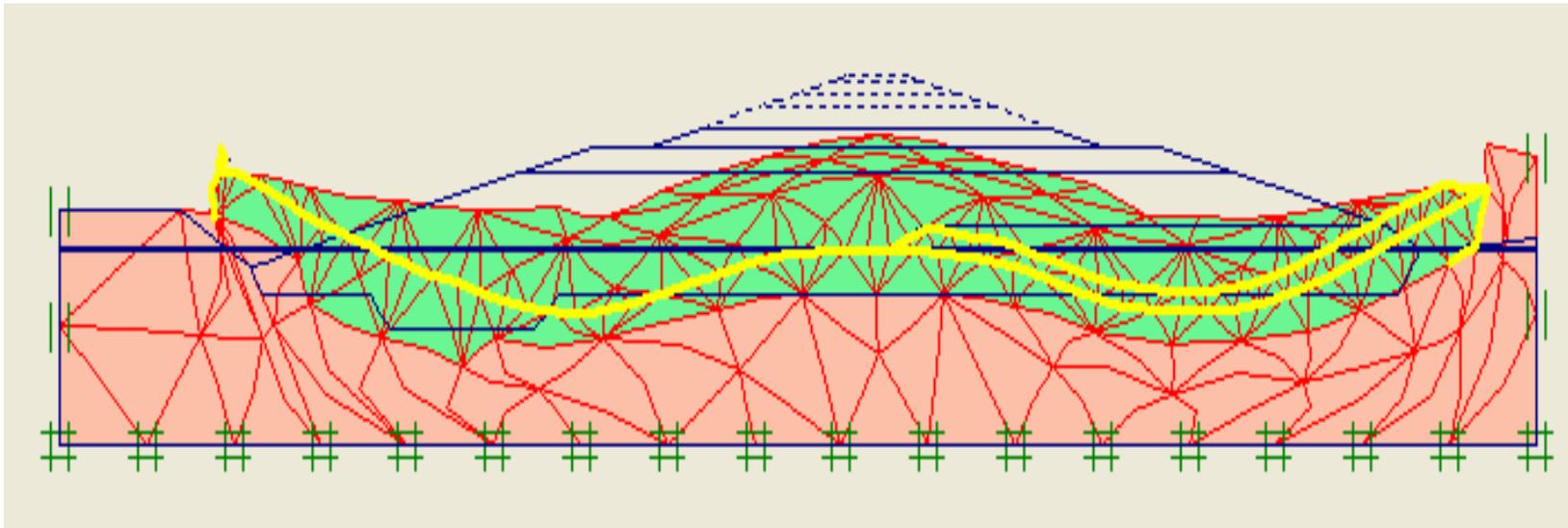




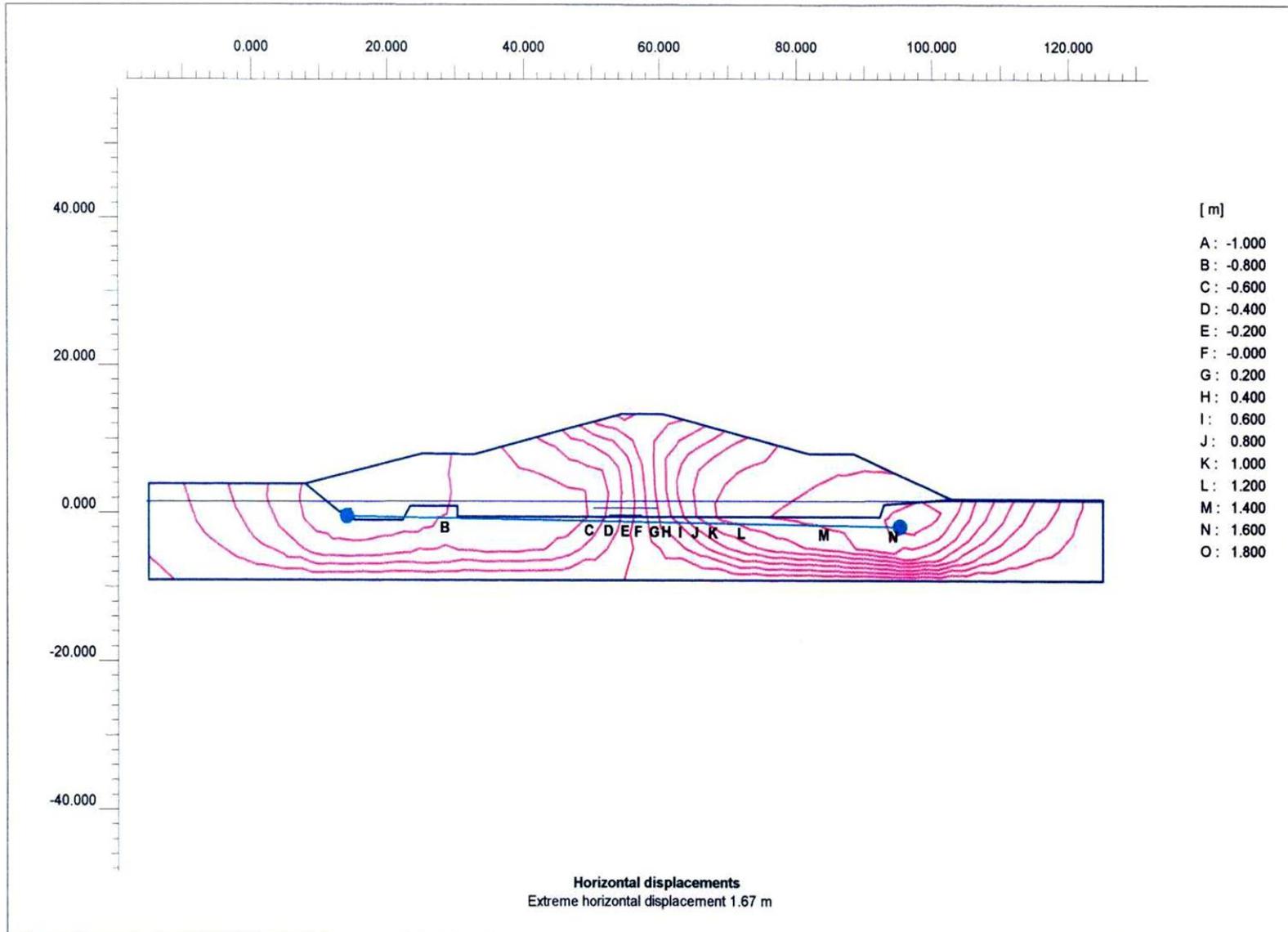
Contour



Deformasi mesh elemen timbunan pada fondasi tanah lunak



Analisis pergerakan horizontal timbunan di atas tanah lunak yang digambarkan dalam bentuk kontur pergerakan horizontal



SELESAI
TERIMA KASIH