



**Instytut Geologii,  
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu**

# **MECHANIKA GRUNTÓW**

**prof. UAM, dr hab. inż. Jędrzej Wierzbicki**

**MG:**

## **CEL**

**Poznanie zasad modelowego opisu ośrodka gruntowego (model i jego parametry).**

**Umiejętność określenia i analizy stanu naprężenia i odkształcenia gruntu.**

**Poznanie podstaw reologii gruntu, modelu modified Cam-Clay oraz Hardening Soil.**

**Poznanie:**

- **teorii konsolidacja gruntu,**
- **kryteriów wytrzymałościowych,**
- **hipotez rozkładu naprężeń w podłożu i metod wyznaczania naprężeń od budowli,**
- **metod analizy stanu naprężenia w podłożu i jego wytrzymałości,**
- **elementów teorii sprężystości.**

**Zapoznanie się z metodyką zaawansowanych laboratoryjnych badań wytrzymałościowych.**

**MG:**

# **ORGANIZACJA ZAJĘĆ**

**1. 30 h WYKŁADÓW + 30 h ĆWICZEŃ**

**2. PRACA WŁASNA – 100 h**

**3. KONSULTACJE**

**4. SPRAWDZENIE WIEDZY:**

- **KOŁOKWIA**
- **EGZAMIN**

## MG: **LITERATURA**

- **Das B.M. (1984):**

**Principles of geotechnical engineering.** PWS-Kent Publishing Company, Boston Mass.

- **Glazer Z. (1985):**

**Mechanika Gruntów.** Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

- **Head K.H. (1986):**

**Manual of Soil Laboratory Testing.** Penetch Press., Vol. 3.

- **Kisiel I., Dmitruk S., Lysik B. (1969):**

**Zarys reologii gruntów.** Nośność i stateczność gruntów. Wyd. Arkady, Warszawa.

- **Lambe T. W., Whitman R.V. (1969):**

**Soil mechanics.** MIT wyd. J. Wiley and Sons, Inc.

**MG: LITERATURA**

• **Pisarczyk S. (2005):**

**Mechanika gruntów.** OWPW, Warszawa.

• **Wiłun Z. (2000):**

**Zarys geotechniki.** Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.

• **Worth C.P., Houlsby G.T. (1985):**

**Soil mechanics – property characterization and analysis procedures.**

W: Proc. of 11<sup>th</sup> ICSMFE, Vol. 1, San Francisco: 1-56.

• **Craig R.F. 1997.**

**Soil Mechanics.** Six editio, Spon Pres, Taylor & Francis Group. London & New York

• **Atkinson J. 1993.**

**An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations.**

MG:

# ZARYS PRZEDMIOTU

## Mechanika Gruntów:

nauka o fizycznych i mechanicznych właściwościach gruntów oraz stanach naprężenia i odkształcenia występujących w podłożu.

## Mechanika Gruntów

jest projekcją klasycznej mechaniki newtonowskiej na trójfazowy ośrodek rozdrobniony.

Mechanika Skał – bada ośrodek zlityfikowany

MG:

# HISTORIA

## OKRES „KLASYCZNY”

- XVIII i XIX wiek; podstawowe zależności i parametry;
- Coulomb 1773 – równowaga graniczna;
- Rankin 1857 – warunek stanu granicznego;
- Boussinesq 1886 – wyznaczanie stanu naprężenia w podłożu;
- Krey 1918 – hipoteza wytrzymałościowa.



## OKRES „KLASYCZNY + ”

- 1 poł. XX wieku;

- Terzaghi 1925, 1936:

- metodyka badań gruntów,
- zależność właściwości mechanicznych od stanu gruntu,
- teoria konsolidacji,
- pojęcie naprężeń efektywnych;

- Fellenius 1926 – analiza stateczności zboczy;

## **OKRES „KLASYCZNY + ”**

- **1932 - prof. Pogany – Laboratorium Mechaniki Gruntów (Politechnika Lwowska);**
- **1936 – 1 kongres i postanie ISSMFE – obecnie ISSMGE**
  - **struktura organizacji,**
  - **21 Komitetów Technicznych (TC-...),**
  - **kongresy;**
- **1956 – Katedra Mechaniki Gruntów (prof. Orzechowski, Politechnika Poznańska)**
- **1966 – Zakład / Katedra Geotechniki (prof. Zbigniew Młynarek, WSR/AR/Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu)**
- **Polski Komitet Geotechniki (od 1956): prof. Piątkowski, prof. Wiłun, prof. Grabowski, prof. Dembicki, prof. Młynarek, prof. Lechowicz, prof. Szymański.**

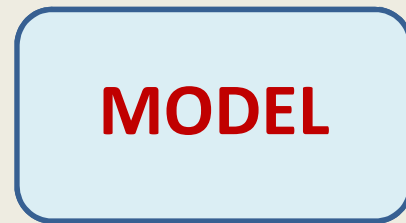
**OKRES „NOWOCZESNY ”**

- 2 poł. XX wieku & REC, ośrodek Cambridge;
- modele lepko-sprężyste + elasto-plastyczne (Cam-Clay);
- rozszerzenie rozumienia parametrów i uzależnienie ich wartości od ścieżki naprężenie - odkształcenie;
- wielowymiarowa analiza zachowania się gruntu, przestrzeń p-q;
- wprowadzenie analizy ryzyka w ujęciu statystycznym.

MG:

# INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY

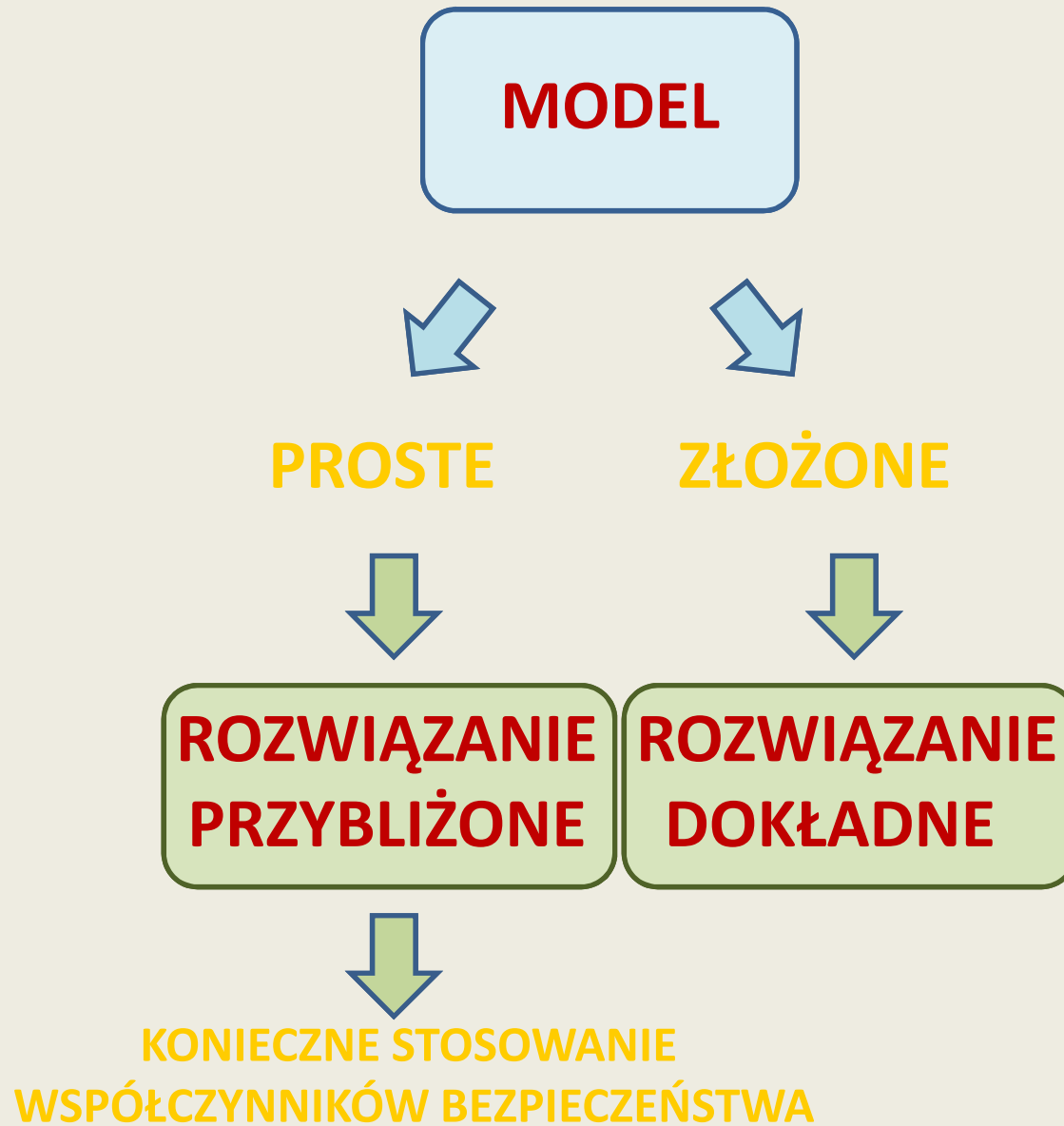
OPIS OŚRODKA GRUNTOWEGO



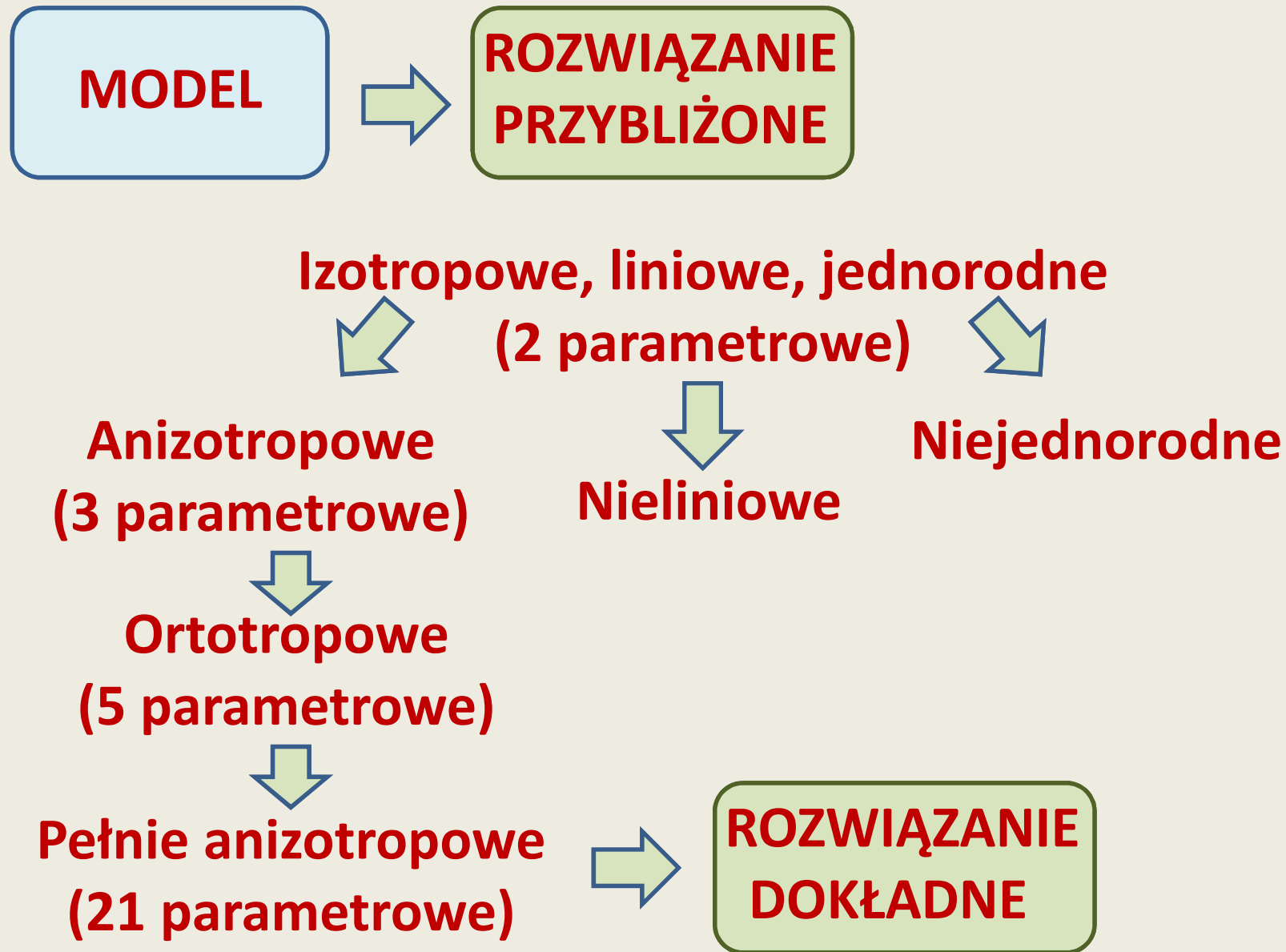
PARAMETRY

**MG:**

## **INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - model**



**MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - model**



**MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - model**

**MODEL**



**ROZWIĄZANIE  
PRZYBLIŻONE**

- anizotropowa natura gruntu
- relatywnie mała liczba badań
- proste metody badawcze i interpretacyjne
- standaryzacja rozwiązań



**ANALIZY  
NOŚNOŚCI**



**ANALIZY  
DEFORMACJI**

MG:

## INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - model

**ANALIZY  
NOŚNOŚCI**

- $s_u$
- $c', \phi'$
- $\gamma, \gamma'$

**ANALIZY  
DEFORMACJI**

- $E_u, \nu_u$
- $E', \nu'$
- $G, D'$

$$I_r = \frac{G}{s_u}$$

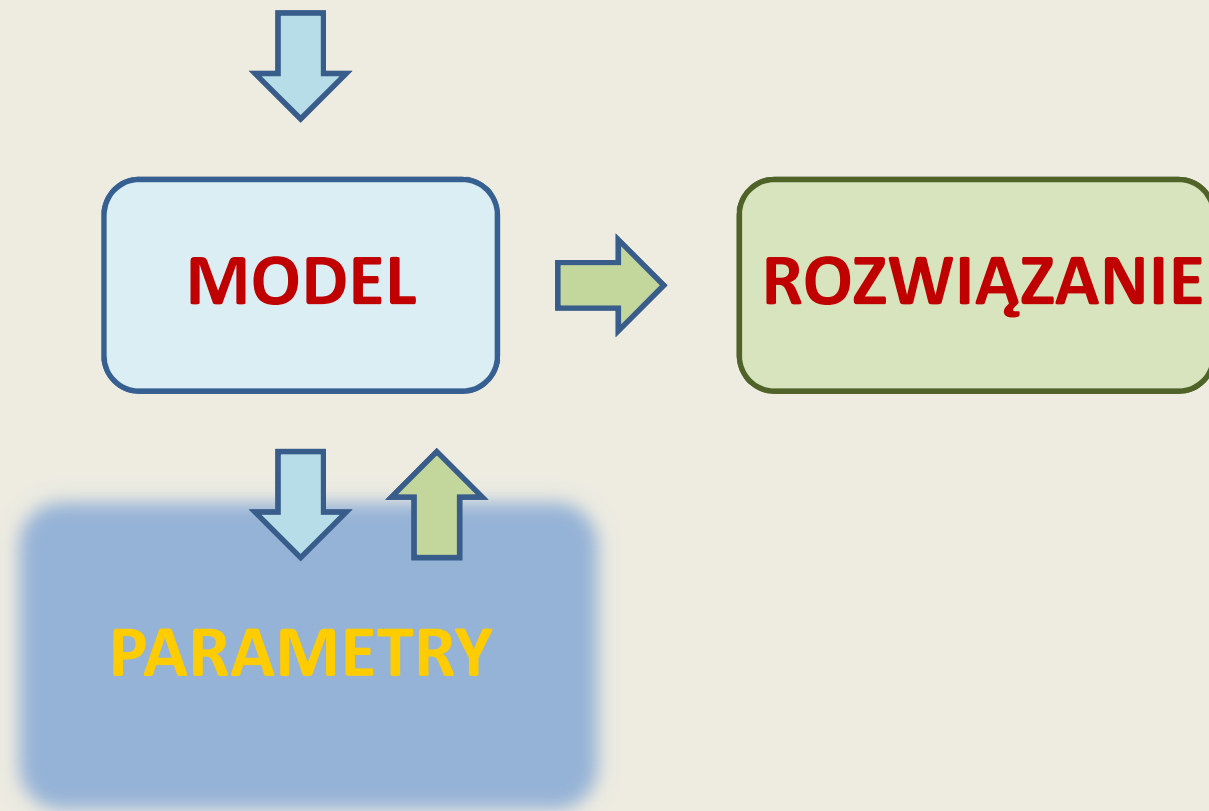




**MG:**

## **INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry**

**OPIS OŚRODKA GRUNTOWEGO**



MG:

## INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

**PARAMETRY**

```
graph TD; A[PARAMETRY] --> B[stałe materiałowe]; A --> C[zmienne stanu];
```

**stałe  
materiałowe**

ciało sprężyste -  $G$   
ciało plastyczne -  $\phi_{\mu}$

**zmienne  
stanu**

$e, M, OCR, s_u, \sigma, \phi' \dots$

MG:

## INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

**PARAMETRY**

```
graph TD; A[PARAMETRY] --> B[analizy stanu granicznego]; A --> C[analizy deformacji];
```

**analizy stanu granicznego**

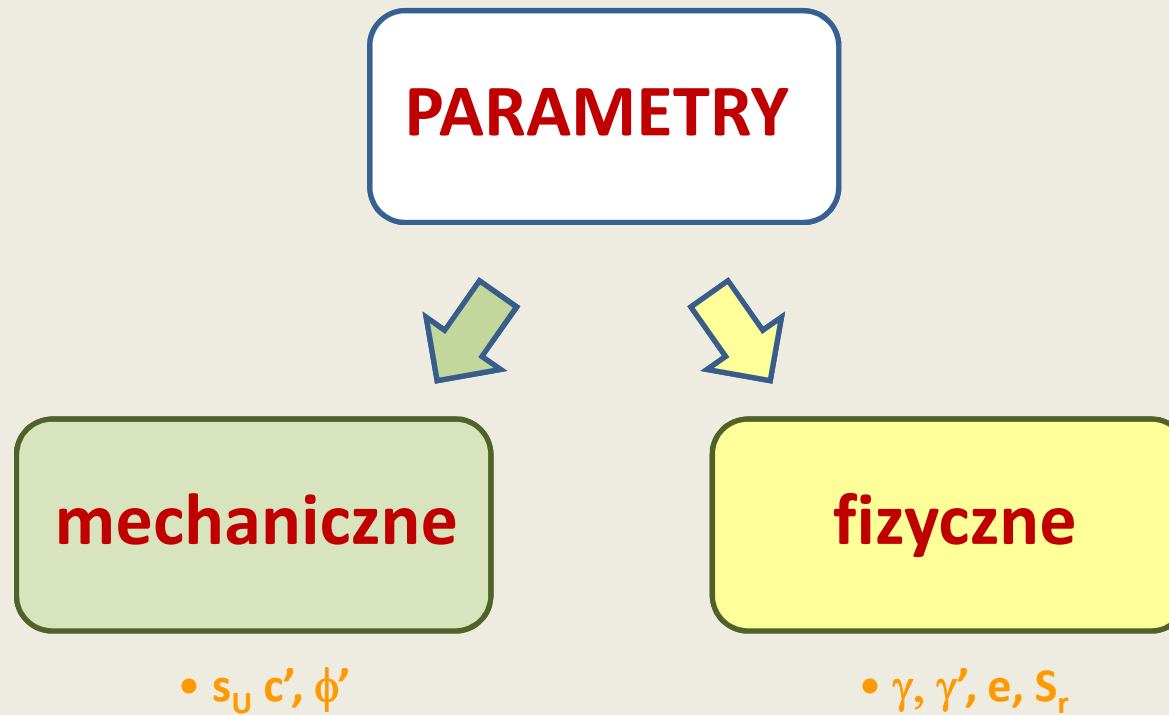
- $s_u$
- $c', \phi'$
- $\gamma, \gamma'$

**analizy deformacji**

- $E, \nu, G, D, C_c, c_v$

MG:

## INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry



**mechaniczne**

•  $s_u$   $c'$ ,  $\phi'$

**fizyczne**

•  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $e$ ,  $S_r$

## MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

- ciężar objętościowy –  $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>]
- ciężar objętościowy szkieletu ziarnowego –  $\gamma_d$  [kN/m<sup>3</sup>]

$$\gamma_d = 100\gamma / (100+w)$$

- ciężar objętościowy z uwzględnieniem... –  $\gamma'$ ,  $\gamma_{sr}$  [kN/m<sup>3</sup>]

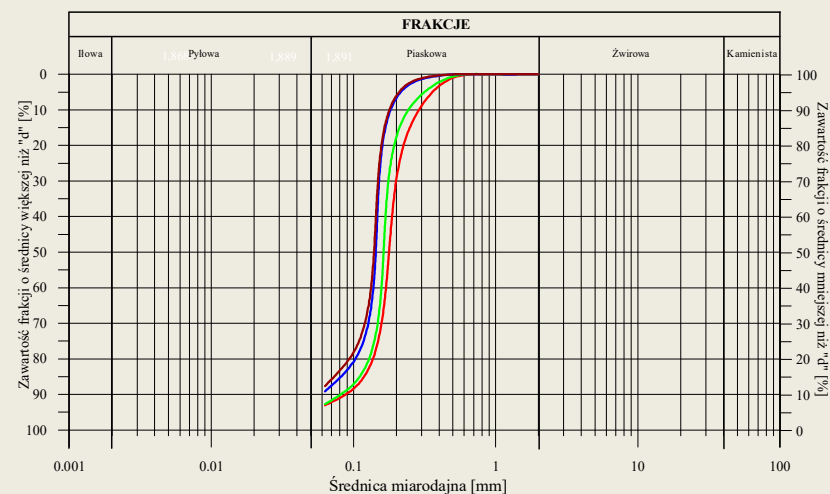
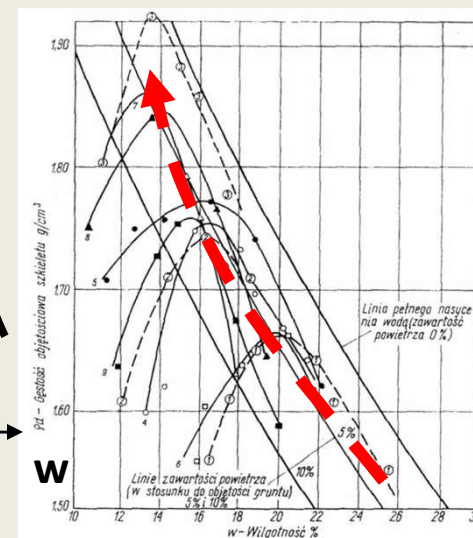
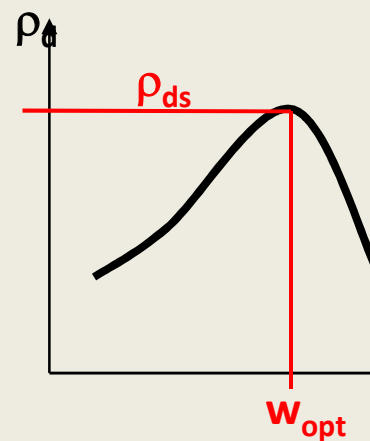
$$\gamma_{sr} = (1-n)\gamma_s + n\gamma_w$$

$$\gamma' = \gamma_{sr} - \gamma_w$$

- wilgotność –  $w$  [%]
- porowatość –  $n$  [-]
- wskaźnik porowatości –  $e$  [-]

# MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

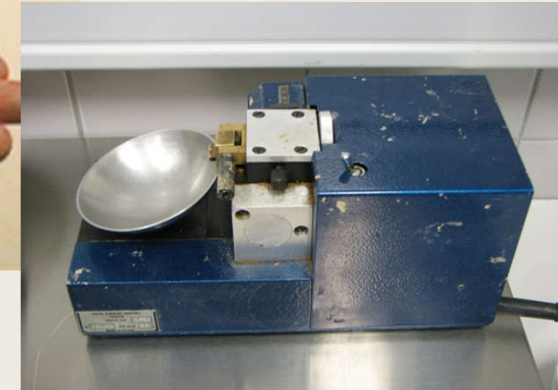
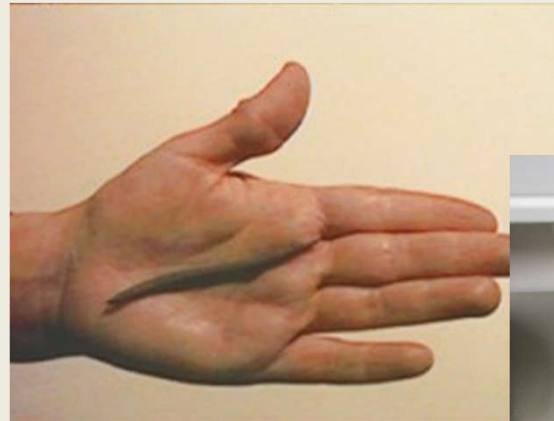
- wilgotność optymalna –  $w_{opt}$  [%]
- maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego –  $\rho_{ds}$  [g/cm<sup>3</sup>]
- skład granulometryczny – ...



## MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

- granica plastyczności –  $w_p$  [-]

- granica płynności –  $w_l$  [-]



- wskaźnik plastyczności –  $I_p$  [-]

$$I_p = w_l - w_p$$

- stopień plastyczności –  $I_L$  [-]

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p}$$

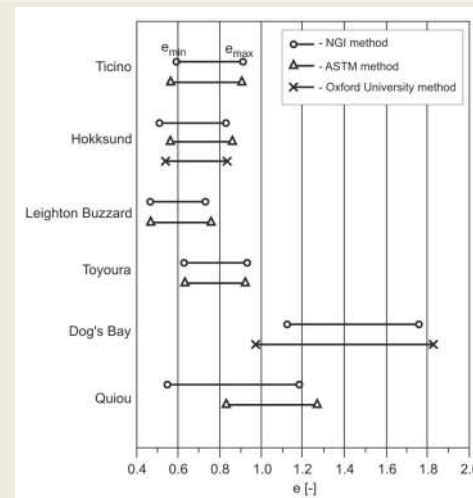
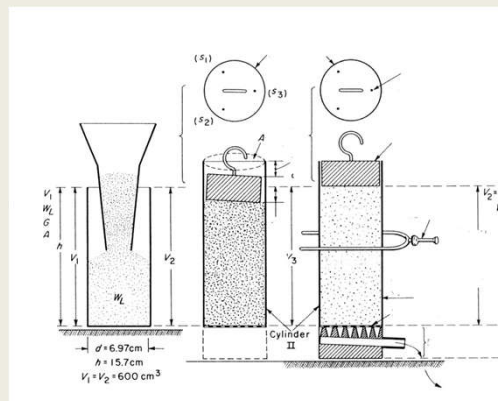
- wskaźnik konsystencji –  $I_C$  [-]

$$I_C = 1 - I_L$$

# MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

- stopień zagęszczenia –  $I_D$  [-]

$$I_D = \frac{e_{\max} - e_n}{e_{\max} - e_{\min}}$$



- wskaźnik aktywności koloidalnej Skemptona –  $A$  [-]

$$A = I_p / f_i$$

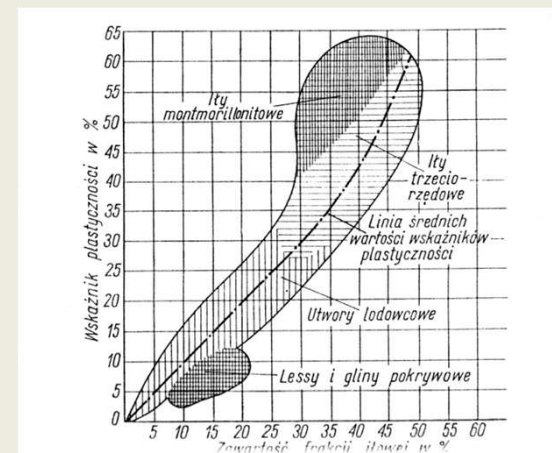
- wskaźnik wilgotności –  $S_r$  [-]

$$S_r = w \rho_s / 100e$$

$0,0 < S_r \leq 0,4$  suchy

$0,4 < S_r \leq 0,8$  wilgotny

$0,8 < S_r \leq 1,0$  mokry





## MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

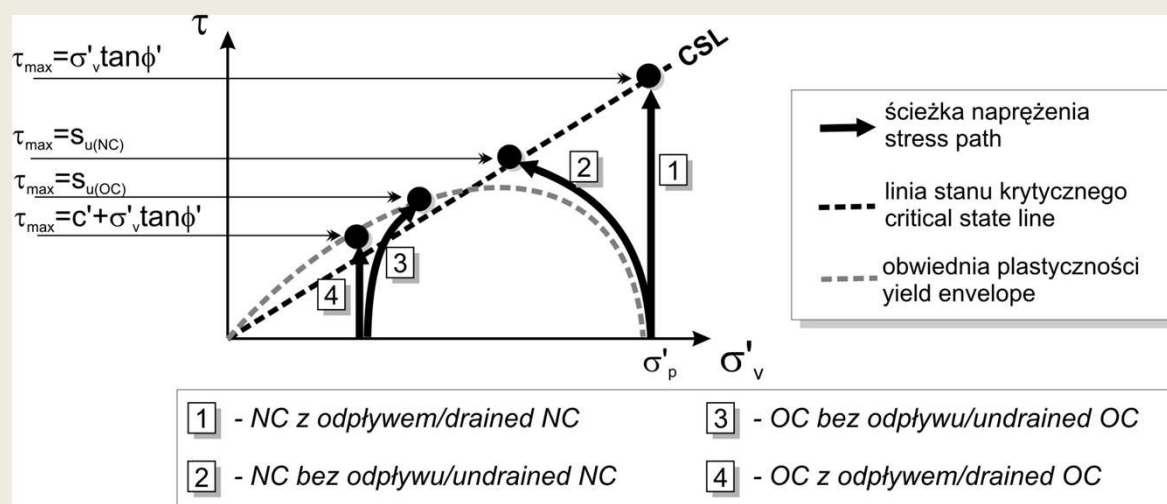
- stan naprężenia –  $\sigma$  [kPa]

- kąt tarcia wewnętrznego –  $\phi'$  [°]

- spójność –  $c'$  [kPa]



- wytrzymałość na ścinanie bez odpływu –  $s_u$  [kPa]



## MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry

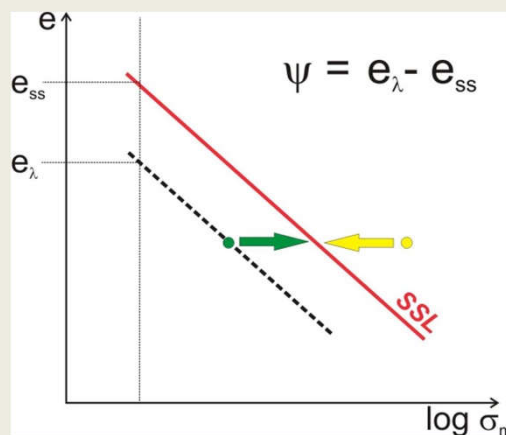
- moduły odkształcenia – ... [MPa]
- współczynnik Poissona –  $\nu$  [-]
- wskaźnik przekonsolidowania (prekonsolidacji) – OCR [-]

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{p(y)}}{\sigma'_{v0}}$$

- współczynnik parcia spoczynkowego –  $K_0$  [-]

$$K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}}$$

- parametr stanu –  $\psi$  [-]



**MG: INŻYNIERSKI OPIS LITOSFERY - parametry**

$$\frac{s_u}{\sigma'_f} = f(\phi)$$



$$\frac{s_u}{\sigma'_m} = f(\phi, OCR)$$



$$\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} = f(\phi, OCR^n)$$

MG:

# STAN NAPRĘŻENIA

**NAPRĘŻENIE** – graniczna wartość stosunku siły działającej na nieskończenie mały element pola przekroju ciała do wymiaru tego pola.

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A}$$

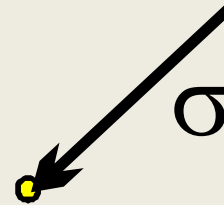
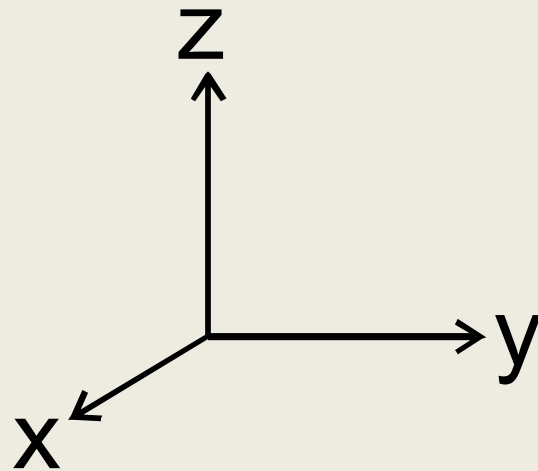
Naprężenia w punkcie – czysto teoretyczne;



Naprężenie na powierzchni, którą charakteryzuje.

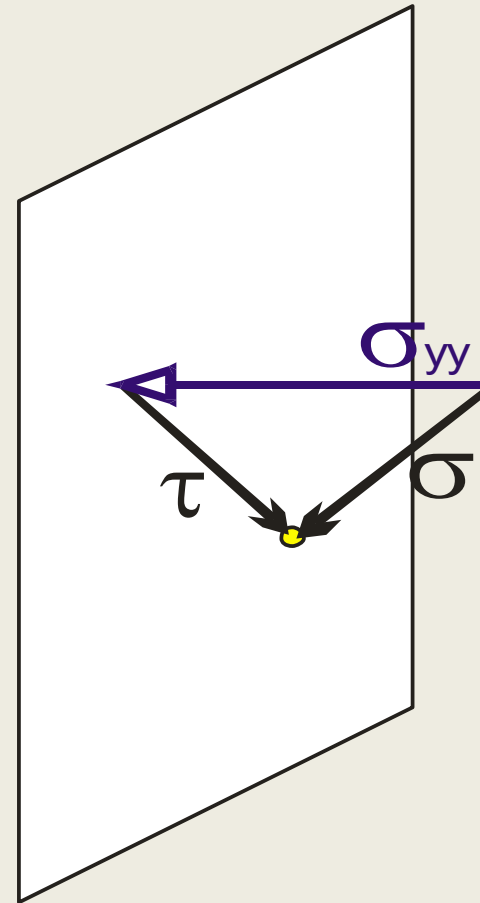
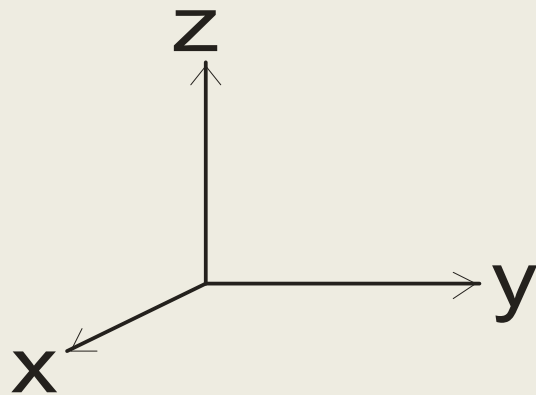
MG: STAN NAPRĘŻENIA

W PUNKCIE



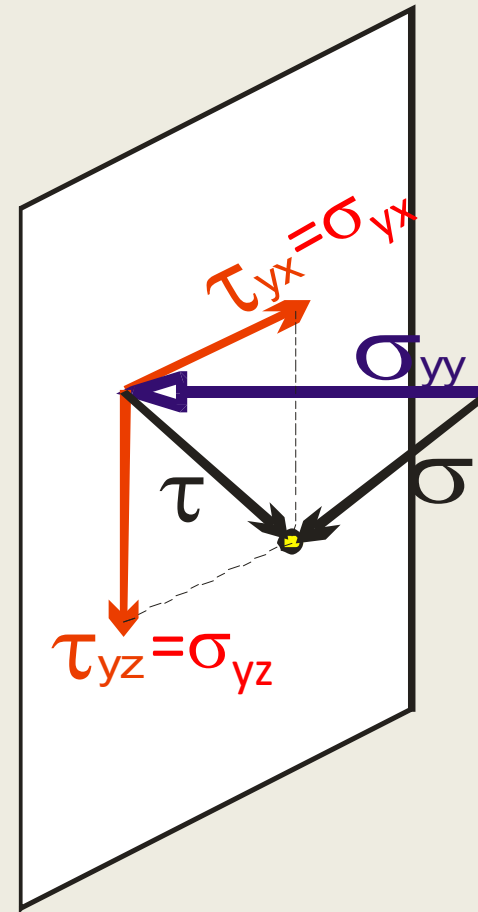
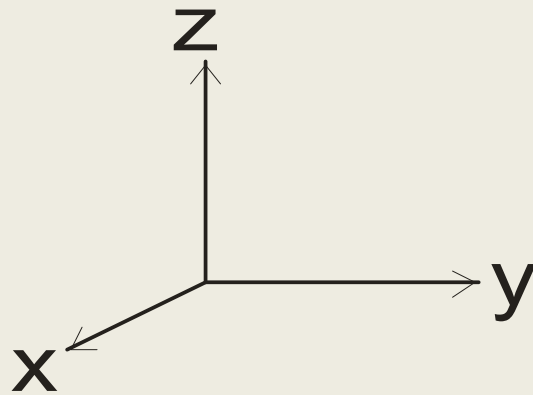
# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NA PŁASZCZYŹNIE



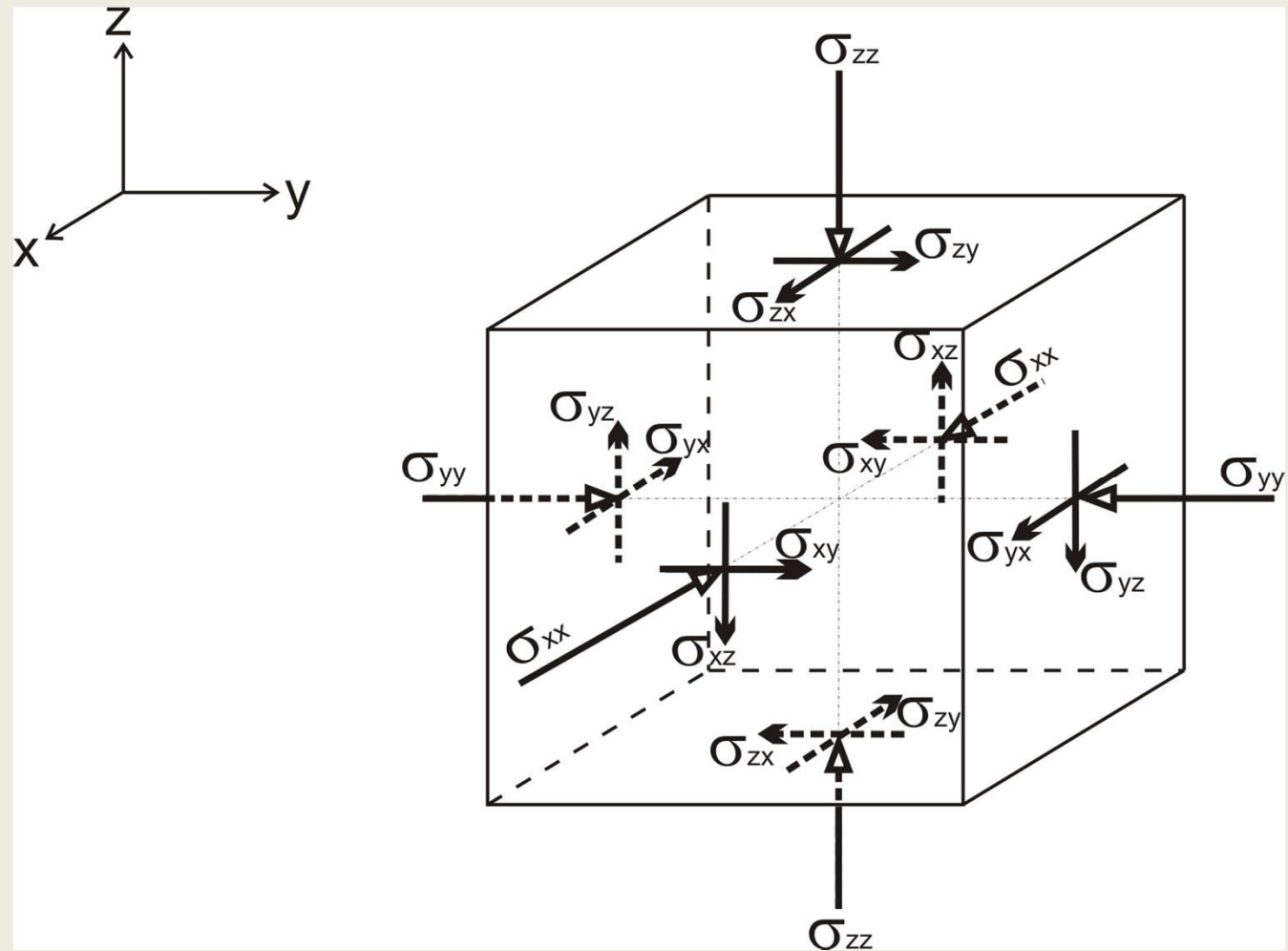
# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NA PŁASZCZYŹNIE



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## W PRZESTRZENI





MG: STAN NAPRĘŻENIA

W PRZESTRZENI

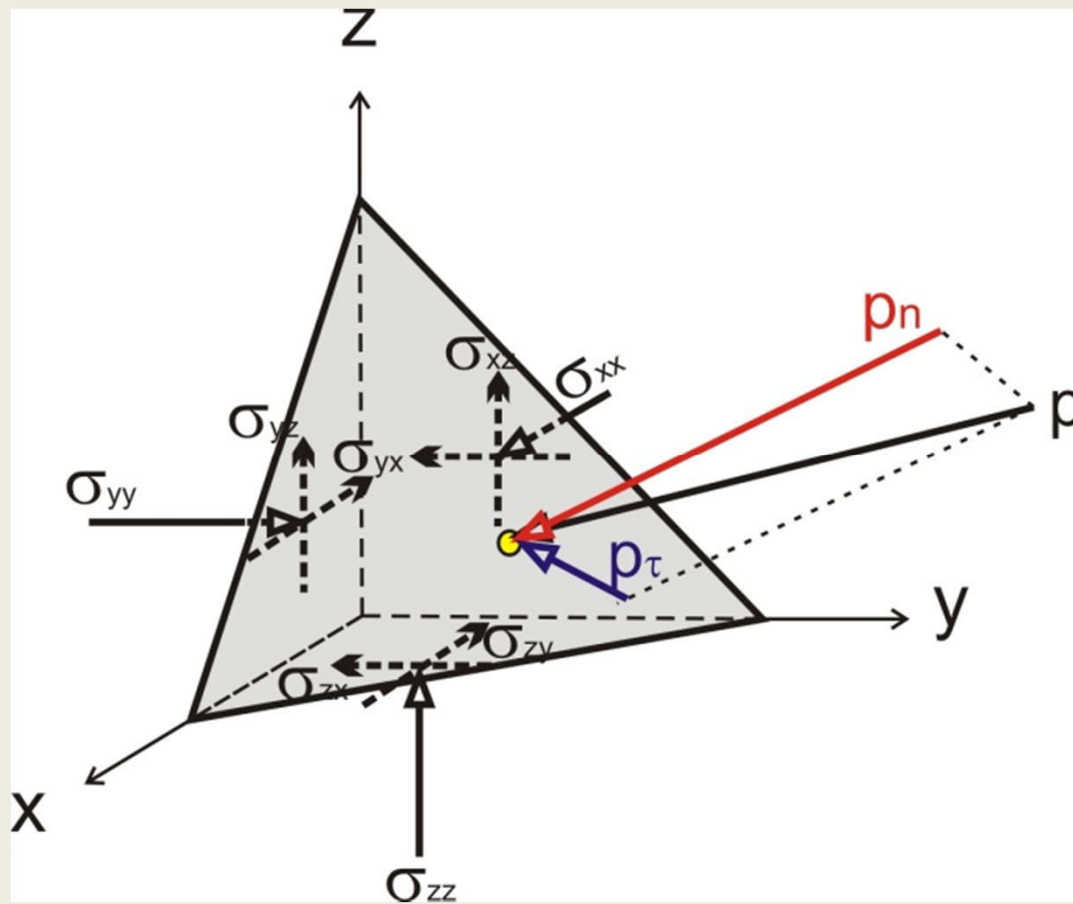


TENSOR  
NAPRĘŻENIA

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA

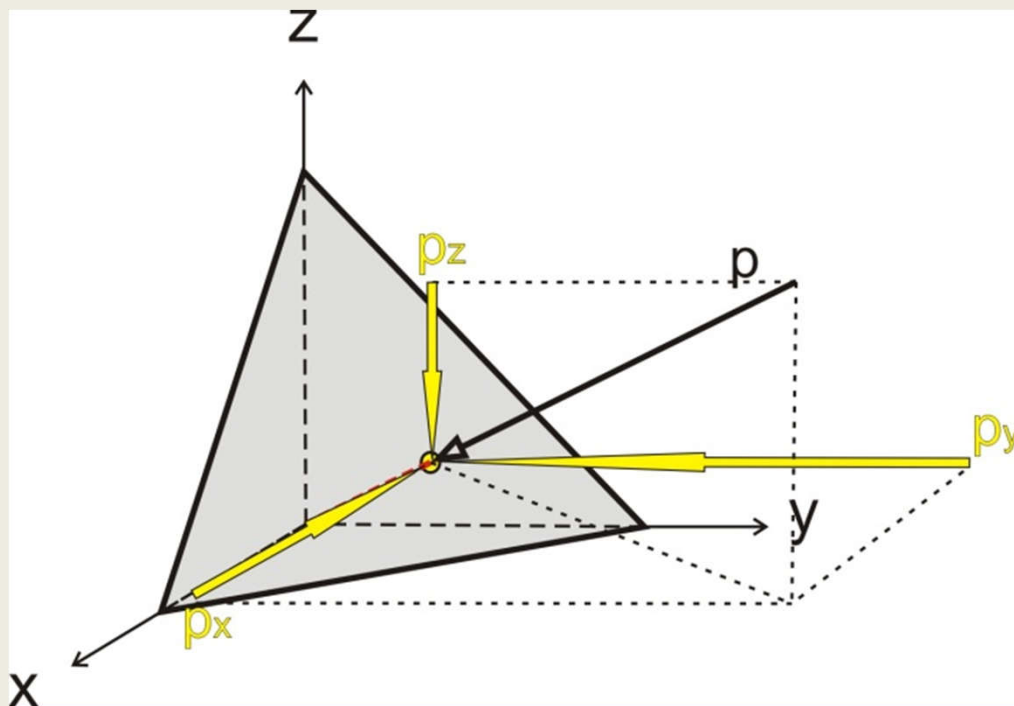
## NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE



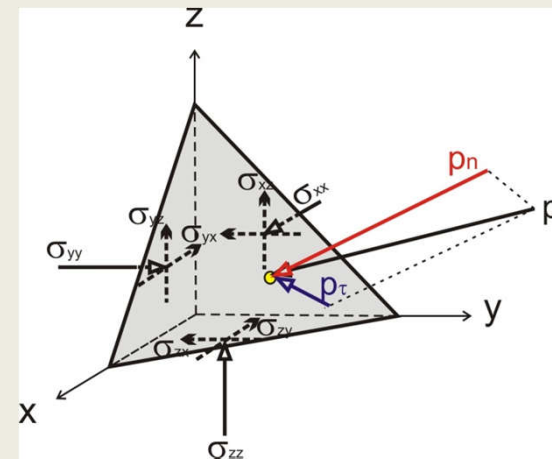
$$p^2 = p_n^2 + p_\tau^2 \quad (1)$$

## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### NA DOWOLNEJ PŁASZCZYZNIE



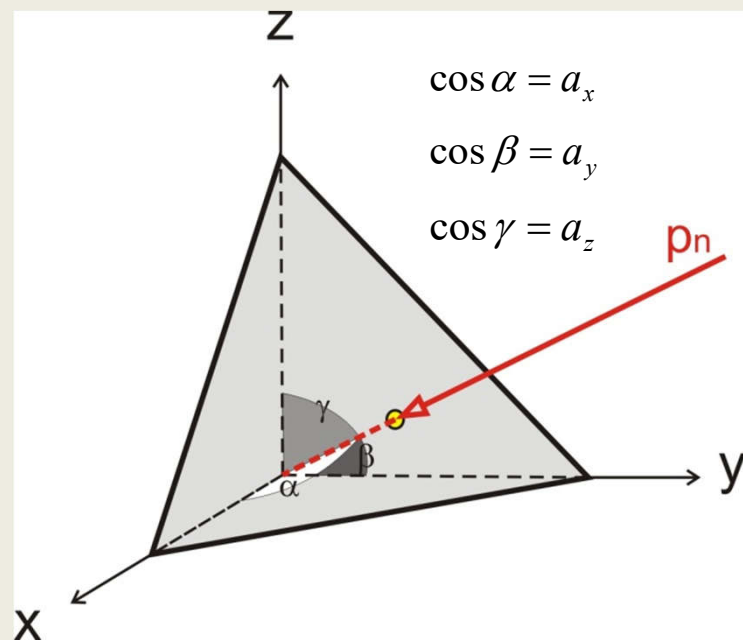
$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 \quad (2)$$



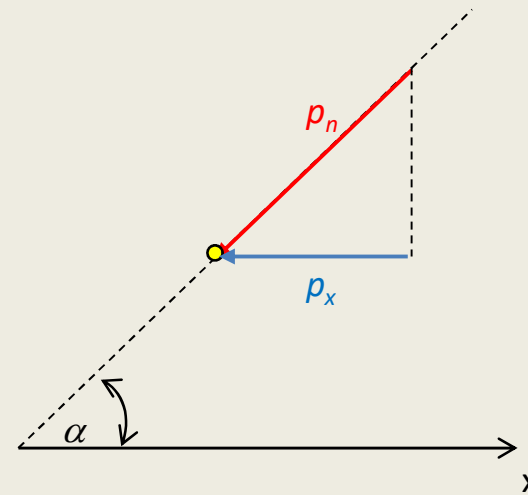
$$p_i = \sum a_j \cdot \sigma_{ij} \quad (3)$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE



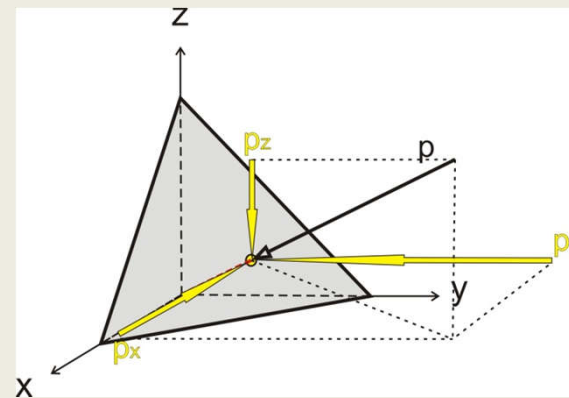
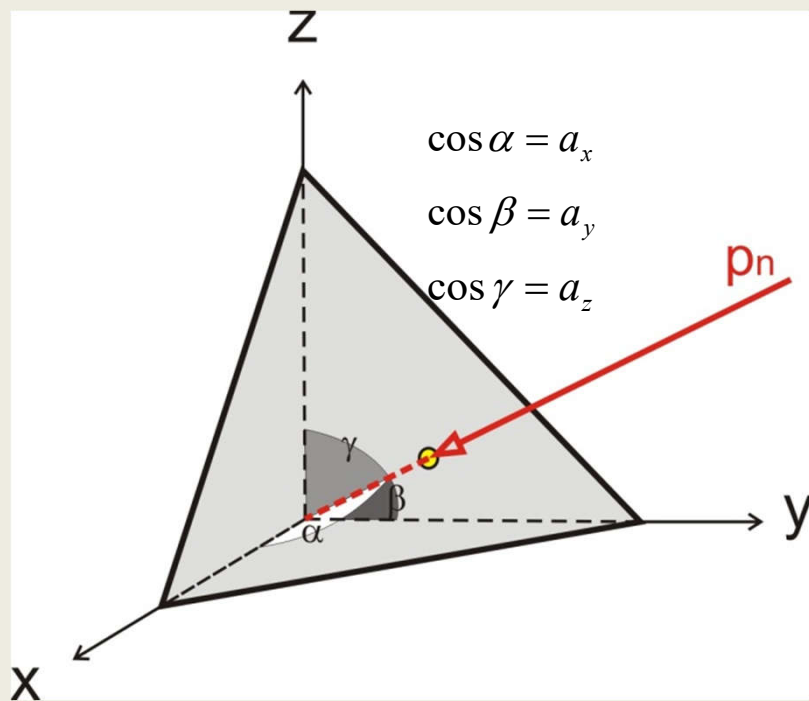
$$p_i = \sum a_j \cdot \sigma_{ij} \quad (3)$$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NA DOWOLNEJ PŁASZCZYZNIE

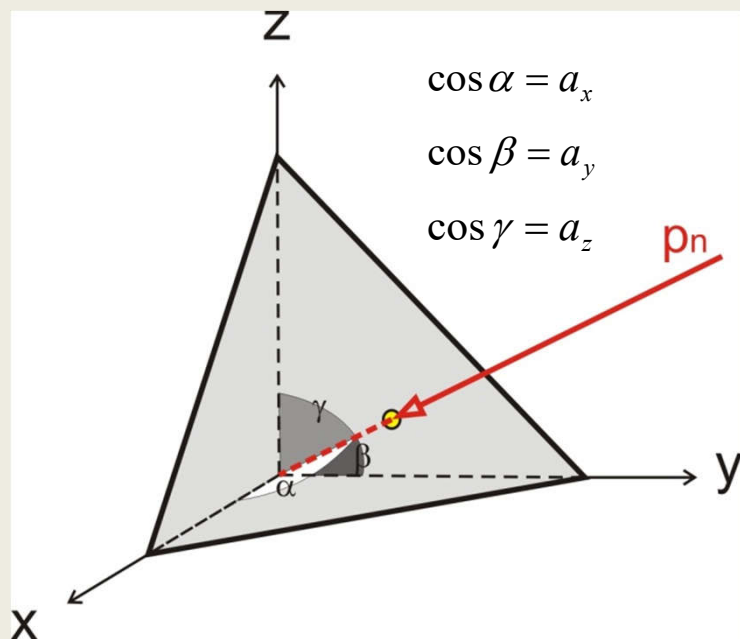
$$p_i = \sum a_j \cdot \sigma_{ij} \quad (3)$$



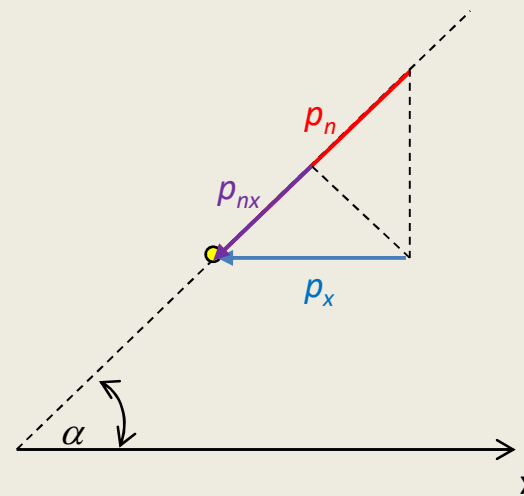
$$\left. \begin{aligned} p_x &= a_x \cdot \sigma_{xx} + a_y \cdot \sigma_{xy} + a_z \cdot \sigma_{xz} \\ p_y &= a_y \cdot \sigma_{yy} + a_x \cdot \sigma_{yx} + a_z \cdot \sigma_{yz} \\ p_z &= a_z \cdot \sigma_{zz} + a_x \cdot \sigma_{zx} + a_y \cdot \sigma_{zy} \end{aligned} \right\} (3.1)$$

## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE



$$p_n = p_{nx} + p_{ny} + p_{nz} \quad (4)$$



$$\begin{aligned}p_{nx} &= a_x \cdot p_x \\ p_{ny} &= a_y \cdot p_y \\ p_{nz} &= a_z \cdot p_z\end{aligned} \quad (5)$$

## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE

(4)

$$p_n = p_{nx} + p_{ny} + p_{nz}$$

+

(5)

$$p_{nx} = a_x \cdot p_x$$

$$p_{ny} = a_y \cdot p_y$$

$$p_{nz} = a_z \cdot p_z$$

+

3.1

$$p_x = a_x \cdot \sigma_{xx} + a_y \cdot \sigma_{xy} + a_z \cdot \sigma_{xz}$$

$$p_y = a_y \cdot \sigma_{yy} + a_x \cdot \sigma_{yx} + a_z \cdot \sigma_{yz}$$

$$p_z = a_z \cdot \sigma_{zz} + a_x \cdot \sigma_{zx} + a_y \cdot \sigma_{zy}$$

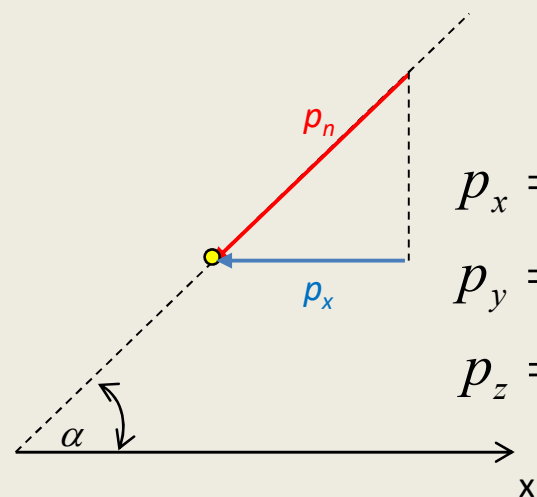
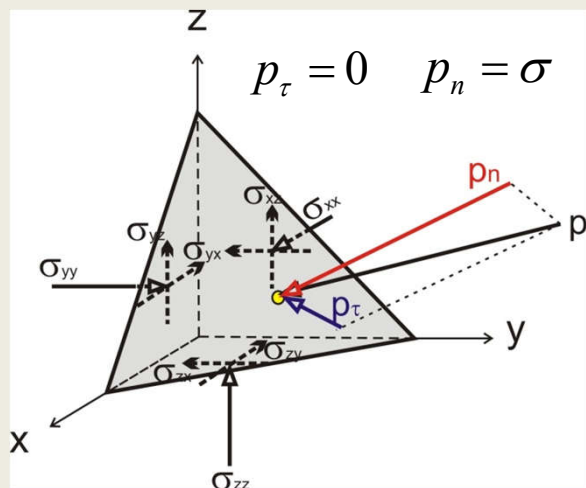
$$p_n = a_x^2 \sigma_{xx} + a_y^2 \sigma_{yy} + a_z^2 \sigma_{zz} + 2a_x a_y \sigma_{xy} + 2a_z a_y \sigma_{zy} + 2a_x a_z \sigma_{xz}$$

$$p_\tau^2 = p^2 - p_n^2$$

(2)

# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

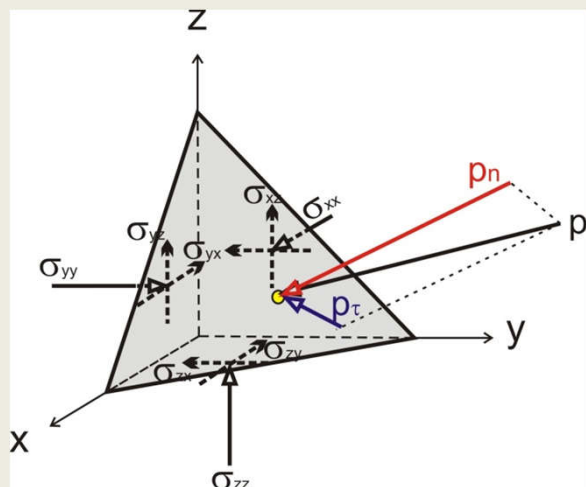


$$p_x = a_x \cdot \sigma$$

$$p_y = a_y \cdot \sigma$$

$$p_z = a_z \cdot \sigma$$

(6)



$$p_x = a_x \cdot \sigma_{xx} + a_y \cdot \sigma_{xy} + a_z \cdot \sigma_{xz}$$

$$p_y = a_y \cdot \sigma_{yy} + a_x \cdot \sigma_{yx} + a_z \cdot \sigma_{yz}$$

$$p_z = a_z \cdot \sigma_{zz} + a_x \cdot \sigma_{zx} + a_y \cdot \sigma_{zy}$$

(3.1)



NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

(6) + (3.1)

$$0 = a_x (\sigma_{xx} - \sigma) + a_y \sigma_{xy} + a_z \sigma_{xz}$$

$$0 = a_x \sigma_{yx} + a_y (\sigma_{yy} - \sigma) + a_z \sigma_{yz}$$

$$0 = a_x \sigma_{zx} + a_y \sigma_{zy} + a_z (\sigma_{zz} - \sigma)$$

NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

(6) + (3.1)

$$0 = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma \end{bmatrix}$$

NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

(6) + (3.1)

$$0 = \sigma^3 - I_1 \sigma^2 - I_2 \sigma - I_3$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

$$I_2 = \sigma_{xx} \sigma_{yy} + \sigma_{yy} \sigma_{zz} + \sigma_{xx} \sigma_{zz} - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{yz}^2 - \sigma_{xz}^2$$

$$I_3 = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

$$(6) + (3.1)$$

$$0 = \sigma^3 - I_1\sigma^2 - I_2\sigma - I_3$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$$

## MG: STAN NAPRĘŻENIA

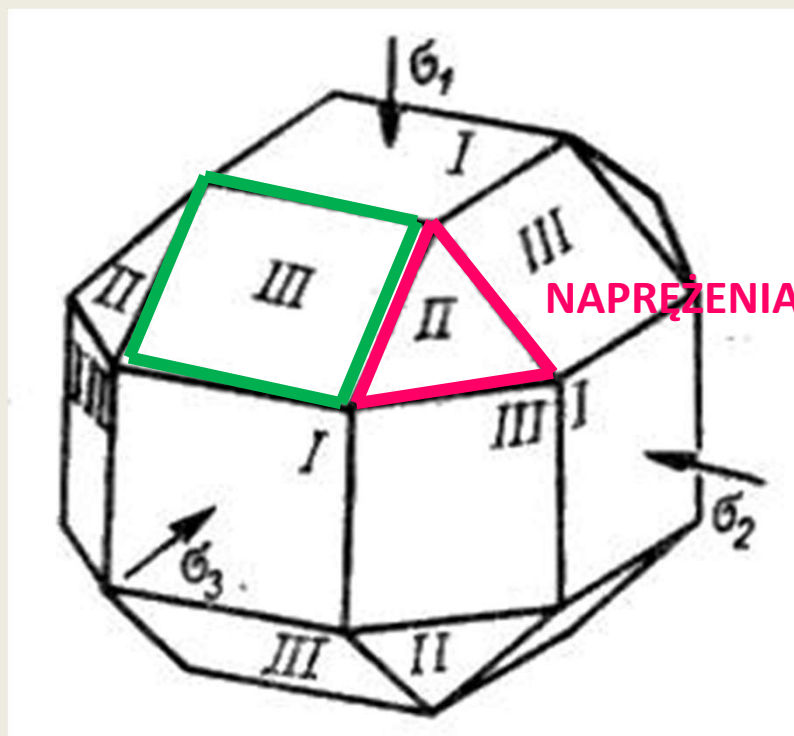
### NAPRĘŻENIA W PŁASZCZYŹNIE DEWIACYJNEJ I OKTAEDRYCZNEJ

#### DEWIATOR NAPRĘŻENIA

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$



## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

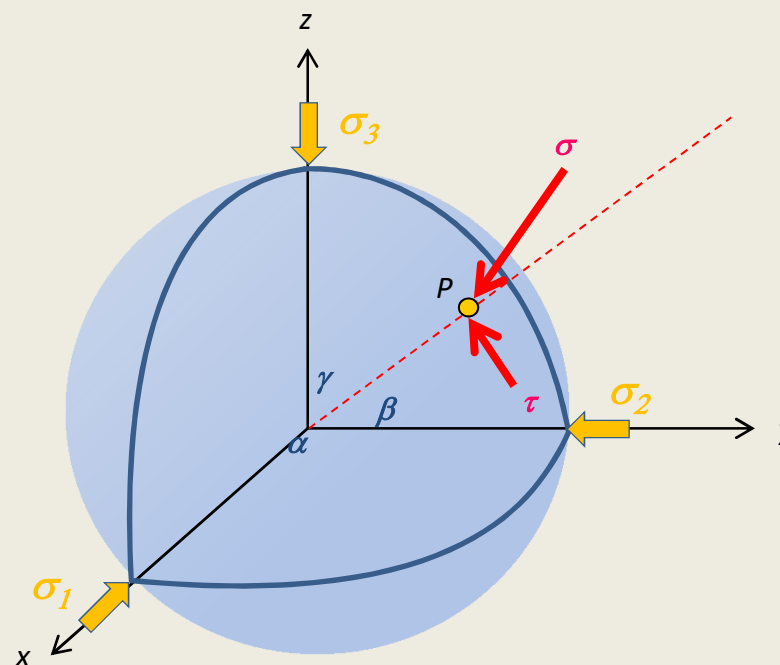
$$p_n = a_x^2 \sigma_{xx} + a_y^2 \sigma_{yy} + a_z^2 \sigma_{zz} + 2a_x a_y \sigma_{xy} + 2a_z a_y \sigma_{zy} + 2a_x a_z \sigma_{xz}$$

$$p_\tau^2 = p^2 - p_n^2$$

NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

$$\sigma = a_x^2 \sigma_1 + a_y^2 \sigma_2 + a_z^2 \sigma_3$$

$$\tau^2 = a_x^2 \sigma_1^2 + a_y^2 \sigma_2^2 + a_z^2 \sigma_3^2 - \sigma^2$$



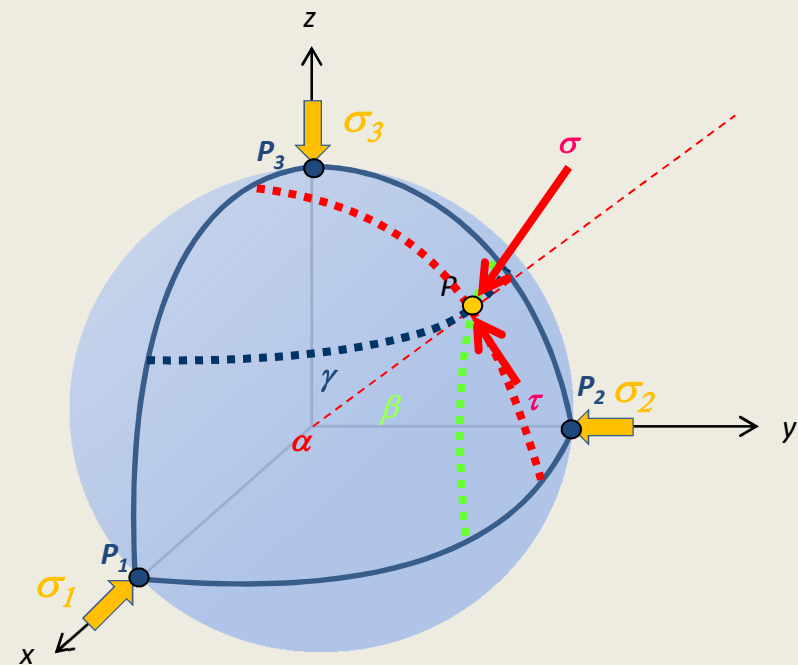
# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

$\gamma = \text{const}$

$\beta = \text{const}$

$\alpha = \text{const}$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

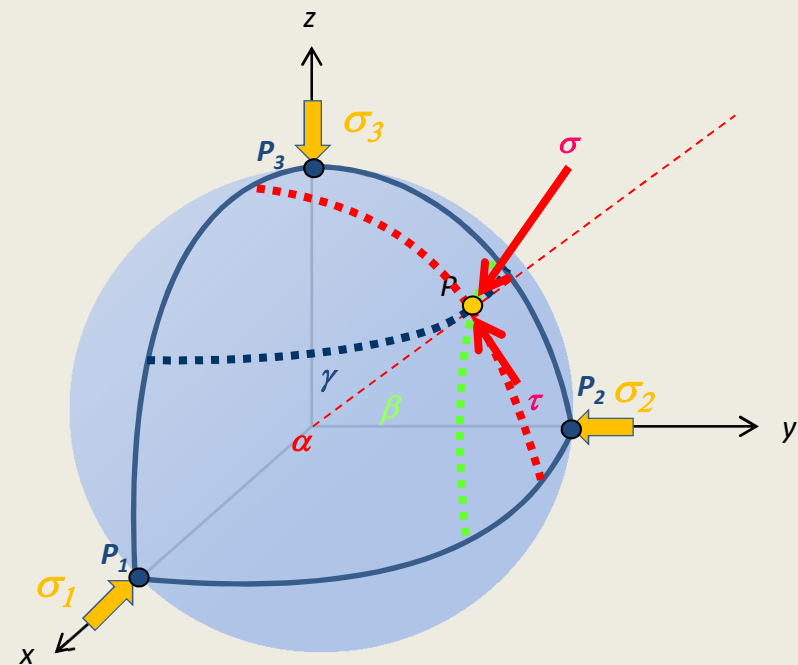
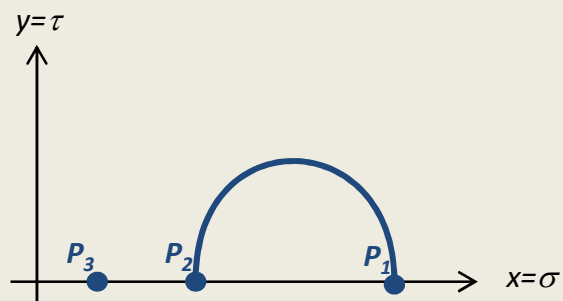
$$\gamma = \text{const}$$

$$\beta = \text{const}$$

$$\alpha = \text{const}$$



$$\gamma = 90^\circ$$





# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

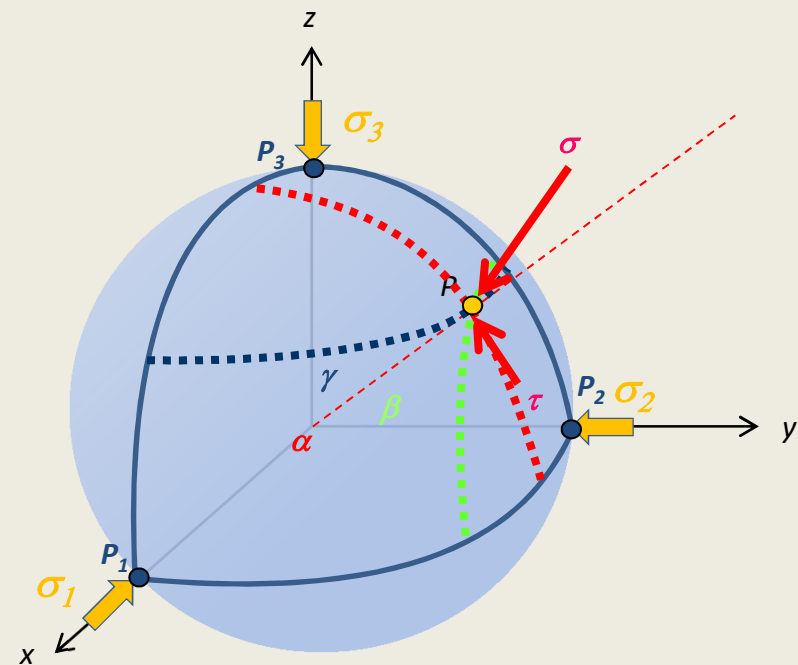
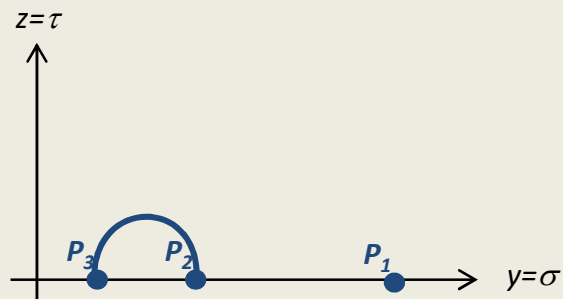
$$\gamma = \text{const}$$

$$\beta = \text{const}$$

$$\alpha = \text{const}$$



$$\alpha = 90^\circ$$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

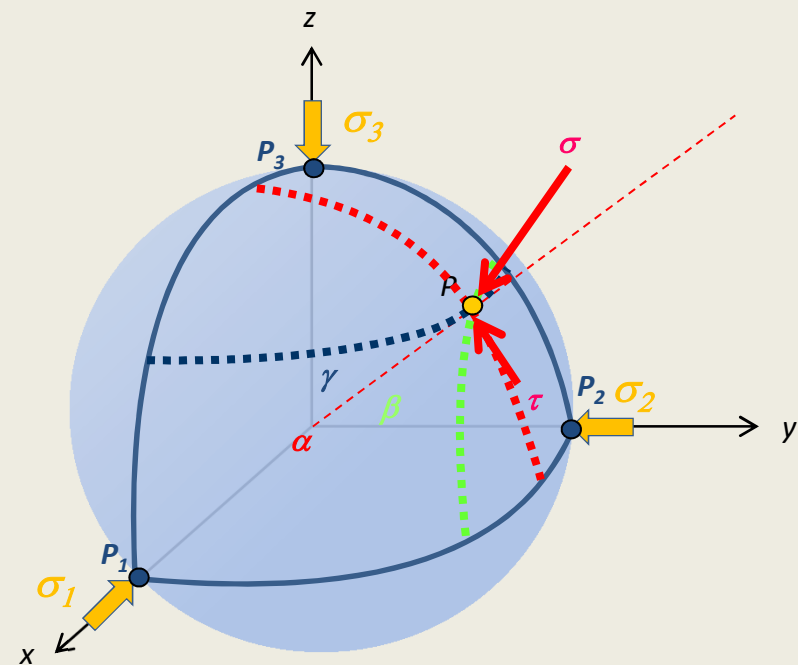
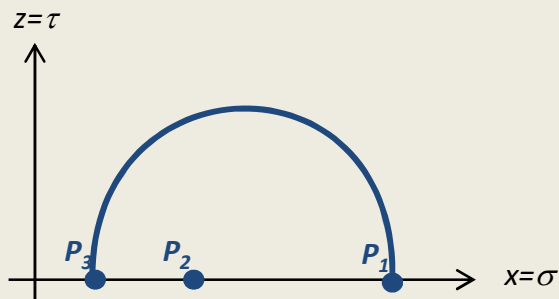
$$\gamma = \text{const}$$

$$\beta = \text{const}$$

$$\alpha = \text{const}$$



$$\beta = 90^\circ$$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

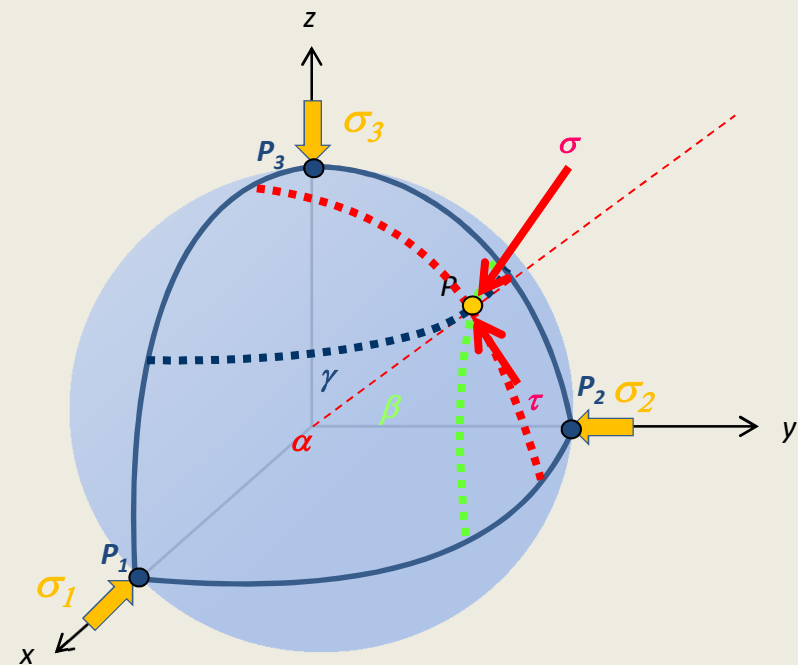
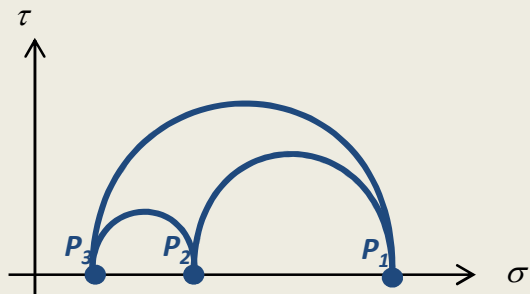
$\gamma = \text{const}$

$\beta = \text{const}$

$\alpha = \text{const}$



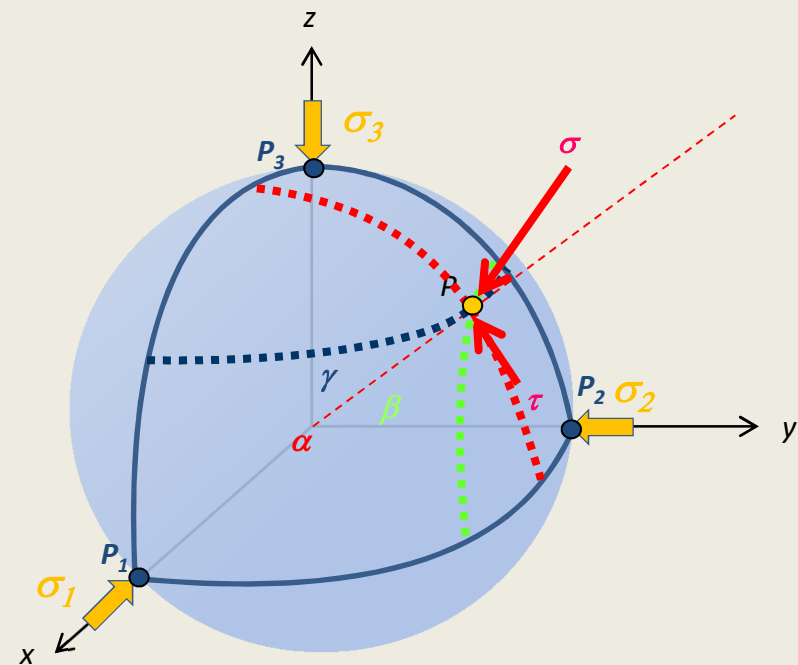
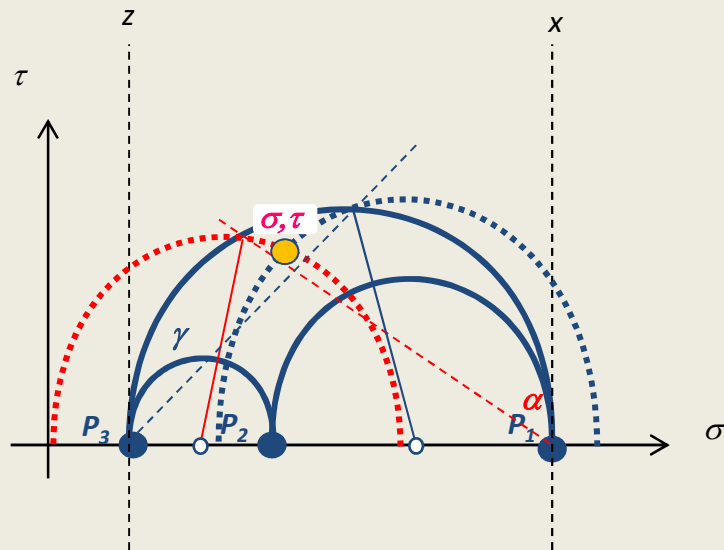
$\alpha, \beta, \gamma = 90^\circ$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

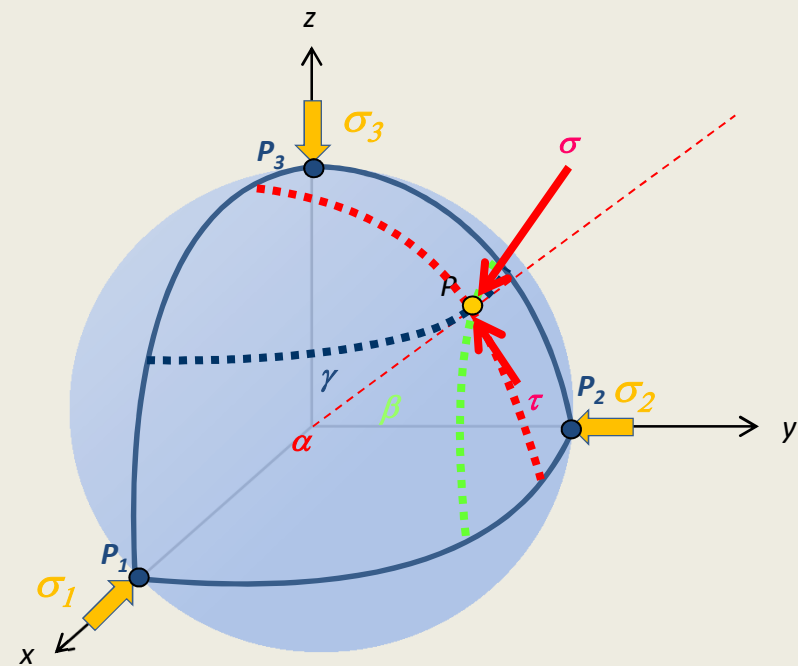
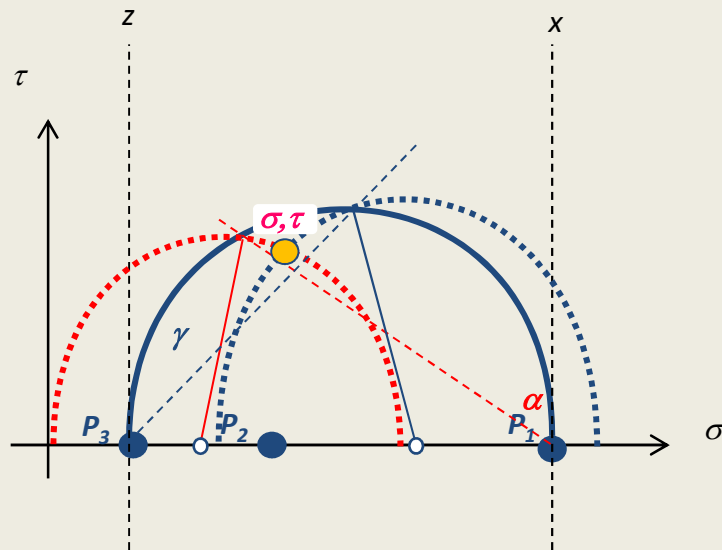
$\alpha = \text{const}$   $\gamma = \text{const}$



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## NAPRĘŻENIA NA DOWOLNEJ PŁASZCZYŹNIE - KOŁA MOHRA

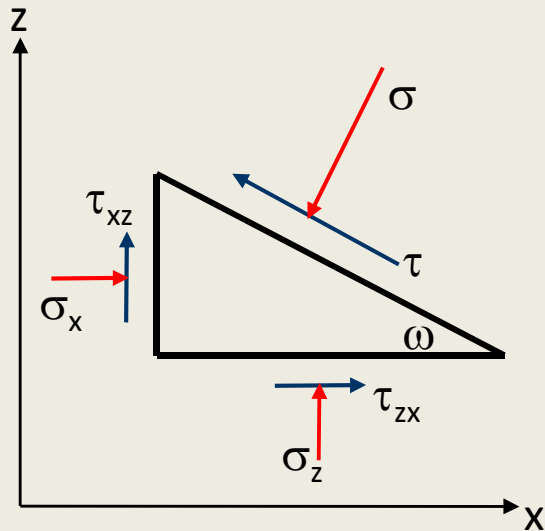
$$\alpha = \text{const} \quad \gamma = \text{const}$$



## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### KOŁA MOHRA NA PŁASZCZYŹNIE

$$\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$$



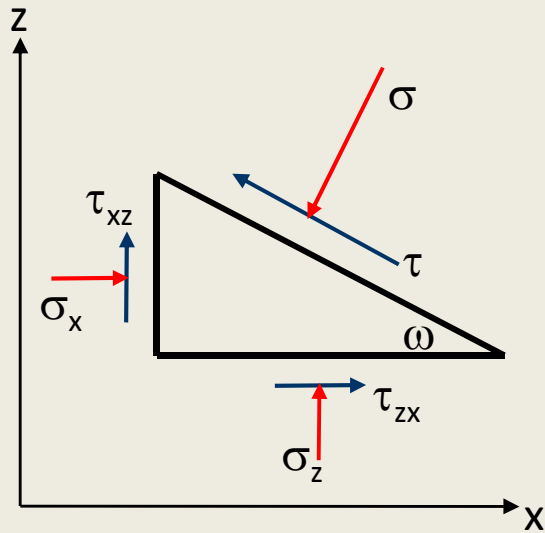
$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\omega - \tau_{zx} \sin 2\omega$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\omega + \tau_{zx} \cos 2\omega$$

## MG: STAN NAPRĘŻENIA

### KOŁA MOHRA NA PŁASZCZYŹNIE

$$\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$$



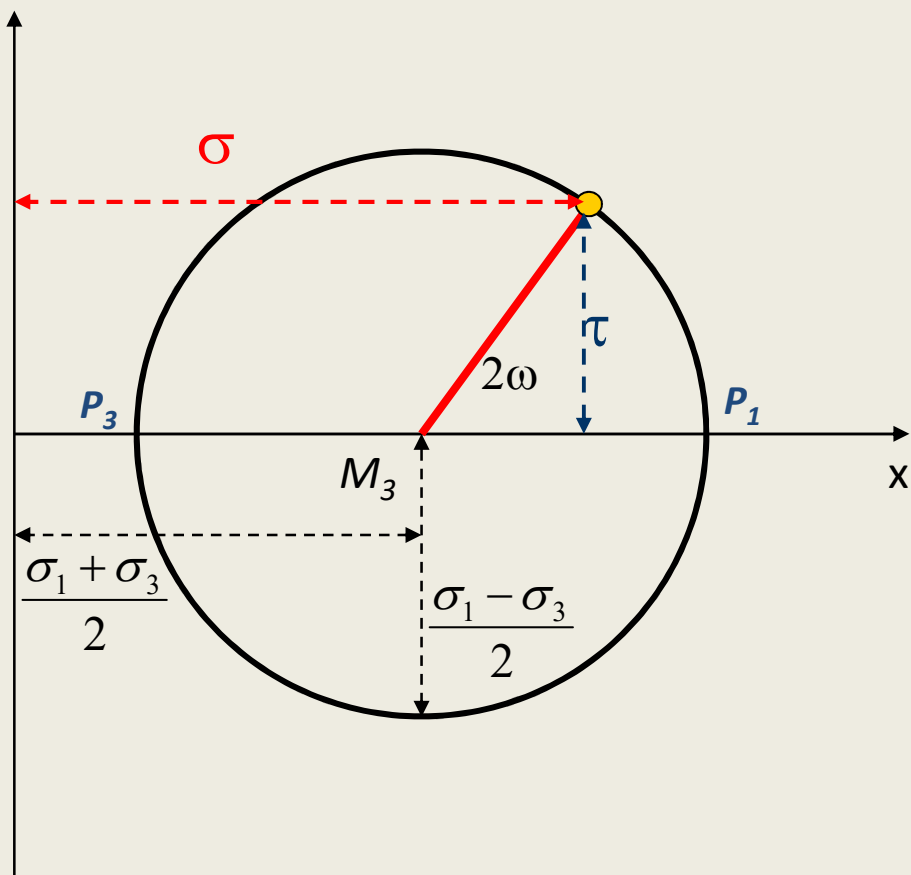
$$\sigma_x = \sigma_1, \sigma_z = \sigma_3$$

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\omega$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\omega$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA

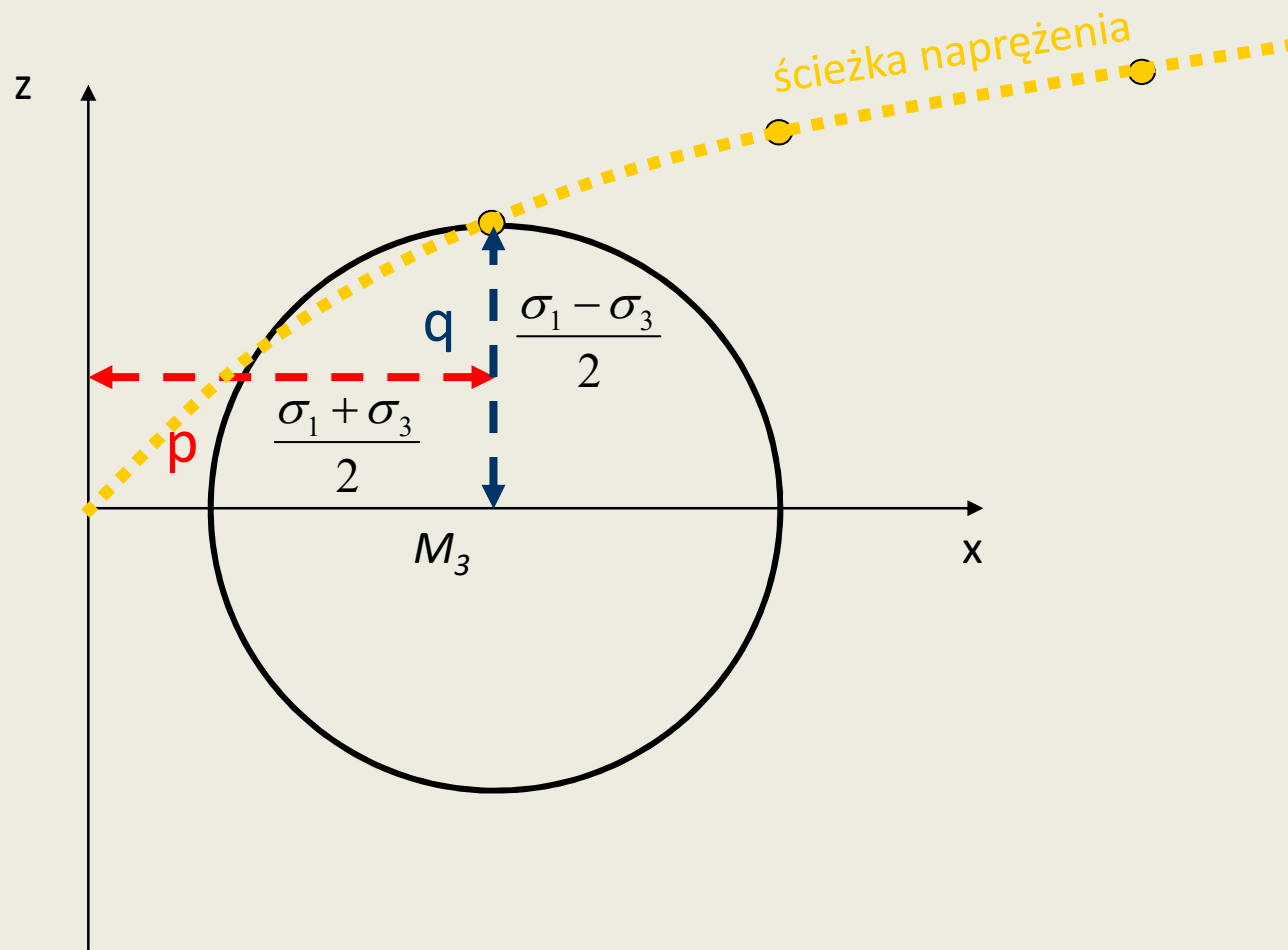
## KOŁA MOHRA NA PŁASZCZYŹNIE





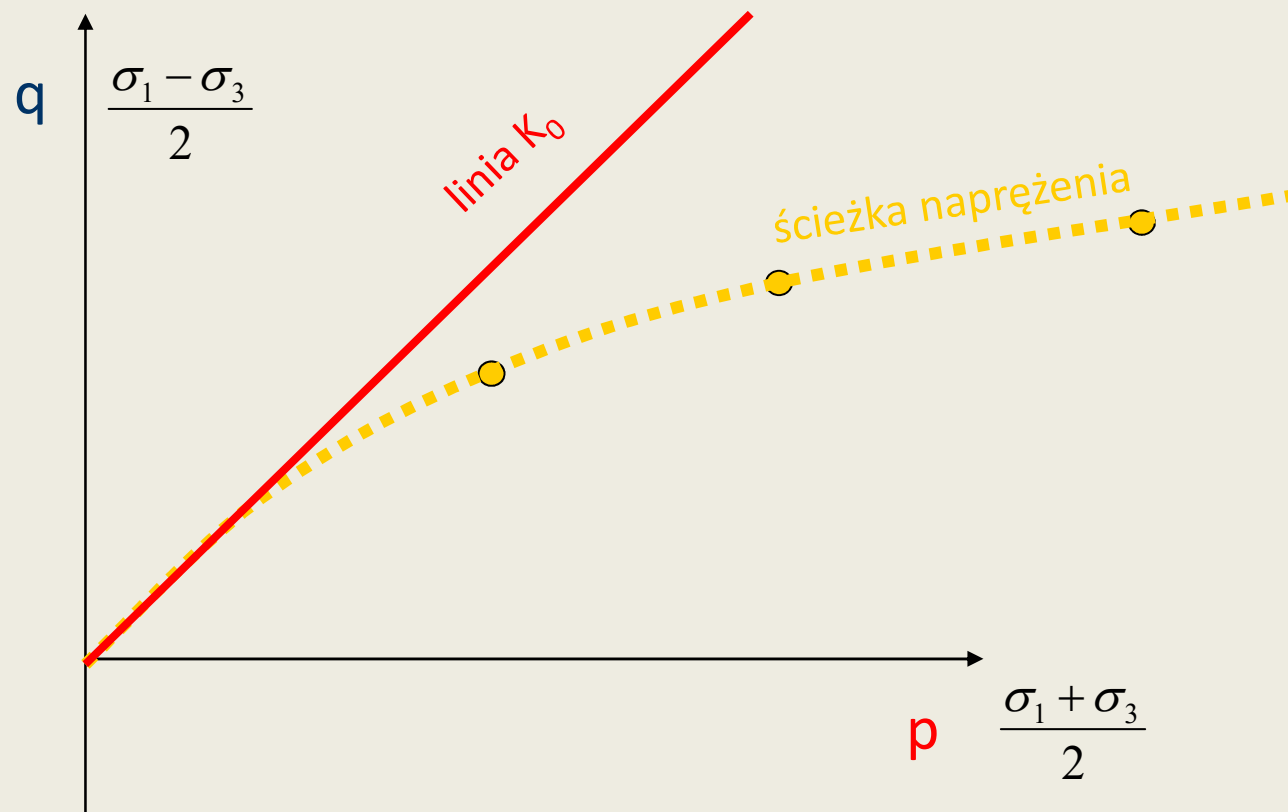
# MG: STAN NAPRĘŻENIA

## KOŁA MOHRA NA PŁASZCZYŹNIE



# MG: STAN NAPRĘŻENIA

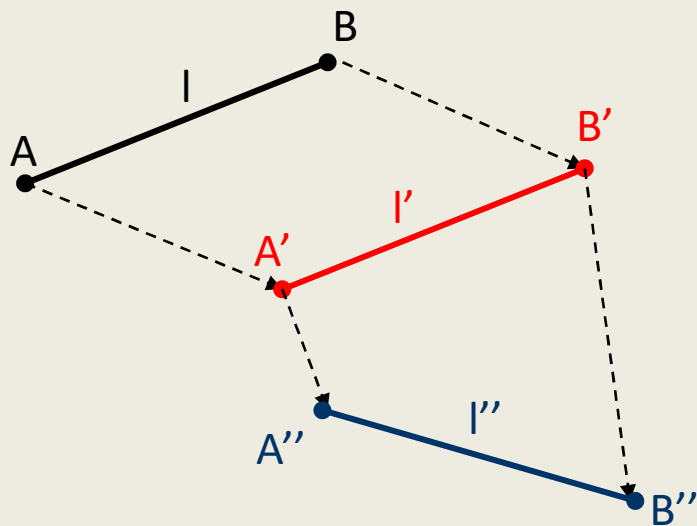
## KOŁA MOHRA NA PŁASZCZYŹNIE



MG:

# STAN ODKSZTAŁCENIA

## ZAŁOŻENIA



$$A \rightarrow A'$$

$$B \rightarrow B'$$

$$AB \parallel A'B'$$

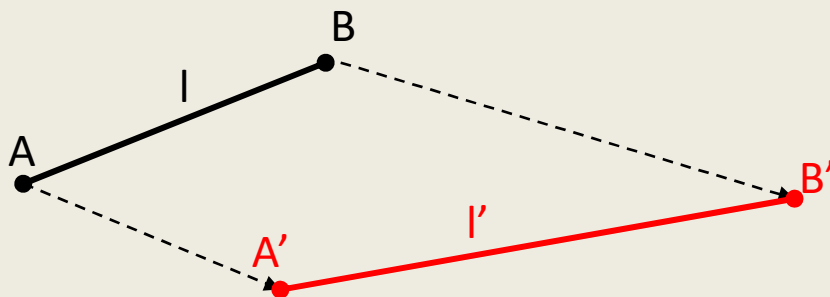
$$l = l' = l''$$



przesunięcie i obrót

# MG: STAN ODKSZTAŁCENIA

## ZAŁOŻENIA



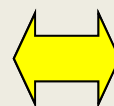
$$A \rightarrow A'$$
$$B \rightarrow B'$$

$$l \neq l'$$



## ODKSZTAŁCENIE

$$\sigma = \text{const.}$$



$$u_x(x, y, z)$$

$$u_y(x, y, z)$$

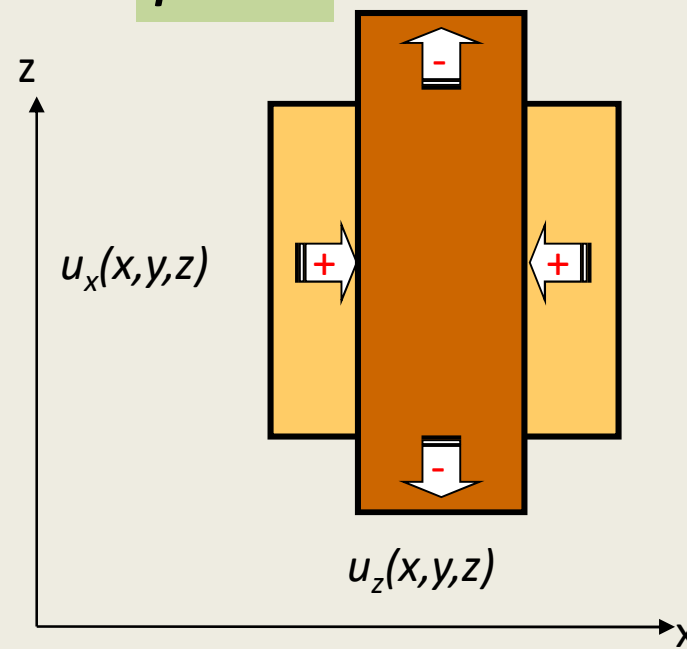
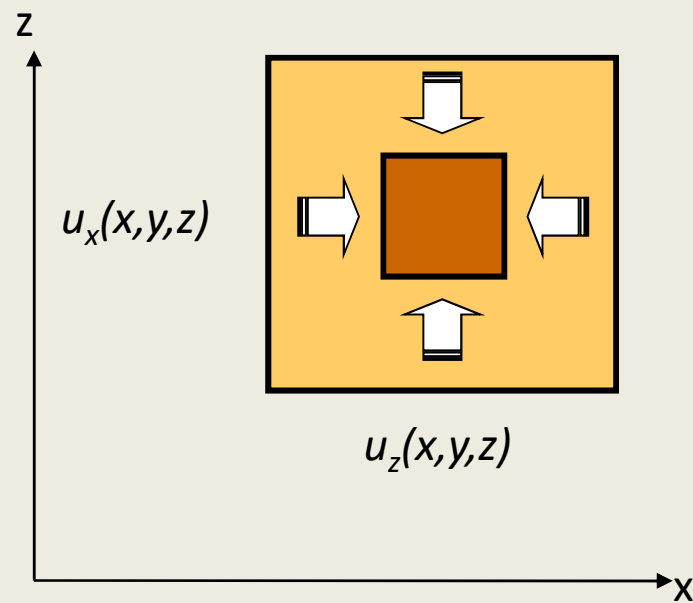
$$u_z(x, y, z)$$

RODZAJE

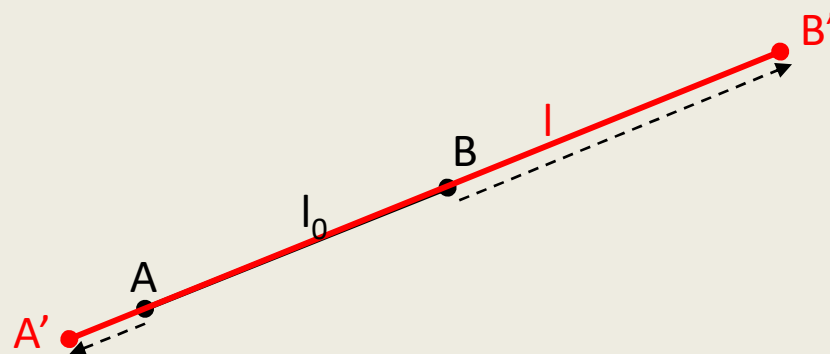
ODKSZTAŁCENIE

objętości

postaci



MIARA ODKSZTAŁCENIA LINIOWEGO



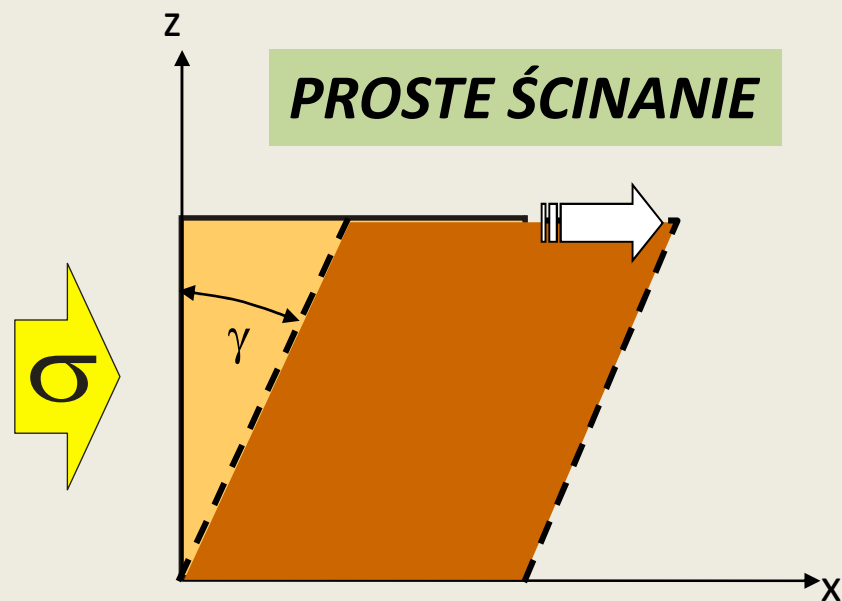
$$\varepsilon_l = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right)^2 + \dots$$



$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0}$$

MG: STAN ODKSZTAŁCENIA

MIARA ODKSZTAŁCENIA POSTACI



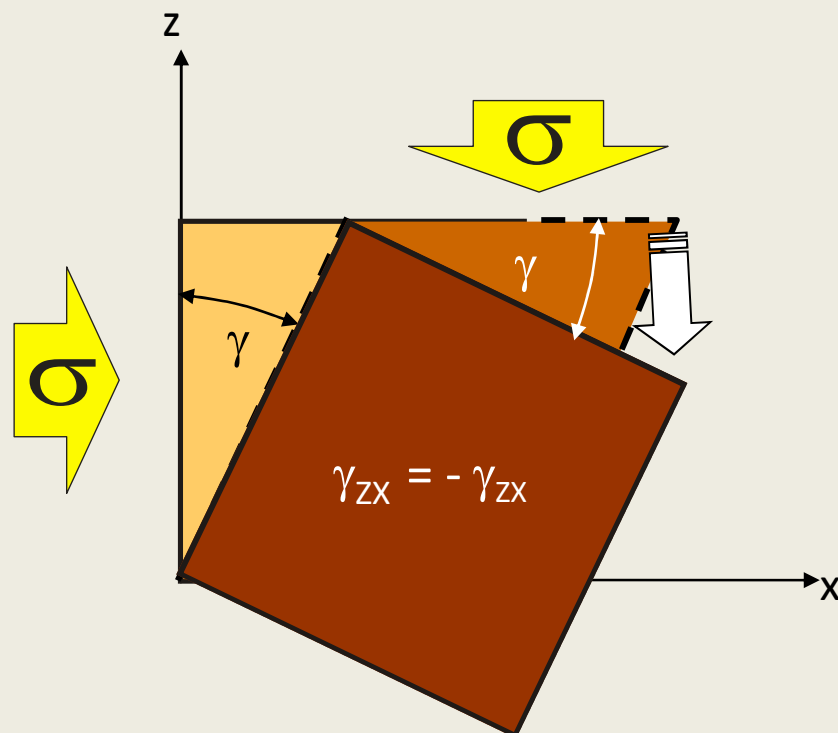
$$\operatorname{tg}\gamma \approx \gamma$$



$$\gamma_{zx} = \frac{du_x}{dz}$$

## MG: STAN ODKSZTAŁCENIA

### MIARA ODKSZTAŁCENIA POSTACI

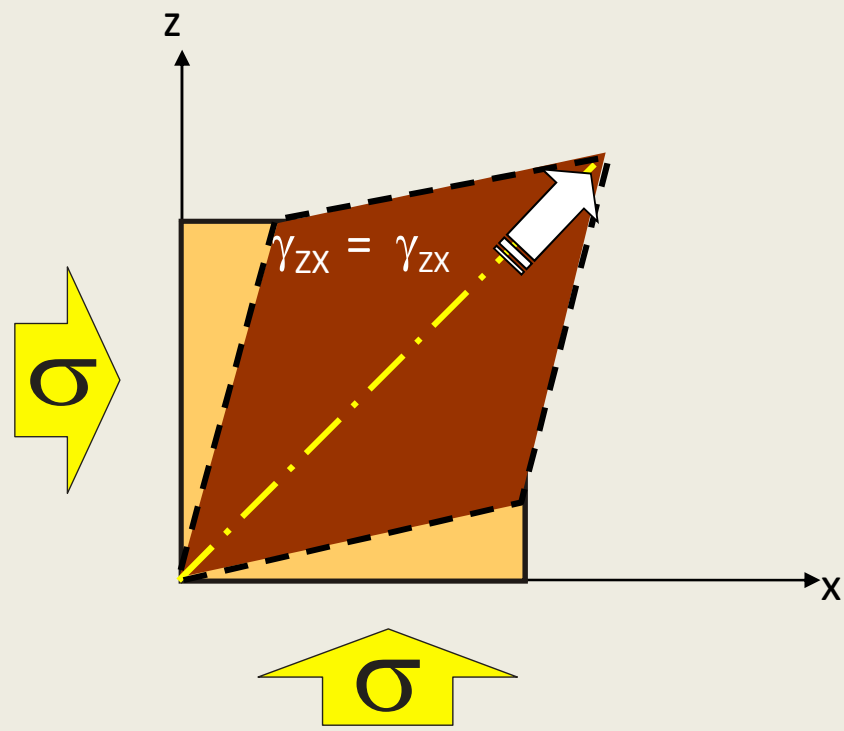


$$\varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} (\gamma_{xz} + \gamma_{zx})$$



**MG: STAN ODKSZTAŁCENIA**

**MIARA ODKSZTAŁCENIA POSTACI**



**CZYSTE ŚCINANIE**

TENSOR ODKSZTAŁCENIA

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right); \quad \varepsilon_{zy} = \dots$$

TENSOR ODKSZTAŁCENIA – ODKSZTAŁCENIA GŁÓWNE

$$0 = \varepsilon^3 - J_1 \varepsilon^2 - J_2 \varepsilon - J_3$$

$$J_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$J_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_3$$

$$J_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$$

MG:

## STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

$$\varepsilon_{kl} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \oplus \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$



$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

CIAŁO IZOTROPOWE



$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kl}\delta_{ij}$$



stałe Lamego

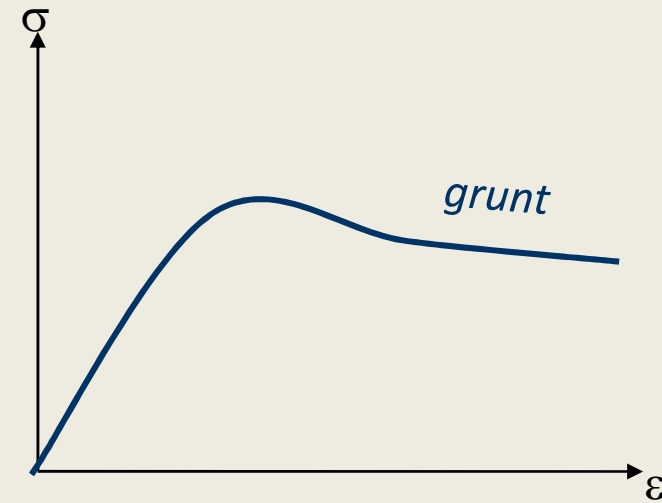
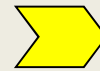
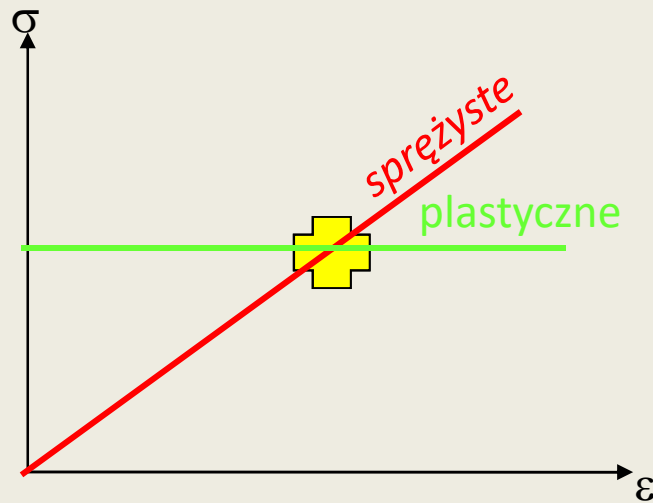


$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## MODEL PODSTAWOWY

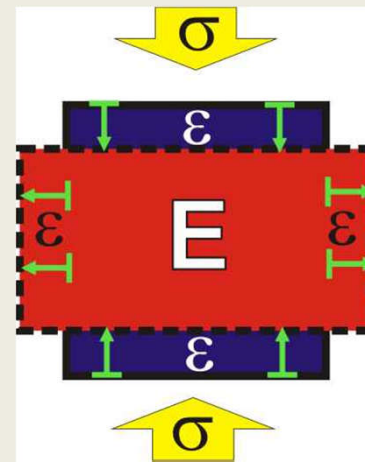
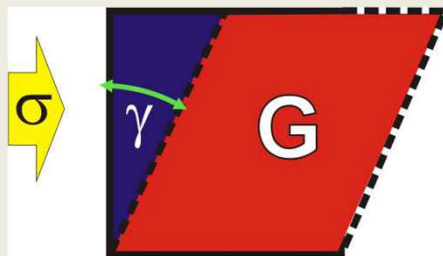


# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

CIAŁO IZOTROPOWE

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$E = 3D(1-2\nu)$$



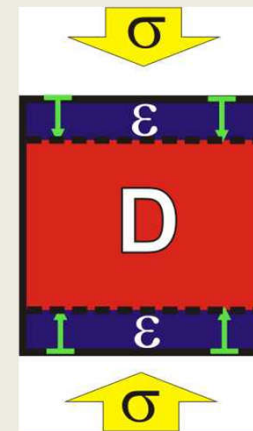
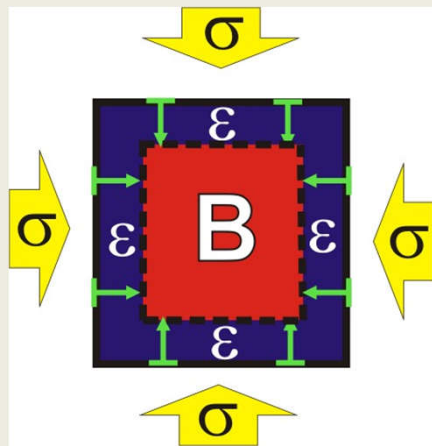
MG:

## STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

CIAŁO IZOTROPOWE

$$B = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

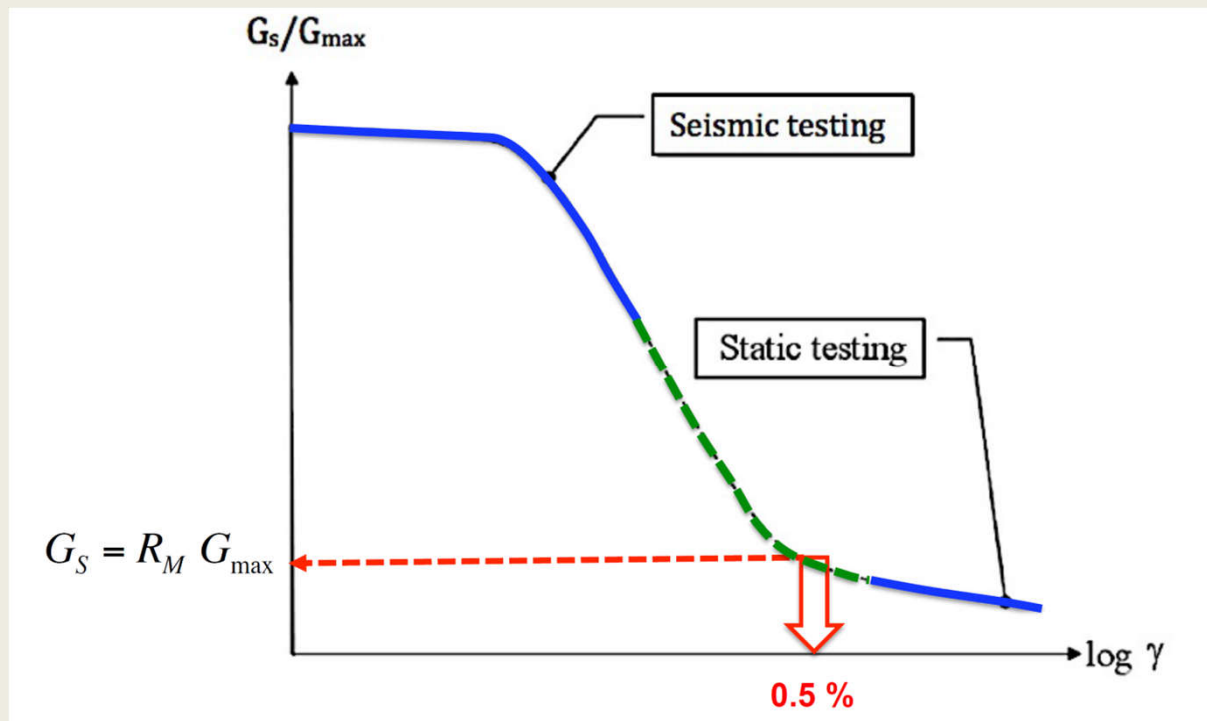
$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$





# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## CIAŁO IZOTROPOWE

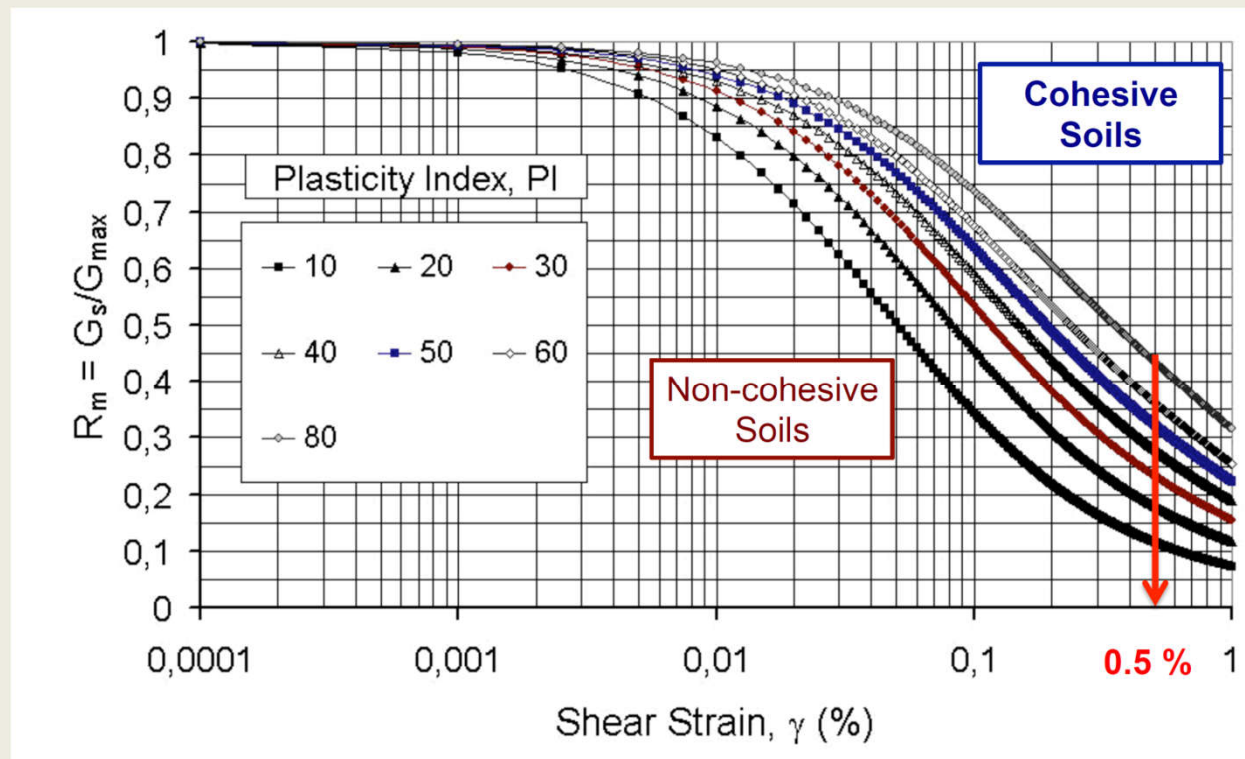


(Massarsch 2014)

MG:

# STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

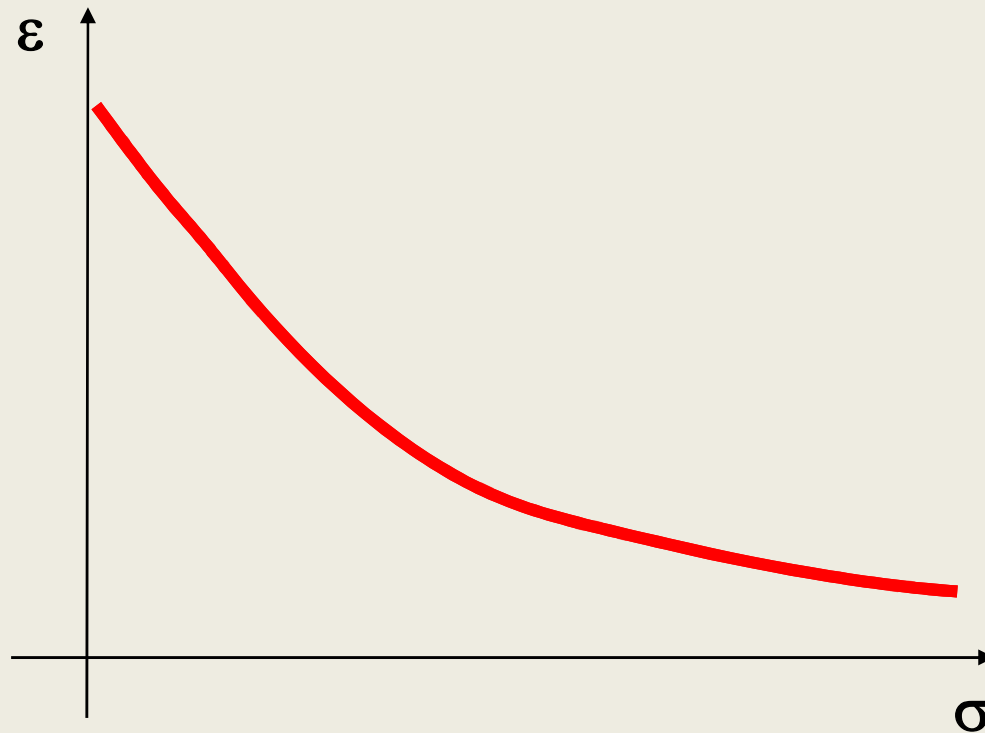
## CIAŁO IZOTROPOWE



(Massarsch 2014)

**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

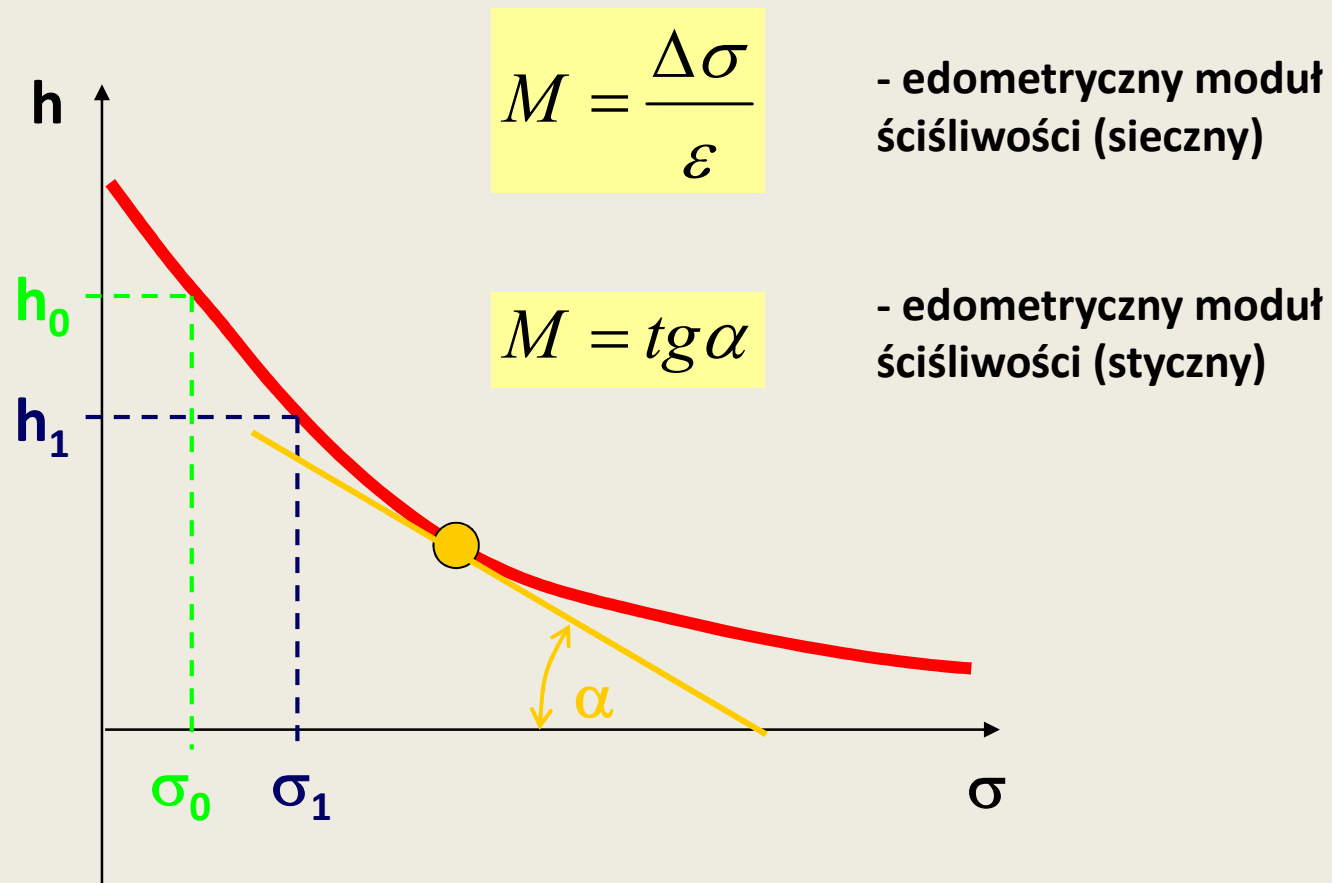
**ŚCIŚLIWOŚĆ**



**Krzywa  
ściśliwości**

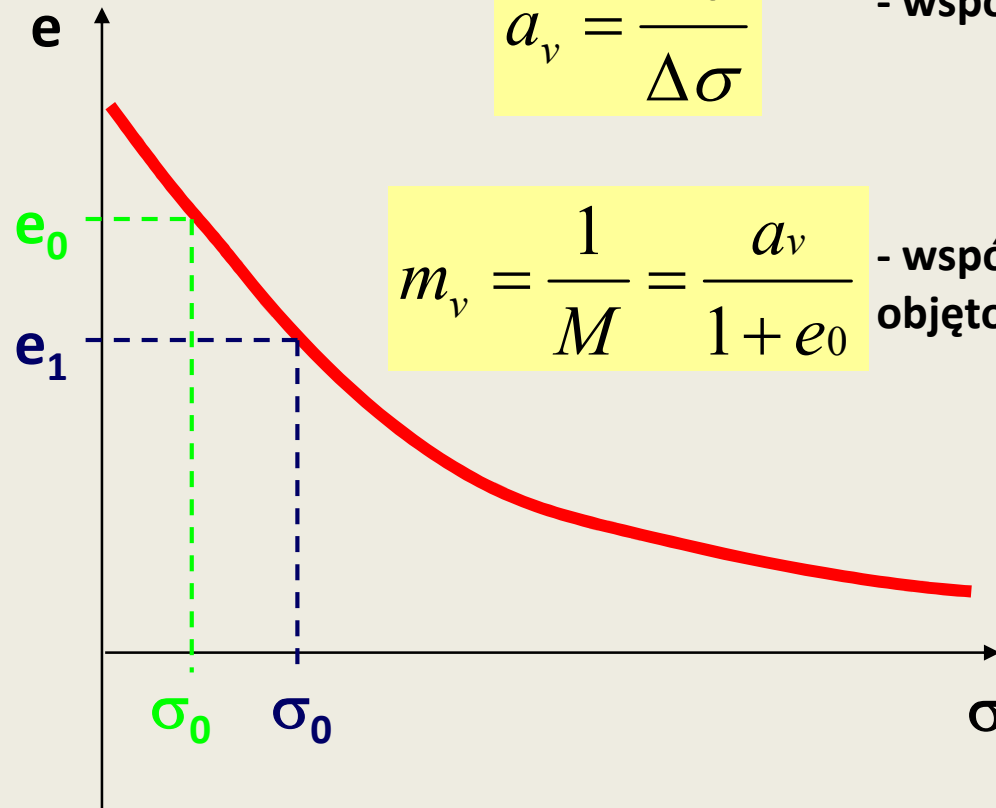
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## ŚCIŚLIWOŚĆ



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## ŚCIŚLIWOŚĆ



$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma}$$

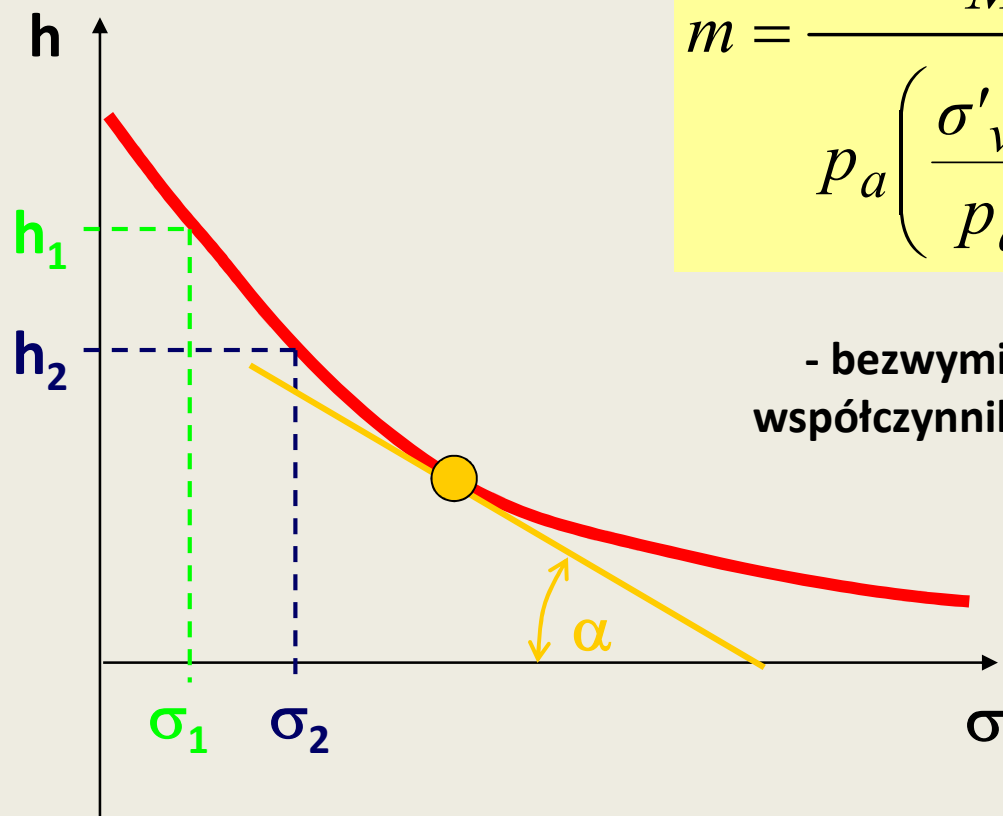
- współczynnik ścisłości

$$m_v = \frac{1}{M} = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

- współczynnik ścisłości objętościowej

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## ŚCIŚLIWOŚĆ



$$m = \frac{M}{p_a \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{1-a}}$$

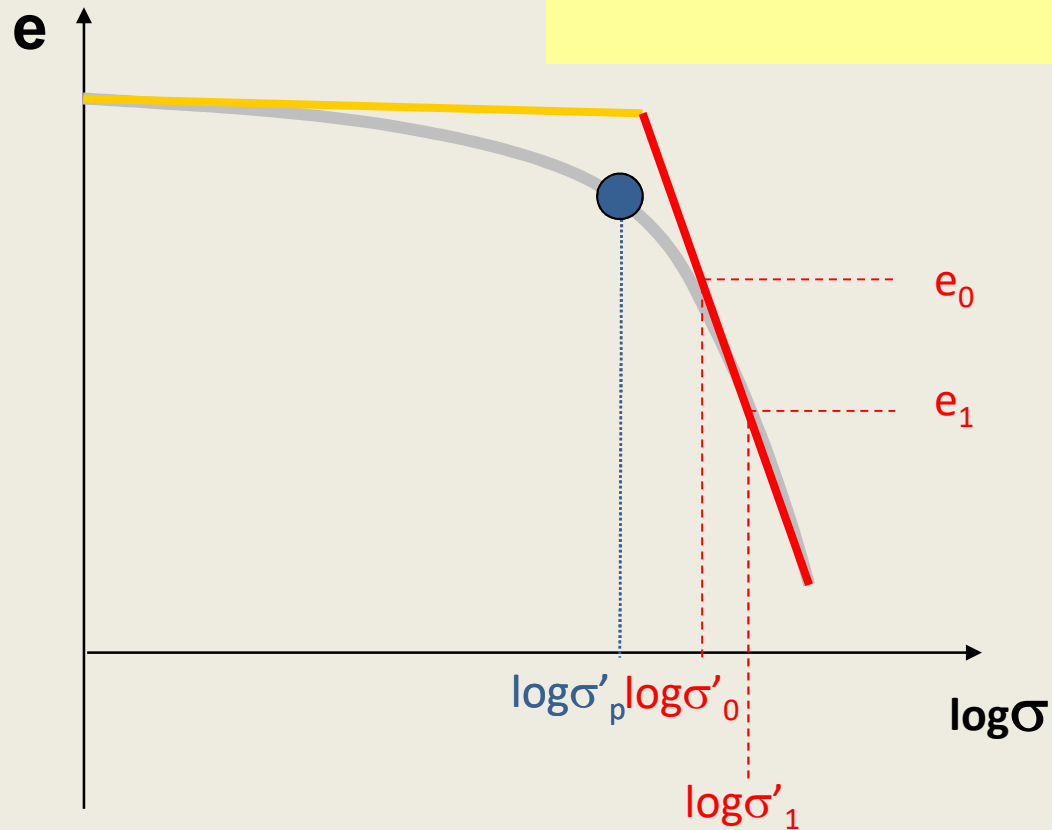
- bezwymiarowy  
współczynnik modułu

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## ŚCIŚLIWOŚĆ

$C_c, \lambda$  - wskaźnik ściśliwości (pierwotnej)

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \sigma'_1 - \log \sigma'_0} = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}}$$



## MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

### ŚCIŚLIWOŚĆ

$C_c$  - wskaźnik ścisłości (pierwotnej)

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \sigma'_1 - \log \sigma'_0} = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}}$$

$$C_c = 0,009(w_L - 10) \quad (\text{Terzaghi i Peck, 1967})$$

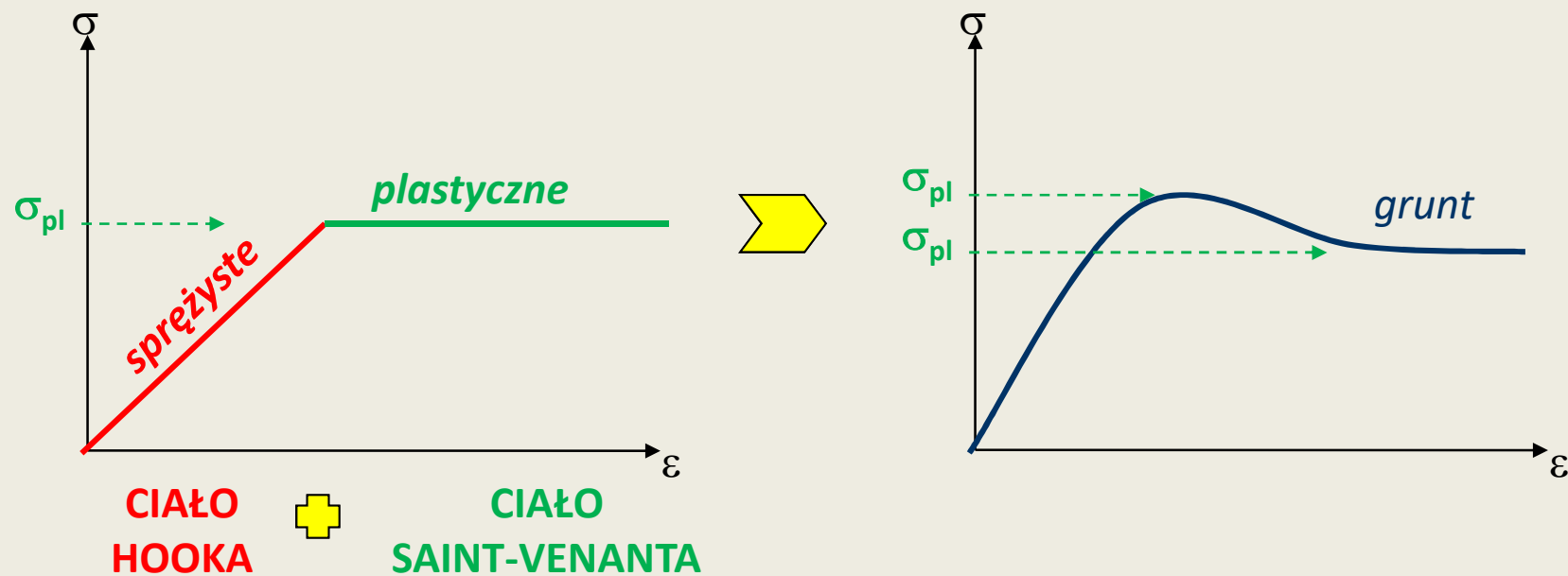
Equation	Reference	Region of applicability
$C_c = 0.007(LL - 7)$	Skempton	Remolded clays
$C_c = 0.01w_N$		Chicago clays
$C_c = 1.15(e_0 - 0.27)$	Nishida	All clays
$C_c = 0.30(e_0 - 0.27)$	Hough	Inorganic cohesive soil: silt, silty clay, clay
$C_c = 0.0115w_N$		Organic soils, peats, organic silt, and clay
$C_c = 0.0046(LL - 9)$		Brazilian clays
$C_c = 0.75(e_0 - 0.5)$		Soils with low plasticity
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$		Chicago clays
$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$		All clays

(Das, 1984)



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## MODEL CIAŁA IZOTROPOWEGO



MG:

## STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

### MODEL CIAŁA IZOTROPOWEGO

#### PODSTAWOWE MODELE REOLOGICZNE

CIAŁO  
HOOKA

$$\tau = G\gamma$$



CIAŁO  
SAINT-VENANTA

$$\tau = \sigma_{pl}$$



CIAŁO  
NEWTONA

$$\tau = \eta\dot{\gamma}$$



**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

**KONSOLIDACJA**

zmiana (zmniejszenie) objętości porów  
w skutek zwiększenia naprężenia

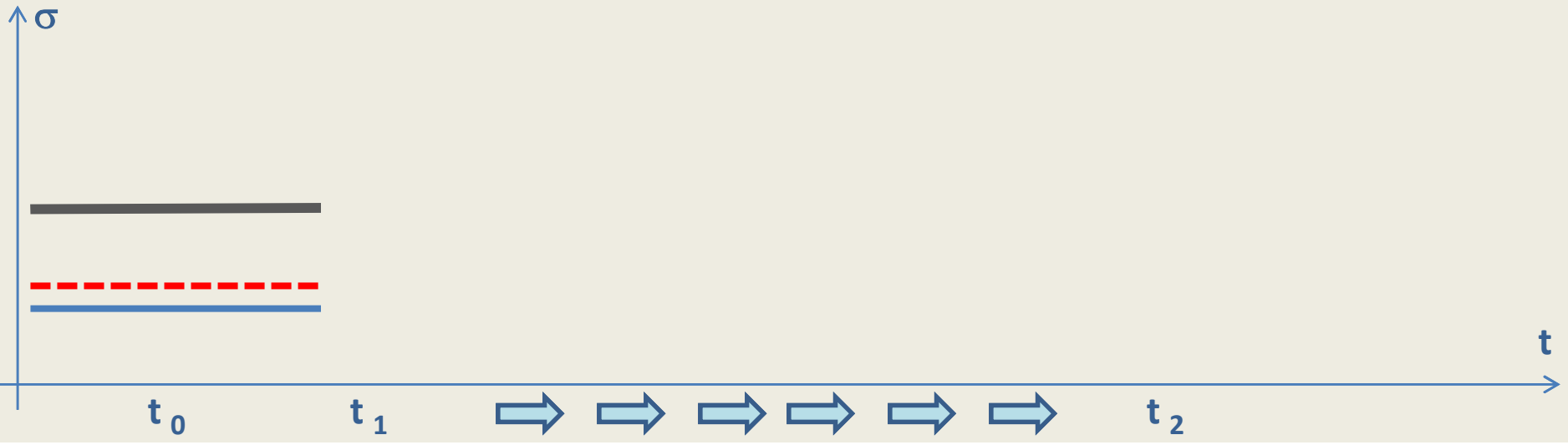
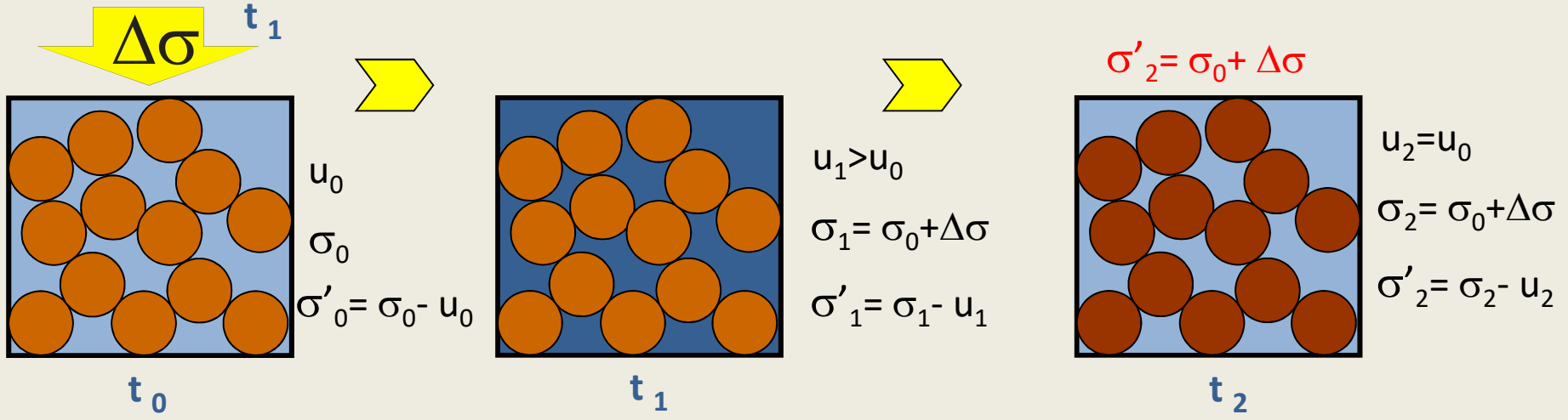
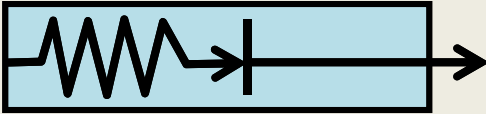


**TEORIA TERZAGHIEGO**

- grunt jest jednorodny
- wszystkie pory są wypełnione wodą
- szkielet i woda są nieściśliwe
- ruch wody jest zgodny z prawem Darcy
- konsolidacja jest liniowa
- współczynnik ściśliwości ma stałą wartość
- parametry gruntu są stałe

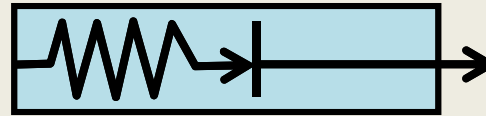
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

MODEL TERZAGHIEGO

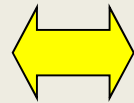


# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

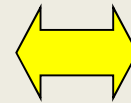
## TEORIA TERZAGHIEGO



$$s_t = \frac{h_0 \Delta e}{1 + e}$$



$$s_t = \frac{\Delta e}{1 + e}$$



$$s_t = \frac{a_v \Delta \sigma'}{1 + e}$$

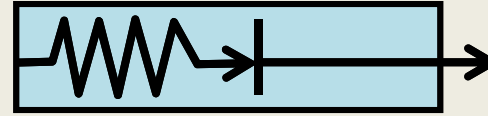


$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \frac{a_v}{1 + e}$$

MG:

## STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

### TEORIA TERZAGHIEGO



$$s_t = \frac{a_v \Delta \sigma'}{1 + e}$$

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma' + \Delta u$$

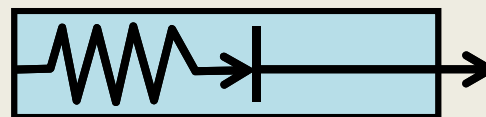
$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \frac{a_v}{1 + e} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial \sigma'}{\partial t}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial t} \frac{a_v}{1 + e}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} dz = - \frac{\partial u}{\partial t} \frac{a_v}{1 + e} dz \quad + \quad \frac{\partial v}{\partial z} dz = - \frac{\partial s}{\partial t} dz$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## TEORIA TERZAGHIEGO



$$\frac{\partial v}{\partial z} dz = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} dz$$



$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1+e}{a_v} \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$i = \frac{v}{k} = \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{1}{\gamma_w}$$



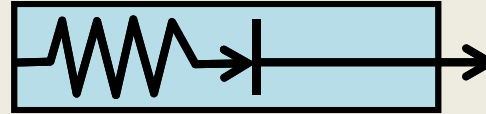
$$v = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{k}{\gamma_w}$$



$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \frac{k}{\gamma_w}$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## TEORIA TERZAGHIEGO



$$c_v = \frac{1+e}{a_v} \frac{k}{\gamma_w} \iff \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1+e}{a_v} \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

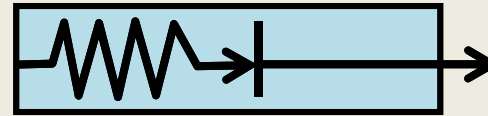


$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

TEORIA TERZAGHIEGO



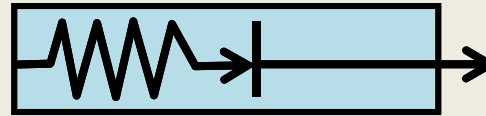
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1+e}{a_v} \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$



$$\Delta u = \frac{4}{\pi} \Delta \sigma \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left[ \frac{(2n+1)\pi z}{2h} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \right]$$

MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

TEORIA TERZAGHIEGO



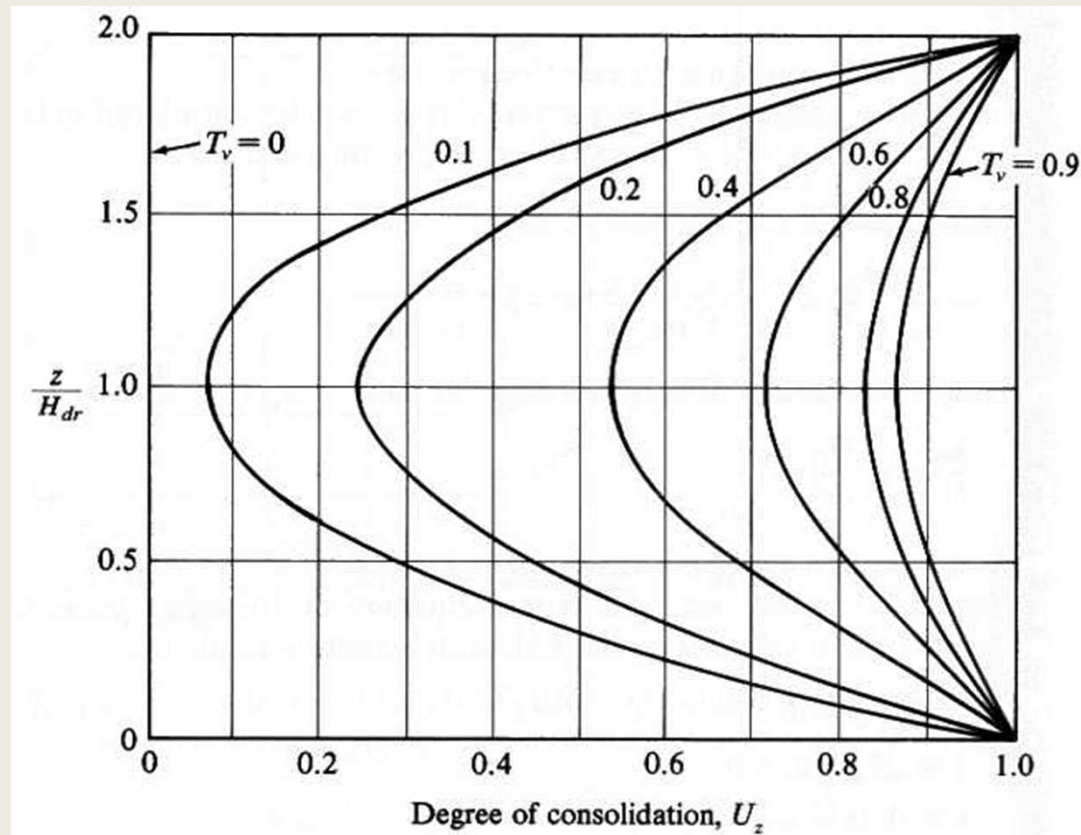
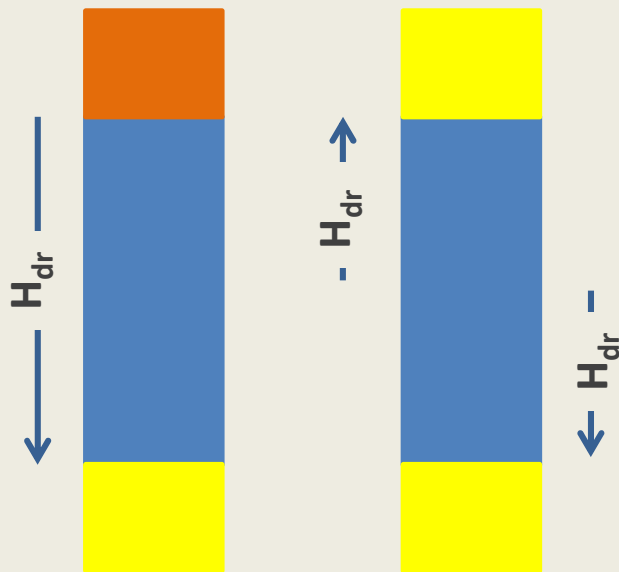
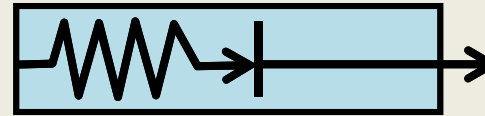
$$T_v = \frac{t}{H^2} \frac{1+e}{a_v} \frac{k}{\gamma_w} \quad \longleftrightarrow \quad M = \frac{1+e}{a_v}$$



$$t = \frac{\gamma_w T_v H^2}{Mk}$$

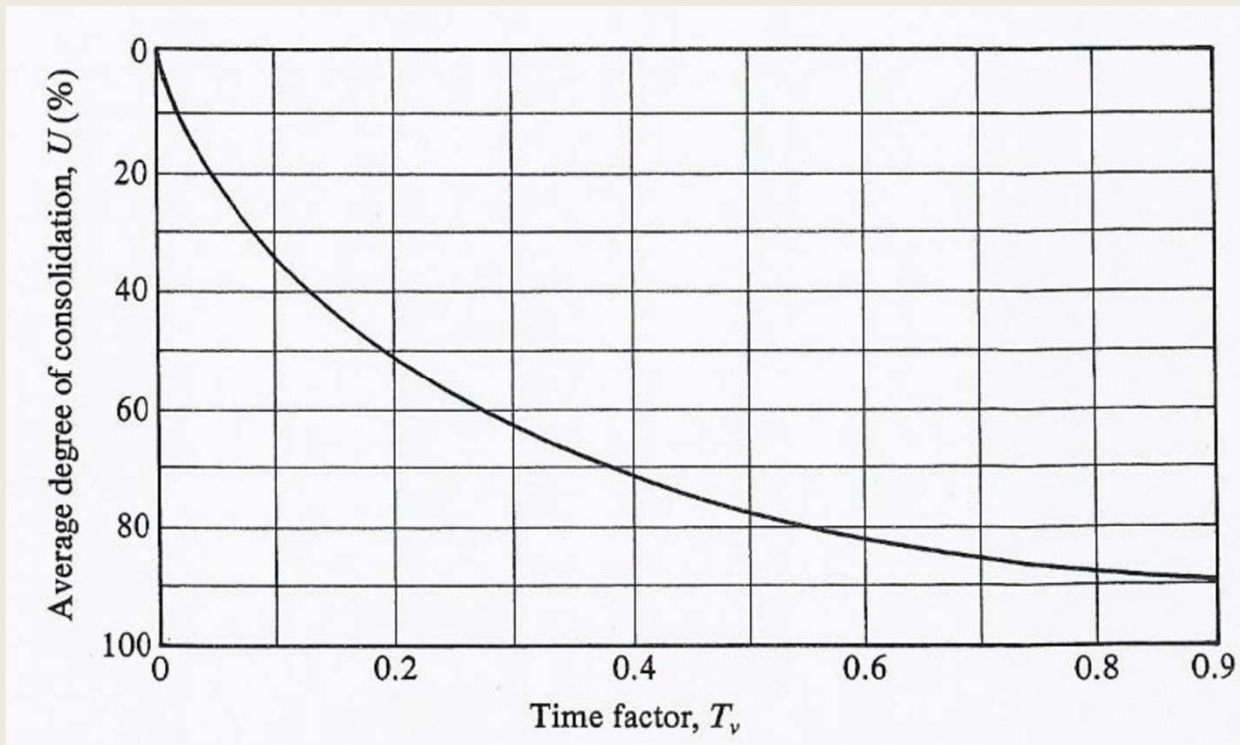
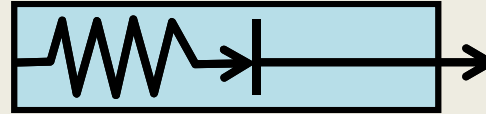
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## TEORIA TERZAGHIEGO



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## TEORIA TERZAGHIEGO



$U < 60\%$

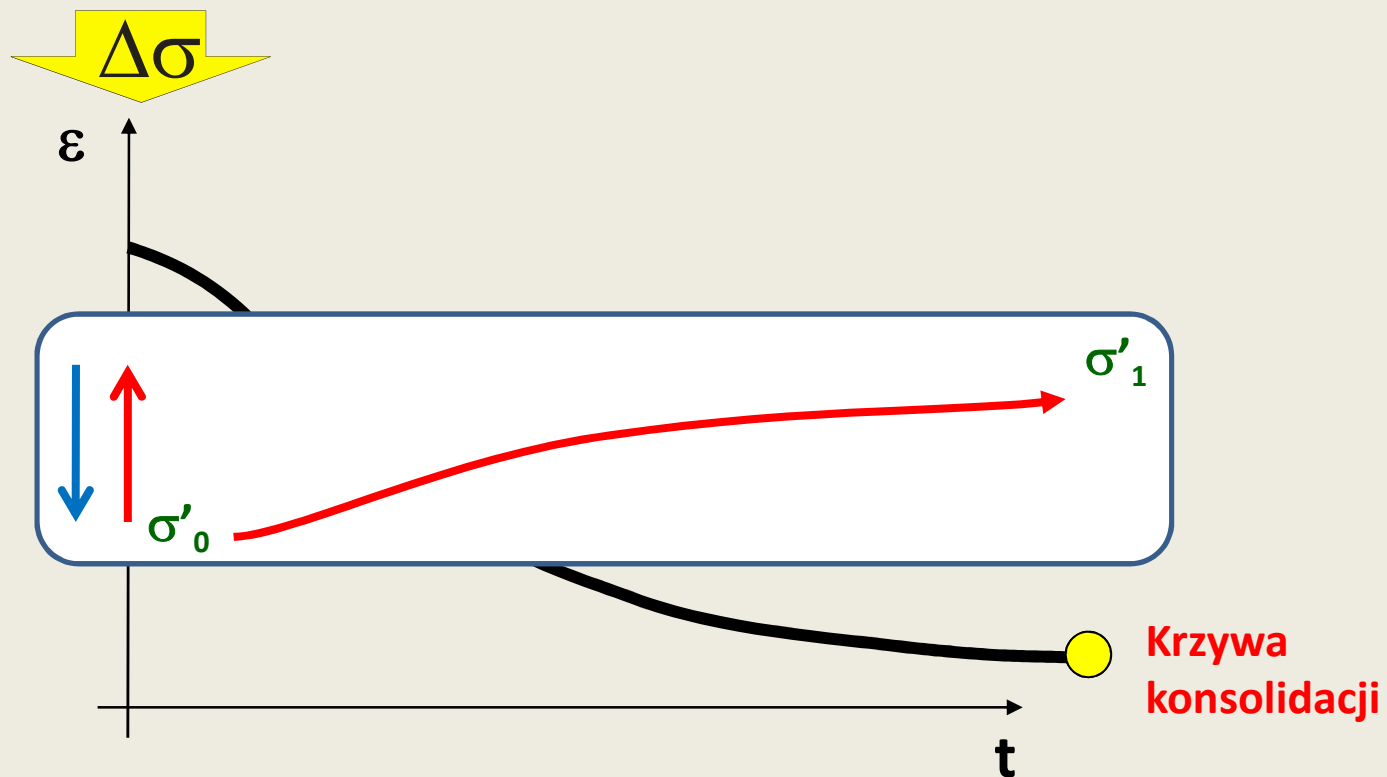
$$T_v = \pi/4(U\%/100)^2$$

$U > 60\%$

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%)$$

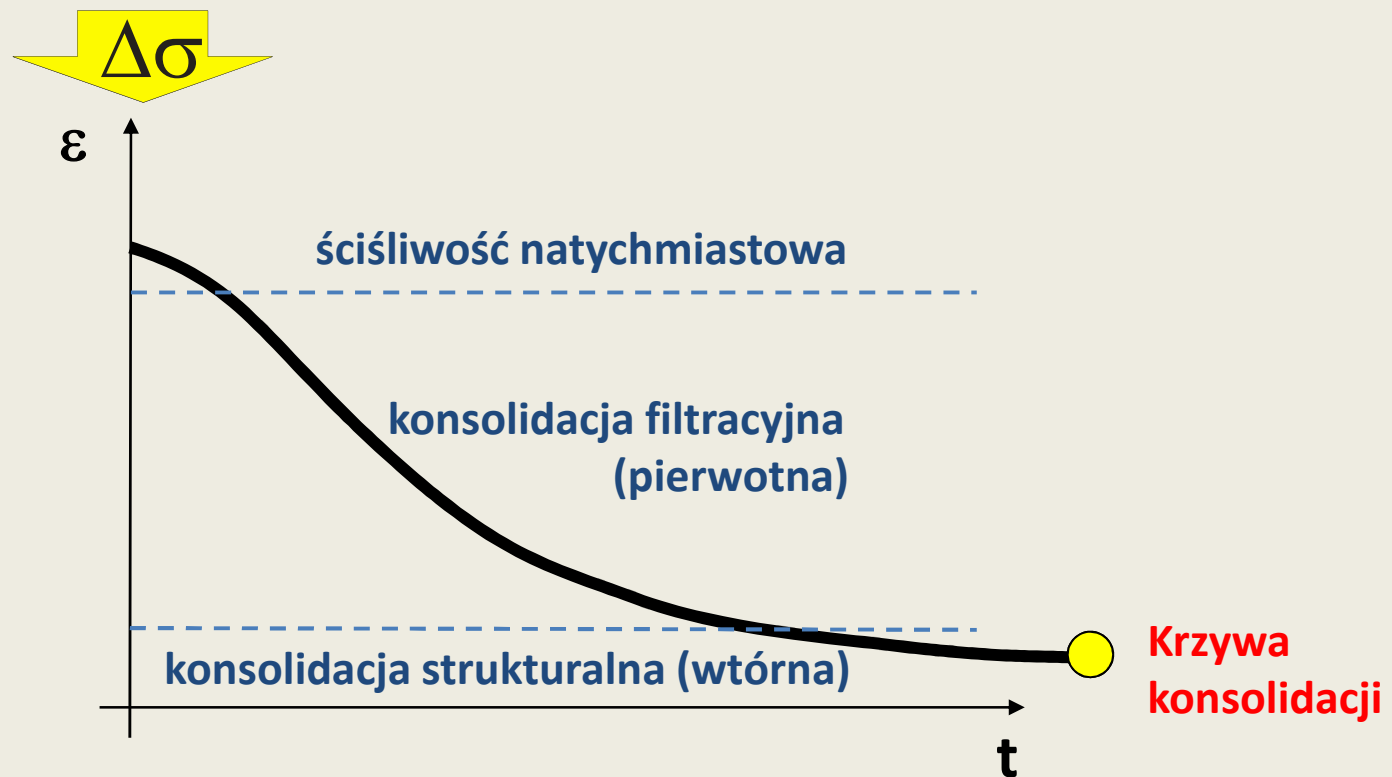
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



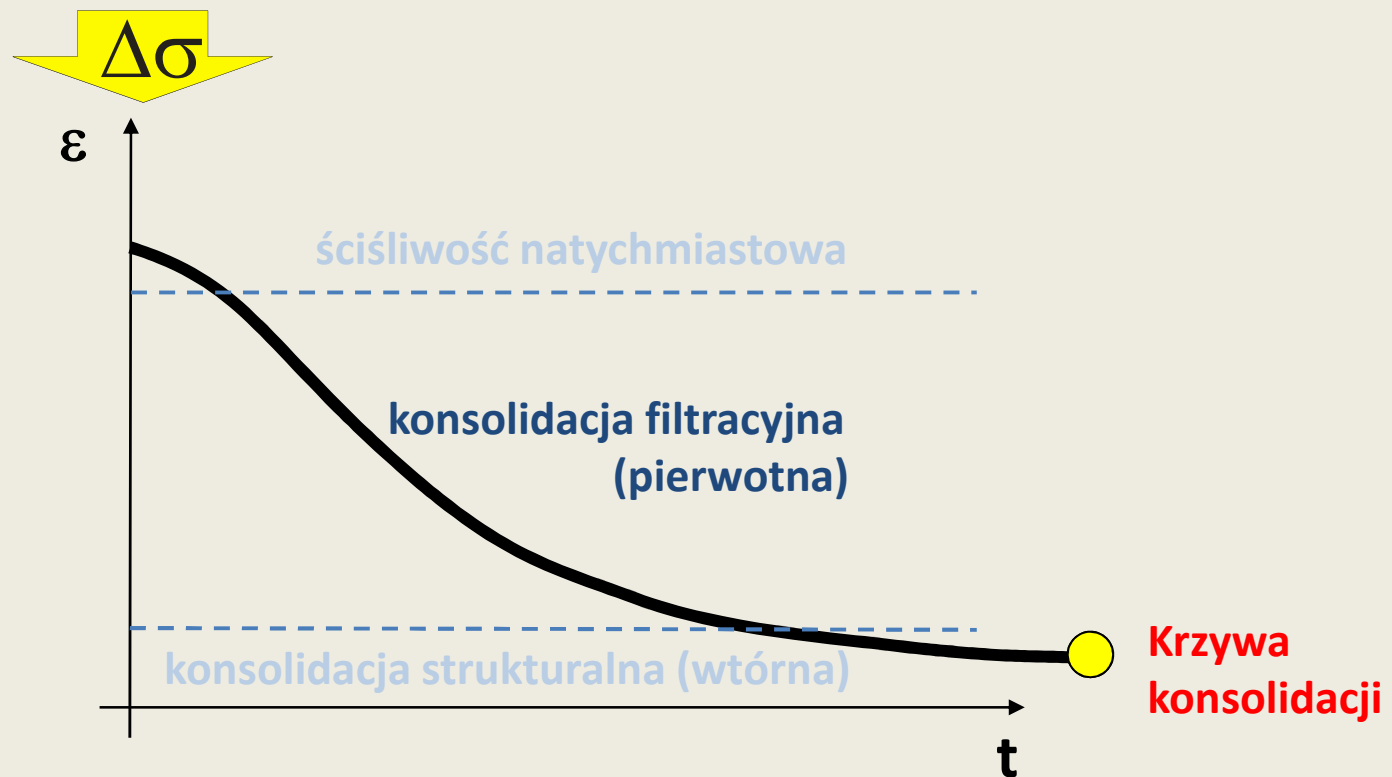
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

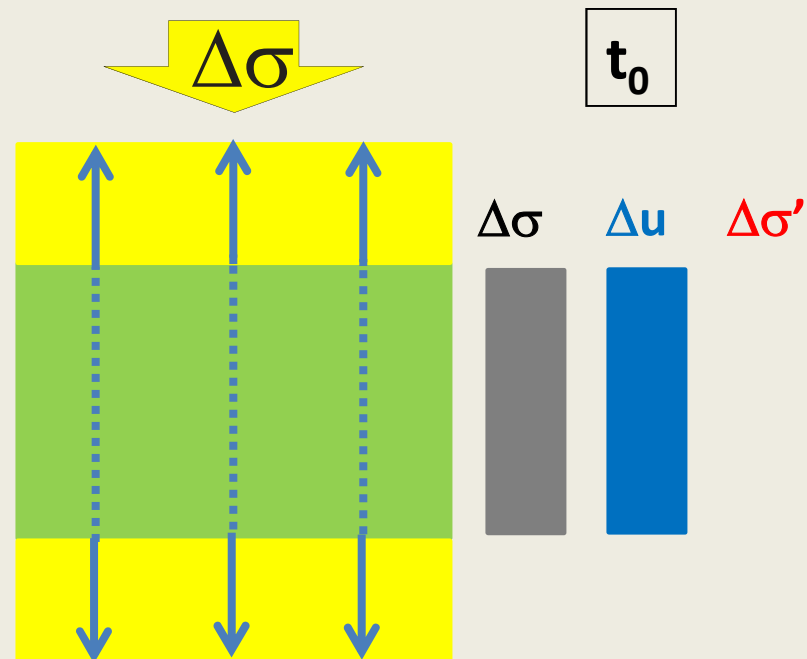
KONSOLIDACJA



MG:

# STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA

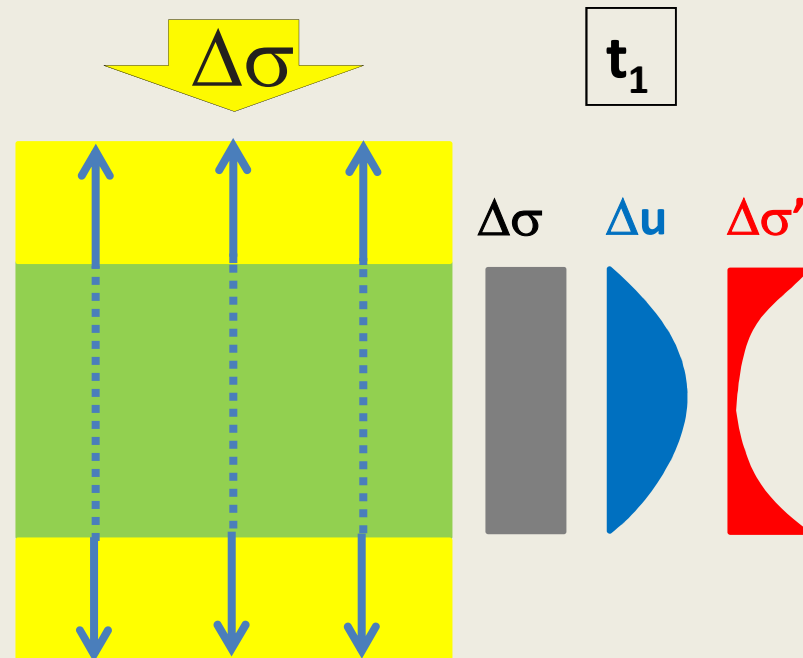




MG:

# STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

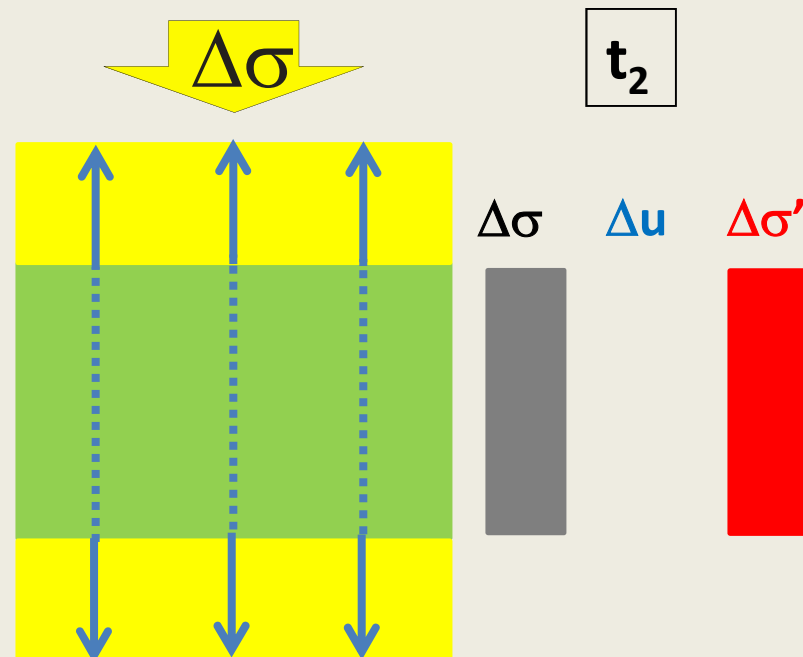
KONSOLIDACJA



MG:

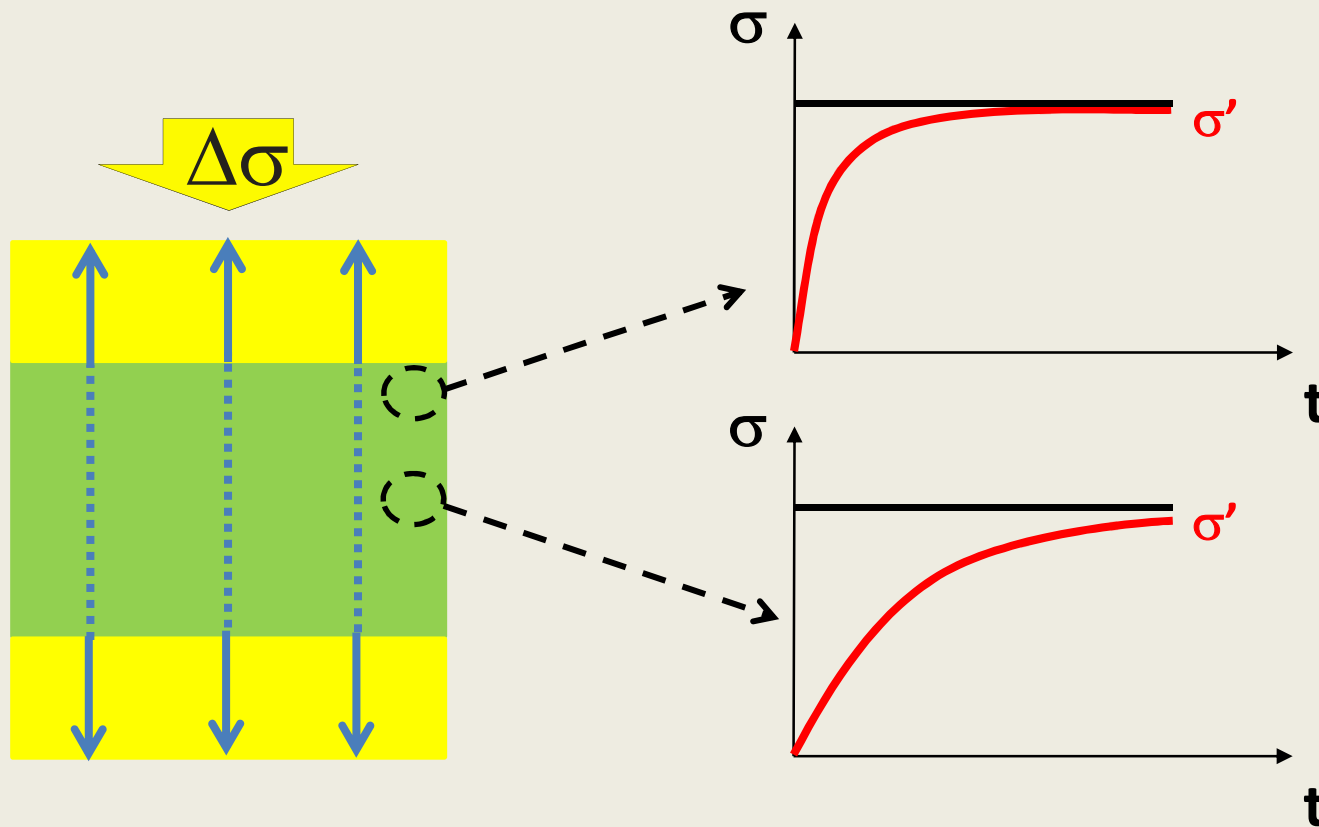
# STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

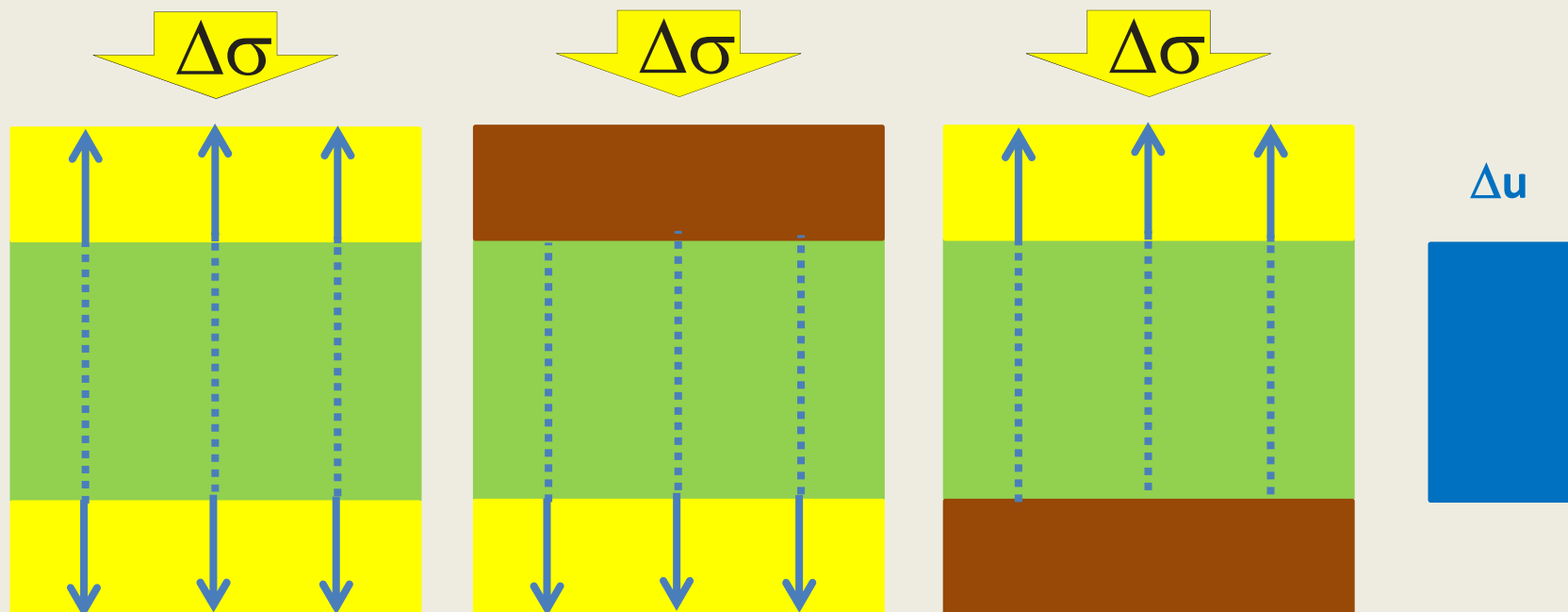
KONSOLIDACJA



MG:

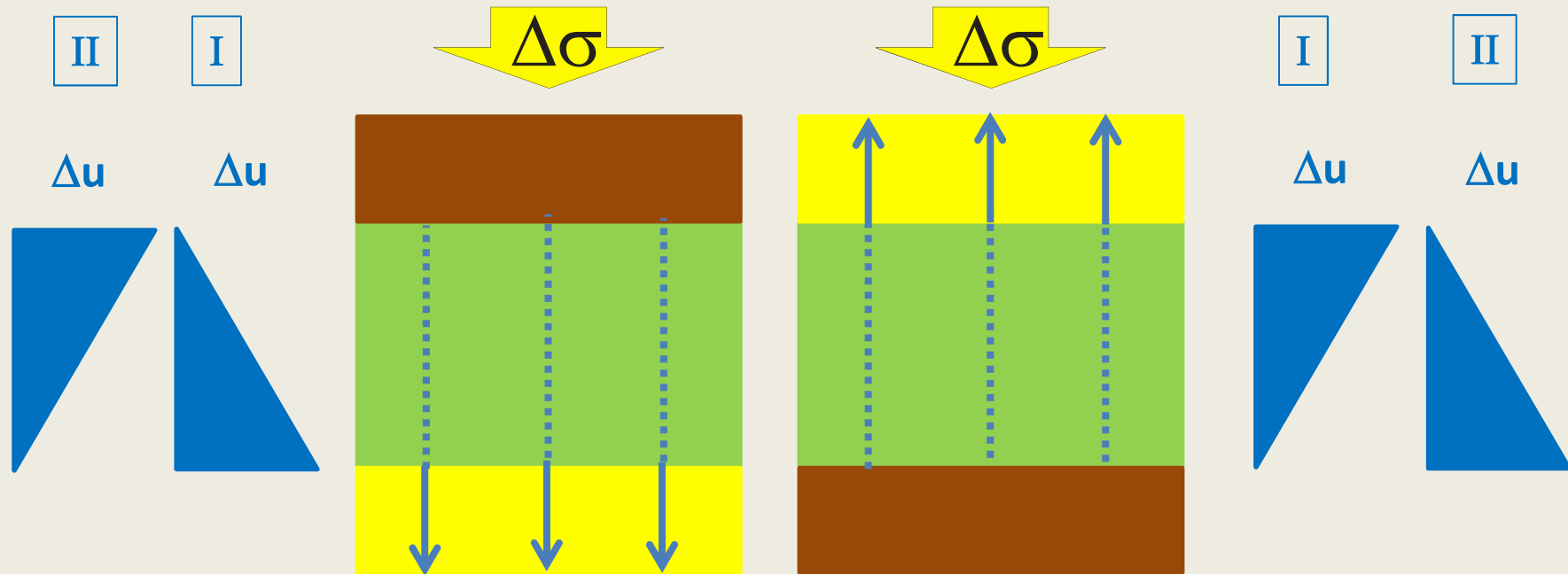
# STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



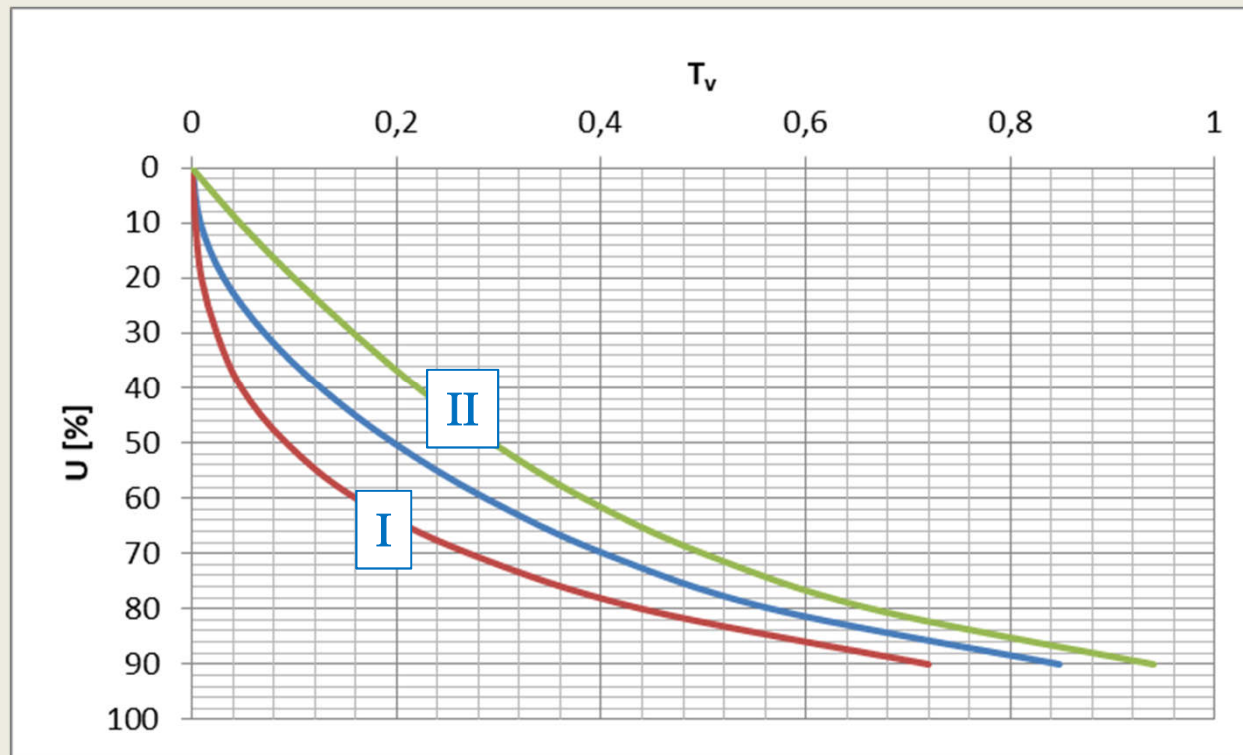
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



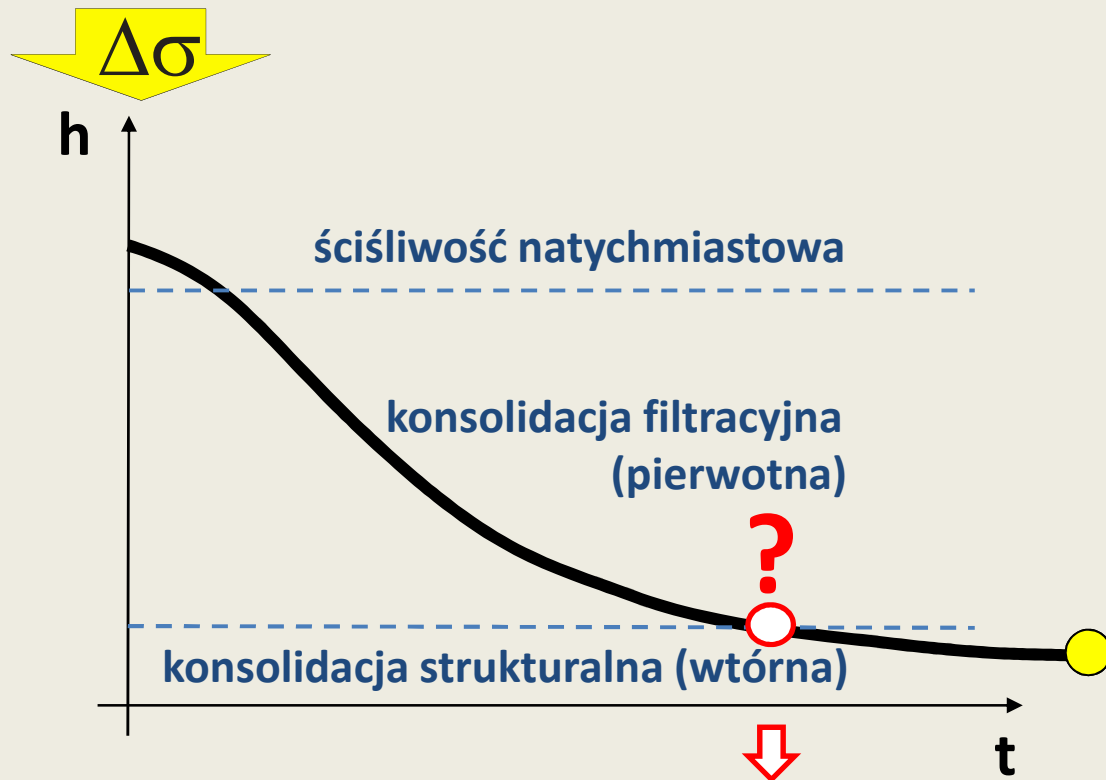
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## KONSOLIDACJA



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA

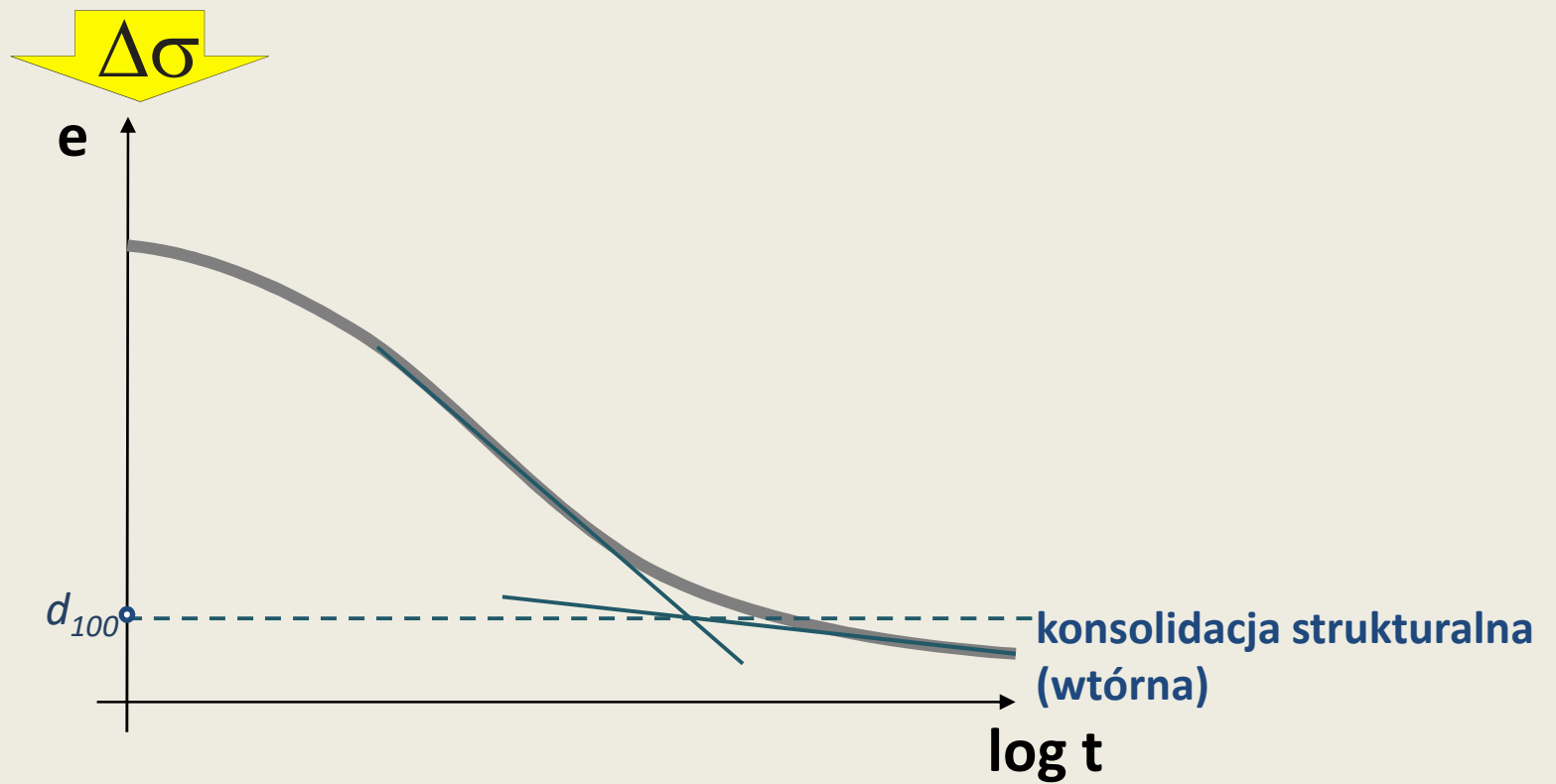


$$t_U = \frac{H^2 T_{vU}}{c_v}$$

$c_v$  - współczynnik konsolidacji

MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

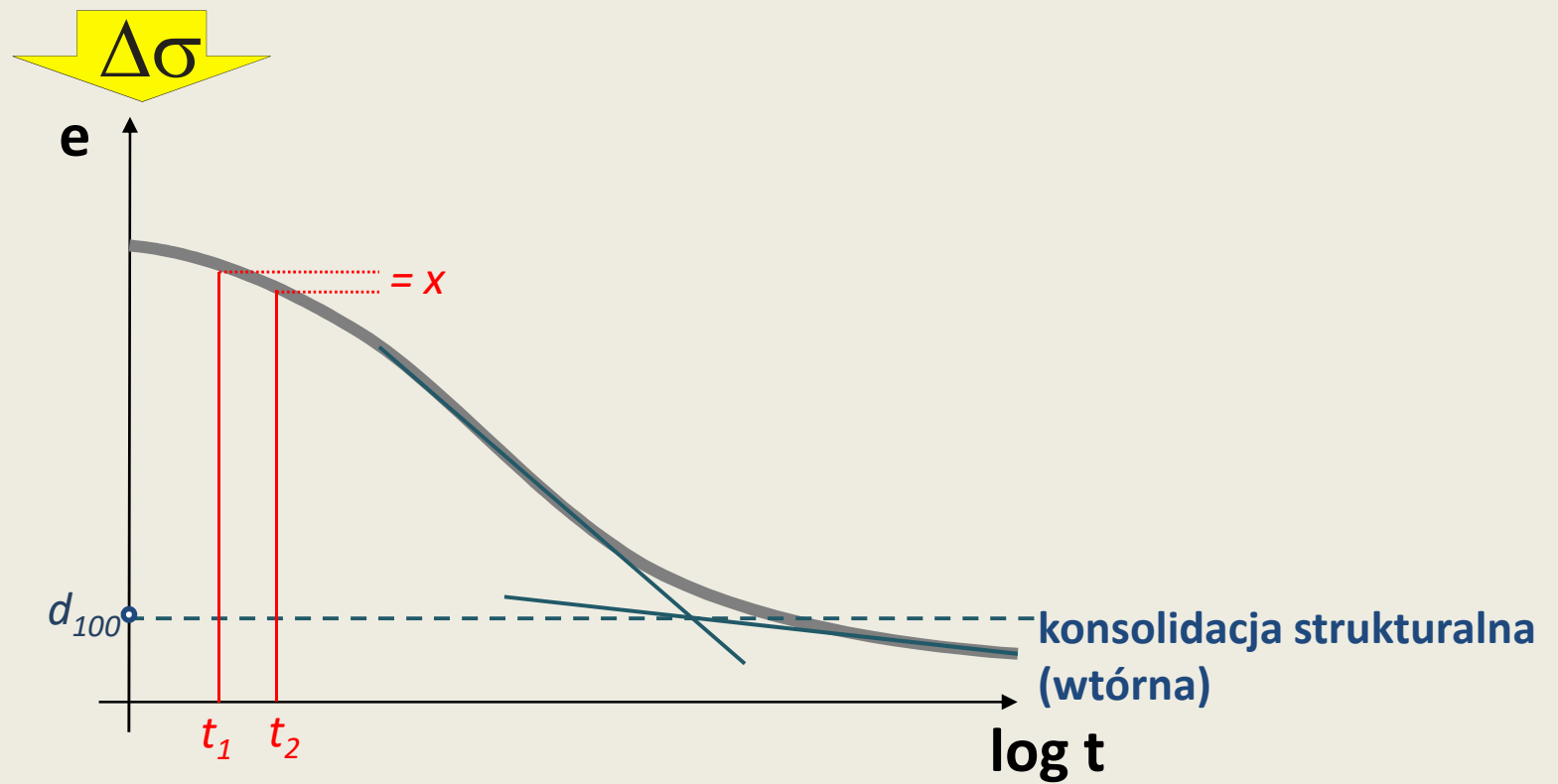
KONSOLIDACJA





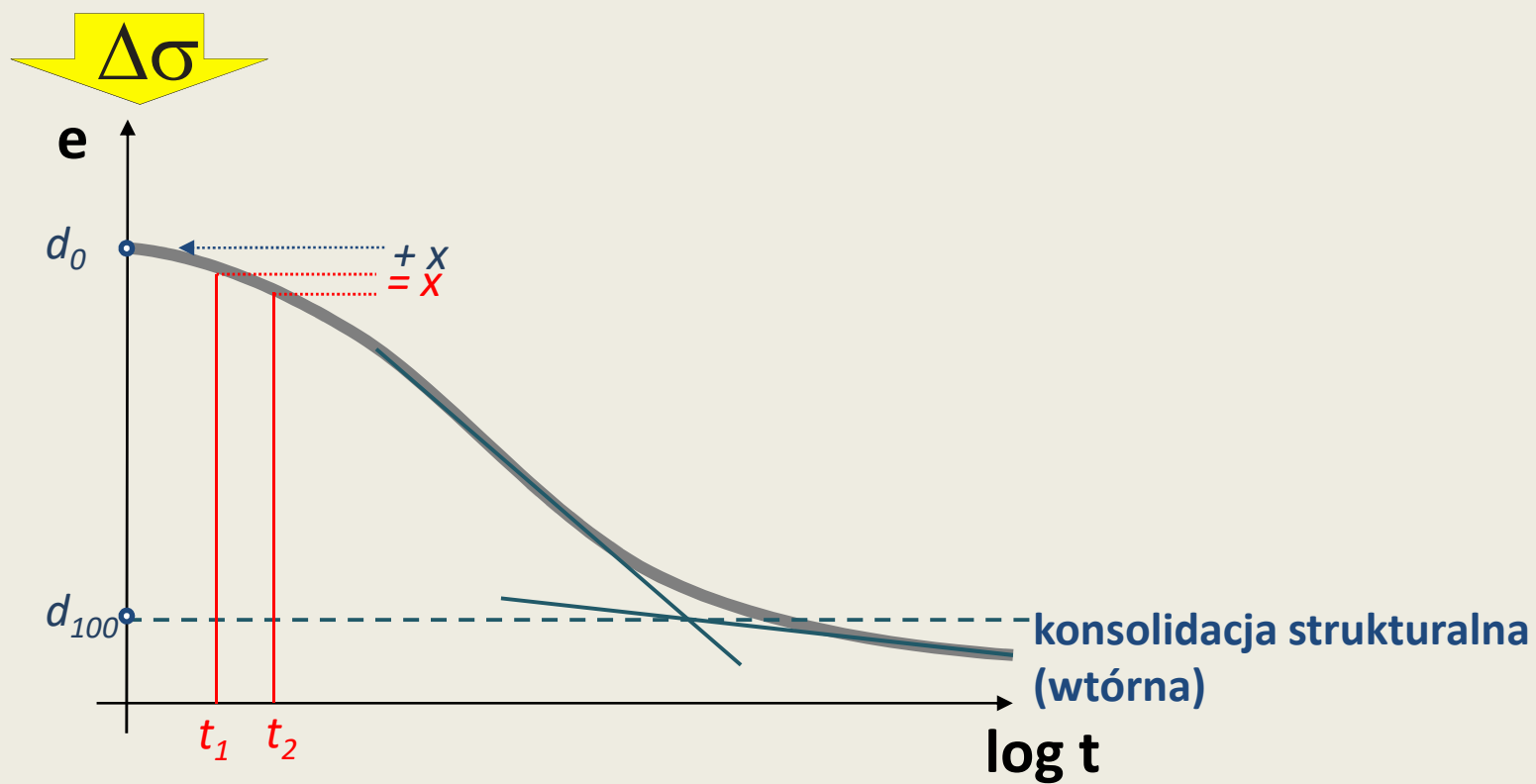
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



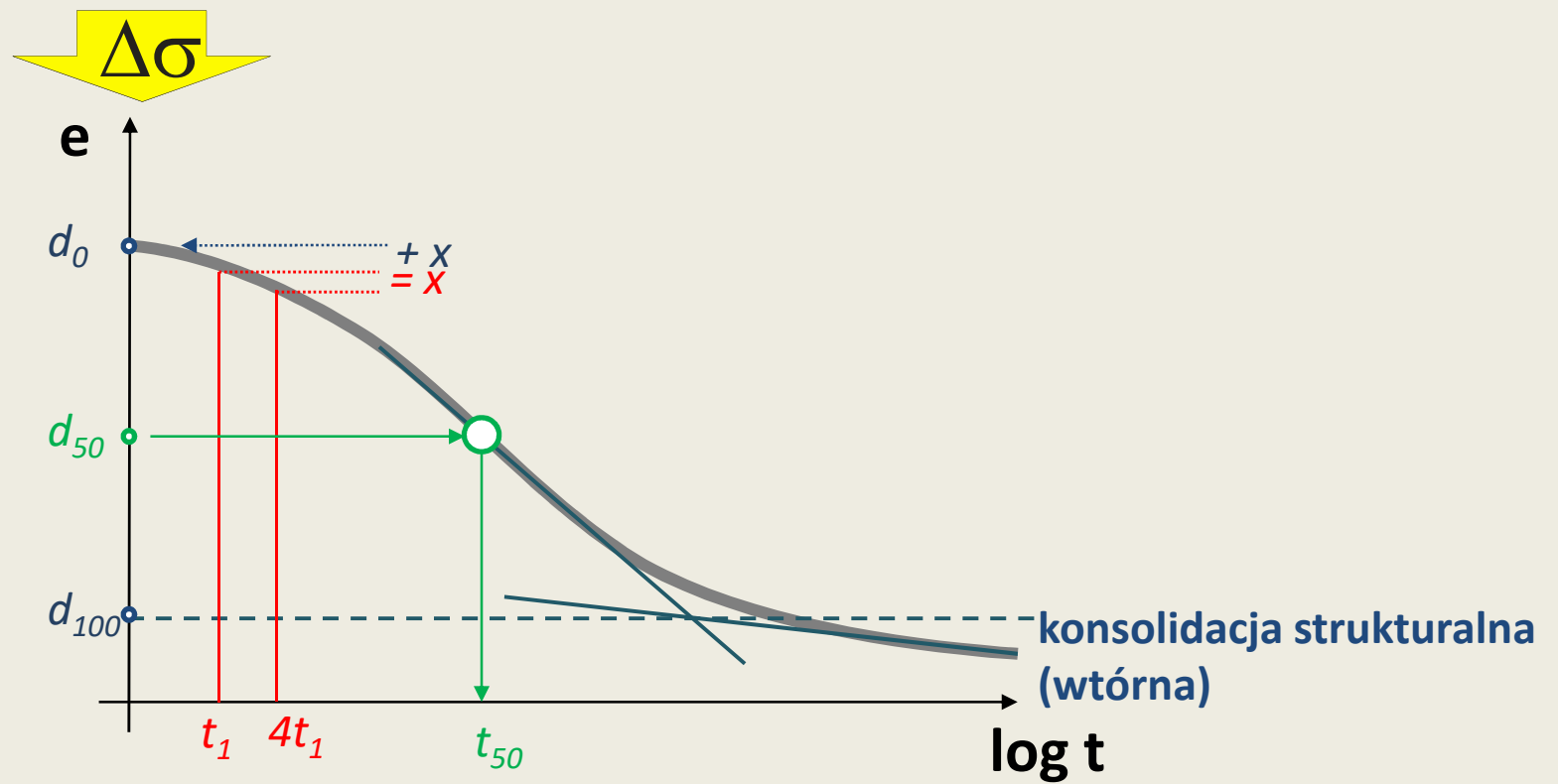
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



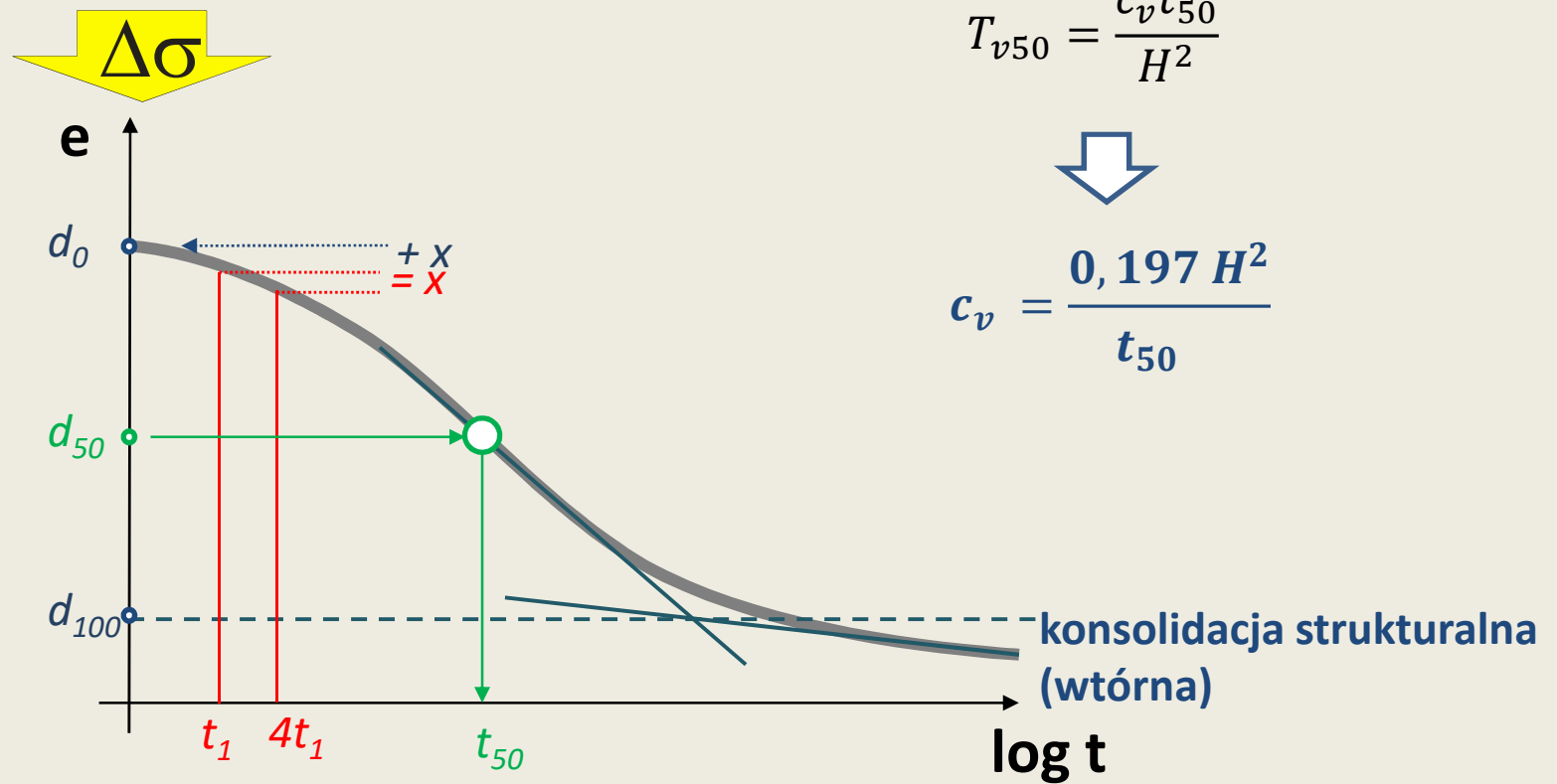
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



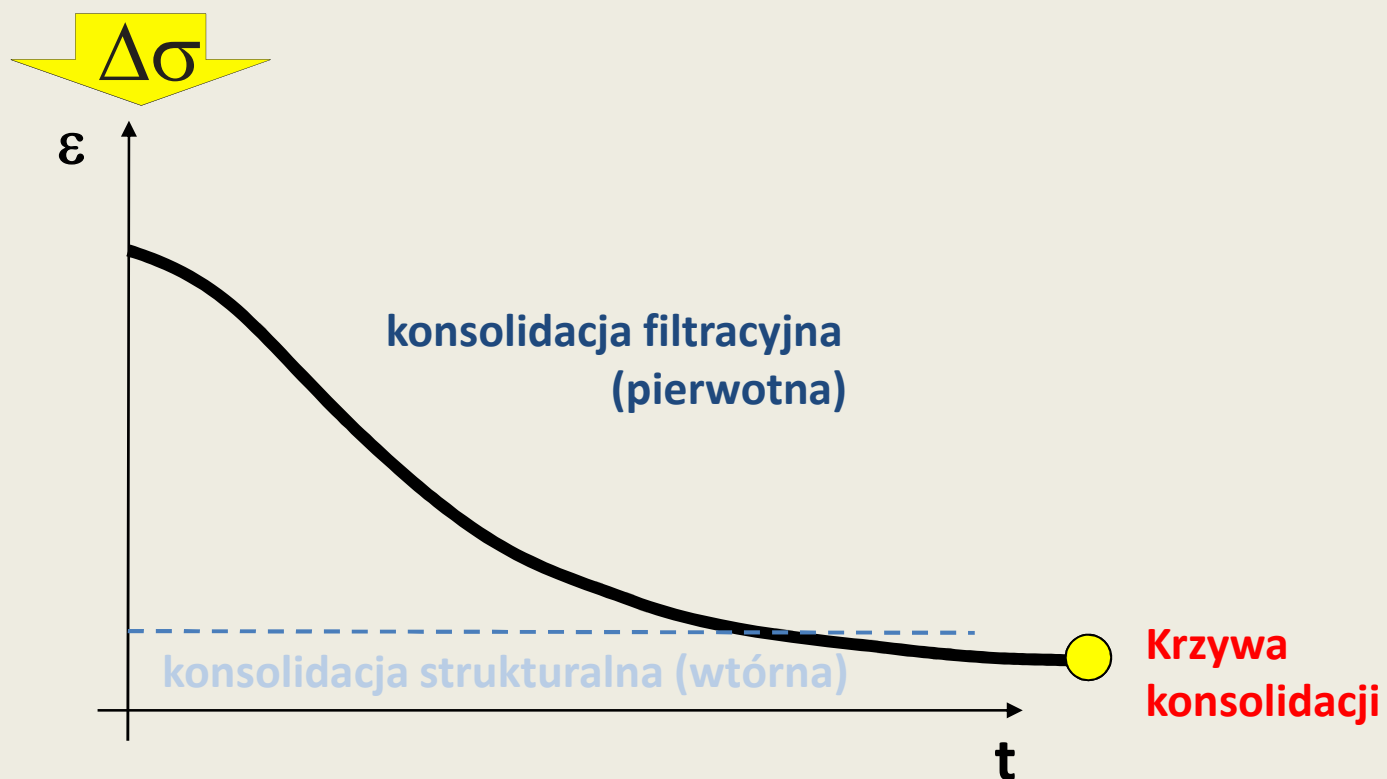
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## KONSOLIDACJA



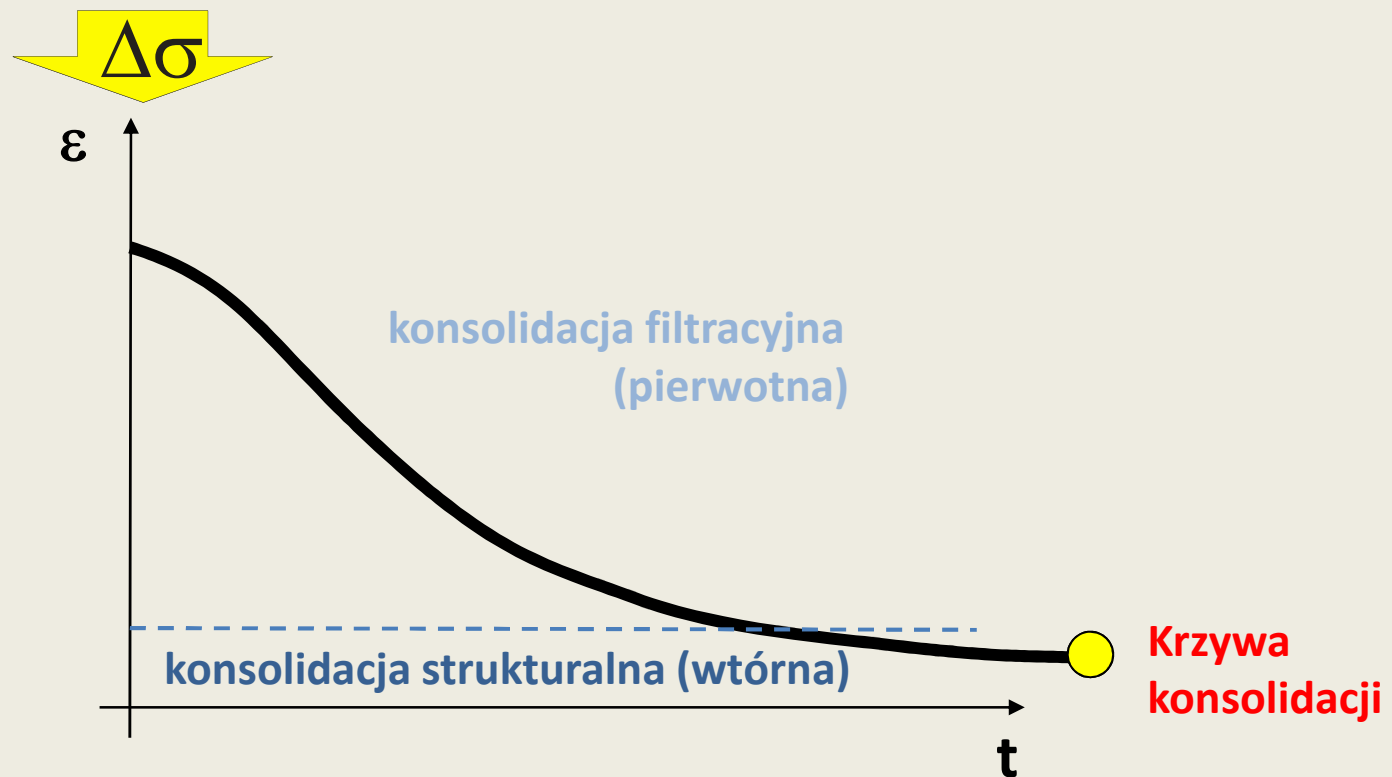
MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

KONSOLIDACJA

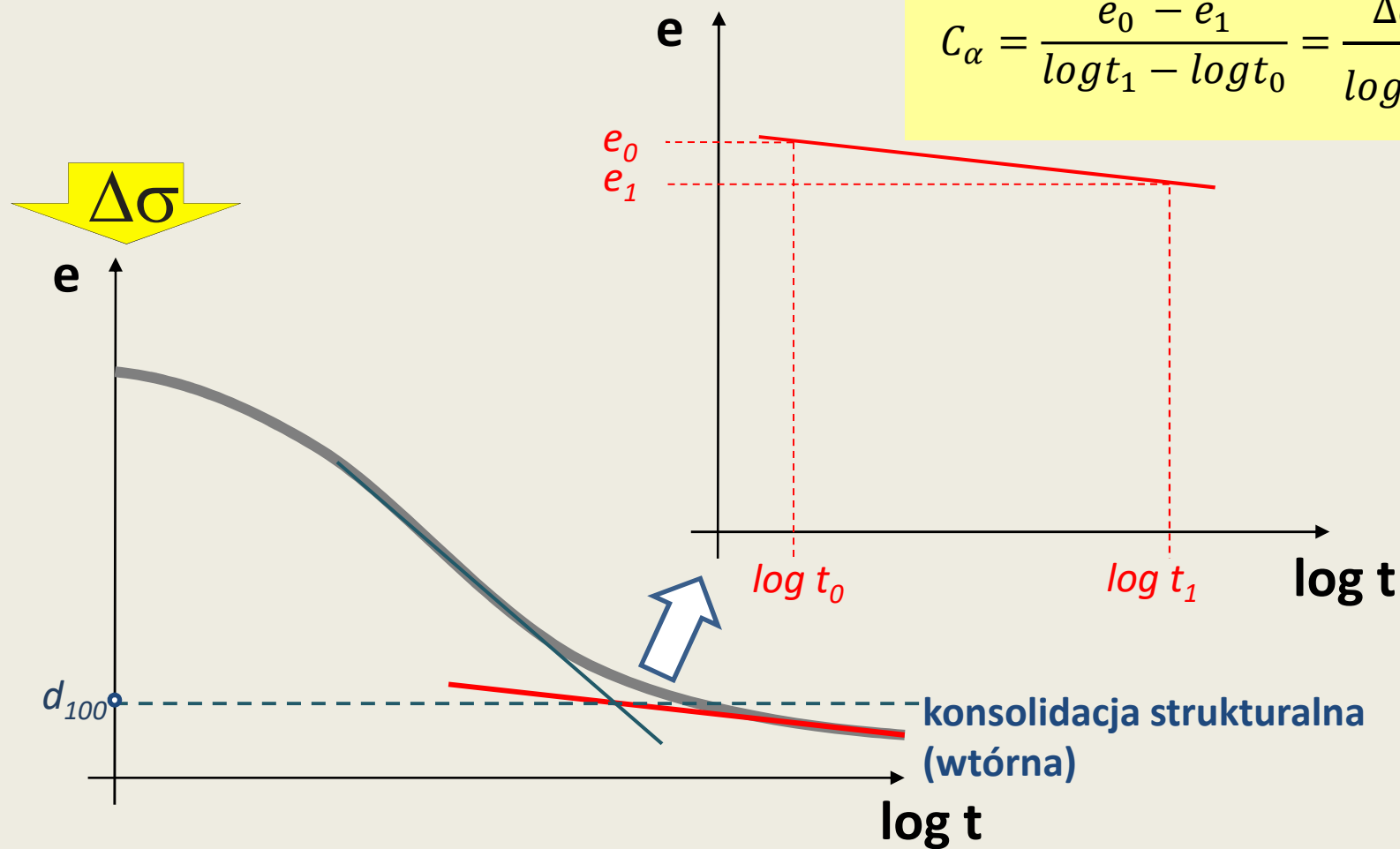


# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## KONSOLIDACJA

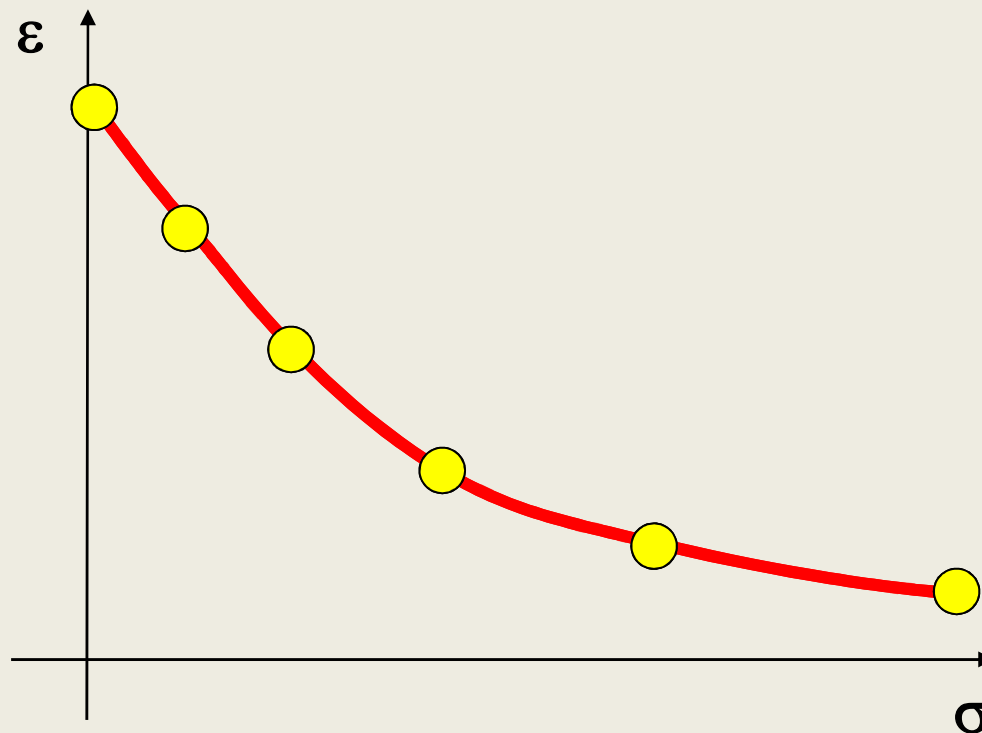
$C_\alpha$  - wskaźnik konsolidacji strukturalnej (wtórnej)

$$C_\alpha = \frac{e_0 - e_1}{\log t_1 - \log t_0} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_1}{t_0}}$$



**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

**KONSOLIDACJA → ŚCIŚLIWOŚĆ**

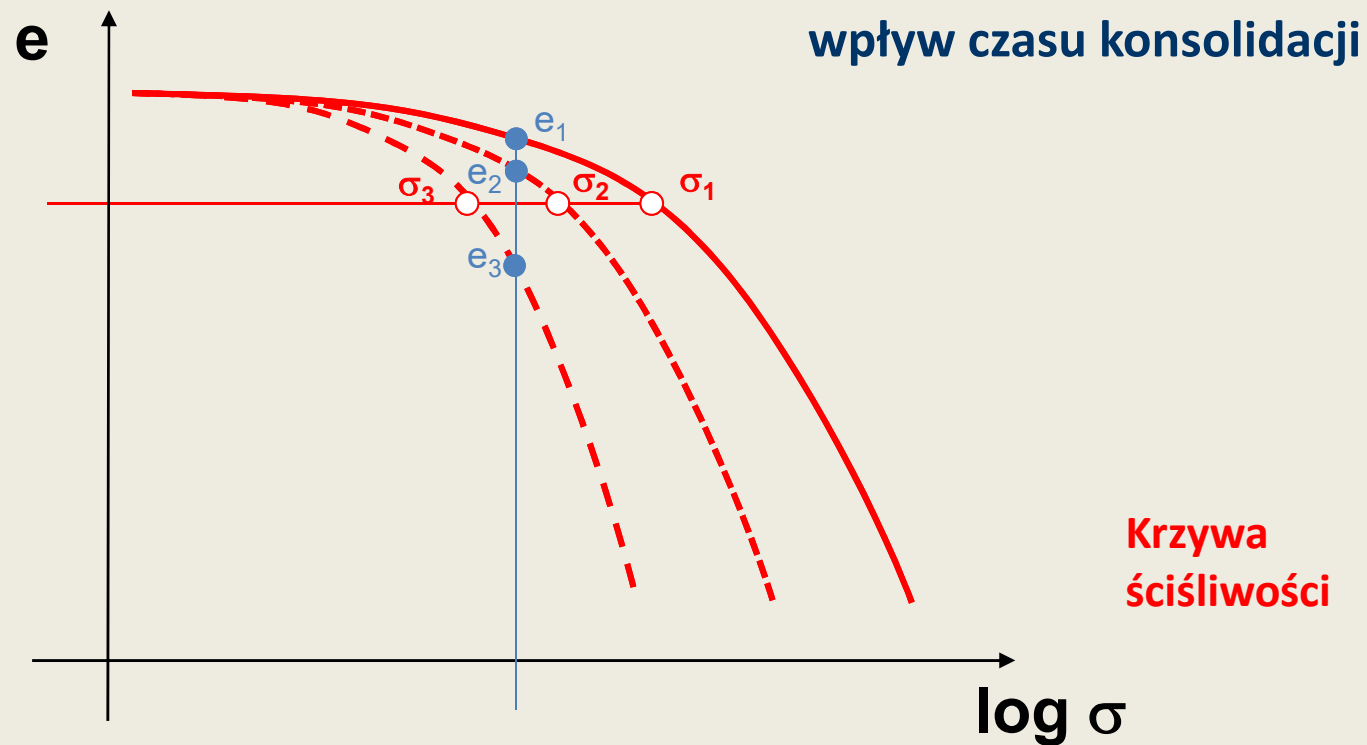


**Krzywa  
ściśliwości**



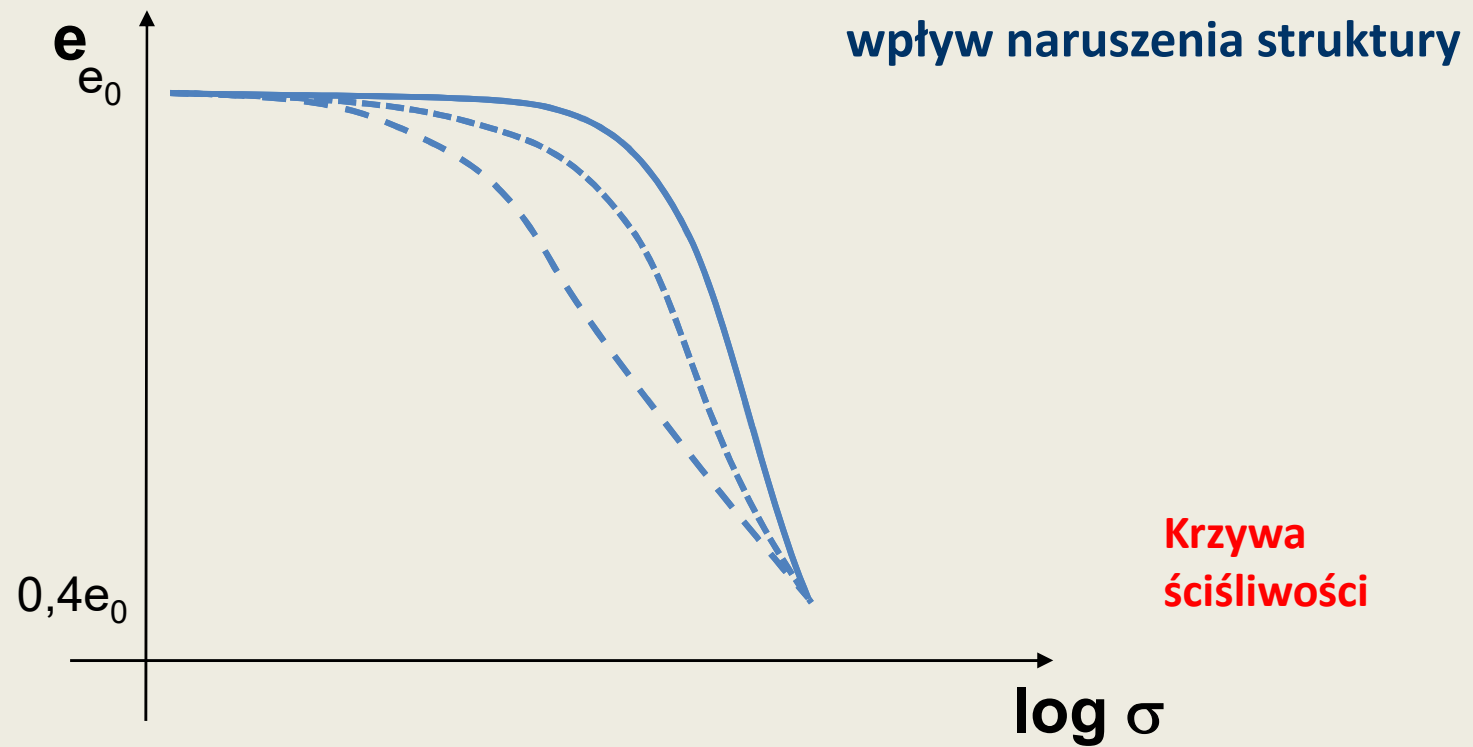
**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

**KONSOLIDACJA → ŚCISLIWOŚĆ**



**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

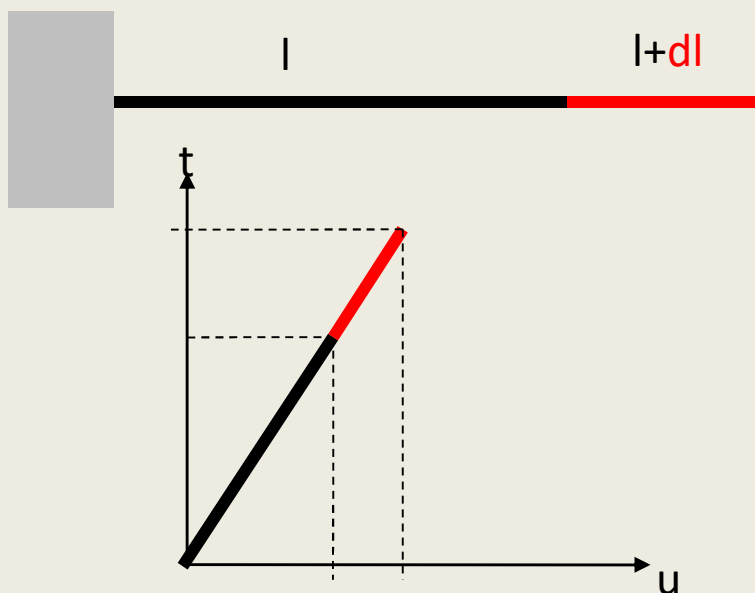
**KONSOLIDACJA → ŚCISLIWOŚĆ**



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## GRUNT JAKO CIAŁO Z PAMIĘCIĄ

prawo Boltzmannna



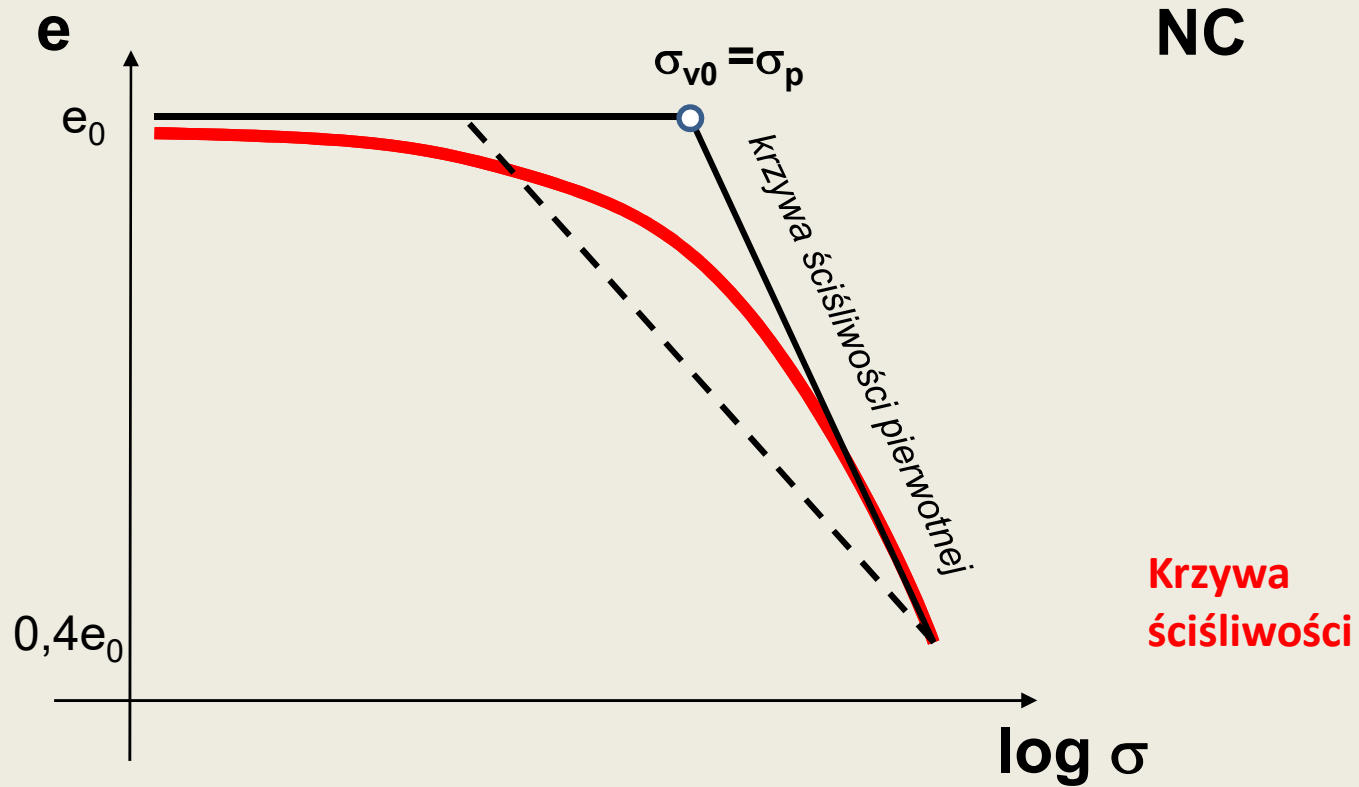
$$du(t) = c(t - t') \frac{dN}{dt}(t') dt'$$

$$u(t) = \int_0^t c(t - t') \frac{dN}{dt}(t') dt'$$

$$\sigma_{ij}(\bar{x}, t) = \varepsilon_{kl}(\bar{x}, 0+) G_{ijkl}(\bar{x}, t) + \int_0^t G_{ijkl}(\bar{x}, t - t') \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t'}(\bar{x}, t') dt'$$

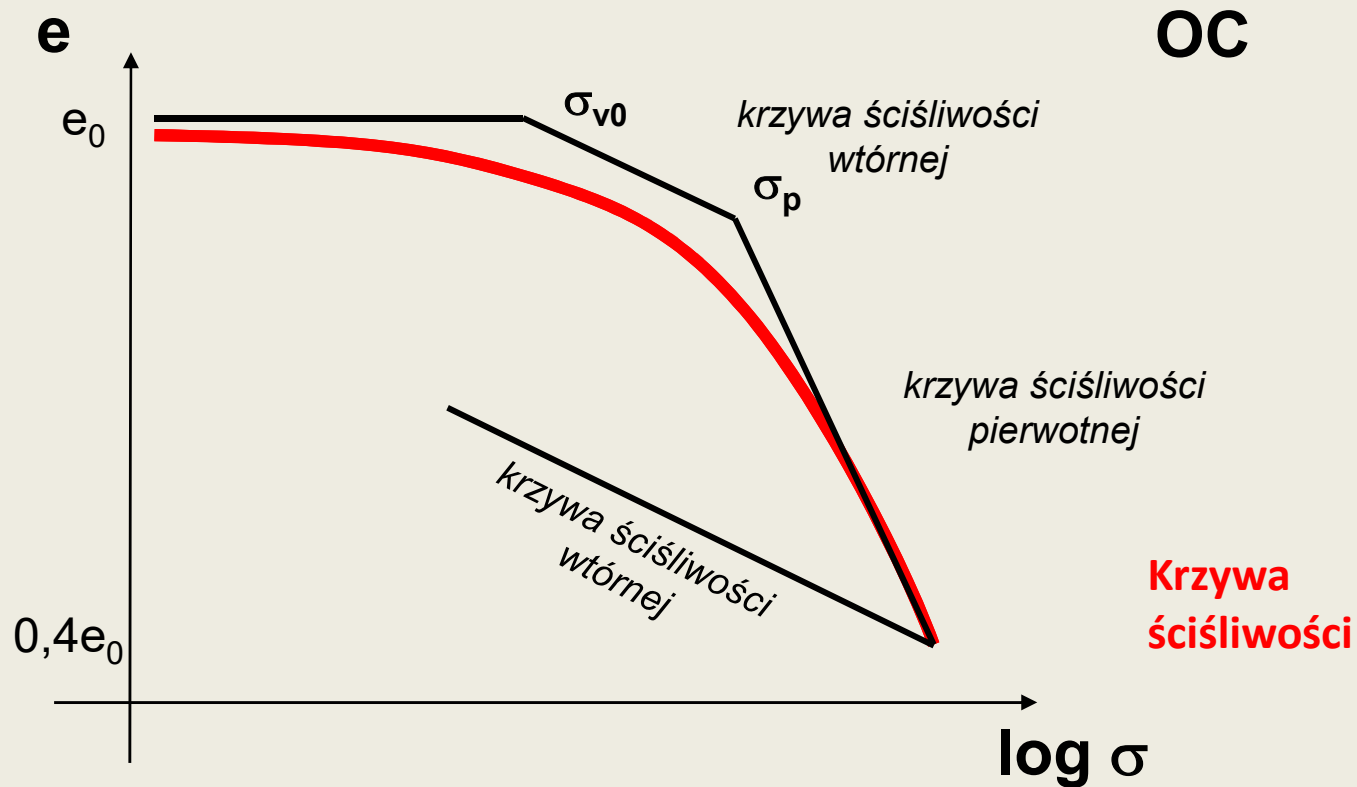
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## GRUNT JAKO CIAŁO Z PAMIĘCIĄ



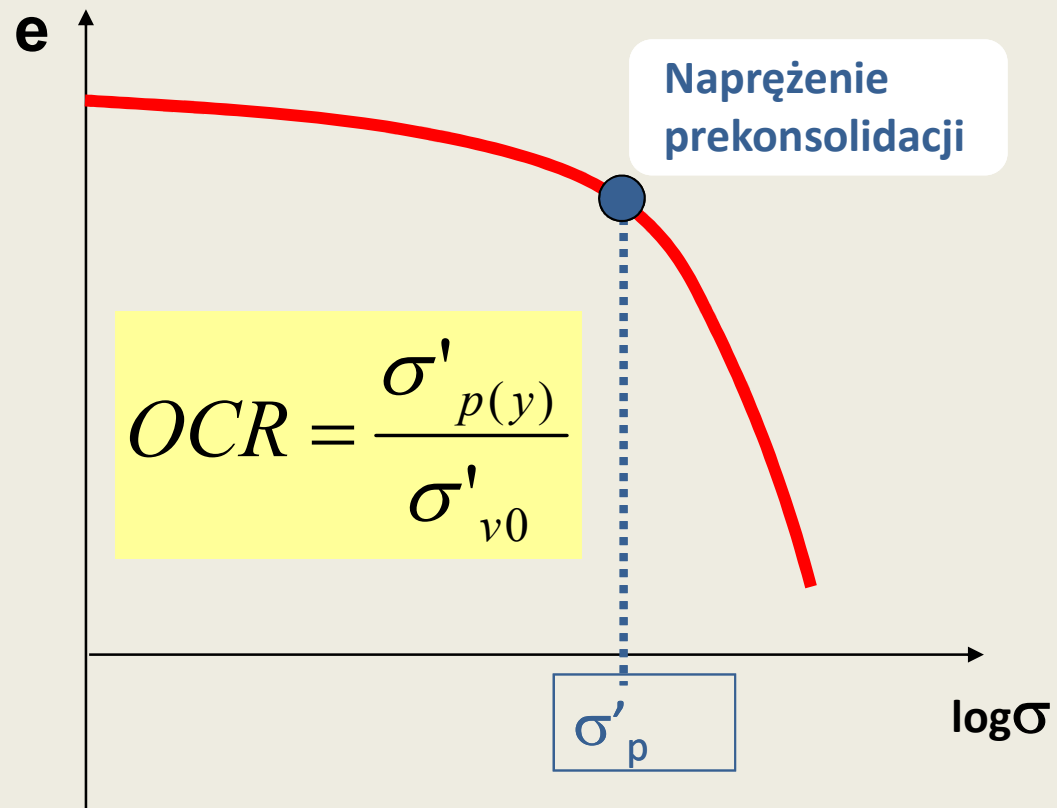
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## GRUNT JAKO CIAŁO Z PAMIĘCIĄ



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

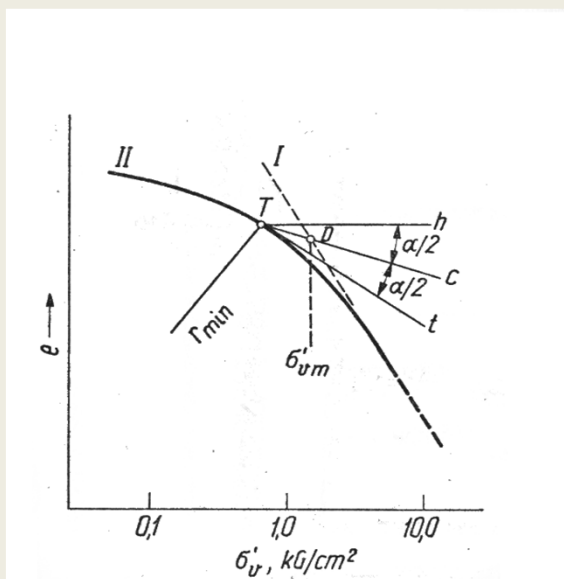
## GRUNT JAKO CIAŁO Z PAMIĘCIĄ



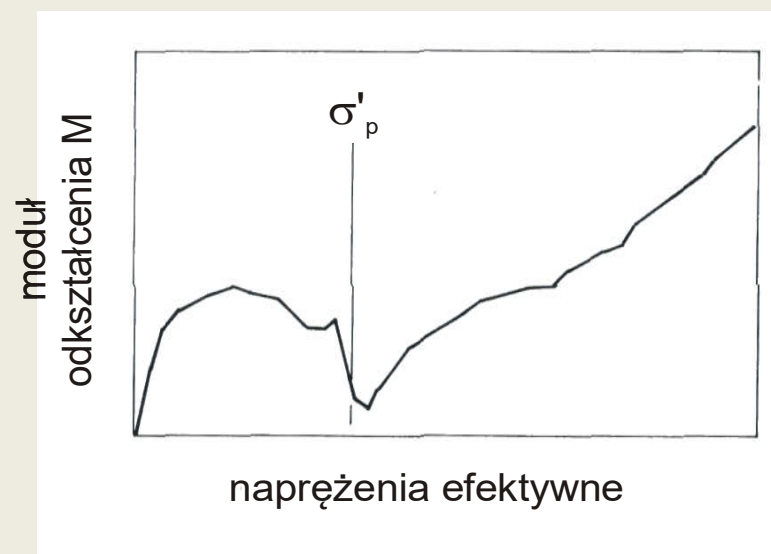
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## GRUNT JAKO CIAŁO Z PAMIĘCIĄ

### Naprężenie prekonsolidacji



Casagrande, 1936

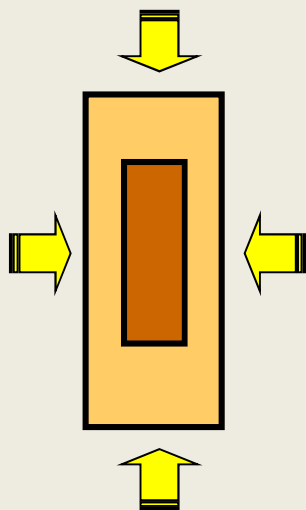


Janbu i inni, 1981

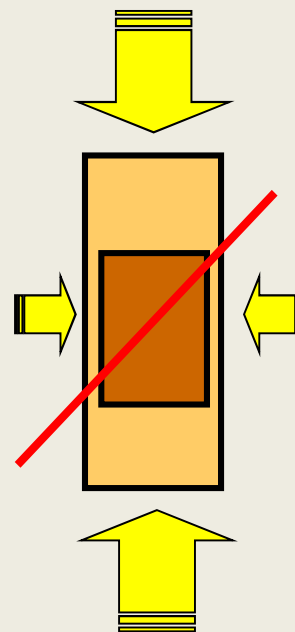
**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

**WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE**

ŚCISKANIE IZOTROPOWE



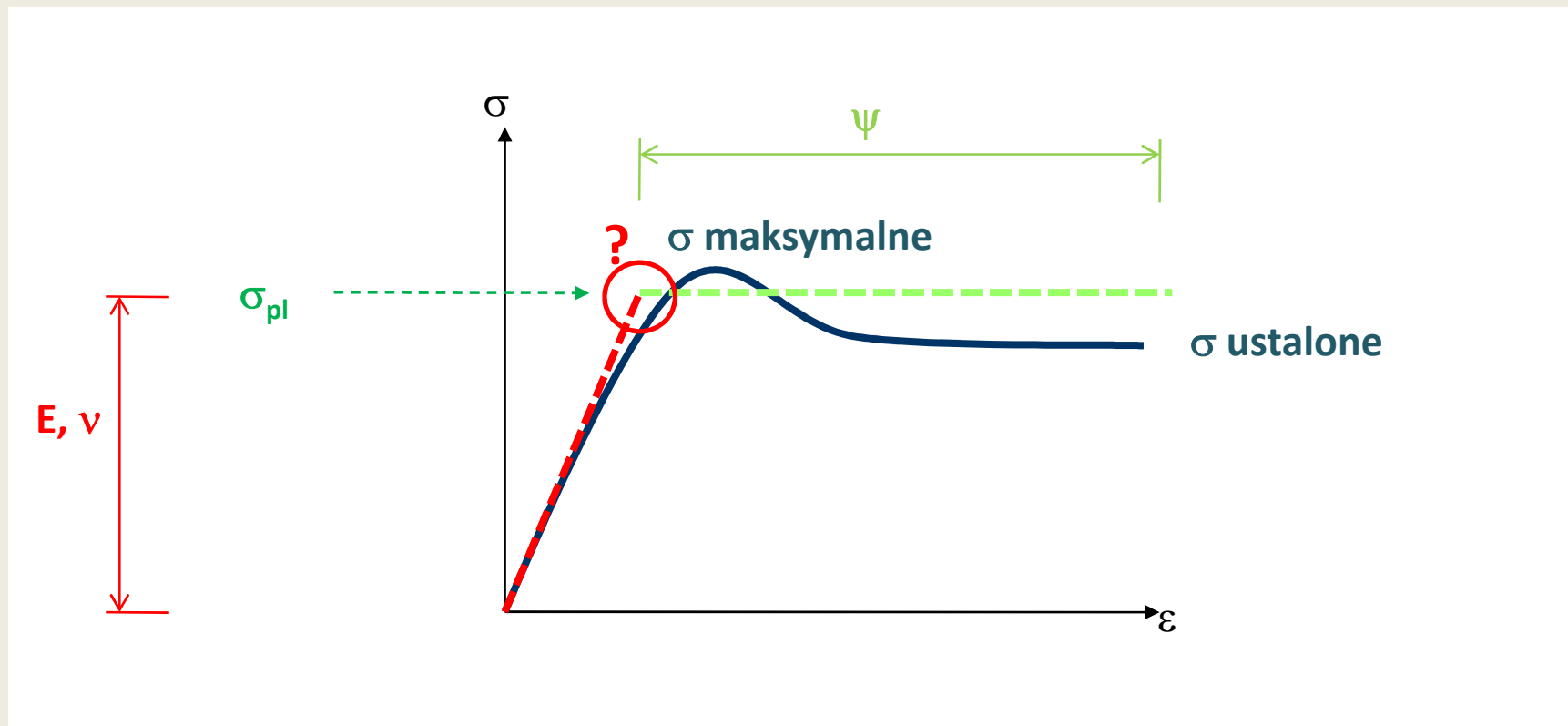
ŚCISKANIE ANIZOTROPOWE





# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE

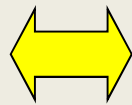


## MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

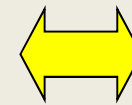
### WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE

warunek granicznej wartości naprężeń stycznych (Coulomba)

$$|\tau| < \tau_f$$



$$|\tau| = \tau_f$$



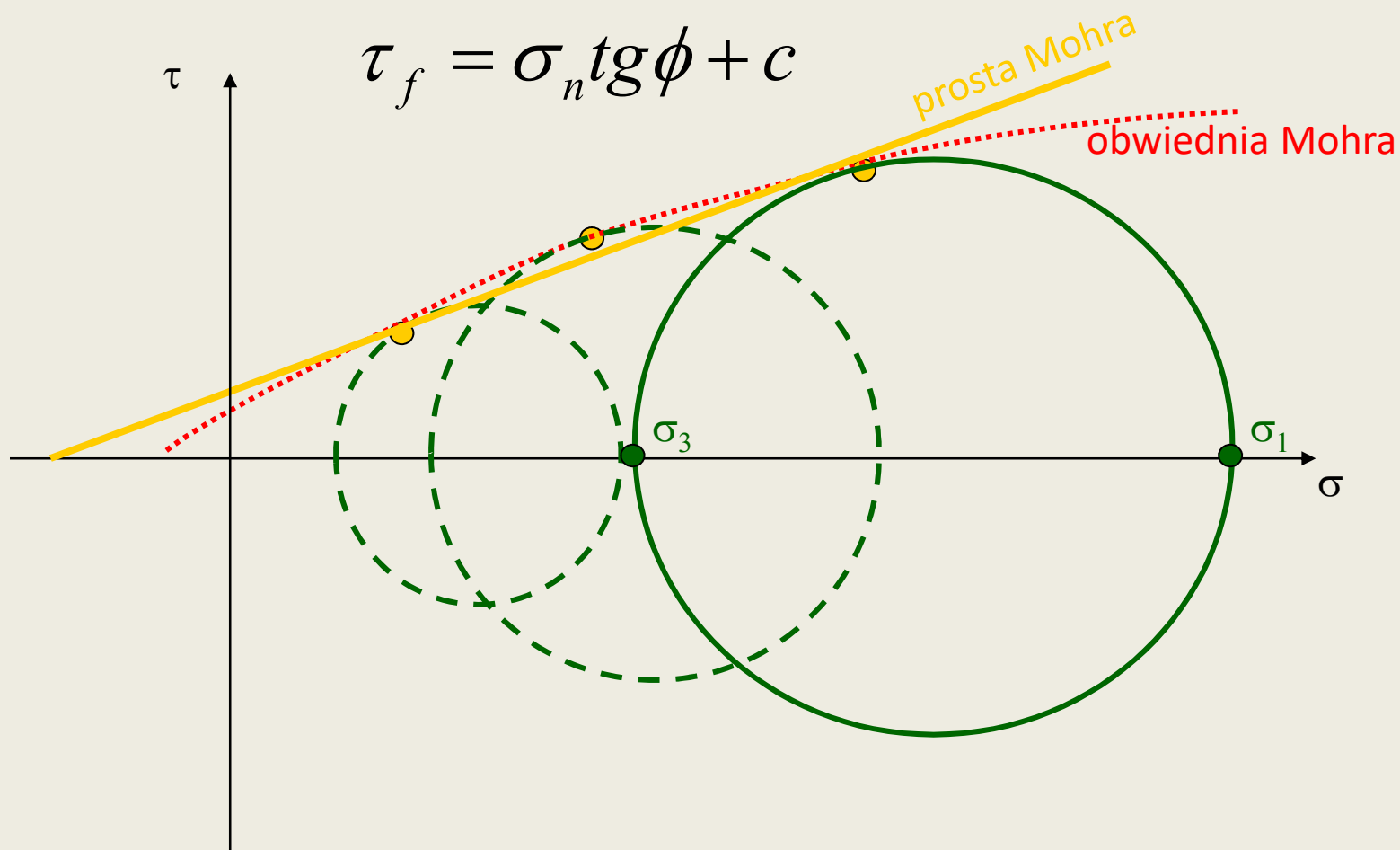
$$|\tau| > \tau_f$$



$$|\tau| = f(\sigma_n)$$

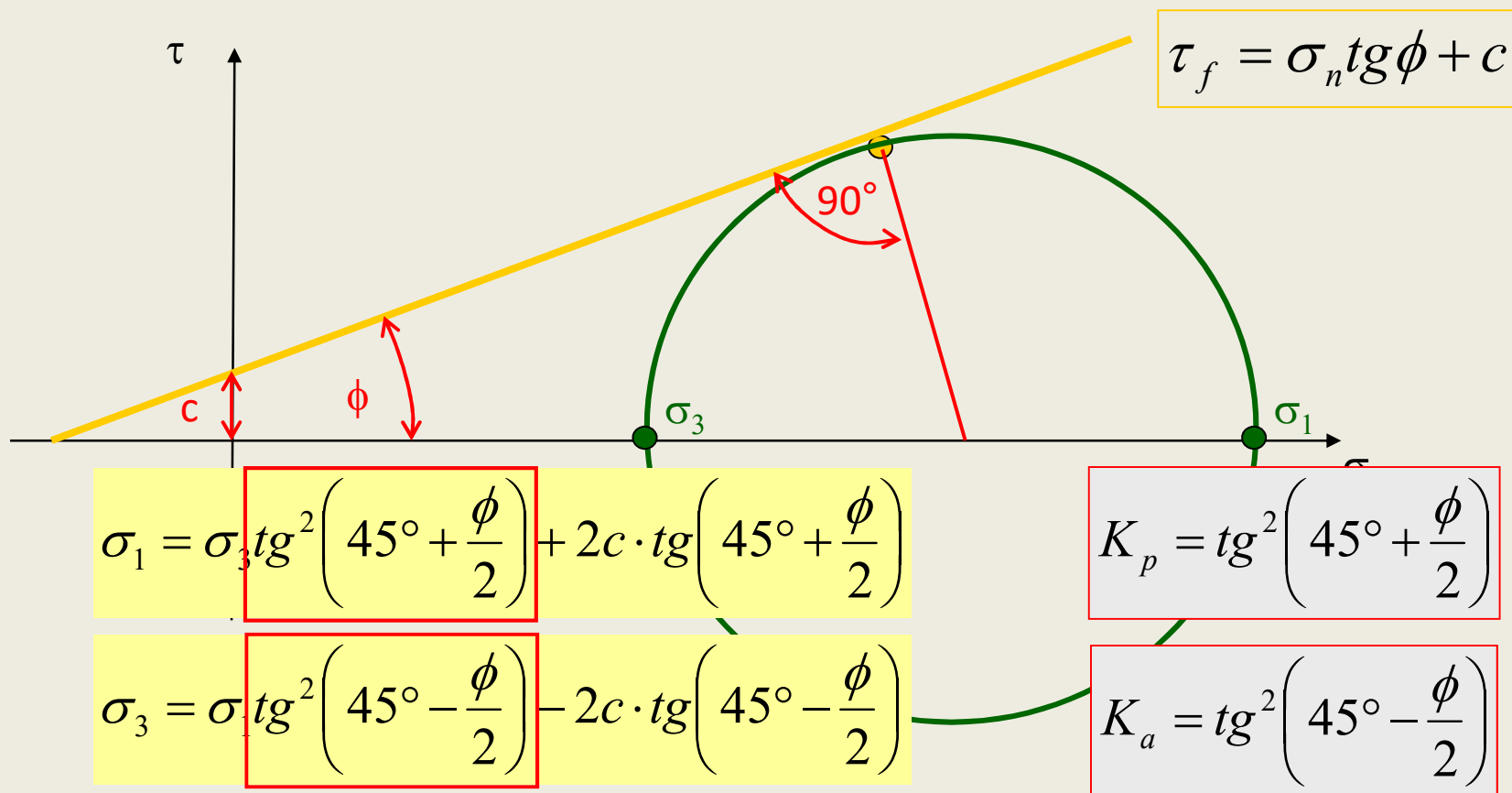
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE – model Mohra-Coulomba



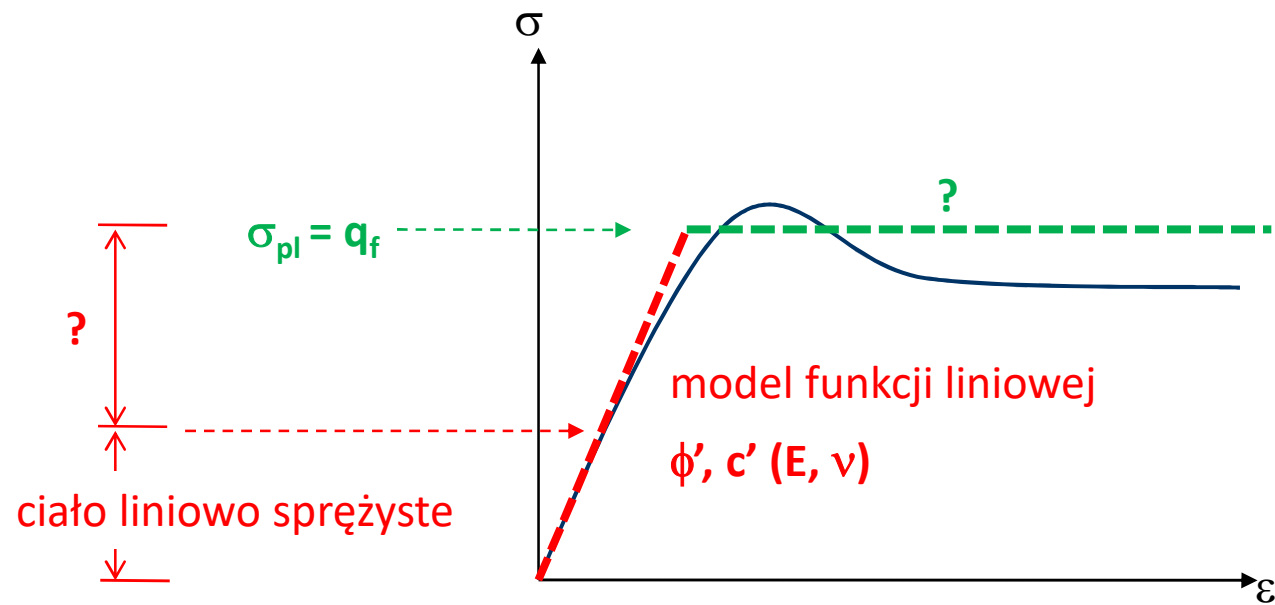
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE – model Mohra-Coulomba



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

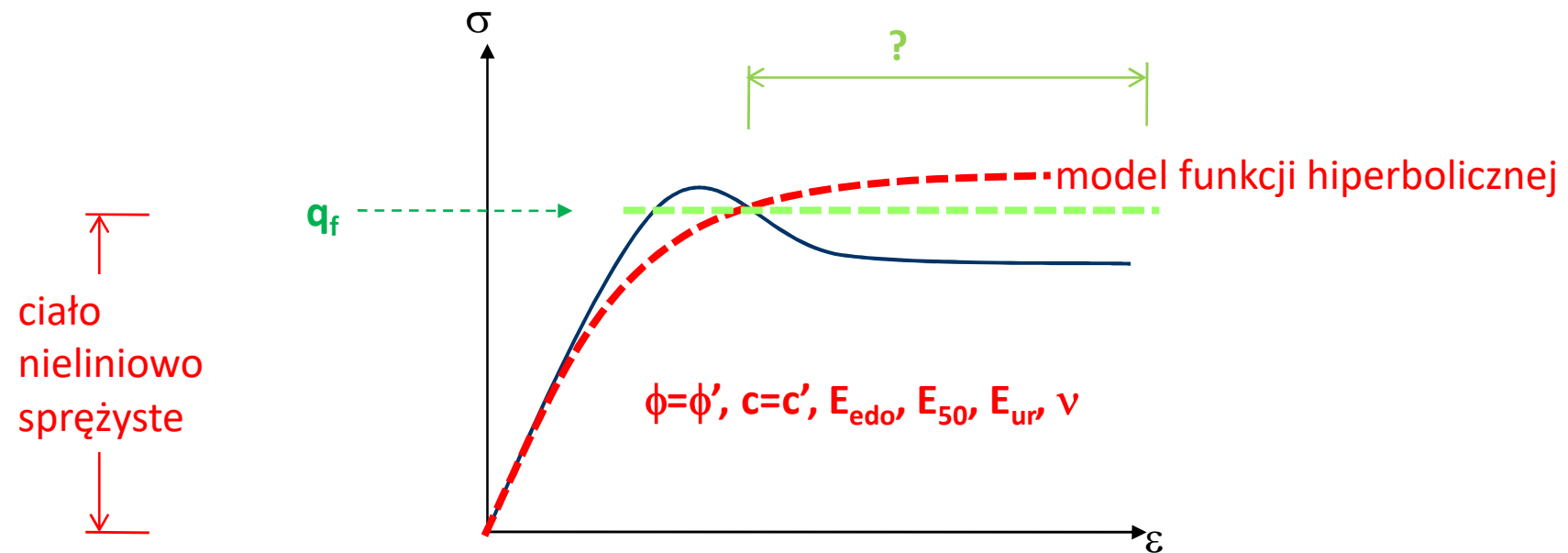
## model Mohra-Coulomba



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

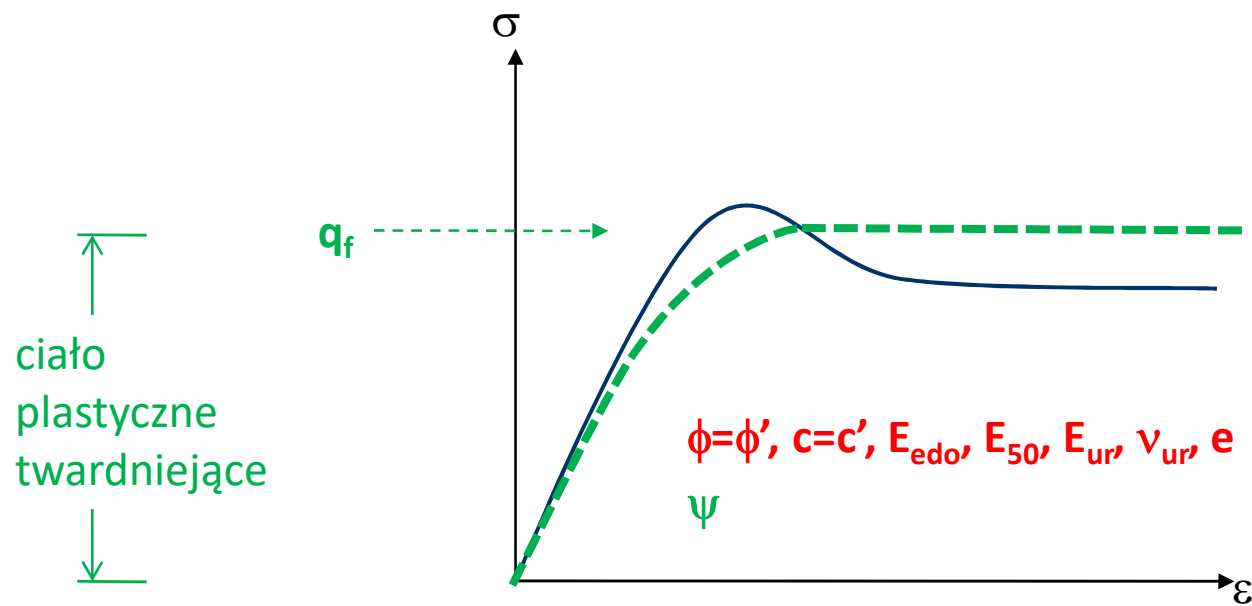
## model Duncana – Changa

(Duncan & Chang 1970)



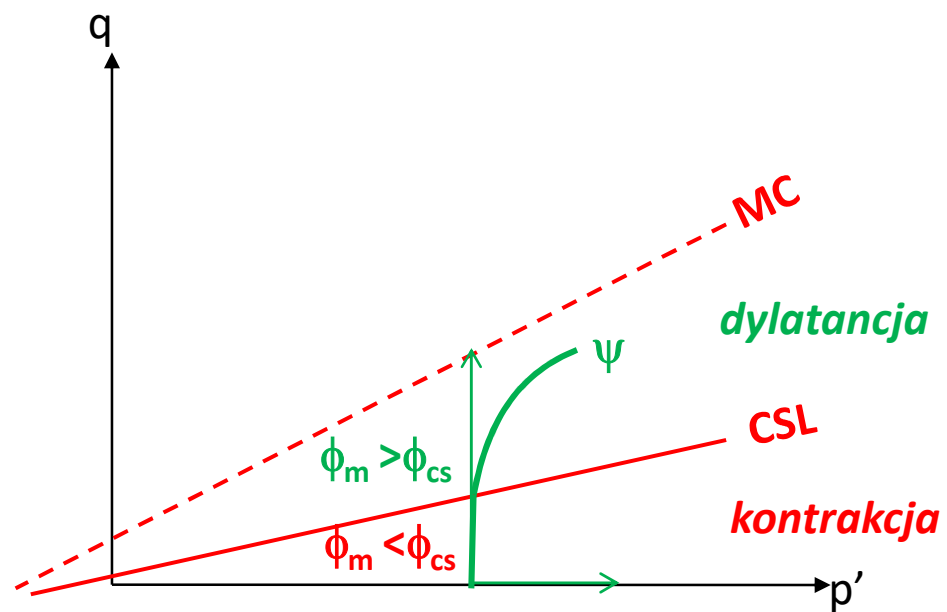
# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## model Hardening Soil



**MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA**

**model Hardening Soil**

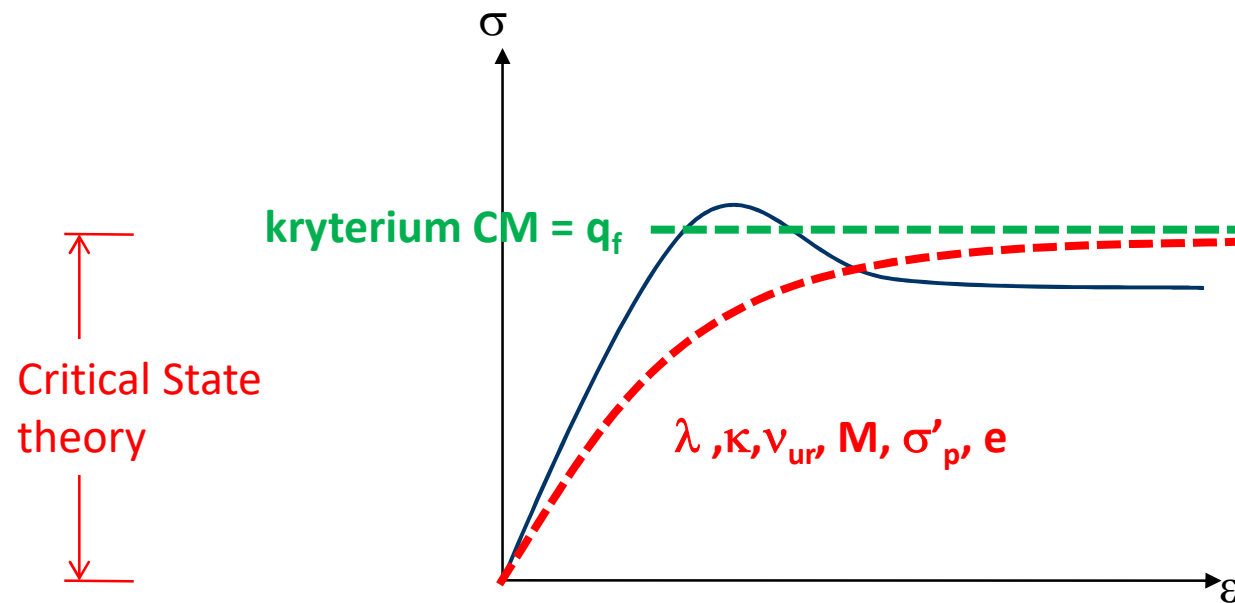




# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## model Modified Cam-Clay

(Roscoe & Burland 1968)



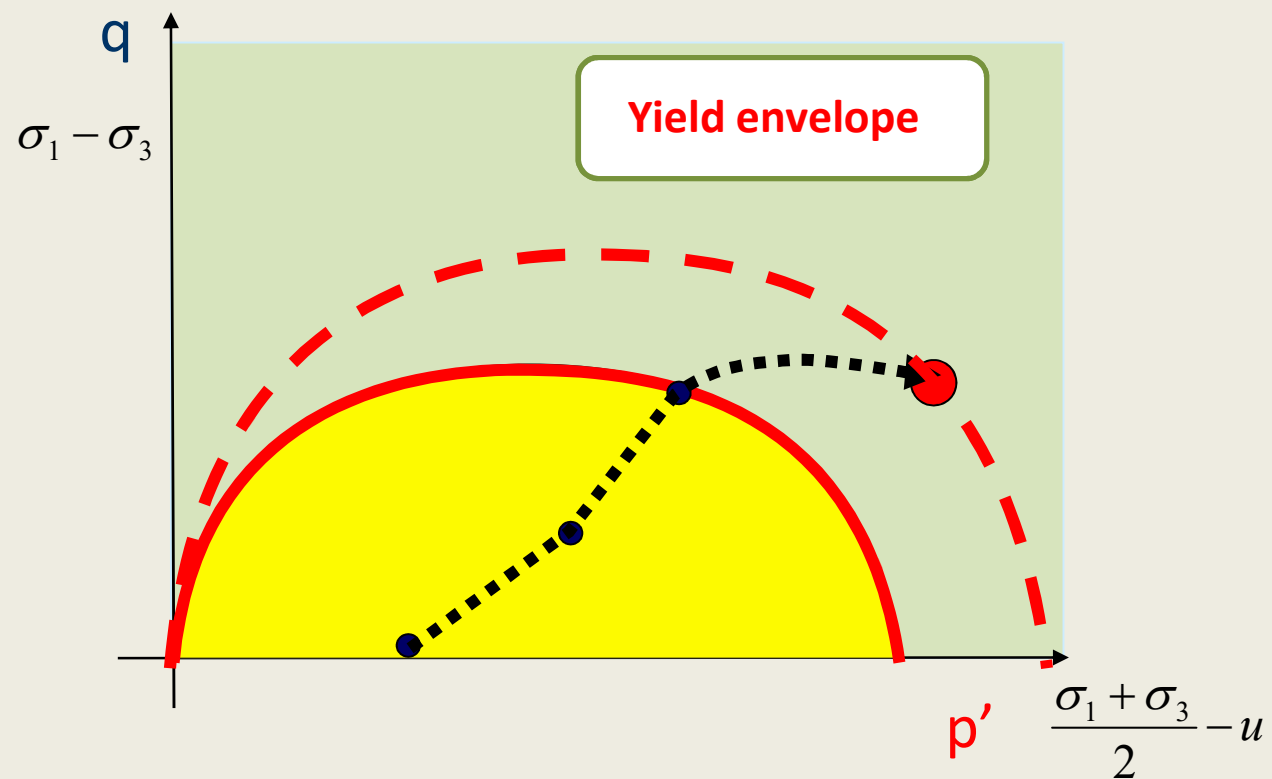
! zniszczenie wg. kryterium von Misesa

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}$$

# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

model Modified Cam-Clay

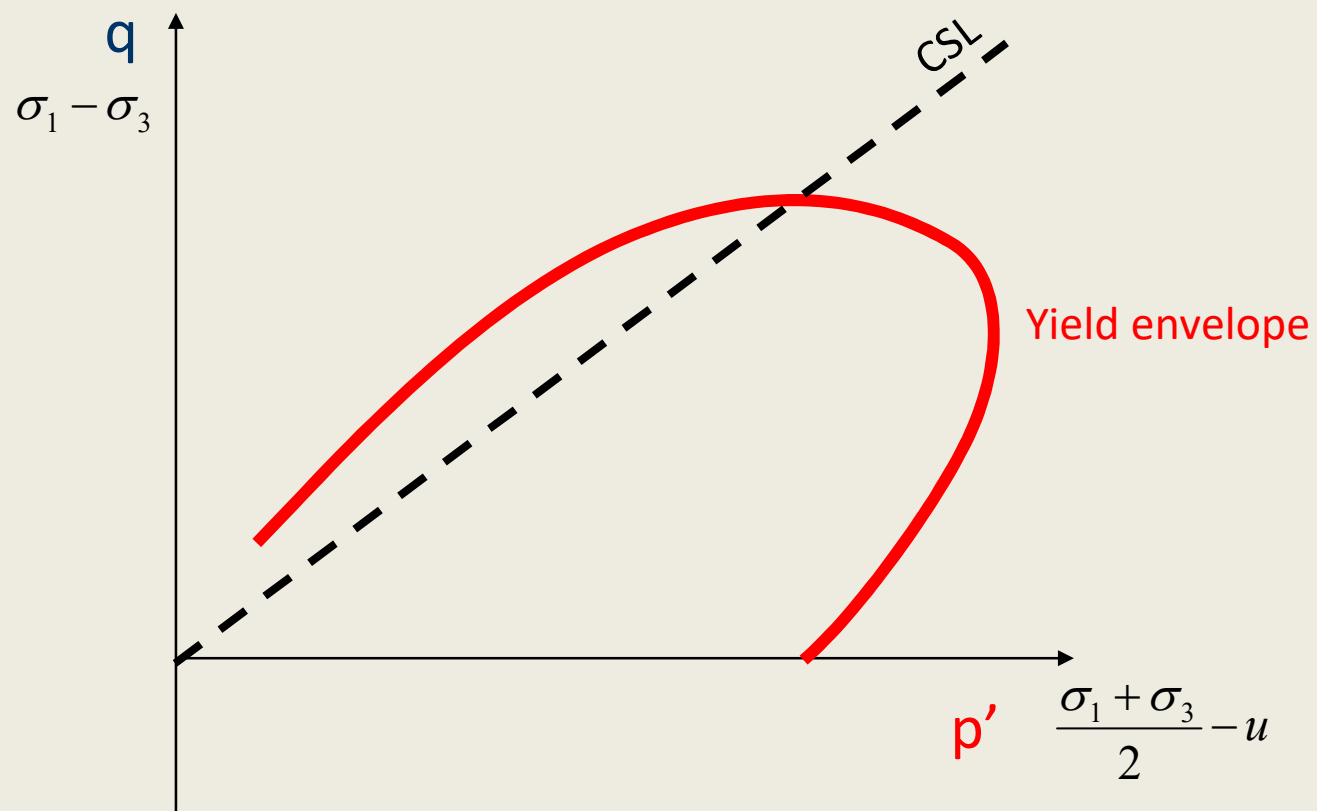
(Roscoe & Burland 1968)



MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

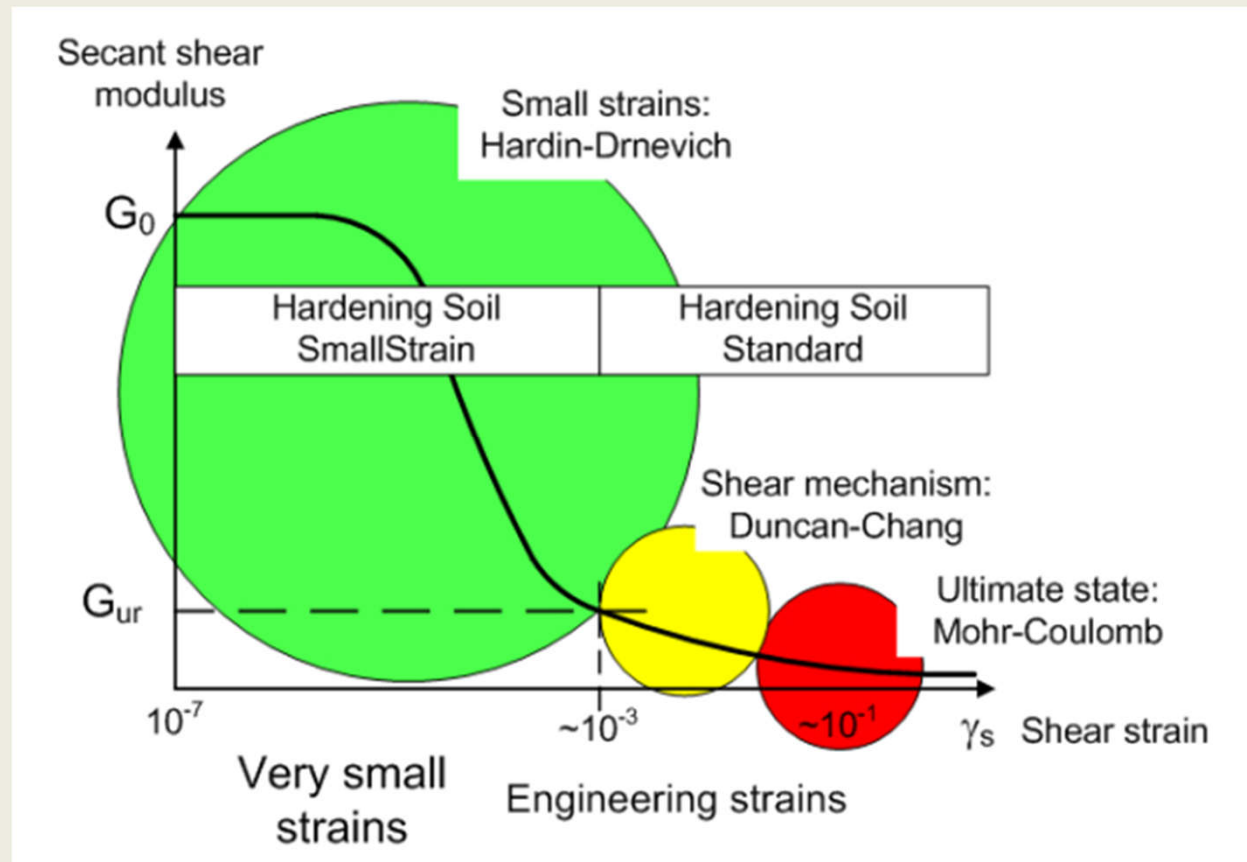
model Modified Cam-Clay

(Roscoe & Burland 1968)



# MG: STAN NAPRĘŻENIA + ODKSZTAŁCENIA

## modele - zakres stosowalności

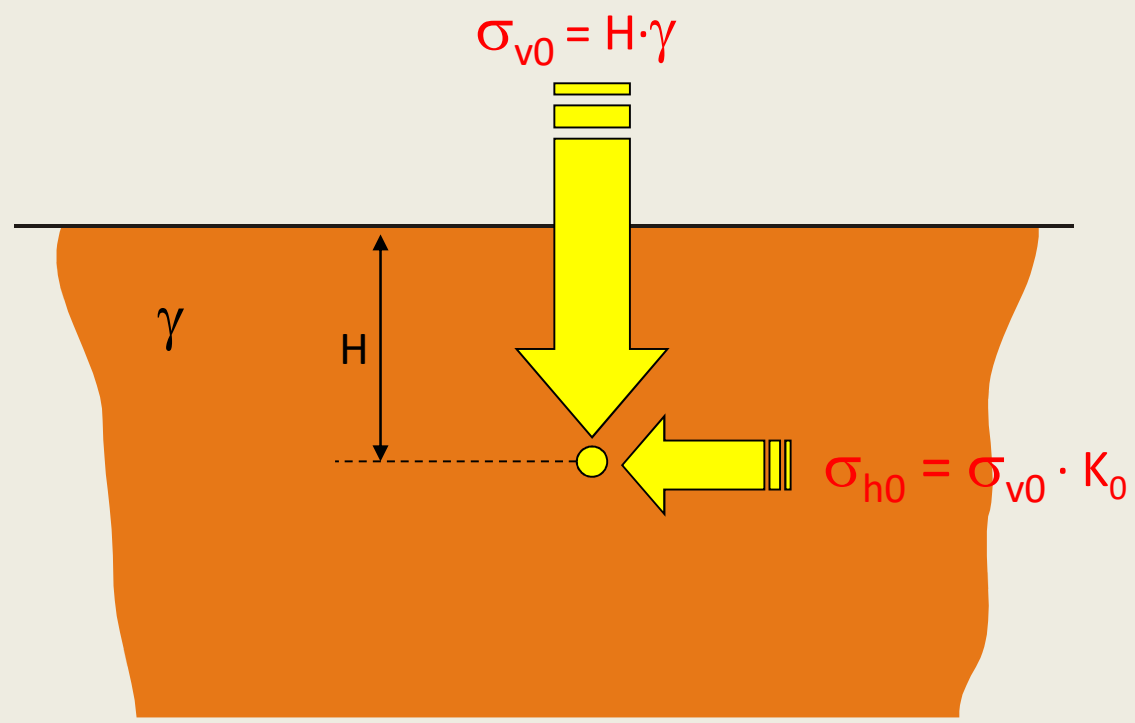


(Obrzud & Truty 2018)

MG: **NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**PARCIE I ODPÓR GRUNTU**

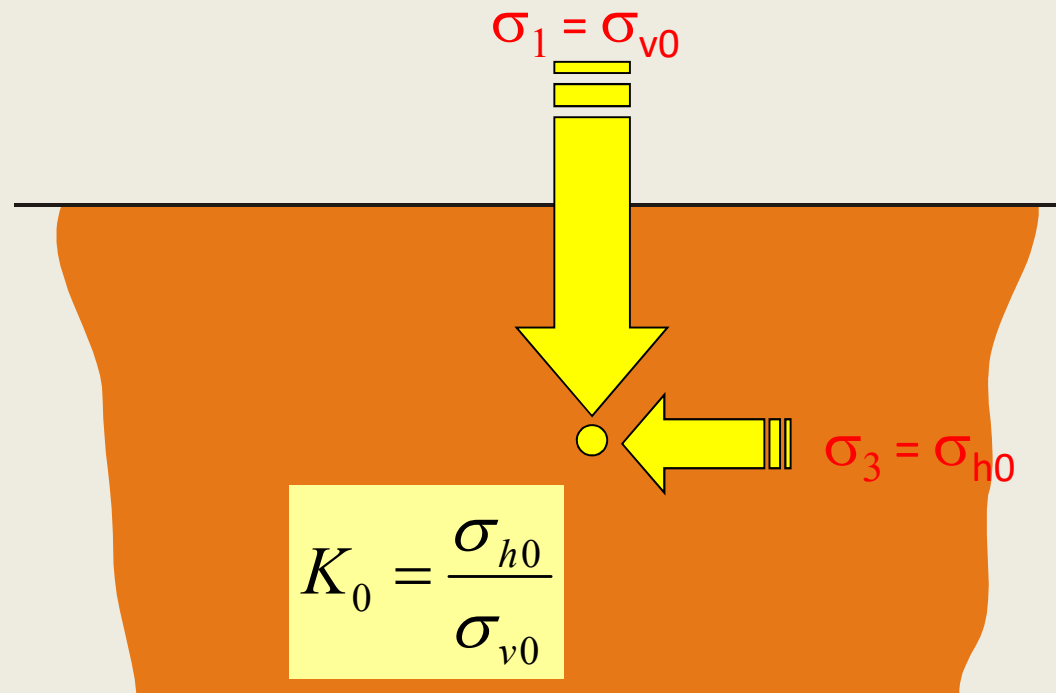
geostatyczny stan naprężenia



# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## PARCIE I ODPÓR GRUNTU

parcie spoczynkowe



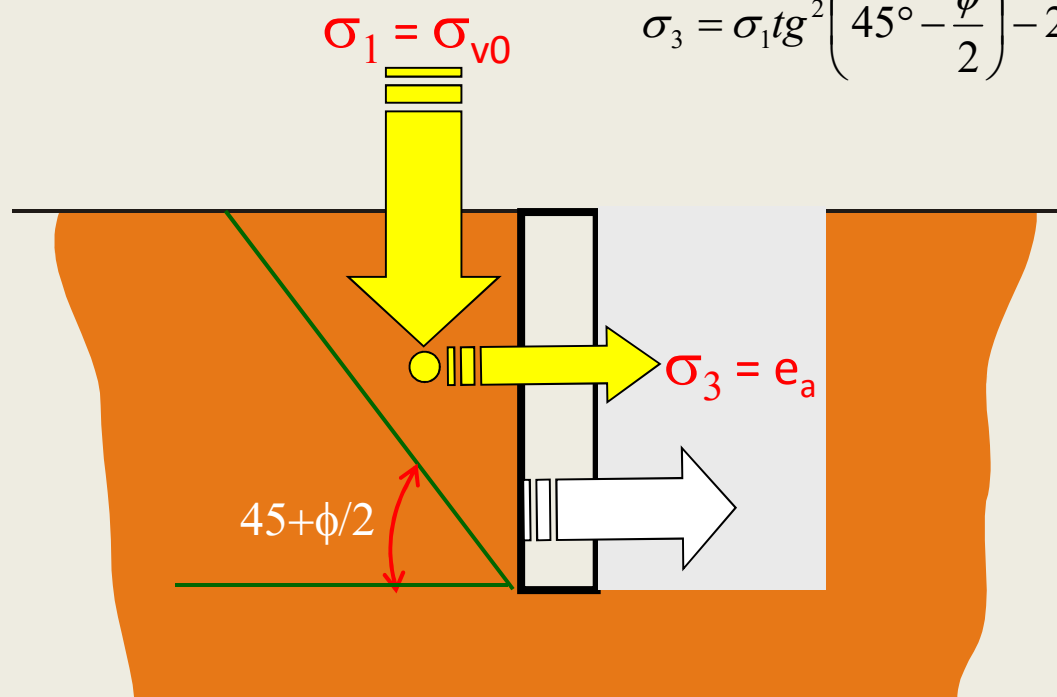
$$K_0 = \left(1 + \frac{2}{3} \sin \phi\right) \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}\right) \Rightarrow K_0 = (1 - \sin \phi)$$

# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## PARCIE I ODPÓR GRUNTU

parcie czynne

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$



$$e_a = \gamma \cdot H \cdot K_a - 2c \cdot \sqrt{K_a}$$

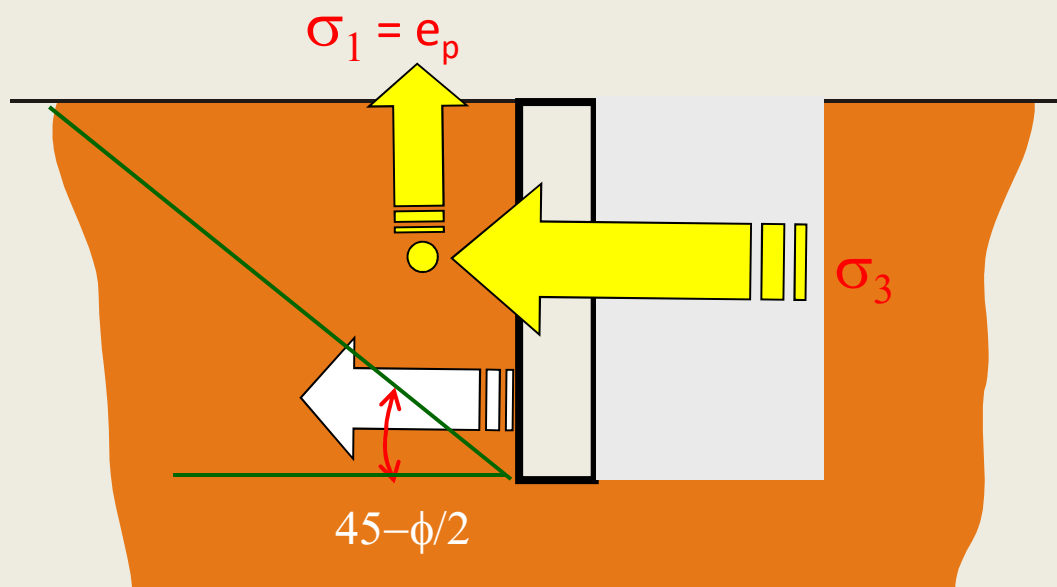
$$E_a = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} K_a - 2c \cdot H \cdot \sqrt{K_a}$$

# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## PARCIE I ODPÓR GRUNTU

parcie bierne

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$



$$e_p = \gamma \cdot H \cdot K_p + 2c \cdot \sqrt{K_p}$$

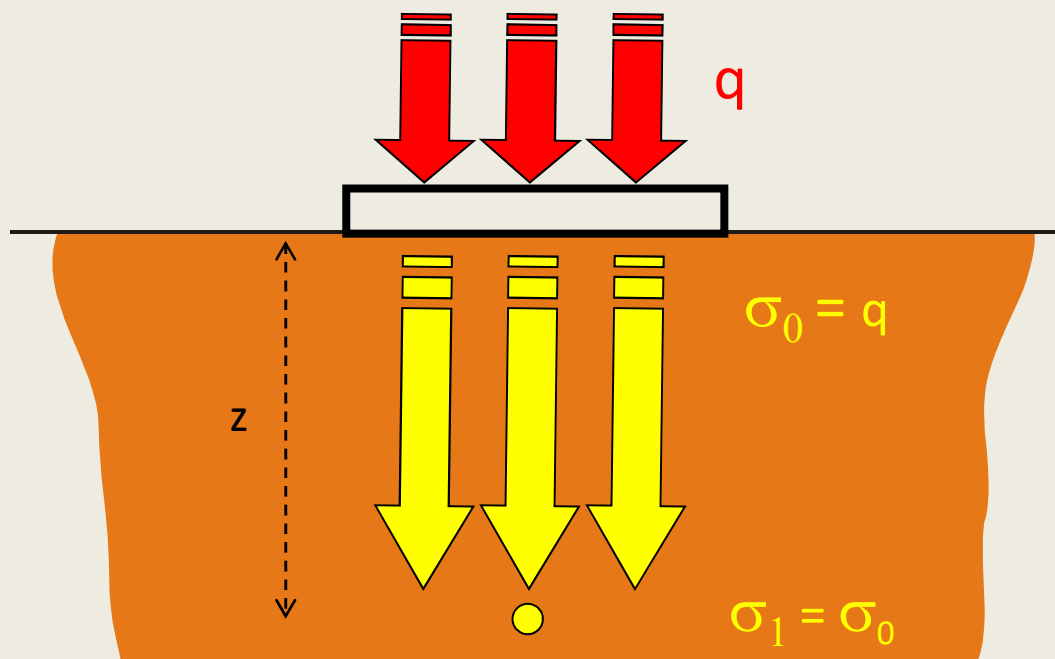
$$E_p = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} K_p + 2c \cdot H \cdot \sqrt{K_p}$$



MG: **NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

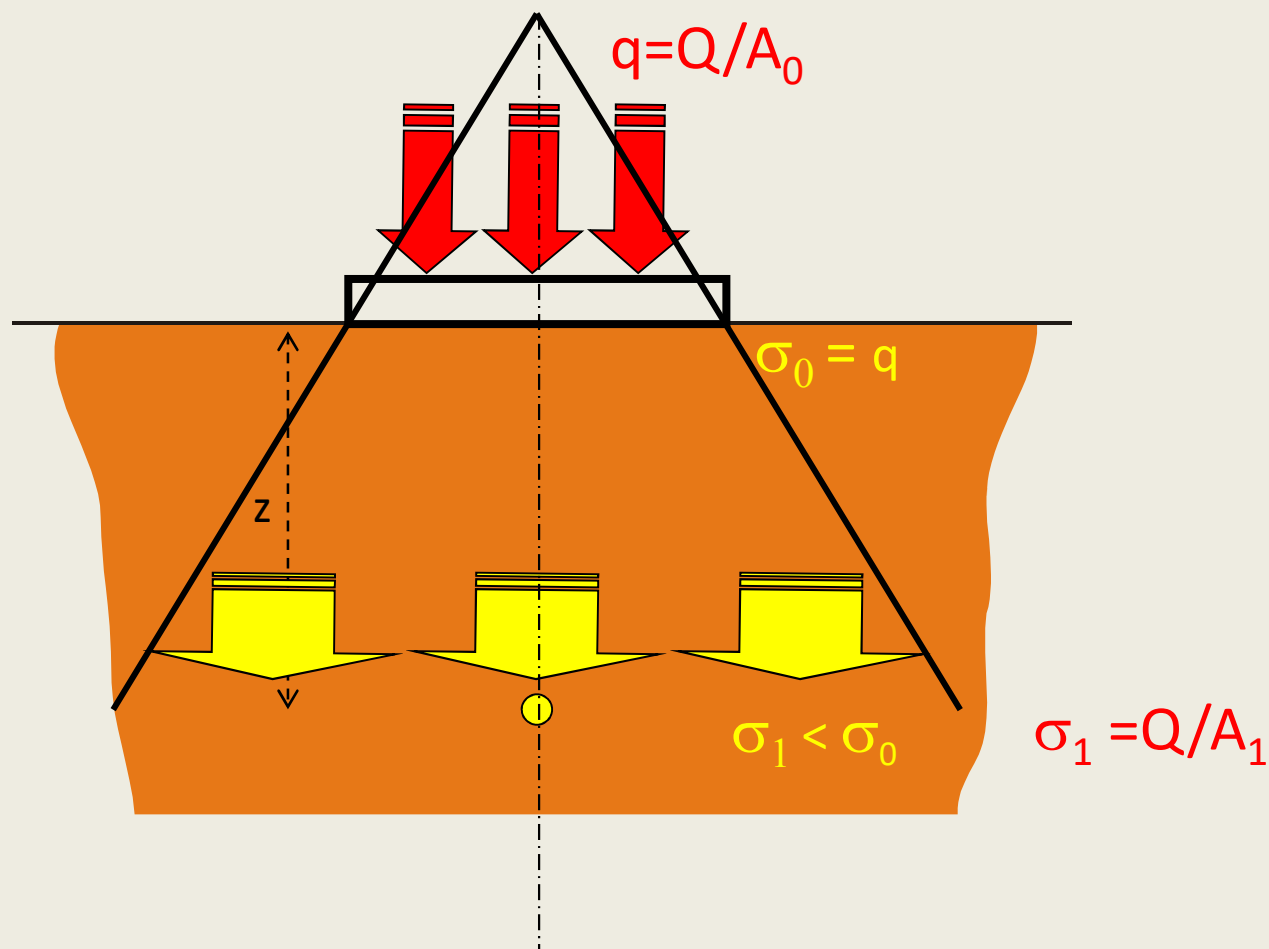
hipoteza Winklera



# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza rozkładu  
równomiernego



**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

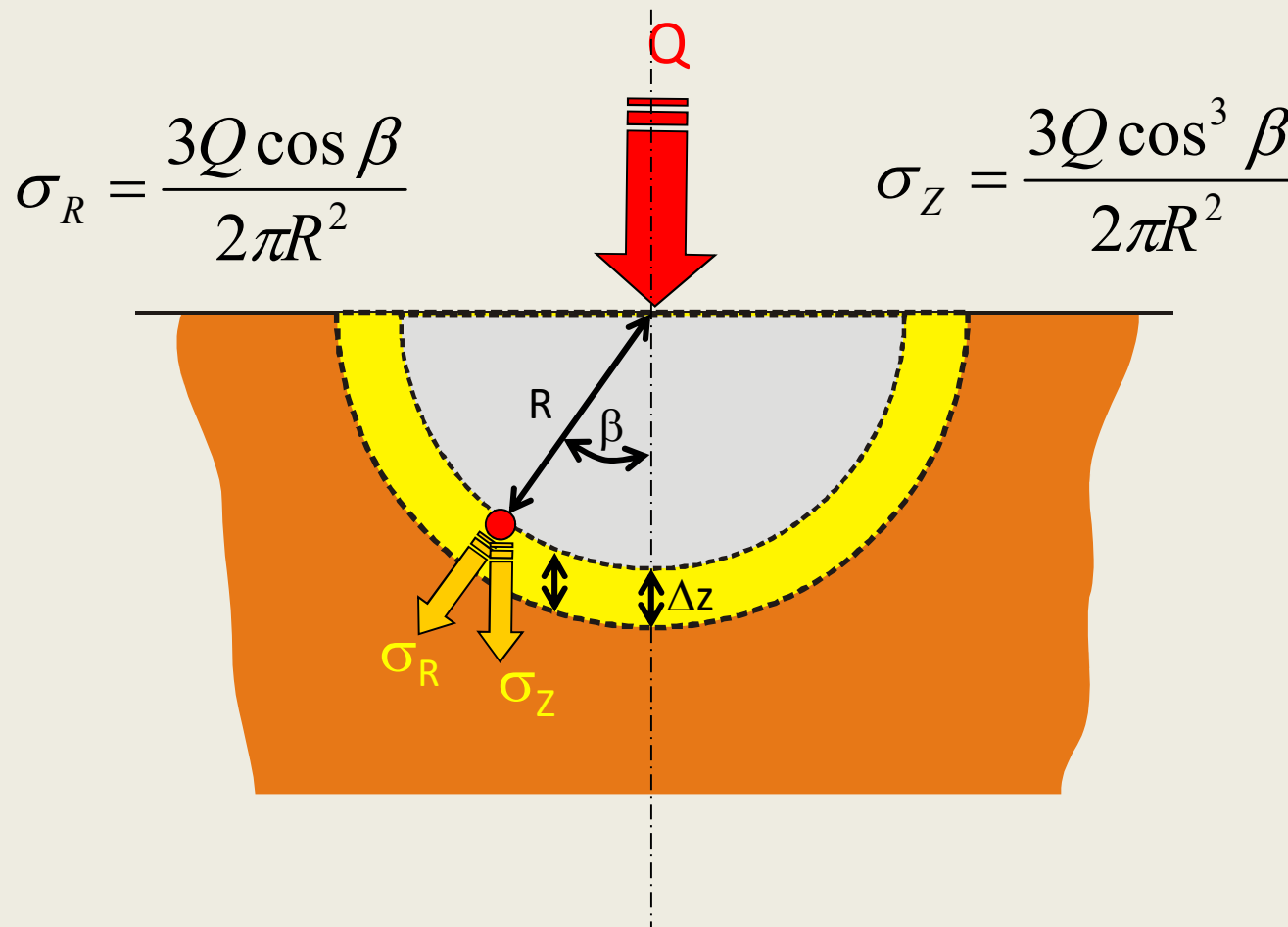
hipoteza  
Boussinesqua

- podłoże jest półprzestrzenią
- grunt jest izotropowy i nieważki
- grunt zachowuje się jak ciało sprężyste
- obowiązuje zasada superpozycji obciążeń
- sposób przyłożenia obciążenia wpływa na rozkład naprężeń tylko w bliskim sąsiedztwie

MG: **NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

hipoteza  
Boussinesqua



# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

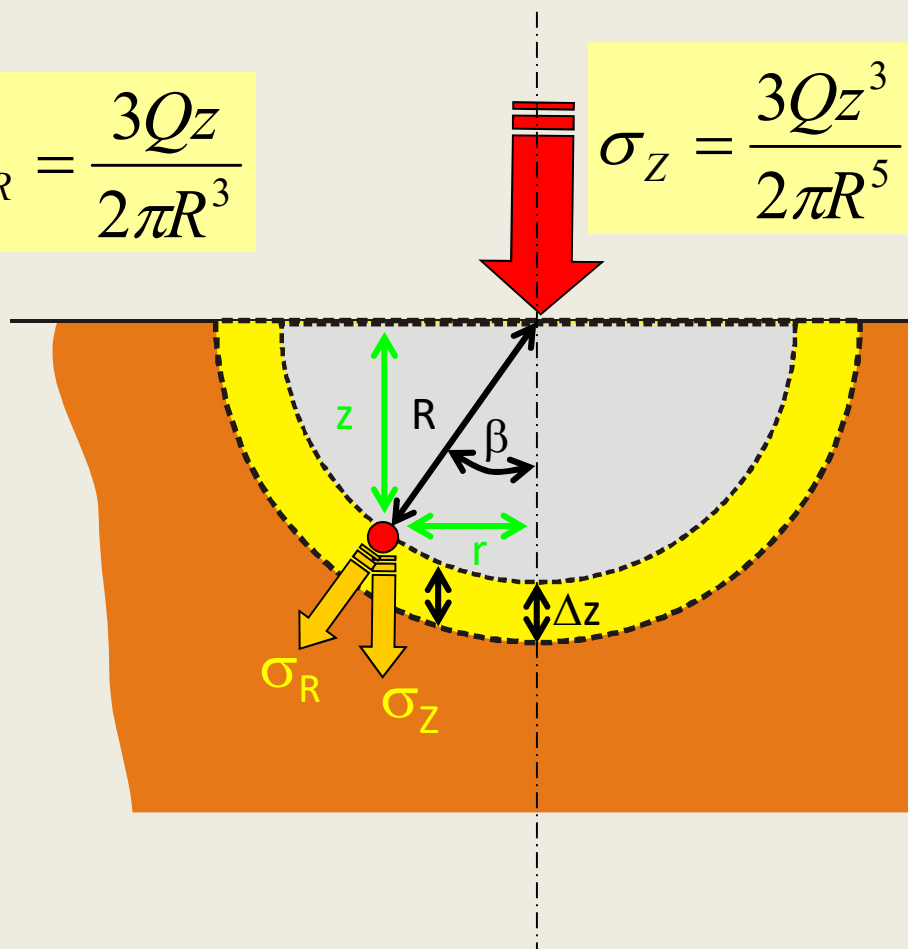
## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

$$\sigma_R = \frac{3Qz}{2\pi R^3}$$

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5}$$

$$= \frac{3Q}{2\pi z^2 \left( 1 + \left( \frac{r}{z} \right)^2 \right)^{\frac{5}{2}}}$$

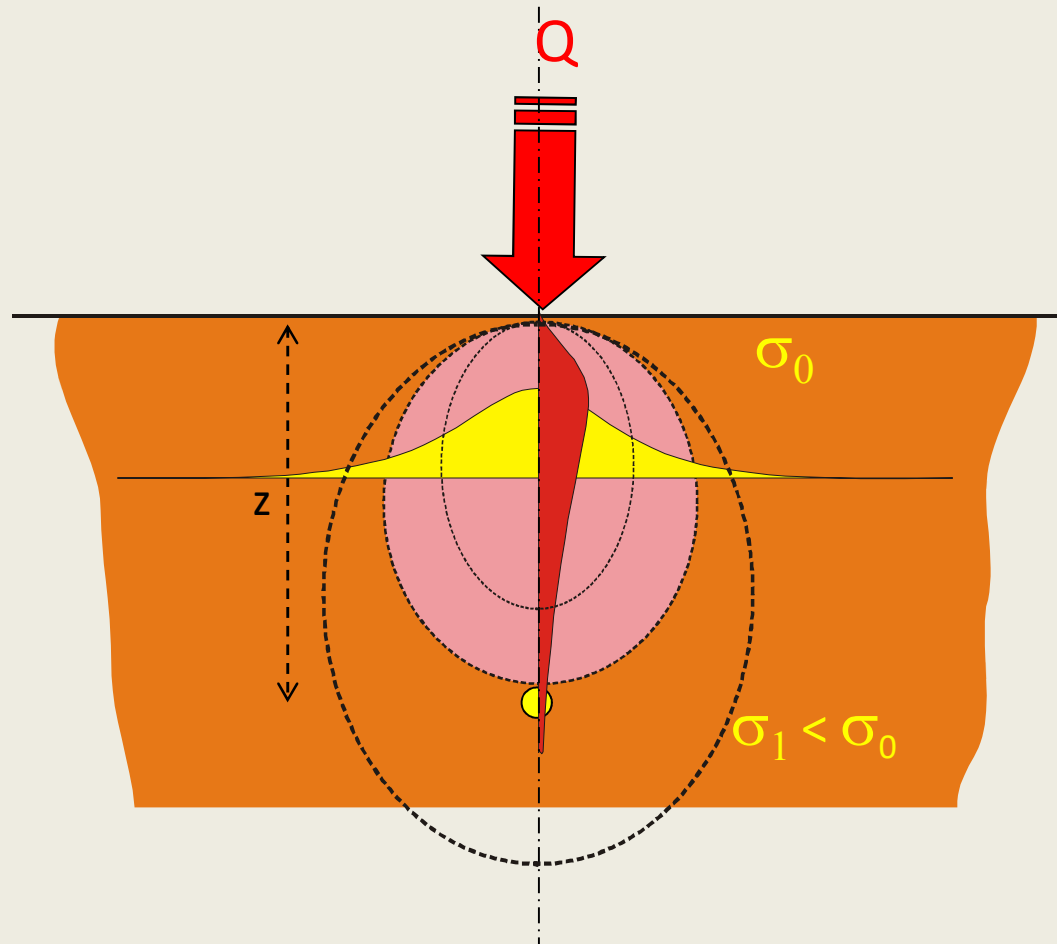


$$\sigma_z = \frac{QK_r}{z^2}$$

MG: **NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

hipoteza  
Boussinesqua

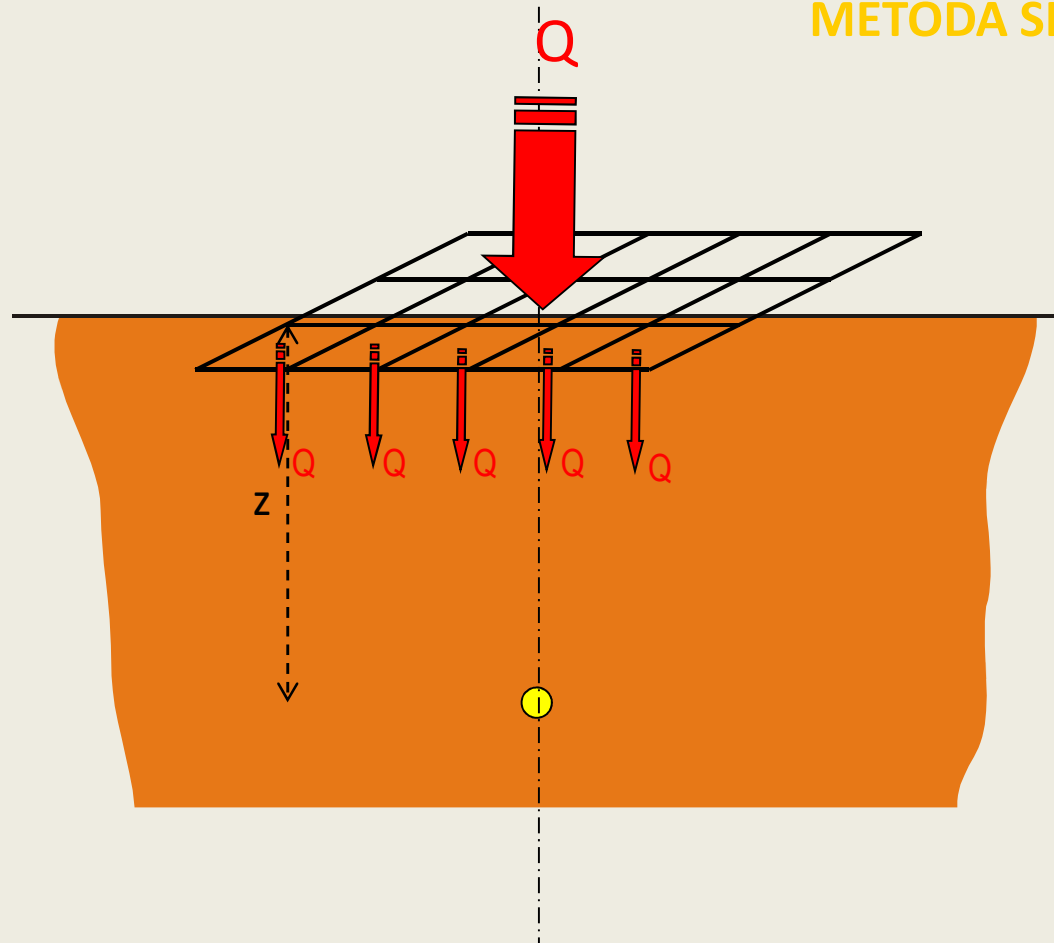


**MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

hipoteza  
Boussinesqua

**METODA SIŁ SKUPIONYCH**



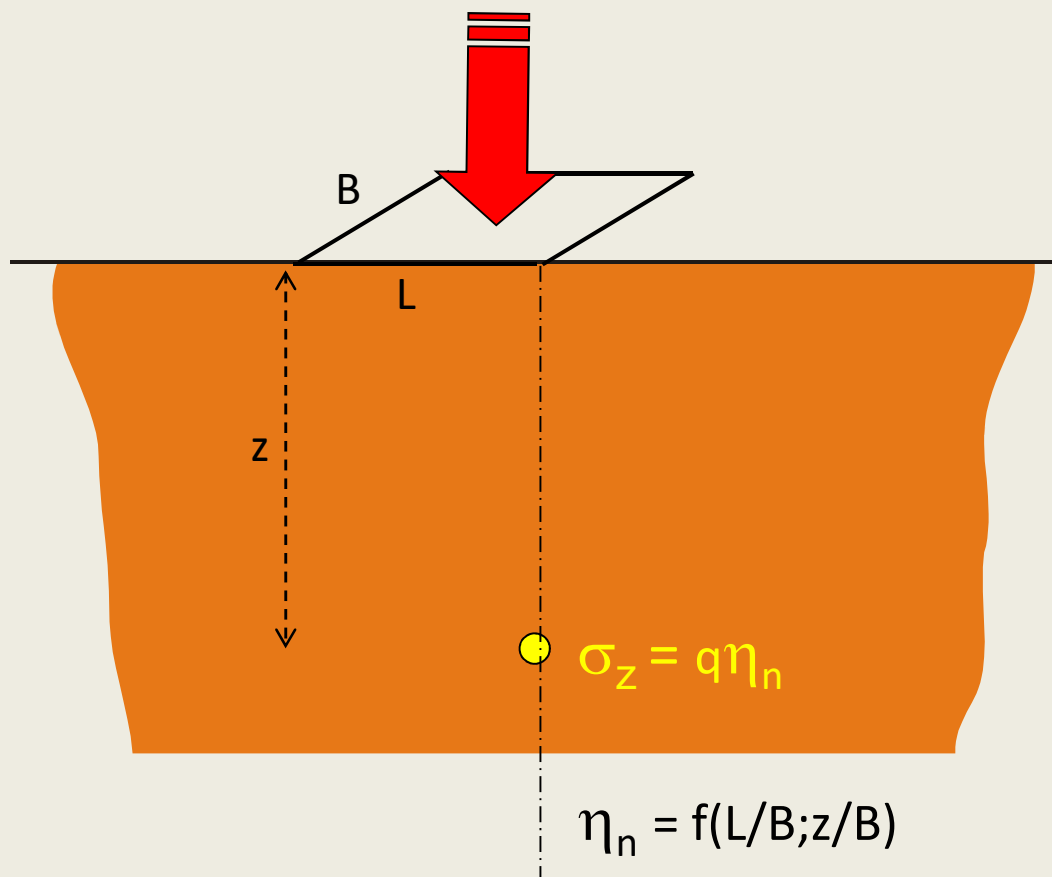
MG: **NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE**

**ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH**

hipoteza  
Boussinesqua

$$q = Q / (BL)$$

METODA PUNKTÓW NAROŻNYCH





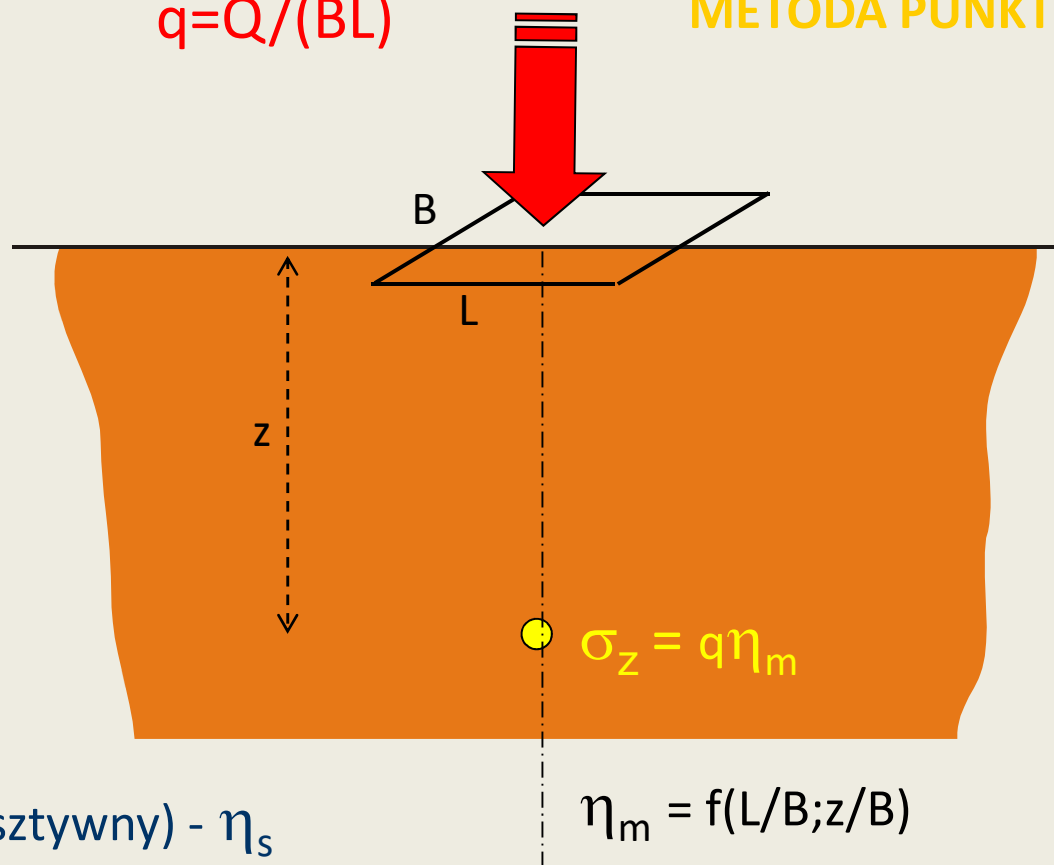
# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

$$q = Q / (BL)$$

METODA PUNKTU ŚRODKOWEGO

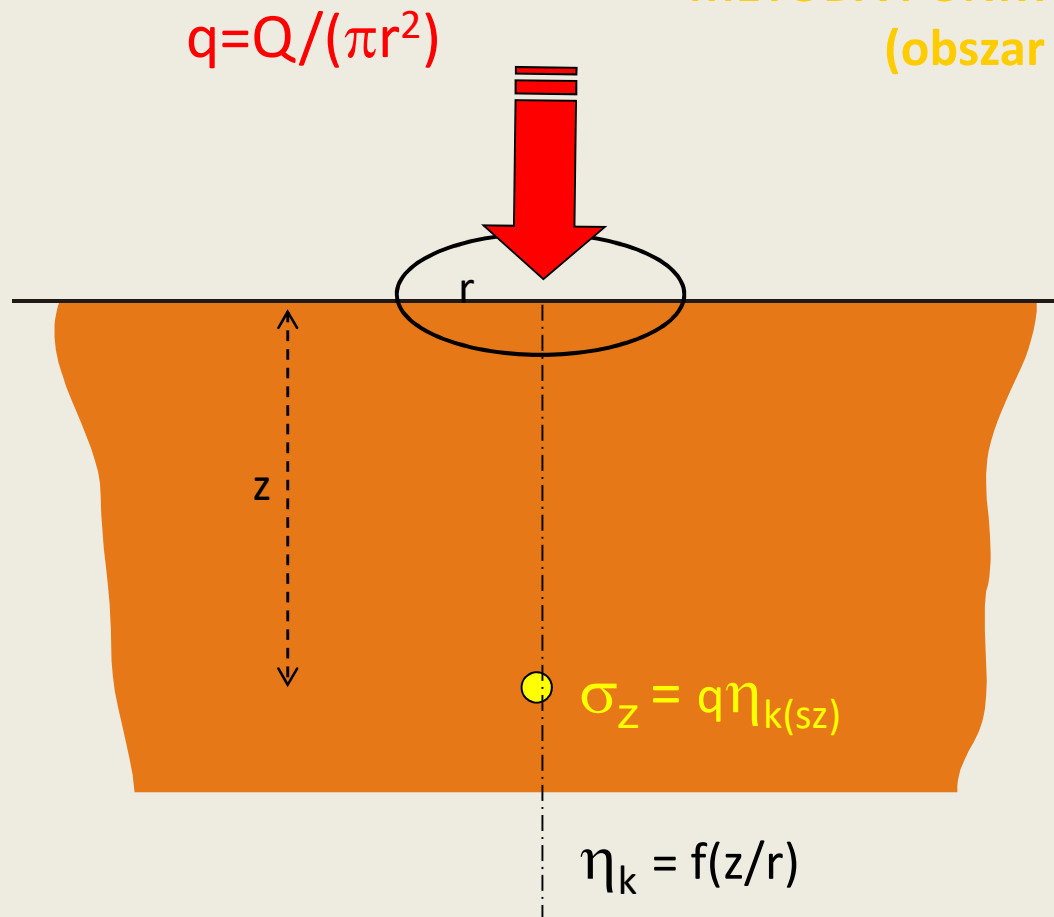


# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

METODA PUNKTU ŚRODKOWEGO  
(obszar kołowy)

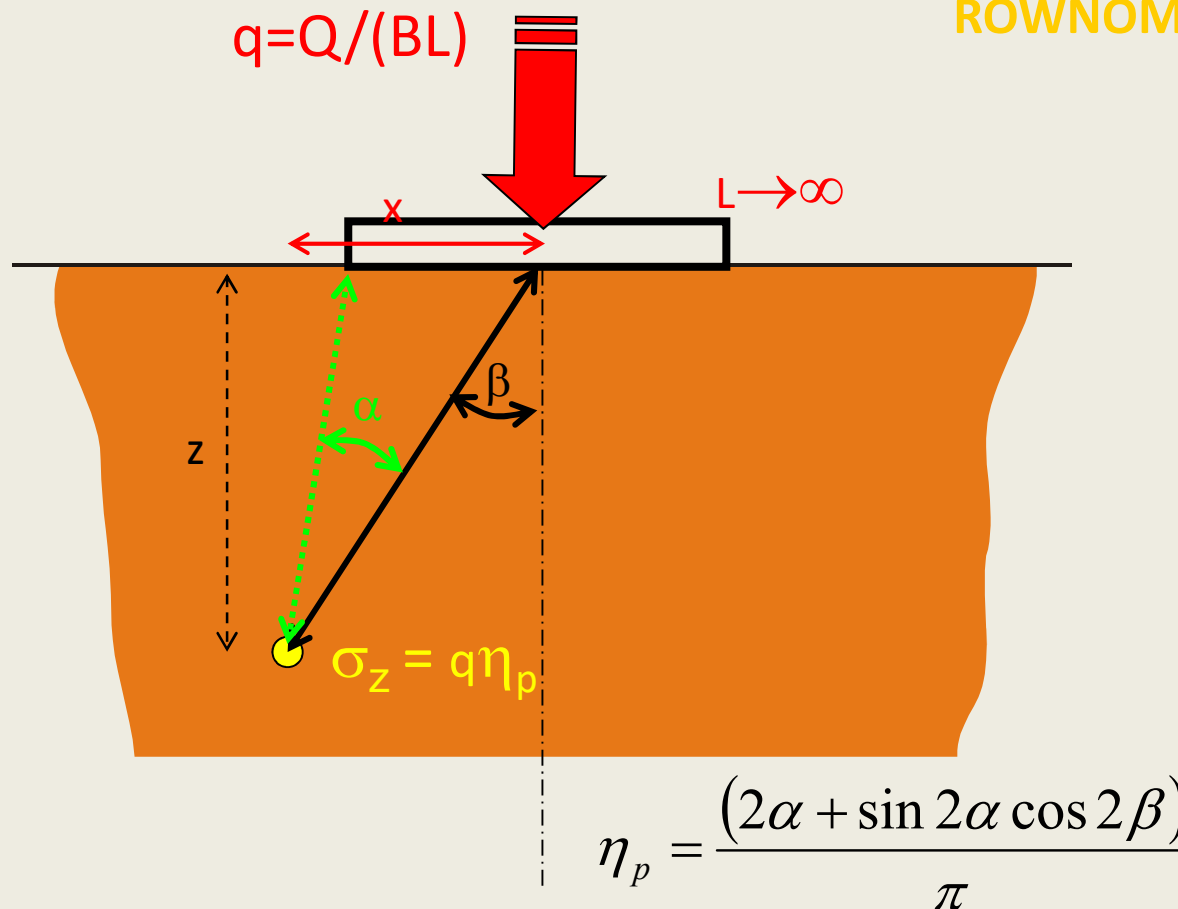


# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

OBCIĄŻENIE PASMOWE  
RÓWNOMIERNE

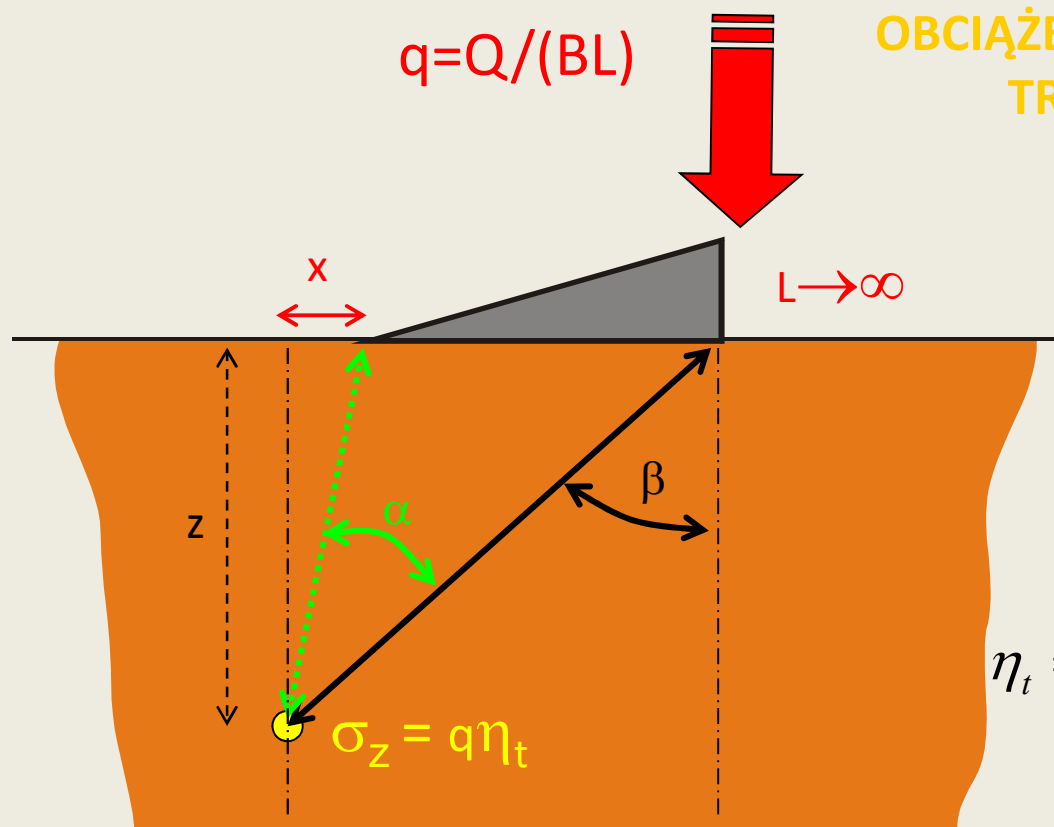


# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

OBCIĄŻENIE PASMOWE  
TRÓJKĄTNE



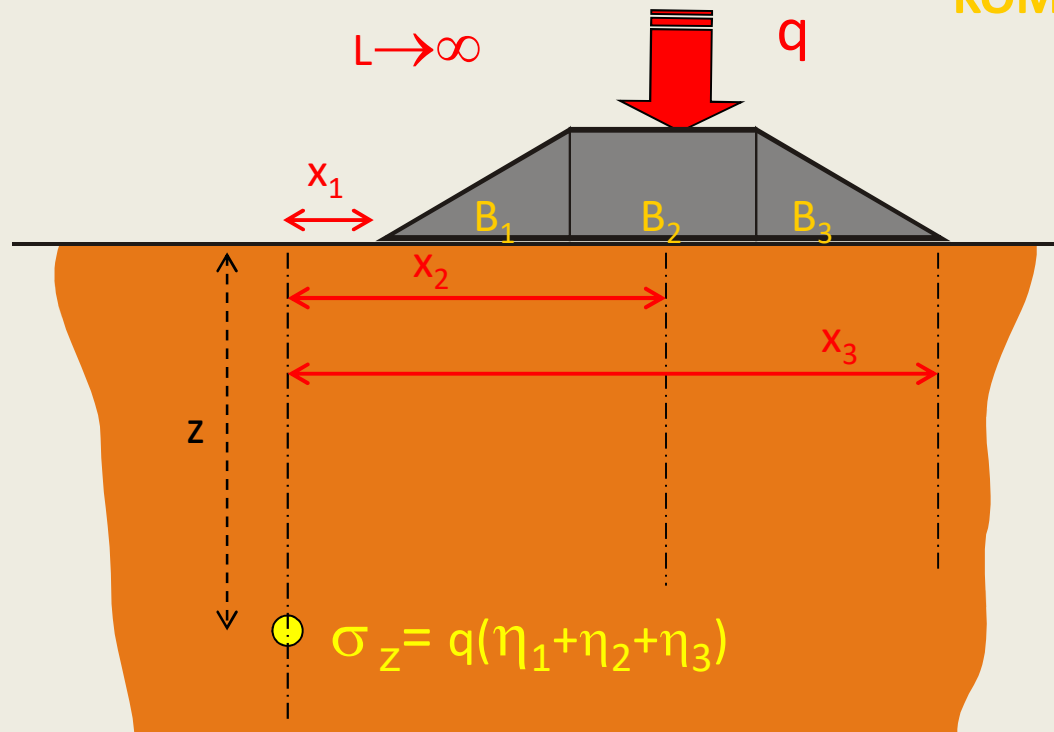
$$\eta_t = \frac{\frac{2x}{B} (2\alpha + \sin 2\beta)}{2\pi}$$

# MG: NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ DODATKOWYCH

hipoteza  
Boussinesqua

OBCIĄŻENIE PASMOWE  
KOMBINOWANE

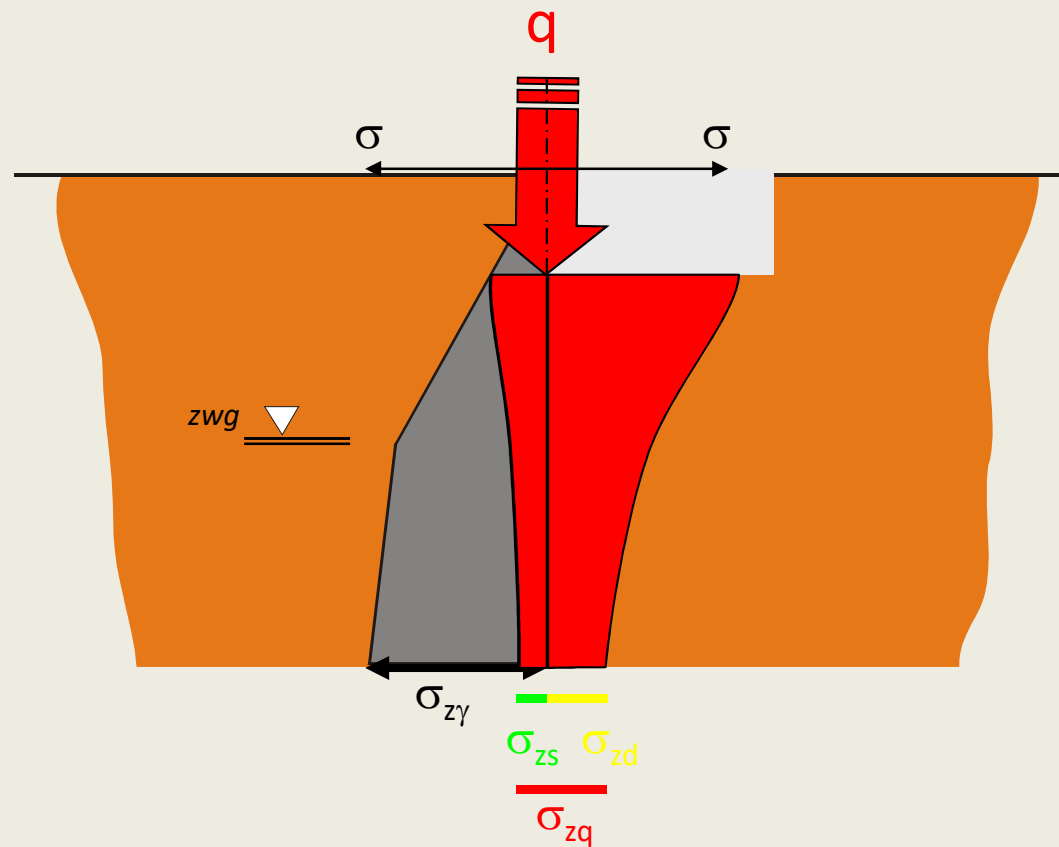


MG:

# NAPRĘŻENIA GEOSTATYCZNE I DODATKOWE

## ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ POD FUNDAMENTEM

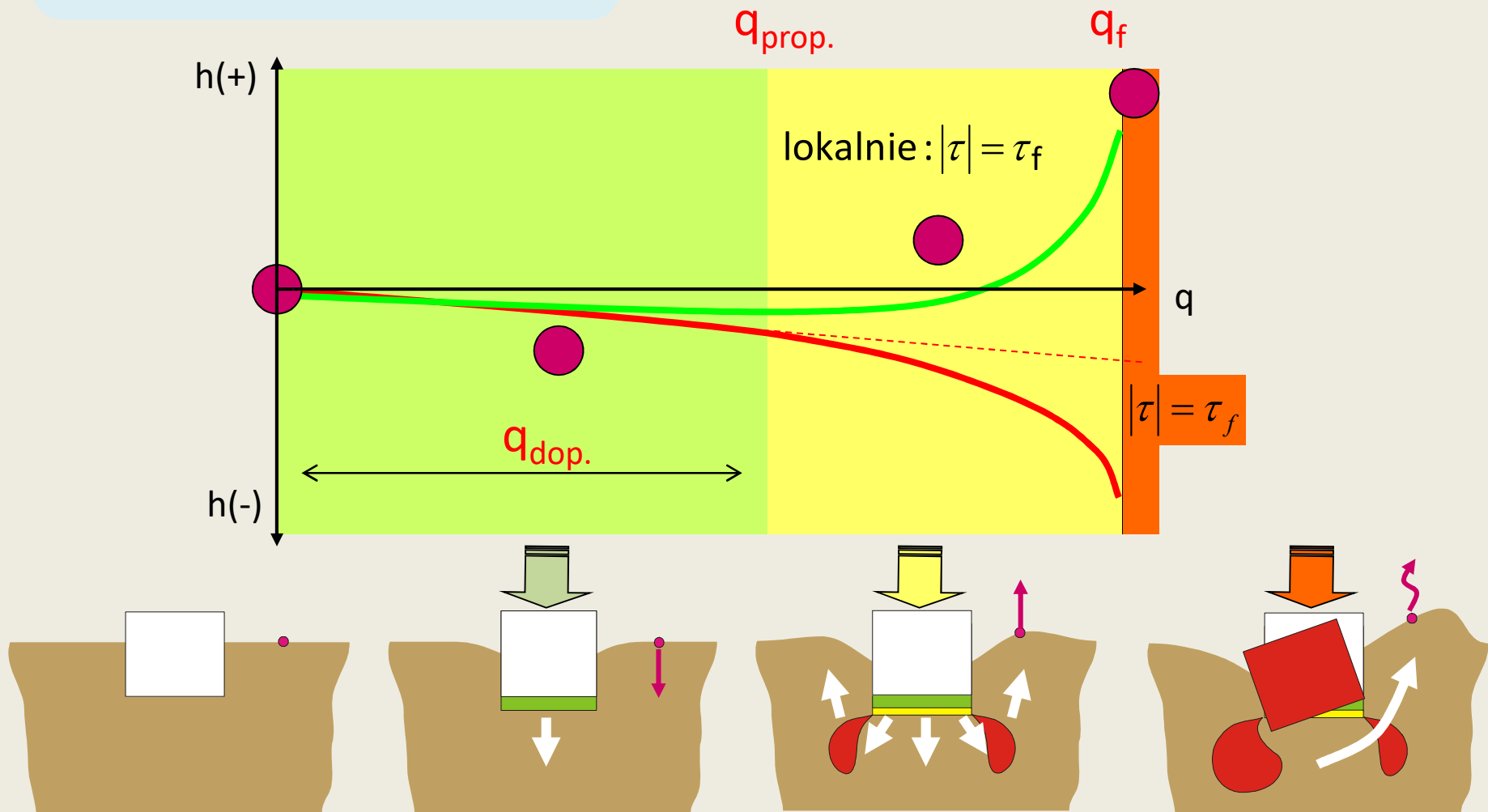
hipoteza  
Boussinesqua



MG:

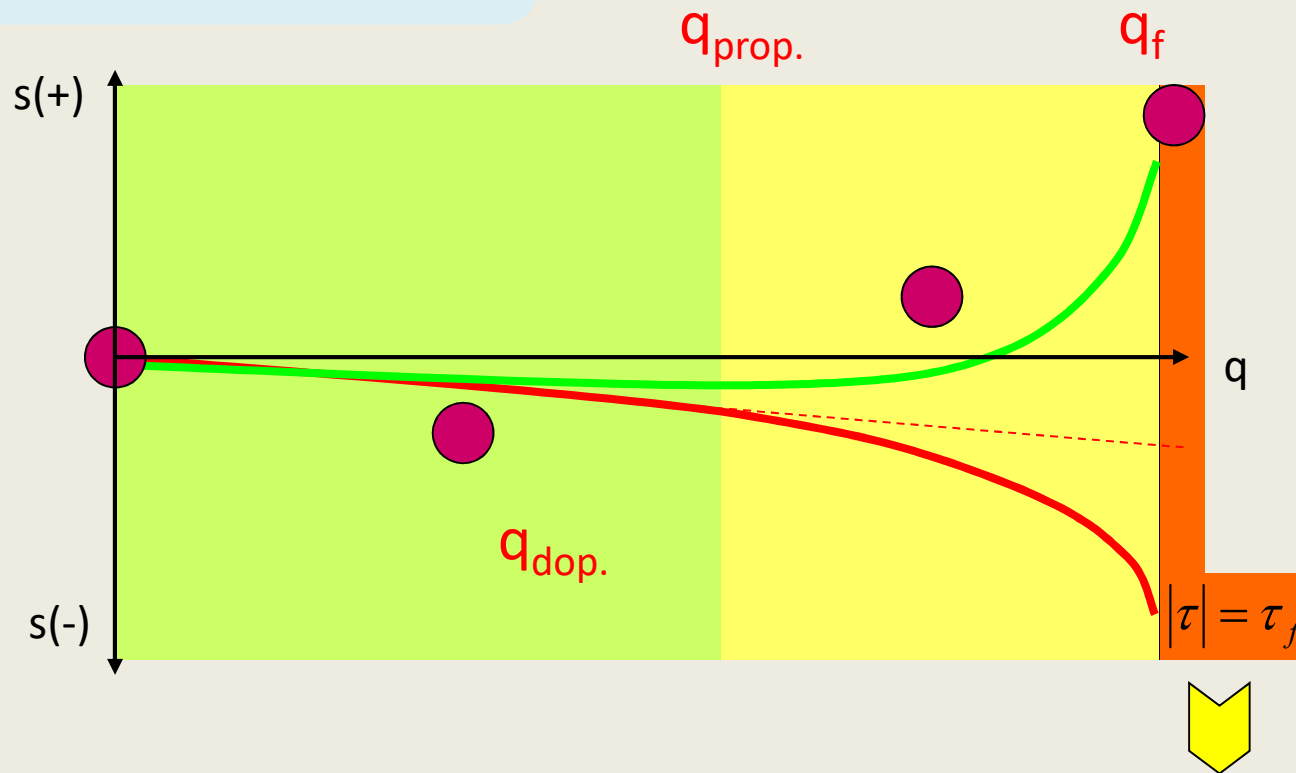
# NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

## REAKCJA PODŁOŻA NA OBCIĄŻENIE



# MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

## REAKCJA PODŁOŻA NA OBCIĄŻENIE

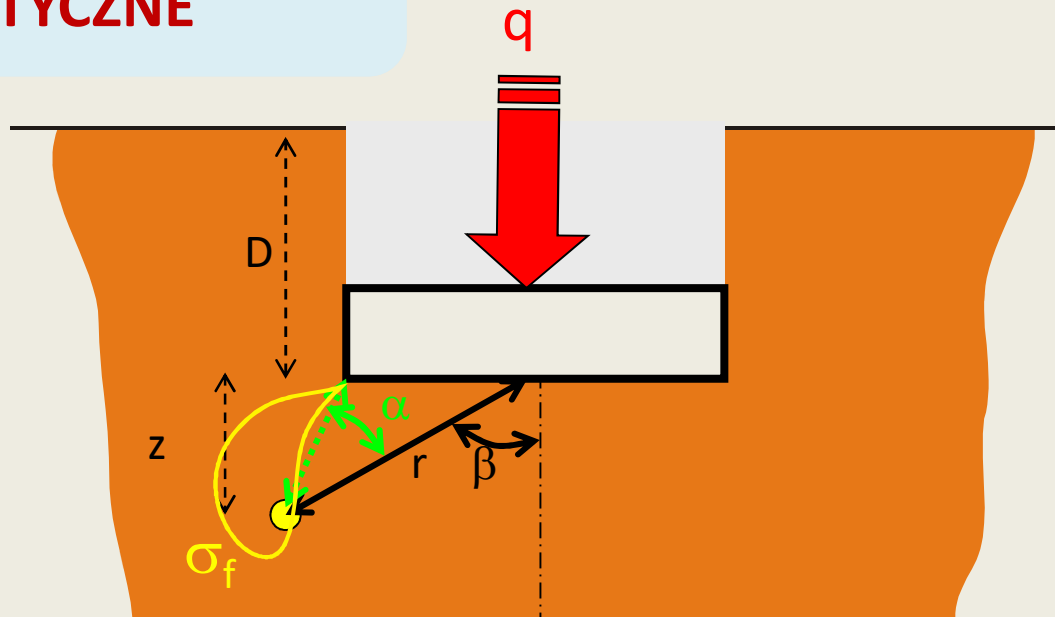


$$\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2} \sin \phi = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} - c \cos \phi$$

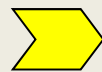


# MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

## NAPRĘŻENIA KRYTYCZNE



$$\sigma_{fz} = \frac{(q)(2\alpha + \sin 2\alpha \cos 2\beta)}{\pi}$$

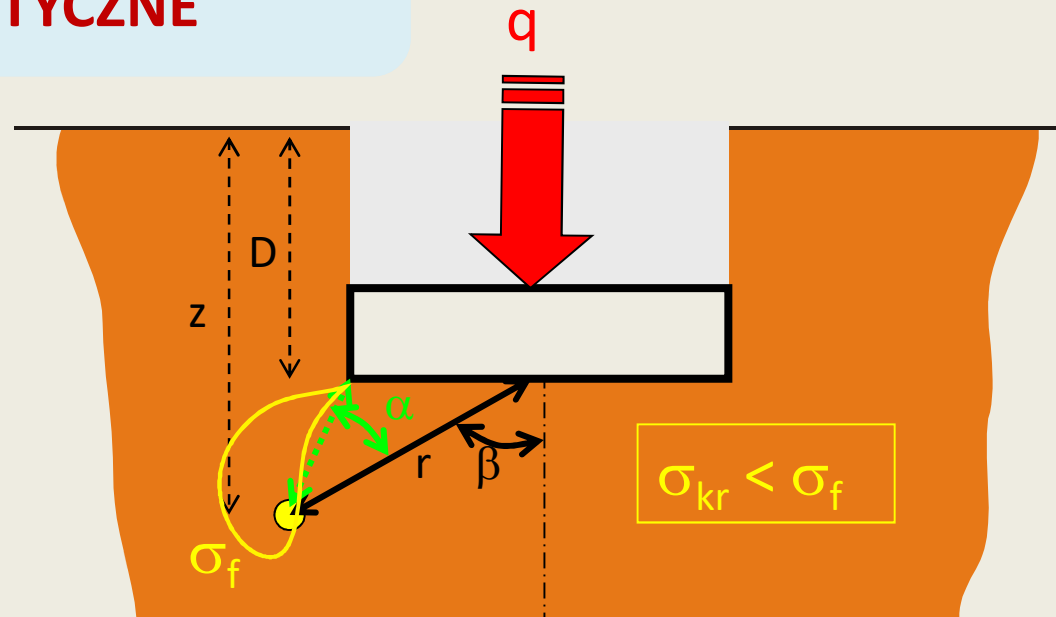


$$z_{\max} = \frac{(q - D\gamma)}{\pi\gamma} \left[ \operatorname{ctg}\phi - \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \right] - \frac{c}{\gamma \operatorname{tg}\phi} - D$$

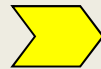
$$\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2} \sin \phi = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} - c \cos \phi$$

# MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

## NAPRĘŻENIA KRYTYCZNE



$$z_{\max} = 0$$



$$q_{kr} = \frac{\pi(\gamma D + c \cot \phi)}{\cot \phi + \phi - \frac{\pi}{2}} + \gamma D$$

*Puzyrewski (1929)*

*Frohlich (1934)*

*Maag (1939)*

## MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

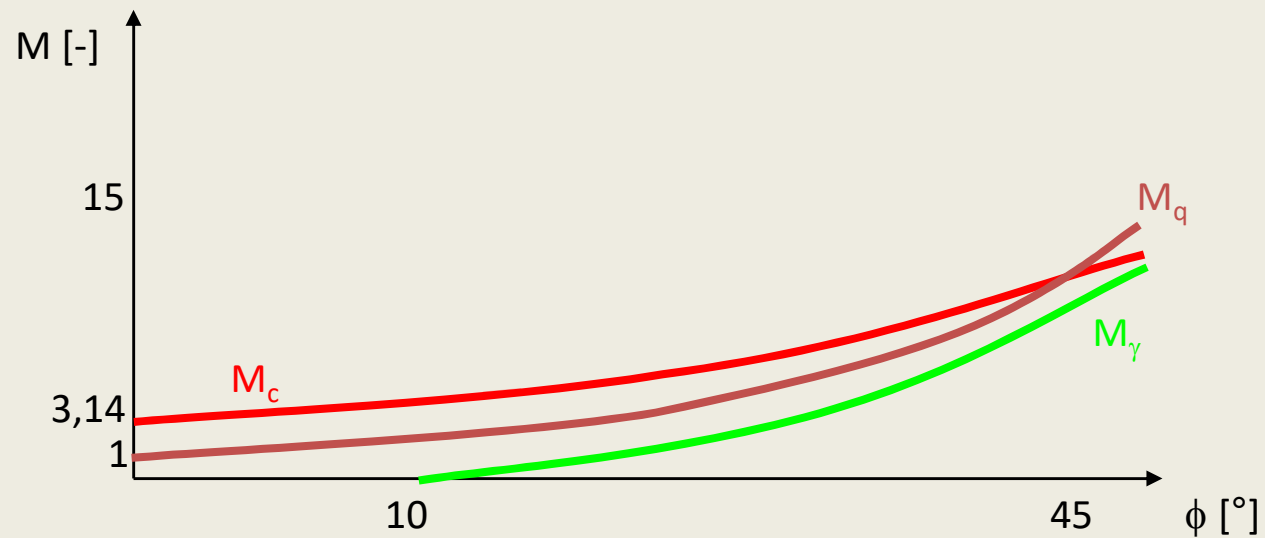
### NAPRĘŻENIA KRYTYCZNE

$$q_{kr} = cM_c + \gamma_D DM_q$$

(Maag)

$$q_{kr} = cM_c + \gamma_D DM_q + \gamma_B BM_\gamma$$

(Masłow)



# MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

## NAPRĘŻENIA GRANICZNE

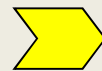
$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = \gamma$$



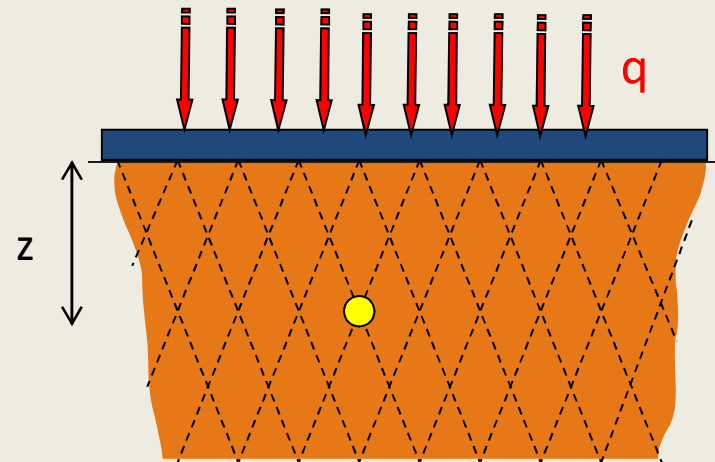
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$



$$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_z + \sigma_x + 2c \cot \phi)^2} = \sin^2 \phi$$



(Rankin)



$$\sigma_z = \sigma_1 = (q + \gamma z)$$

$$\sigma_x = \sigma_3 = (q + \gamma z) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

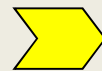
## MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

### NAPRĘŻENIA GRANICZNE

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = \gamma$$

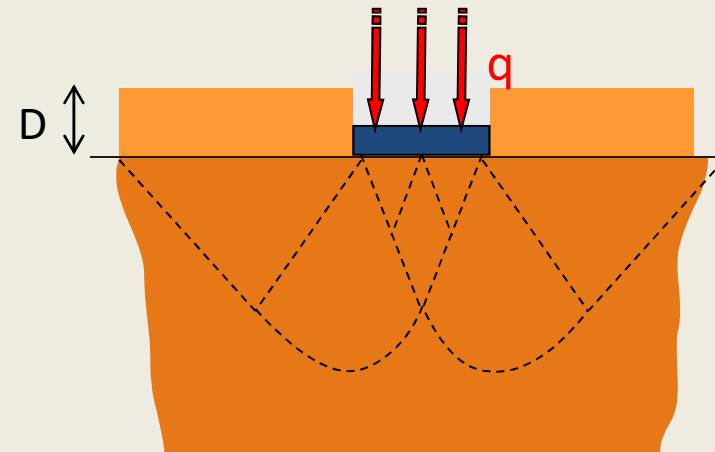


$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$



$$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_z + \sigma_x + 2c \cot \phi)^2} = \sin^2 \phi$$

(Prandtl)



$$q_f = \gamma D e^{\pi g \phi} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + c \cot \phi \left[ e^{\pi g \phi} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right]$$

## MG: NOŚNOŚĆ PODŁOŻA

### NAPRĘŻENIA GRANICZNE

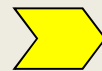
$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = \gamma$$



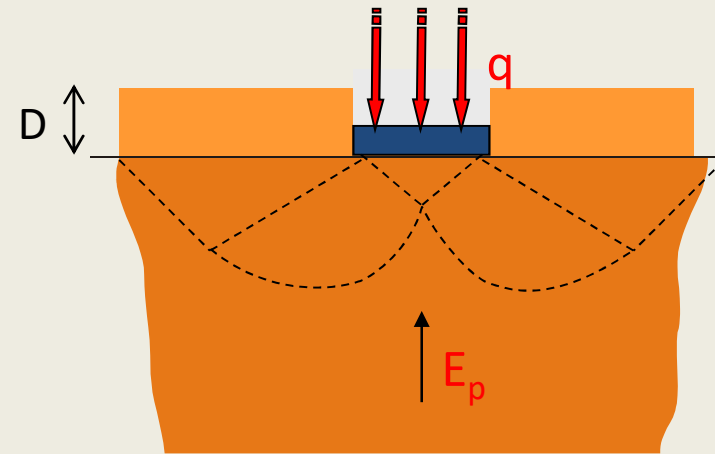
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$



$$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_z + \sigma_x + 2c \cot \phi)^2} = \sin^2 \phi$$



(Terzaghi)



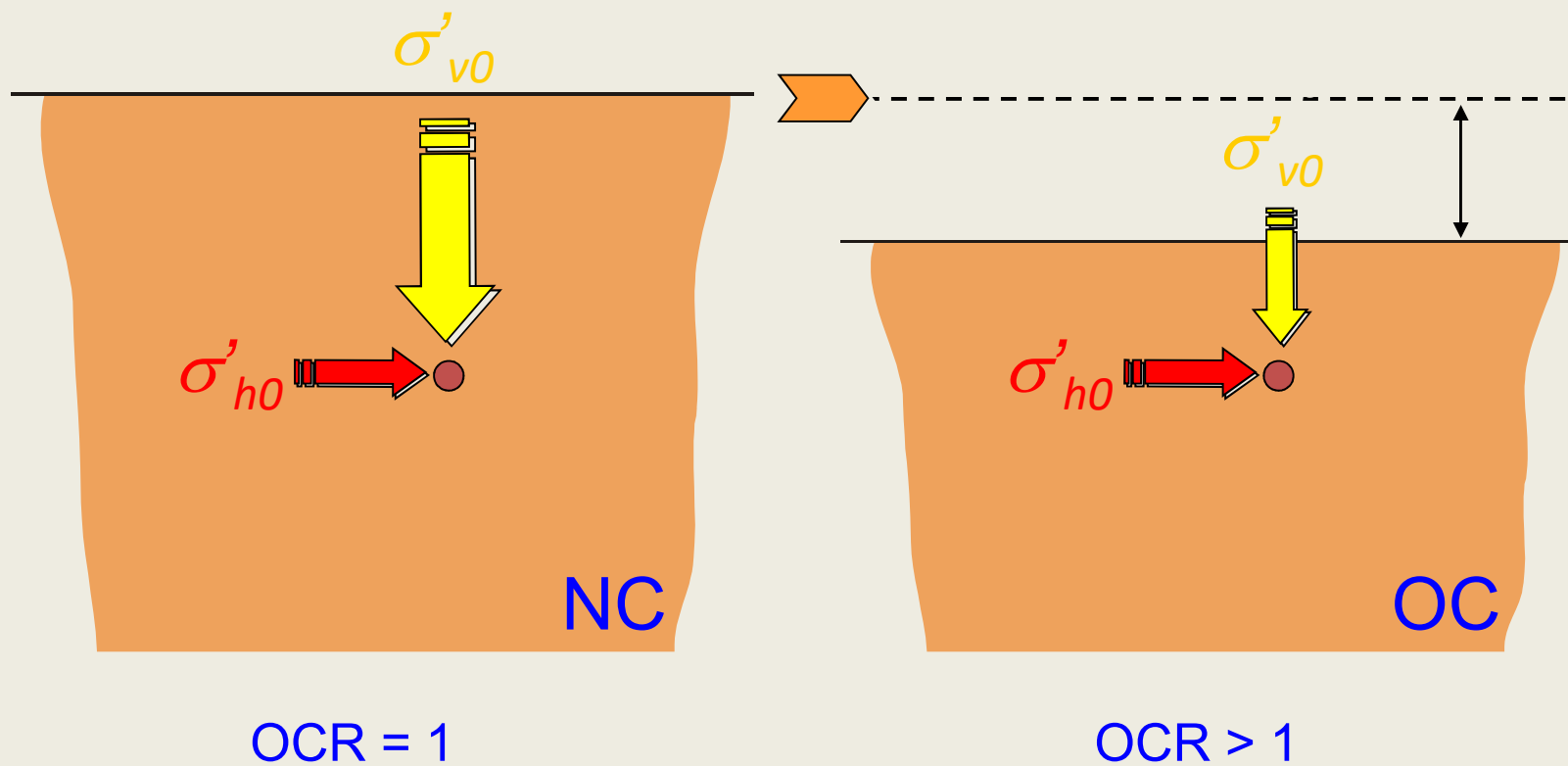
$$q_f = cN_c + \gamma DN_q + 0,5\gamma BN_\gamma$$

$$q_f = \left(1 + 0,3 \frac{B}{L}\right) cN_c + \gamma DN_q + \left(1 - 0,2 \frac{B}{L}\right) 0,5\gamma BN_\gamma$$

MG:  $K_0$  - OCR

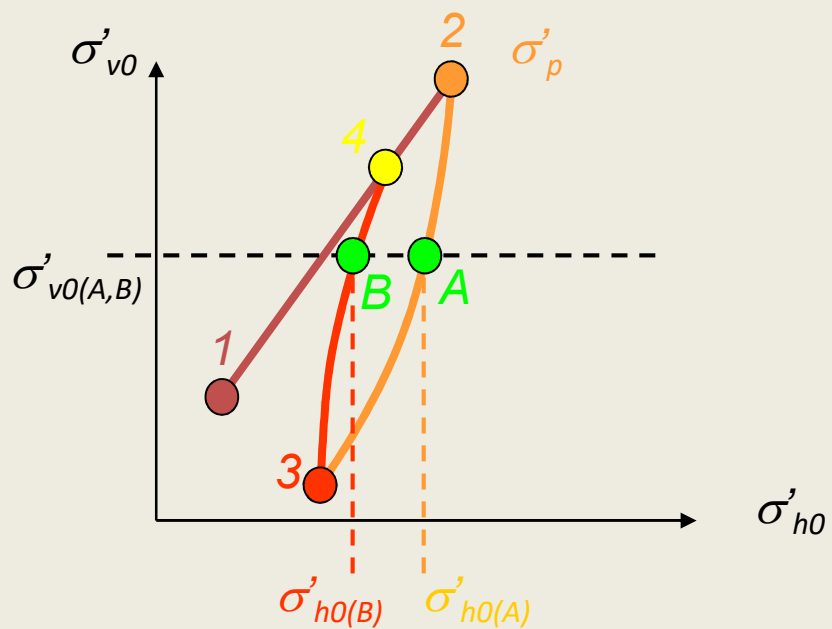
WPŁYW PREKONSOLIDACJI

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$$

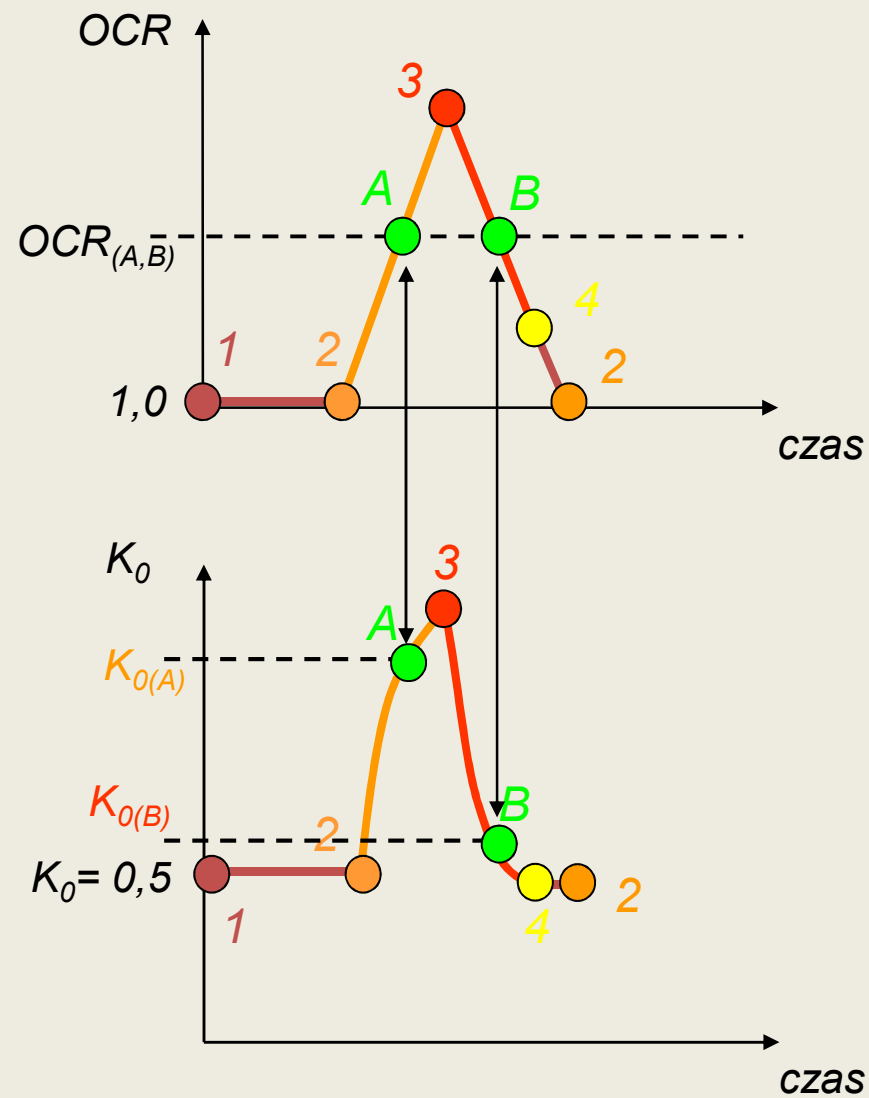


# MG: $K_0$ - OCR

## WPŁYW PREKONSOLIDACJI



Worth i Houlsby (1985)





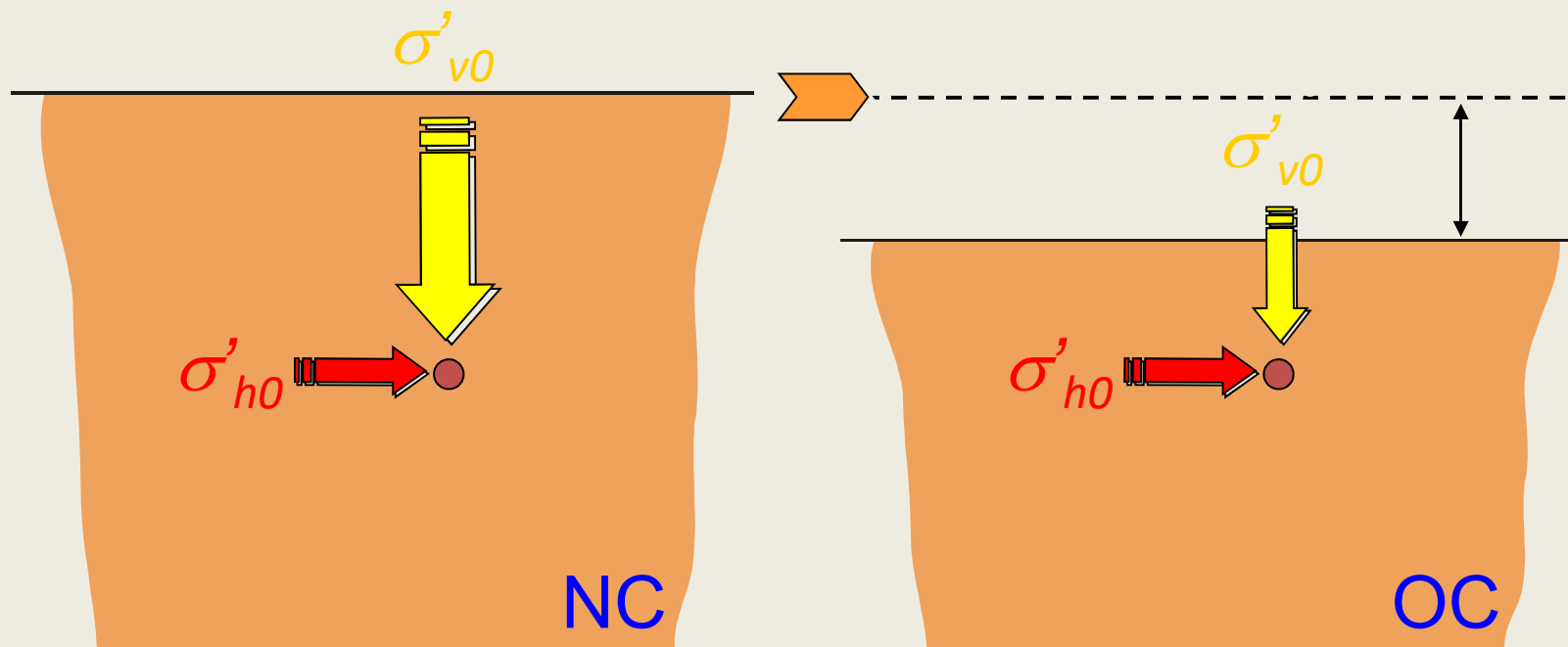
MG:  $K_0$  - OCR

WPŁYW PREKONSOLIDACJI

$$K_0 / K_{0(\text{NC})} = \text{OCR}^n$$

*Ladd i inni (1977)*

$$n = 0,32 \div 0,42$$



**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**

$\phi_{op}$  – średnia efektywna wartość kąta tarcia wewn.  
uzyskana przy zniszczeniu, „średnia” w odniesieniu do  
warunków brzegowych zadania geotechnicznego

$$\phi_{op} = f(\sigma, \varepsilon)$$



$\phi_p$  – maksimum efektywnej wartości kąta tarcia wewn.  
(np. CPT)

MG:

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU

### Bolton (1986)

$\phi_{\mu}$  – materiał / ziarna piasku

$\phi_{cv}$  – wartość ustalona przy stałej objętości gruntu podczas ścięcia

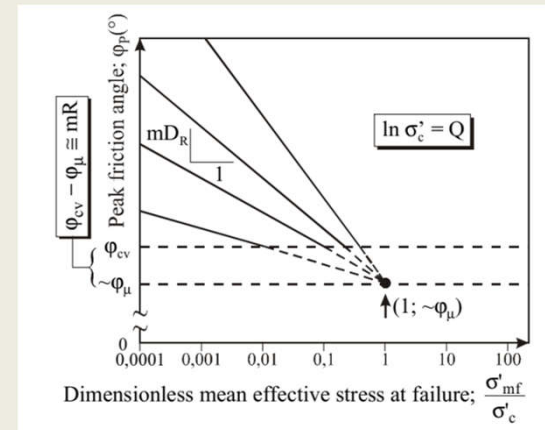
$$\phi_p - \phi_{cv} = m(D_R(Q - \ln \sigma'_{mf}) - R)$$



$$Q = \ln \sigma'_{mf}$$



$$\phi_p = \phi_{cv} - mR$$



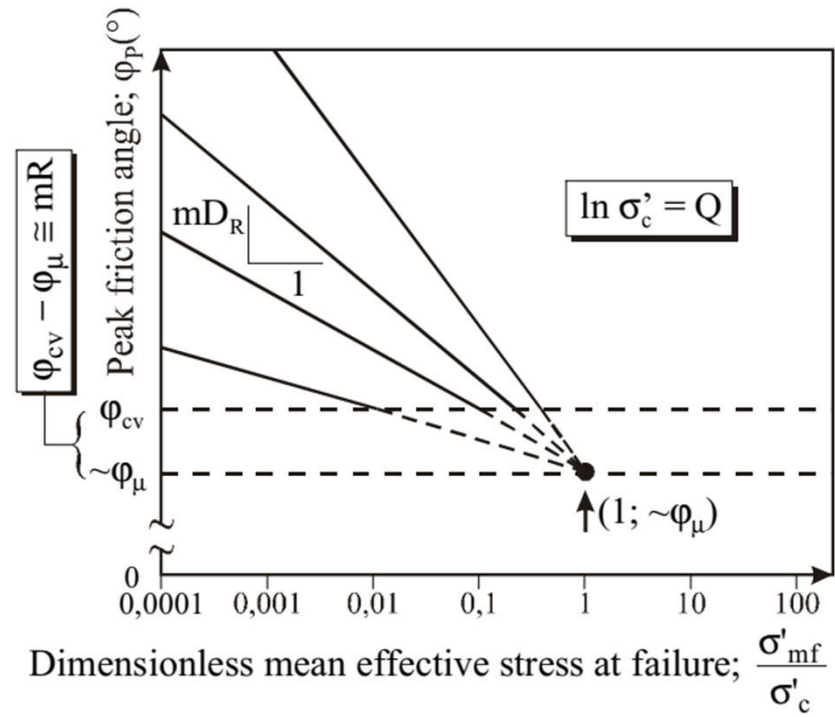
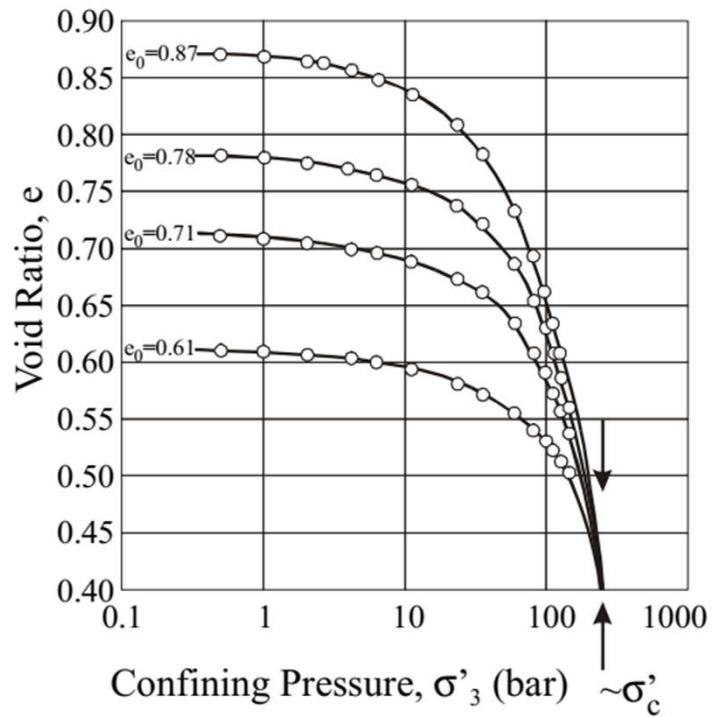
MG:

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU

Bolton (1986)

GRAIN MINERAL	Q
Quartz and feldspar	10
Limestone	8
Anthracite	7
Chalk	5.5

**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**



**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**

$$\varphi_p - \varphi_\mu = m \cdot D_R \cdot \ln(\sigma'_c / \sigma'_{mf}) \quad \varphi_p \geq \varphi_\mu + m$$

$\sigma'_c = 22026.5$  (kPa);

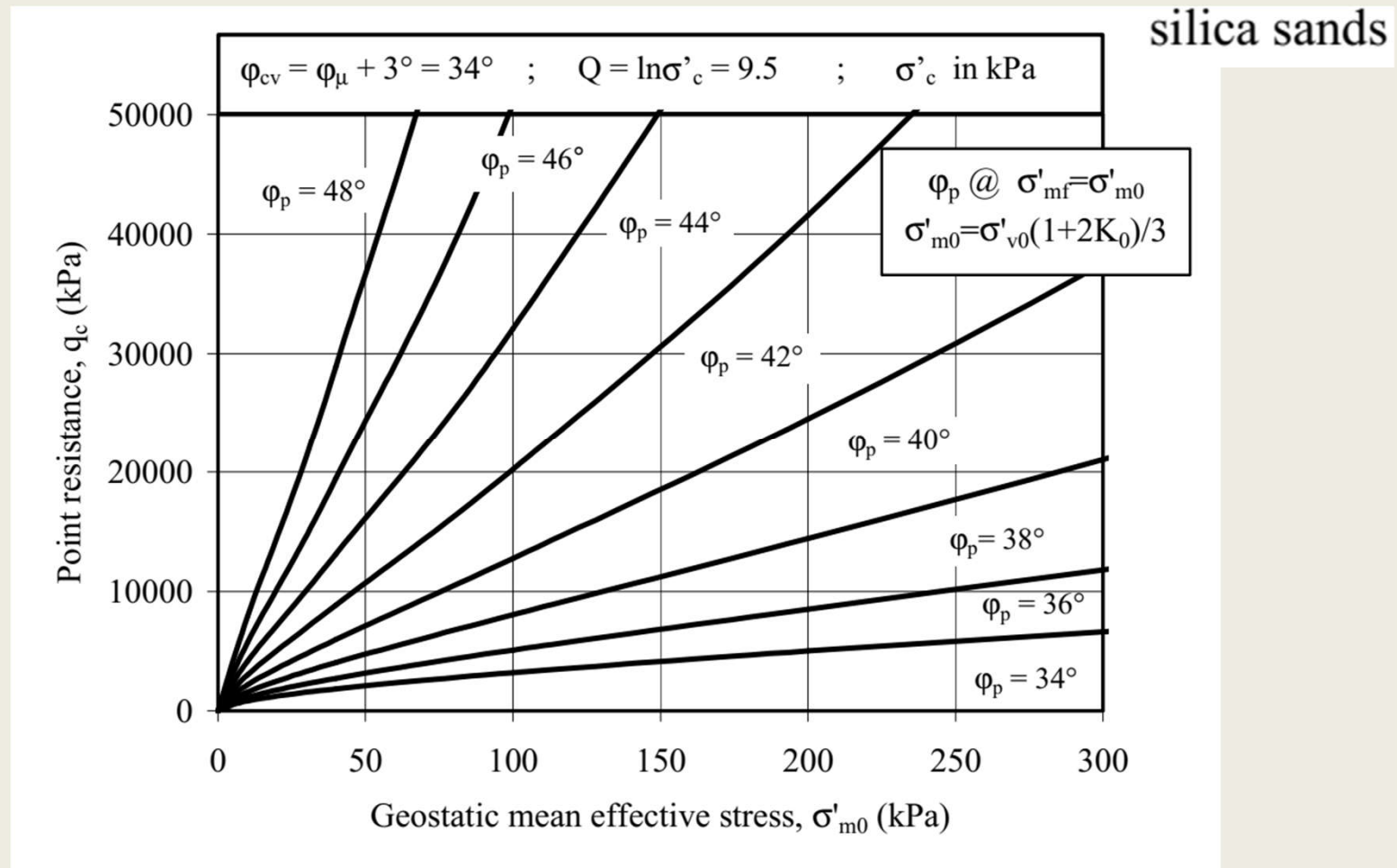
$\varphi_{cv} - \varphi_\mu = 3^\circ$  for axisymmetric conditions (TX) and

$\varphi_{cv} - \varphi_\mu = 5^\circ$  for plane strain conditions (PS).

	$\varphi_\mu$	$\varphi_{cv}$
Quartz sands	$25^\circ \div 30^\circ$	$30^\circ \div 34^\circ$
Silica sands	$27^\circ \div 32^\circ$	$32^\circ \div 36^\circ$
Calcareous sands	$32^\circ \div 38^\circ$	$36^\circ \div 42^\circ$

**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**

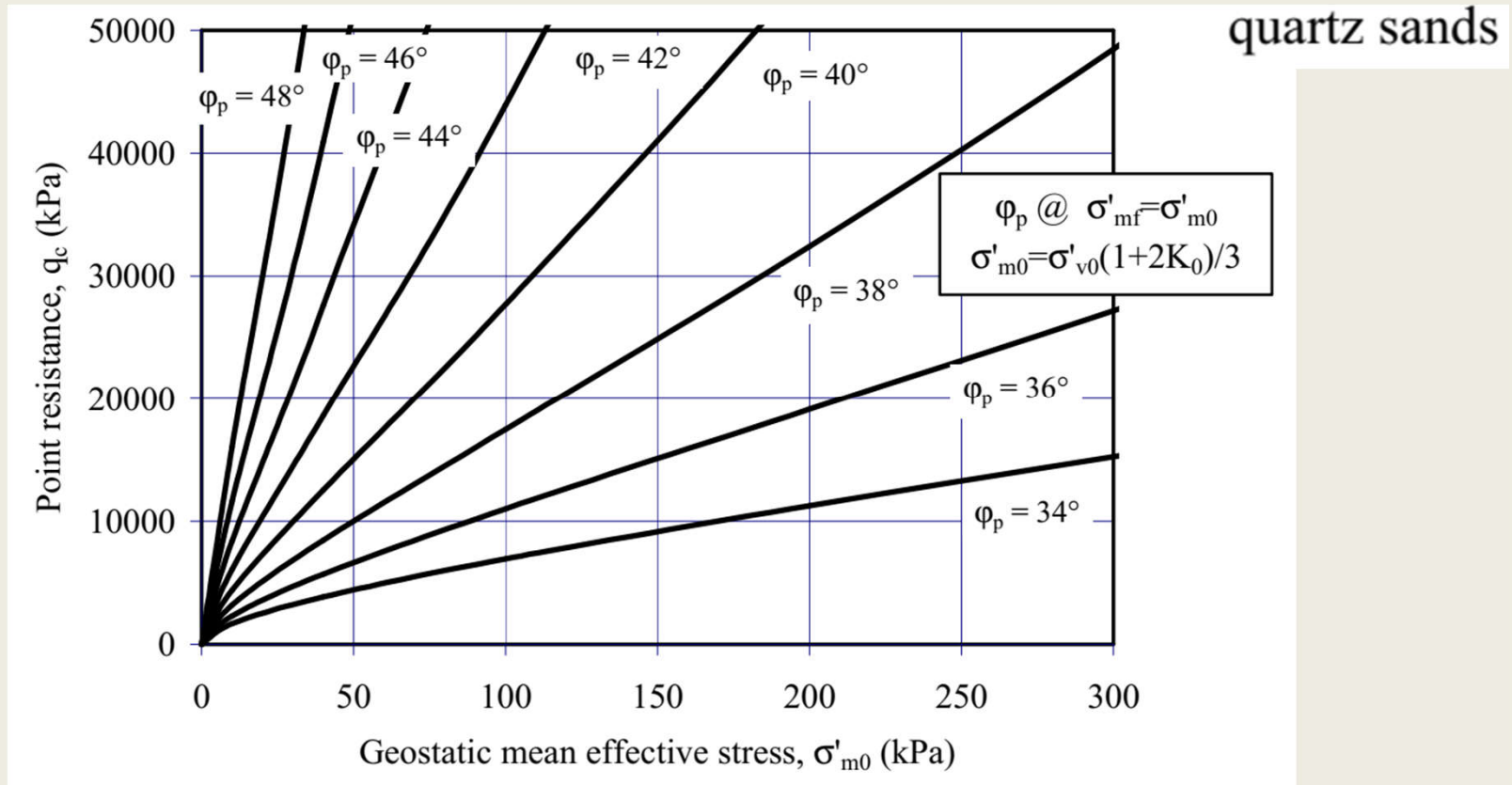
$$\phi_{op} = (\phi_p + \phi_{cv})/2$$



Jamiolkowski et al. (1986)

**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**

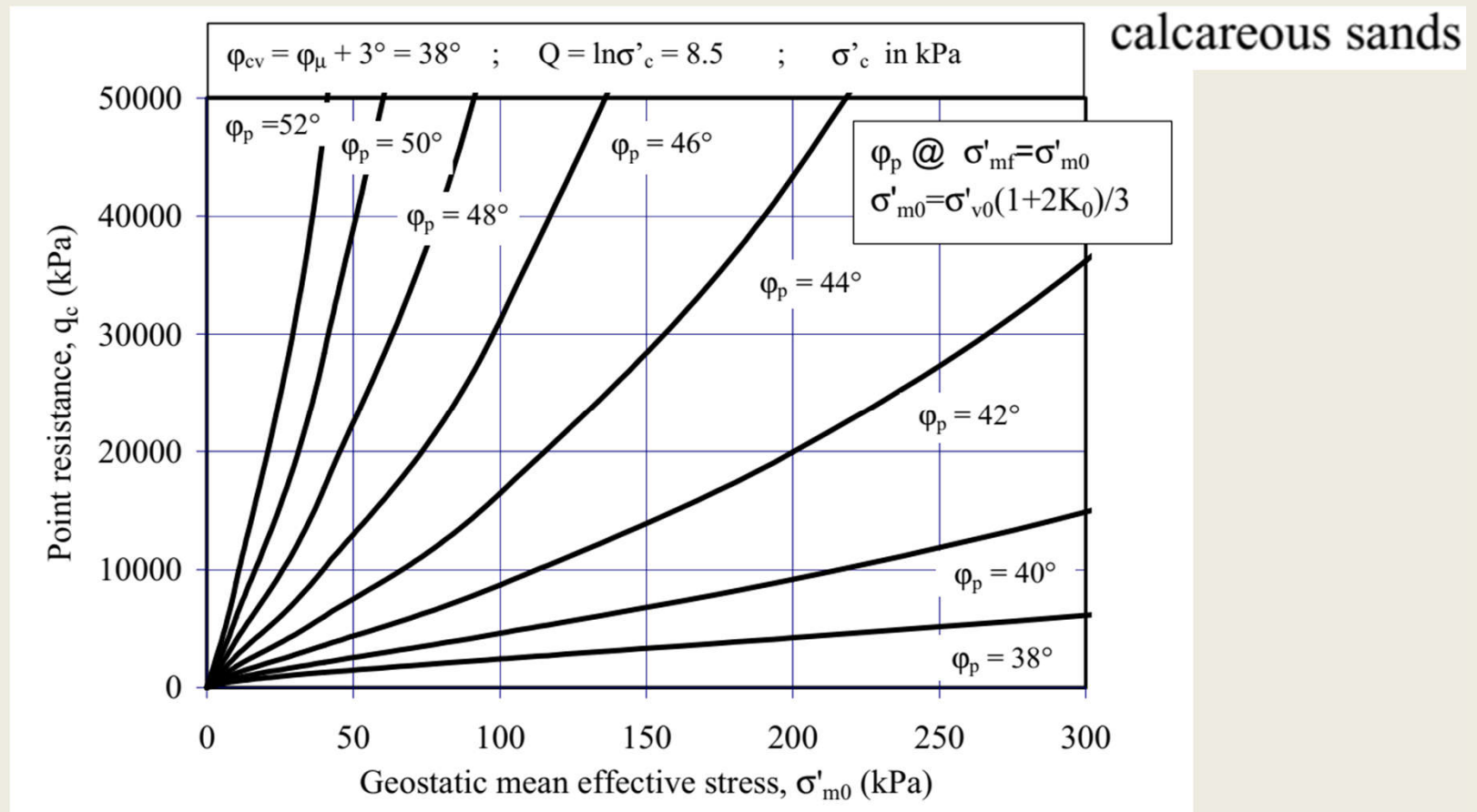
$$\phi_{op} = (\phi_p + \phi_{cv})/2$$





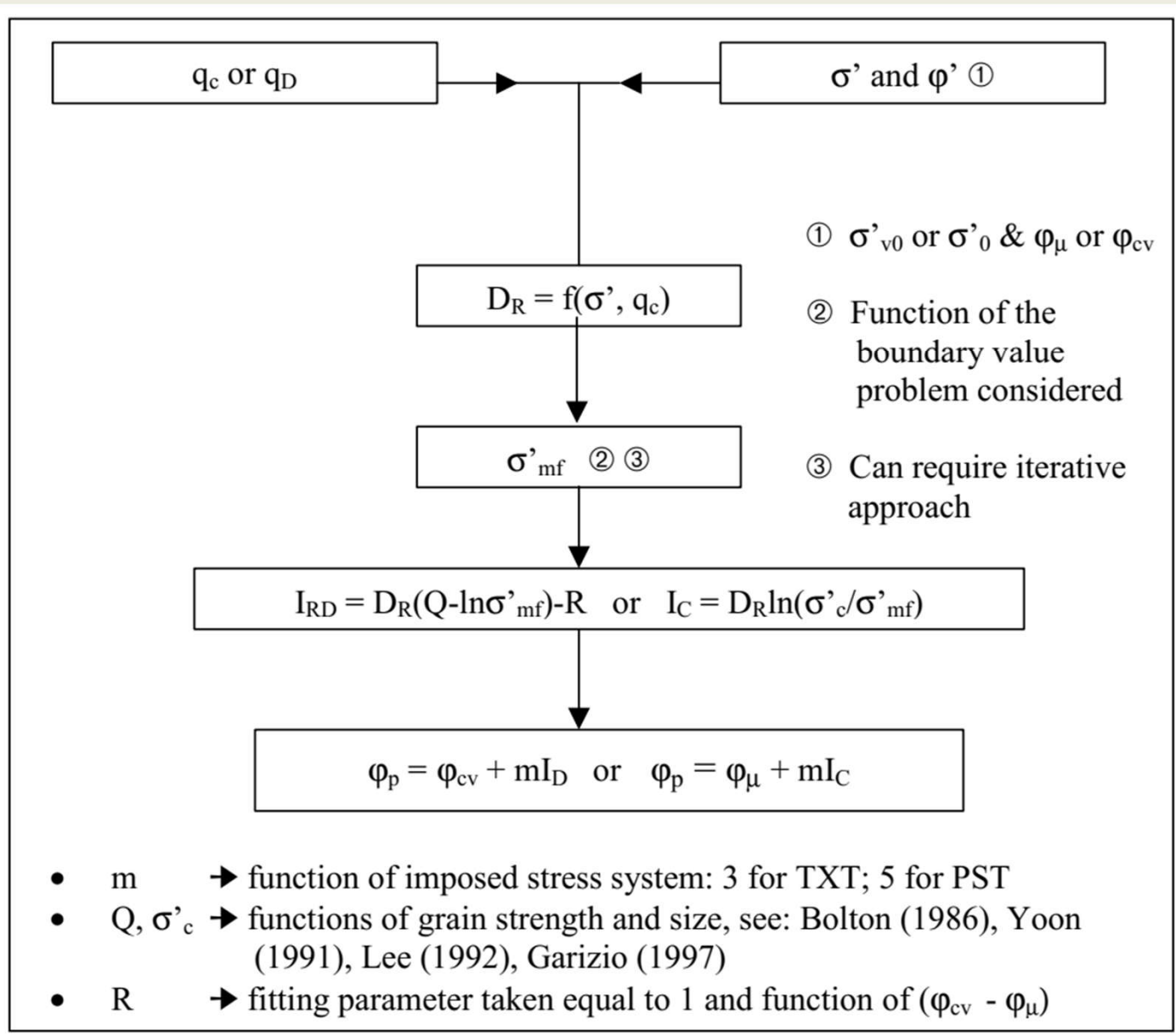
**MG: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU**

$$\phi_{op} = (\phi_p + \phi_{cv})/2$$



MG:

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCIANIE GRUNTU NIESPOISTEGO a BADANIA IN SITU



MG:

## BADANIA LABORATORYJNE

### BADANIA LABORATORYJNE



- znane warunki brzegowe,
- kontrola ścieżki  $\sigma - \varepsilon$ ,
- kontrola właściwości fizycznych,
- mała objętość gruntu,
- problem jakości próbki,
- zmiana stanu naprężenia.

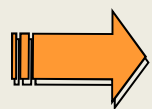
### BADANIA IN SITU



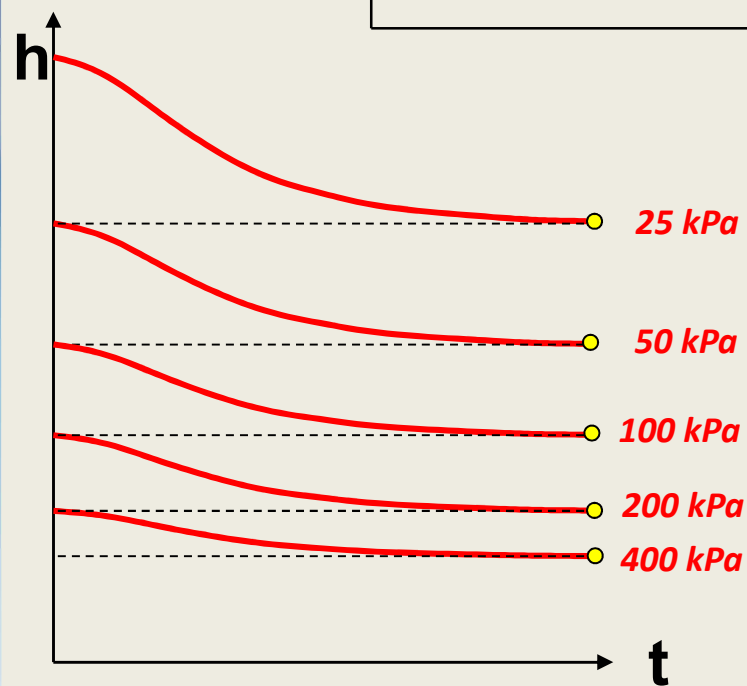
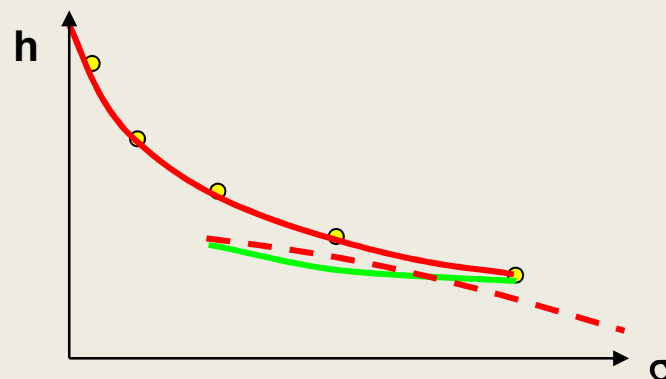
- nieznane warunki brzegowe,
- brak pełnej kontroli ścieżki  $\sigma - \varepsilon$ ,
- nieznane właściwości fizyczne,
- duża objętość gruntu,
- badanie gruntu „in statu nascendi”
- możliwość powtórzeń.

## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA ŚCIŚLIWOŚCI

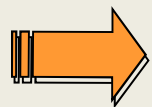


*Edometr – badanie IL*

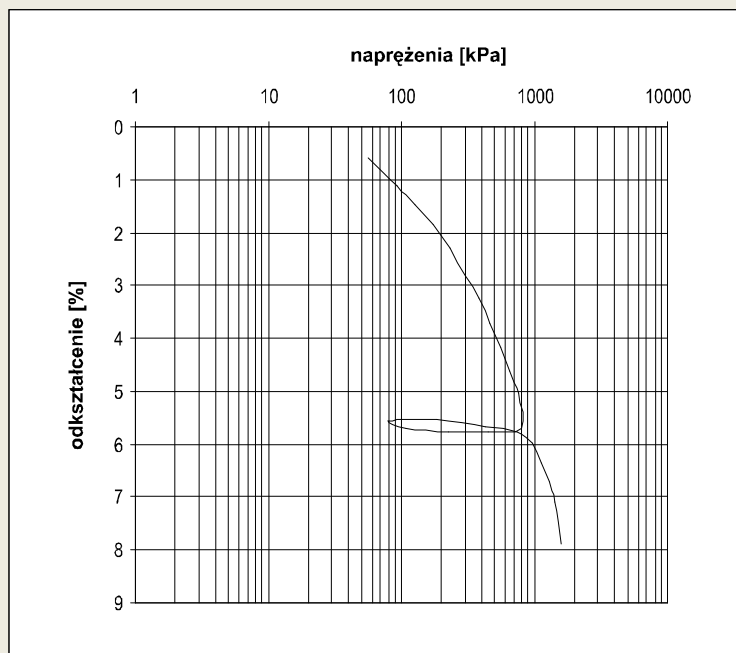


## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA ŚCISLIWOŚCI



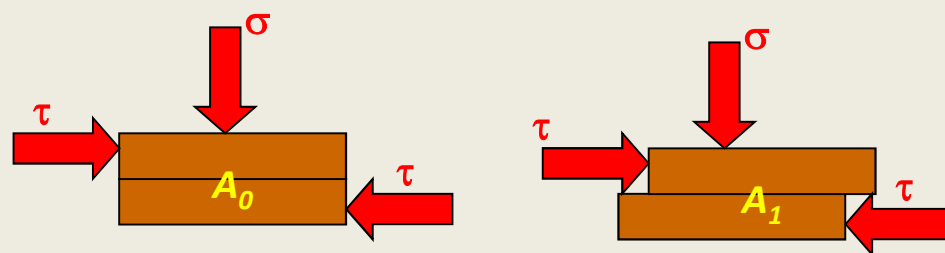
*Edometr - badanie CRS*



## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

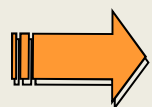
### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

 *Aparat bezpośredniego ścinania (skrzynkowy)*

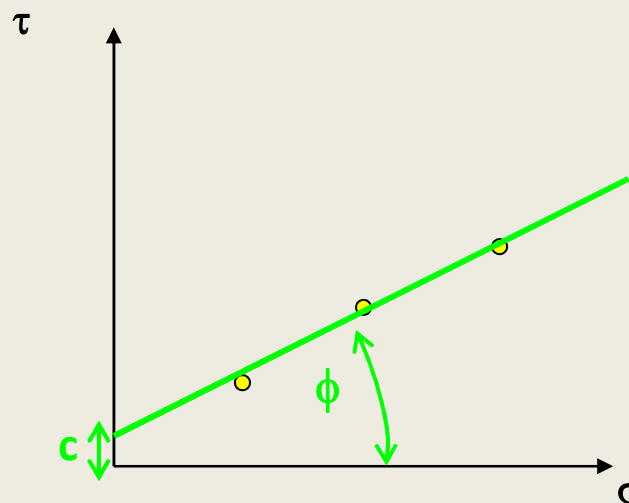
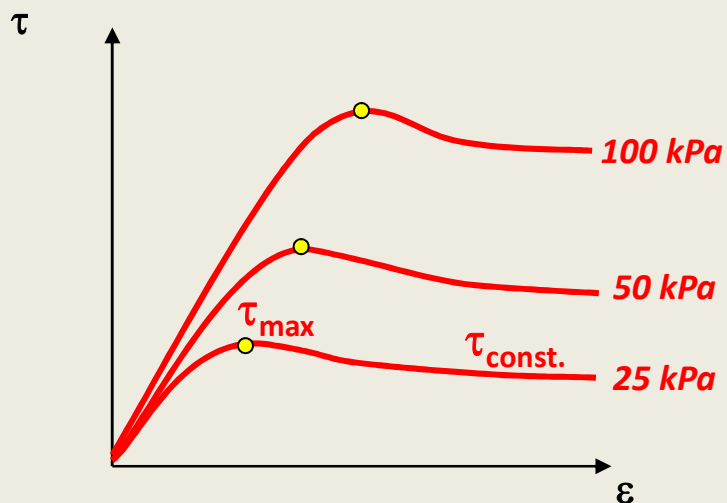


## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE



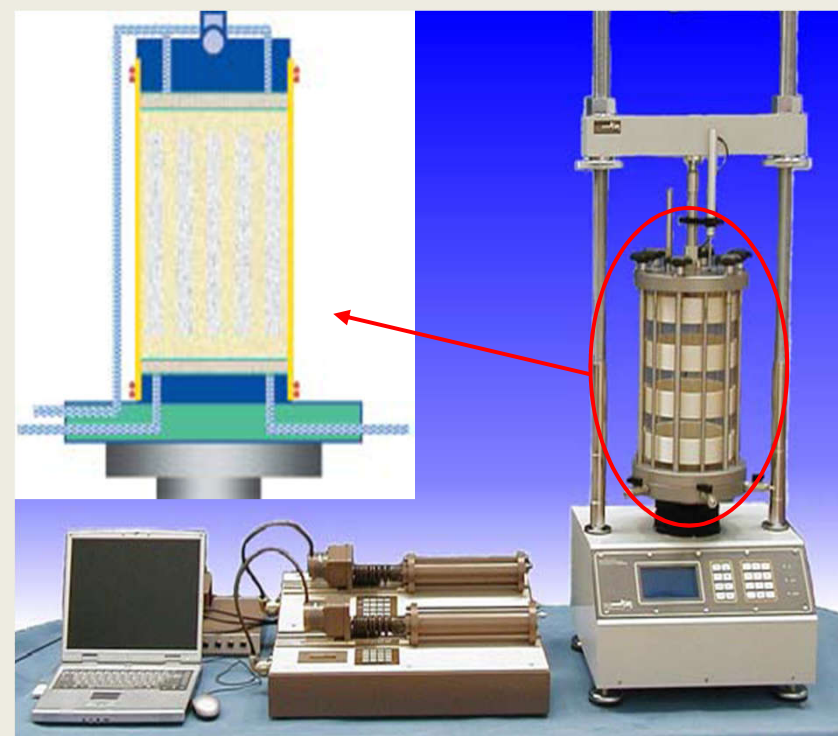
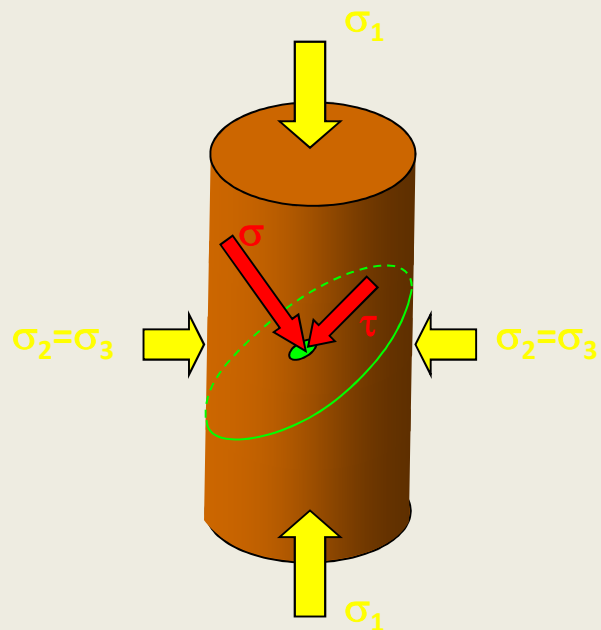
*Aparat bezpośredniego ścinania (skrzynkowy)*



## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

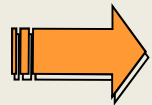
➔ *Aparat trójosiowego ściskania*





## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE



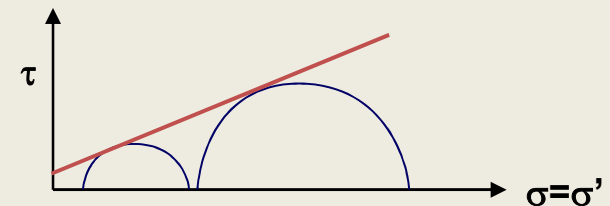
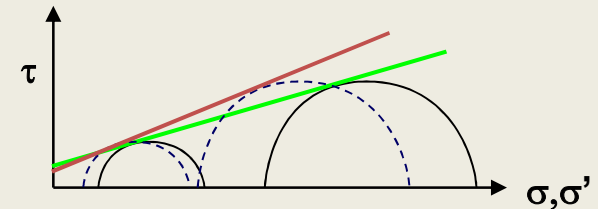
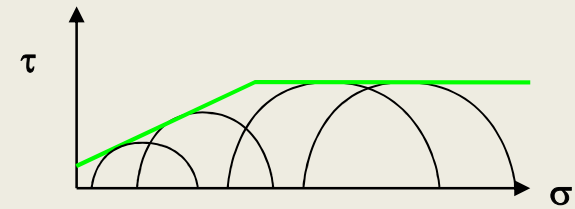
*Aparat trójosiowego ściskania*

*Metody przeprowadzania badania:*

- UU  $(\phi_u, c_u)$

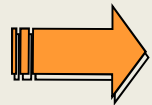
- CIU, CAU  $(\phi_u < \phi, c_u > c')$

- CID, CAD  $(\phi_u, c_u) = (\phi'_u, c'_u)$

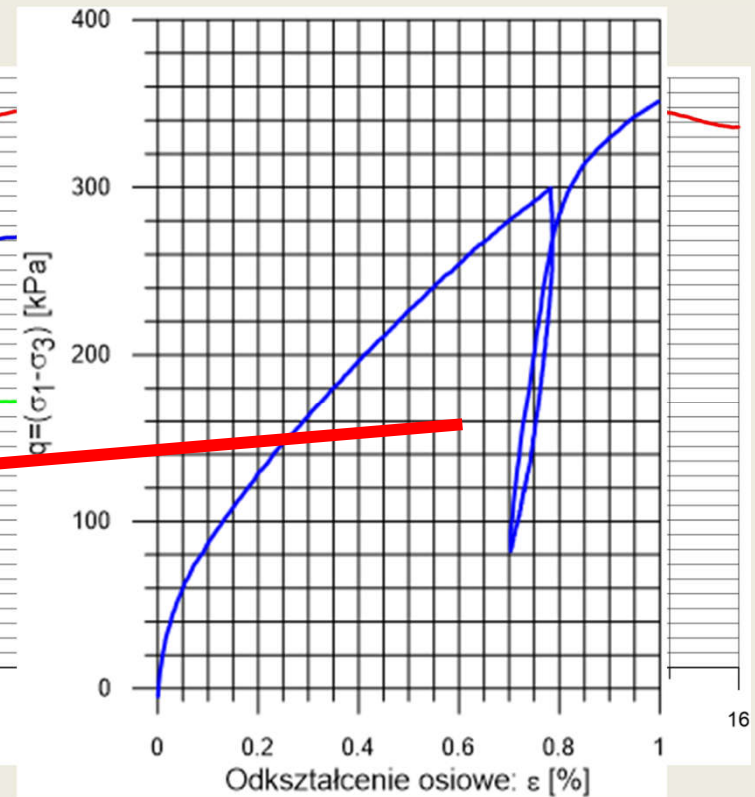
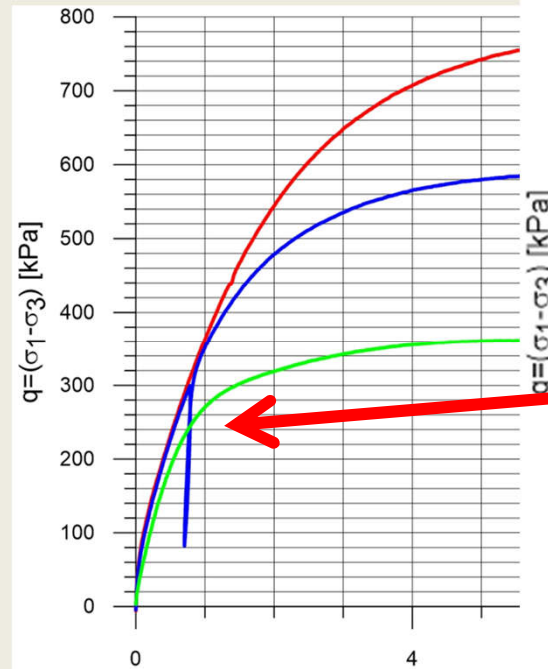
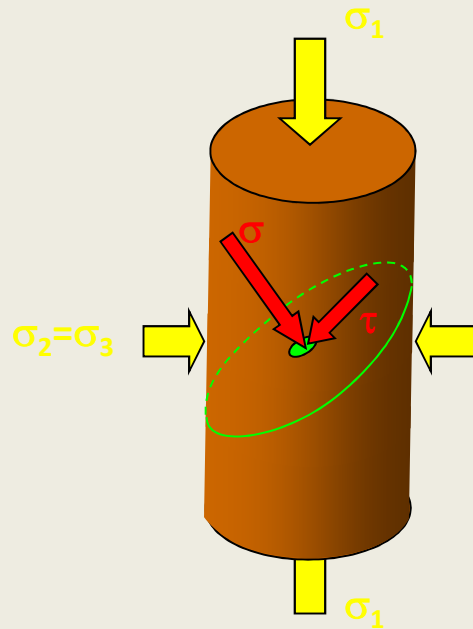


# BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

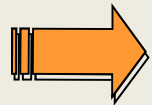


*Aparat trójosiowego ściskania*

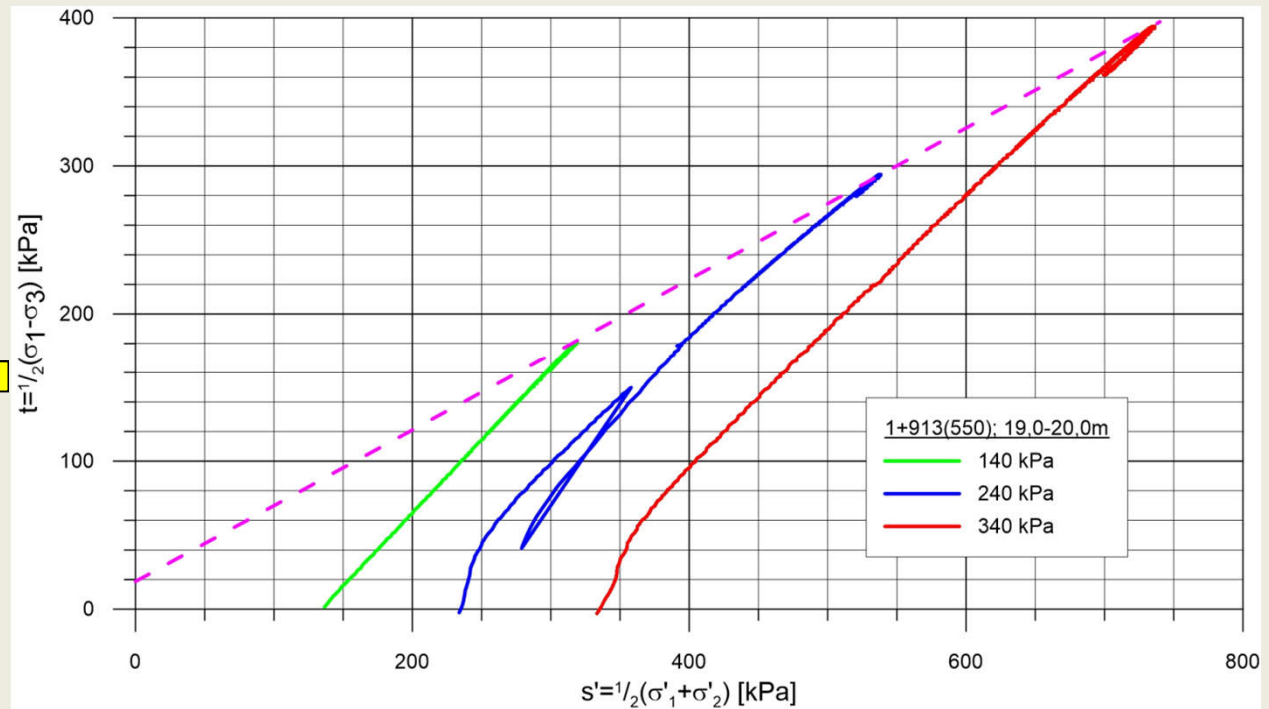
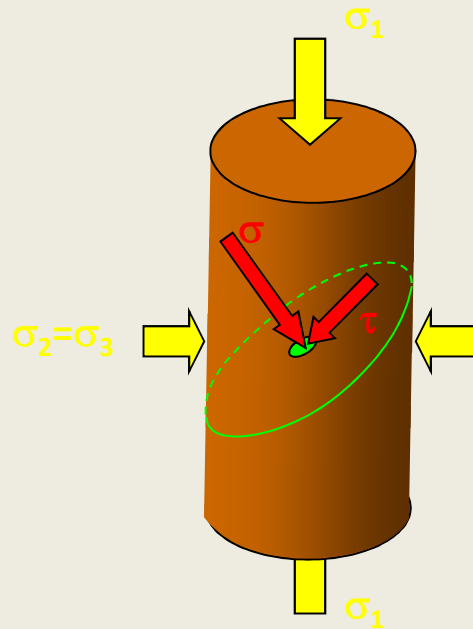


# BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

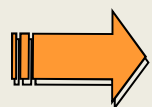


*Aparat trójosiowego ściskania*

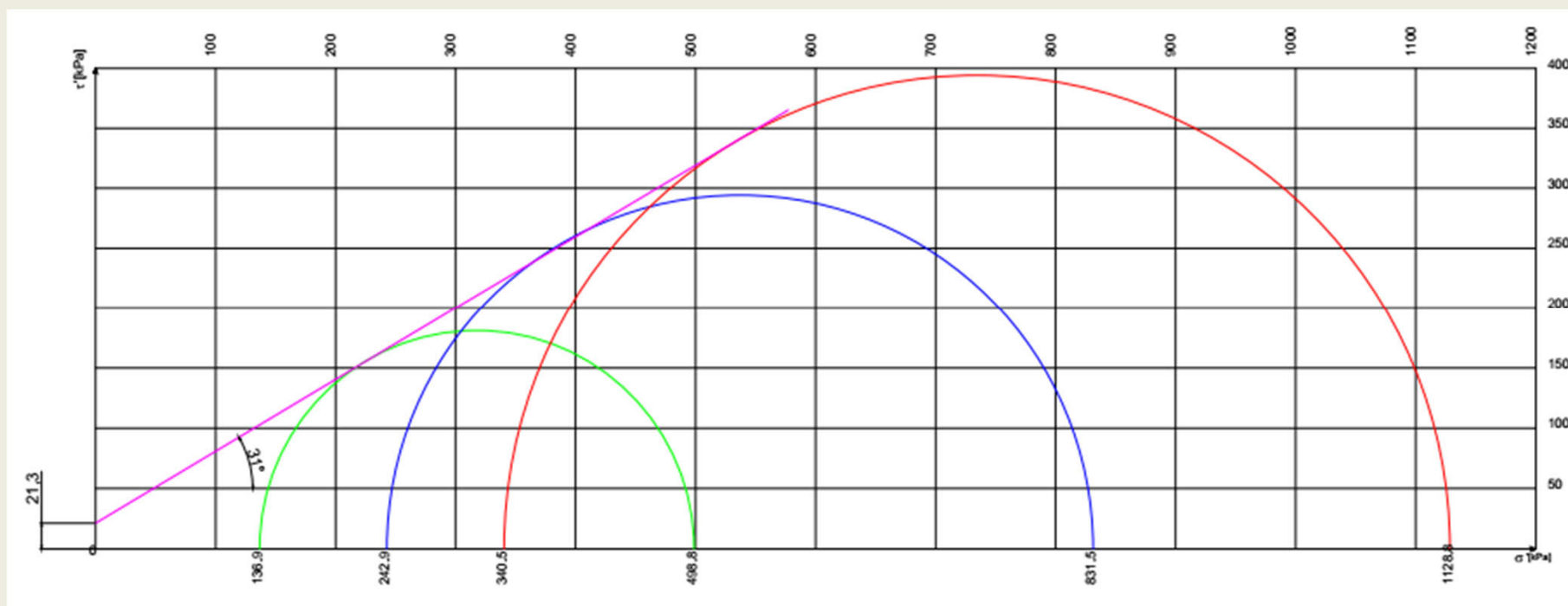


## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

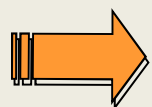


*Aparat trójosiowego ściskania*

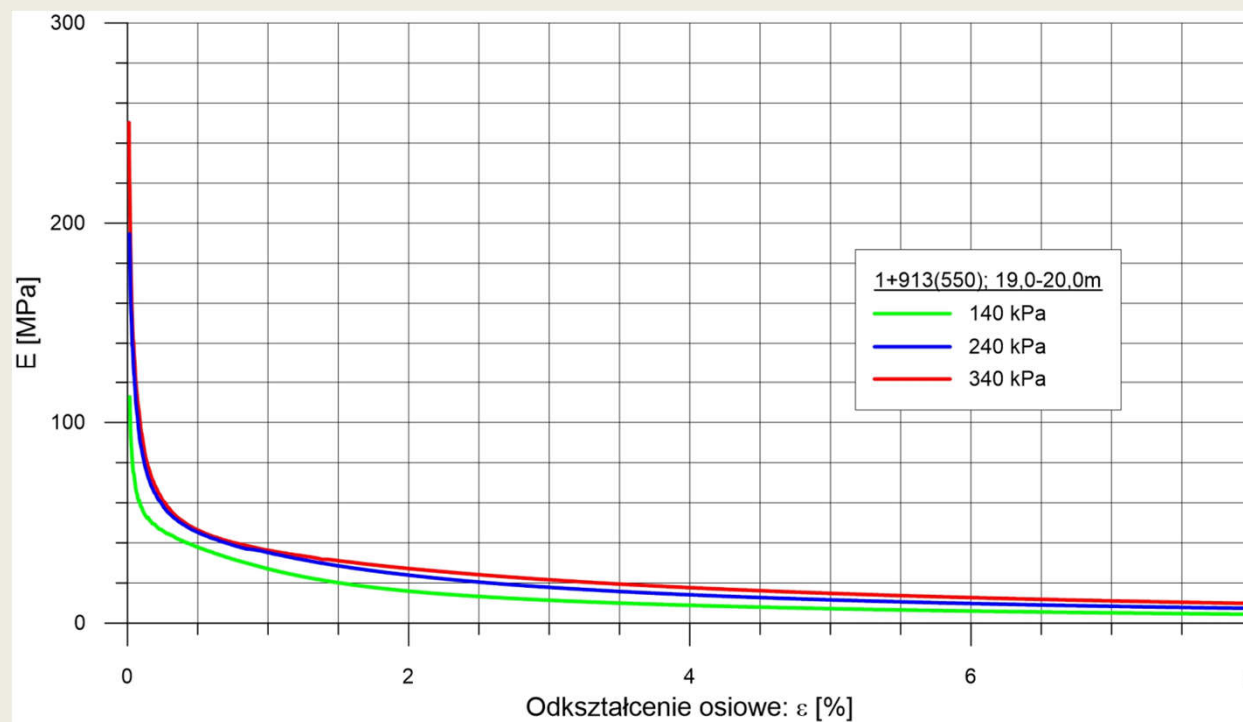
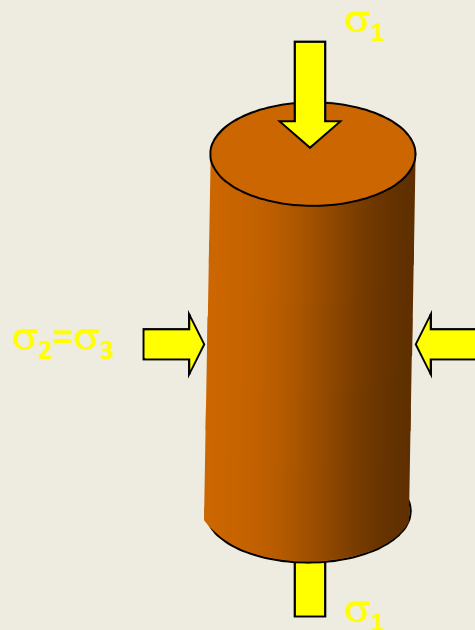


# BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

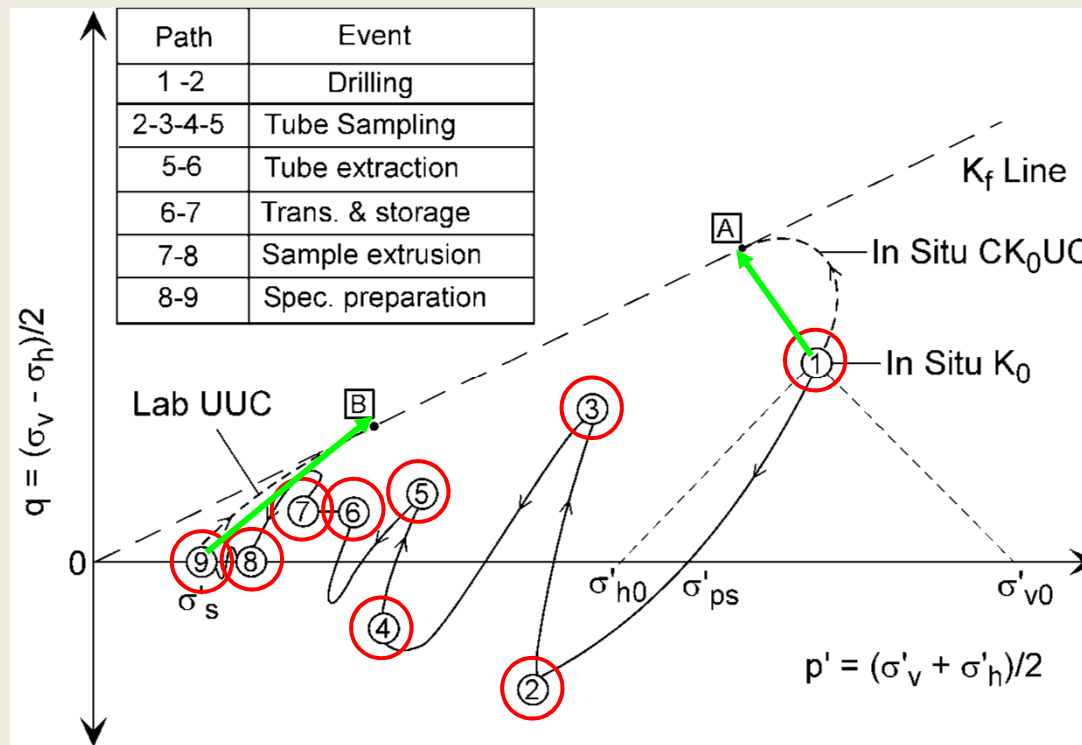


*Aparat trójosiowego ściskania*



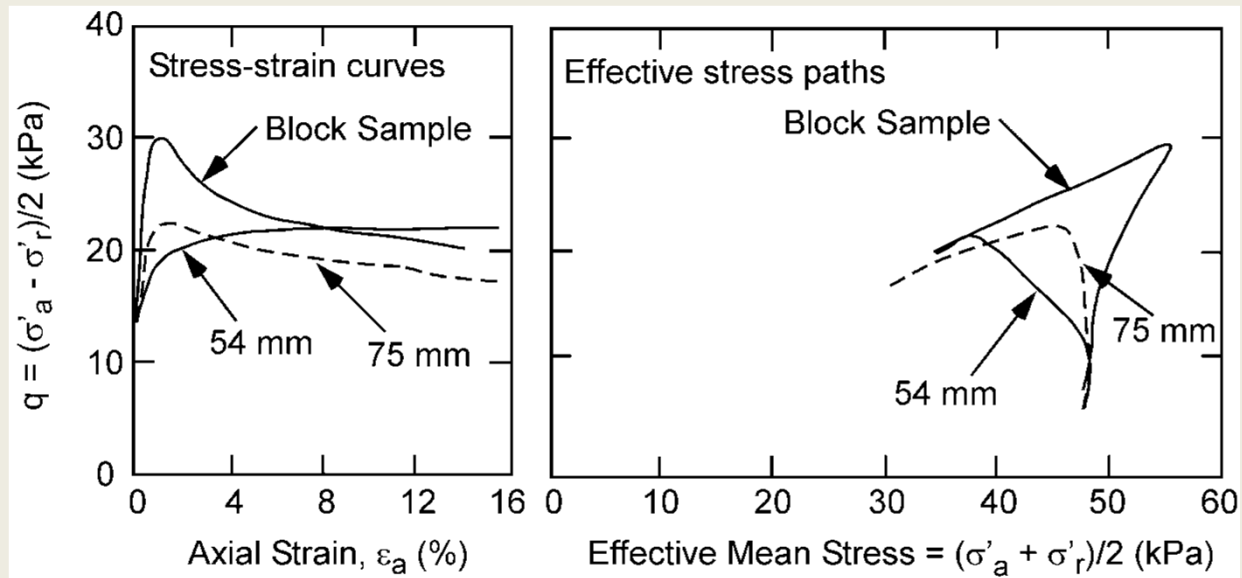
# BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

## JAKOŚĆ PRÓBKII



(Ladd and DeGroot 2003)

**JAKOŚĆ PRÓBK**



(Lunne et al. 1997)

## BADANIA GEOTECHNICZNE - LABORATORYJNE

### JAKOŚĆ PRÓBKII

Specimen Quality Designation (SQD) (Terzaghi et al. 1996)		$\Delta e/e_0$ Criteria (Lunne et al. 1997)		
Volumetric Strain (%)	SQD	OCR = 1 – 2 $\Delta e/e_0$	OCR = 2 – 4 $\Delta e/e_0$	Rating*
< 1	A	< 0.04	< 0.03	Very good to excellent
1 – 2	B	0.04 – 0.07	0.03 – 0.05	Good to fair
2 – 4	C	0.07 – 0.14	0.05 – 0.10	Poor
4 – 8	D	> 0.14	> 0.10	Very poor
> 8	E			

(DeGroot 2007)



GS:

# BADANIA GEOTECHNICZNE

NGI



GS: **BADANIA GEOTECHNICZNE**

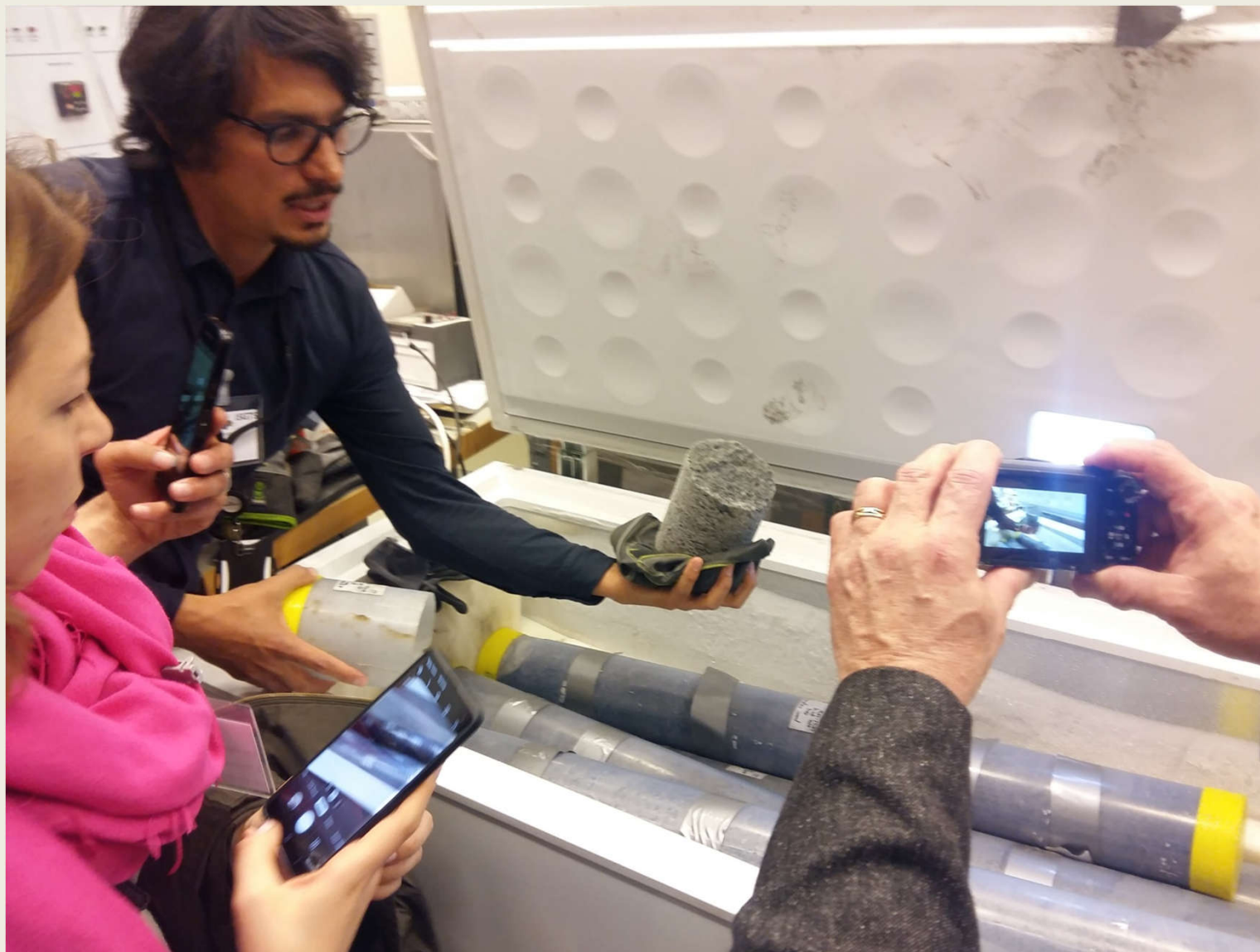




GS:

## BADANIA GEOTECHNICZNE

NGI



GS:

## BADANIA GEOTECHNICZNE

NGI



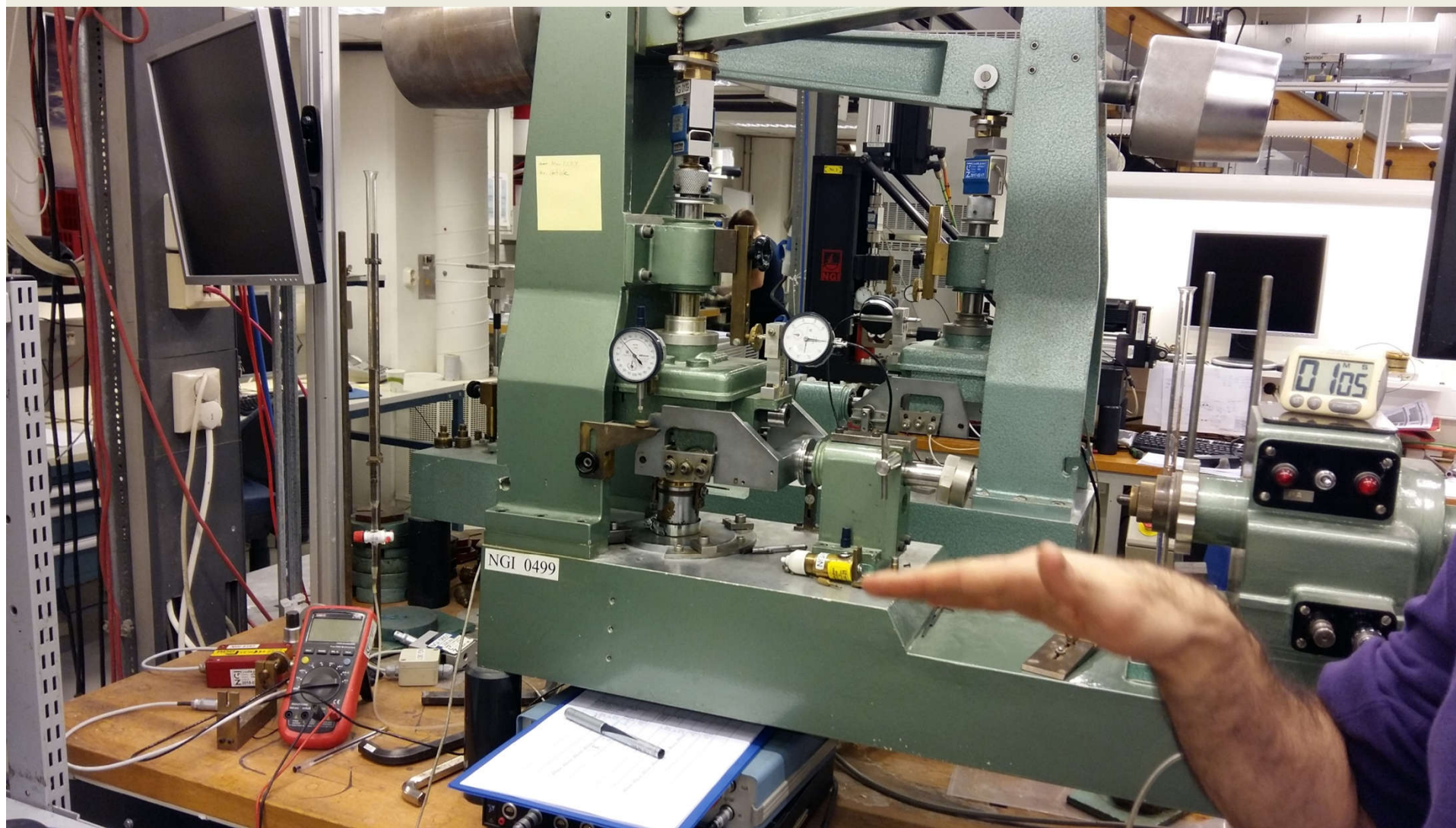
GS:

## BADANIA GEOTECHNICZNE

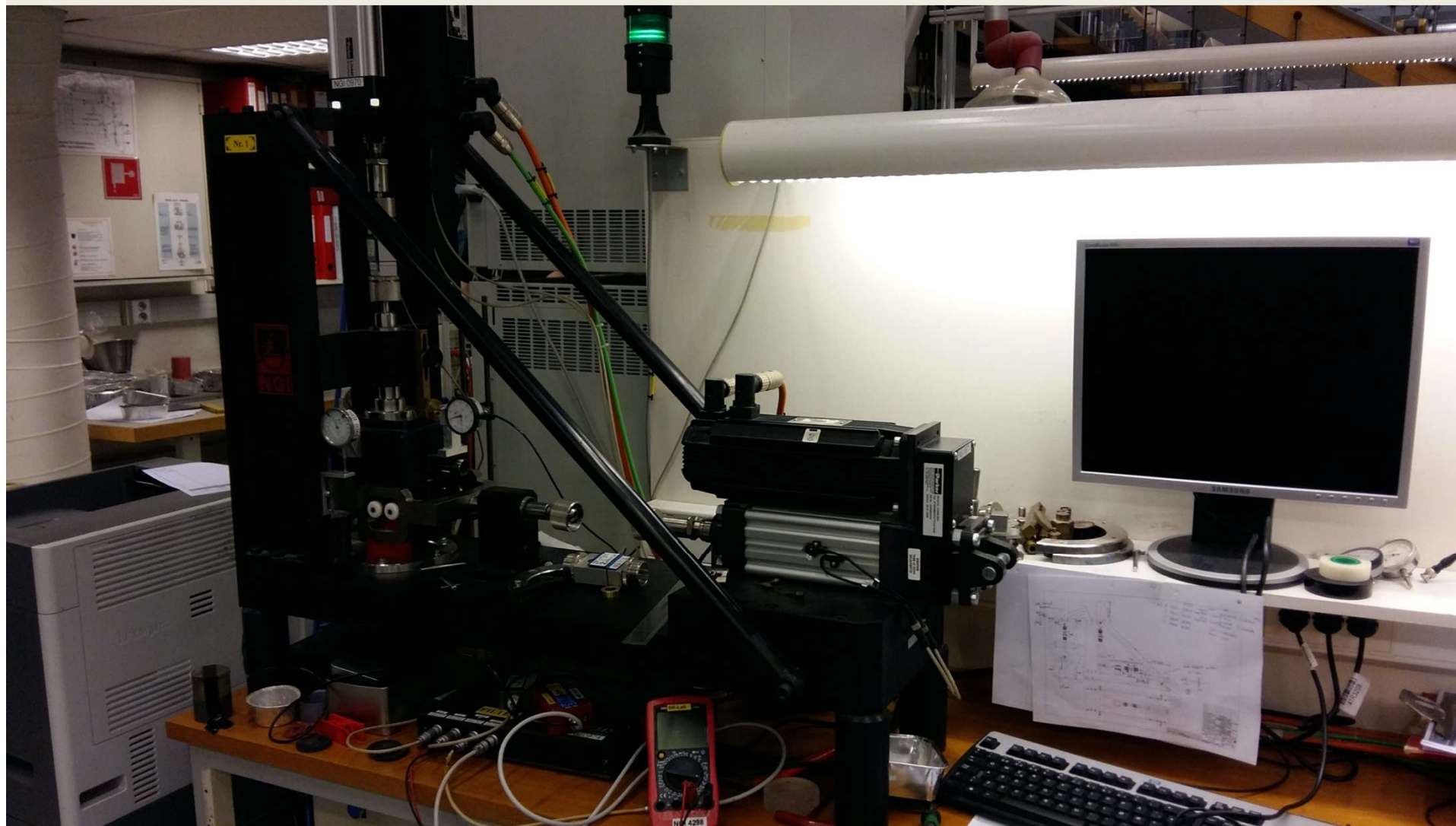
NGI



GS: **BADANIA GEOTECHNICZNE**



GS: **BADANIA GEOTECHNICZNE**





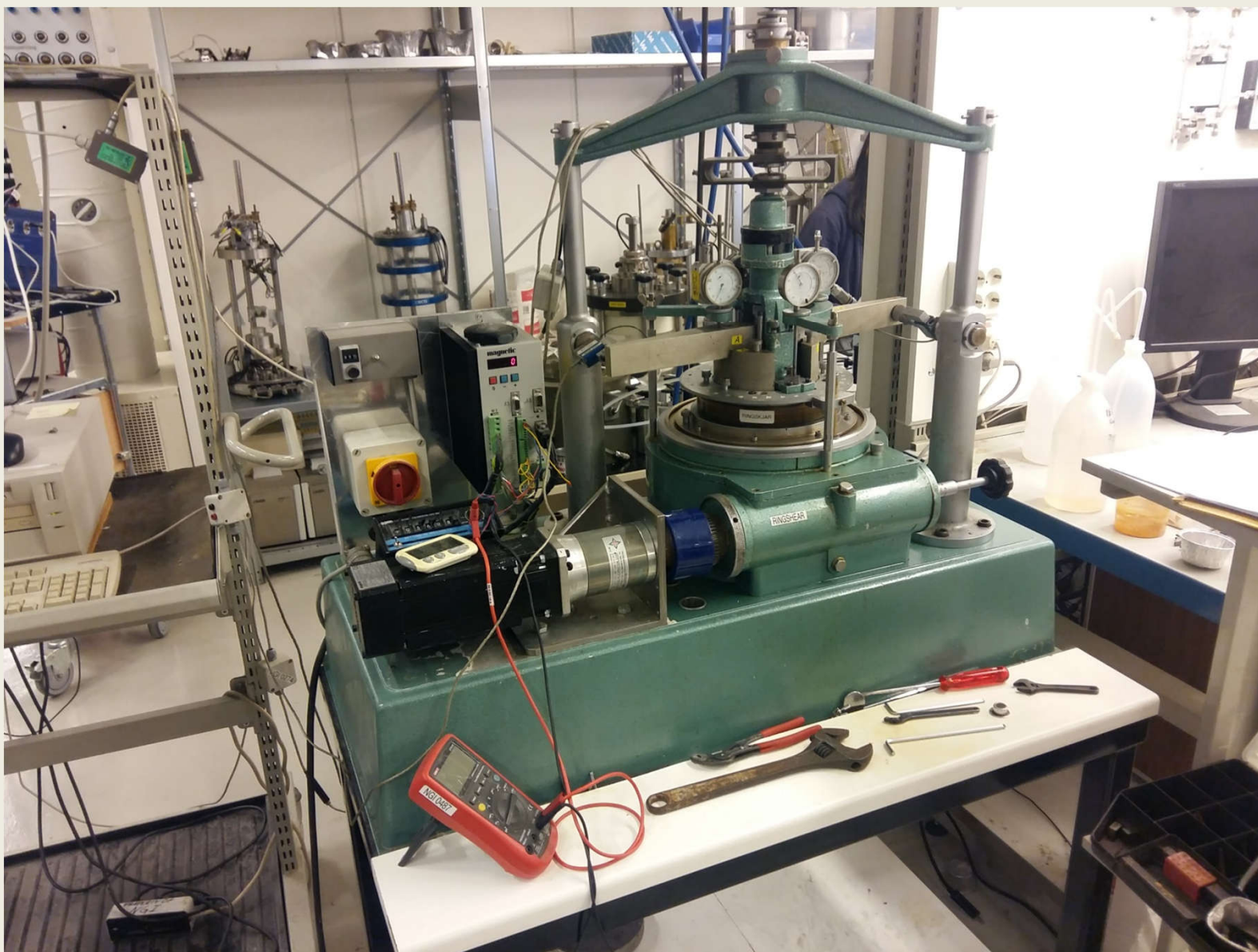
GS:

# BADANIA GEOTECHNICZNE

NGI



GS: **BADANIA GEOTECHNICZNE**



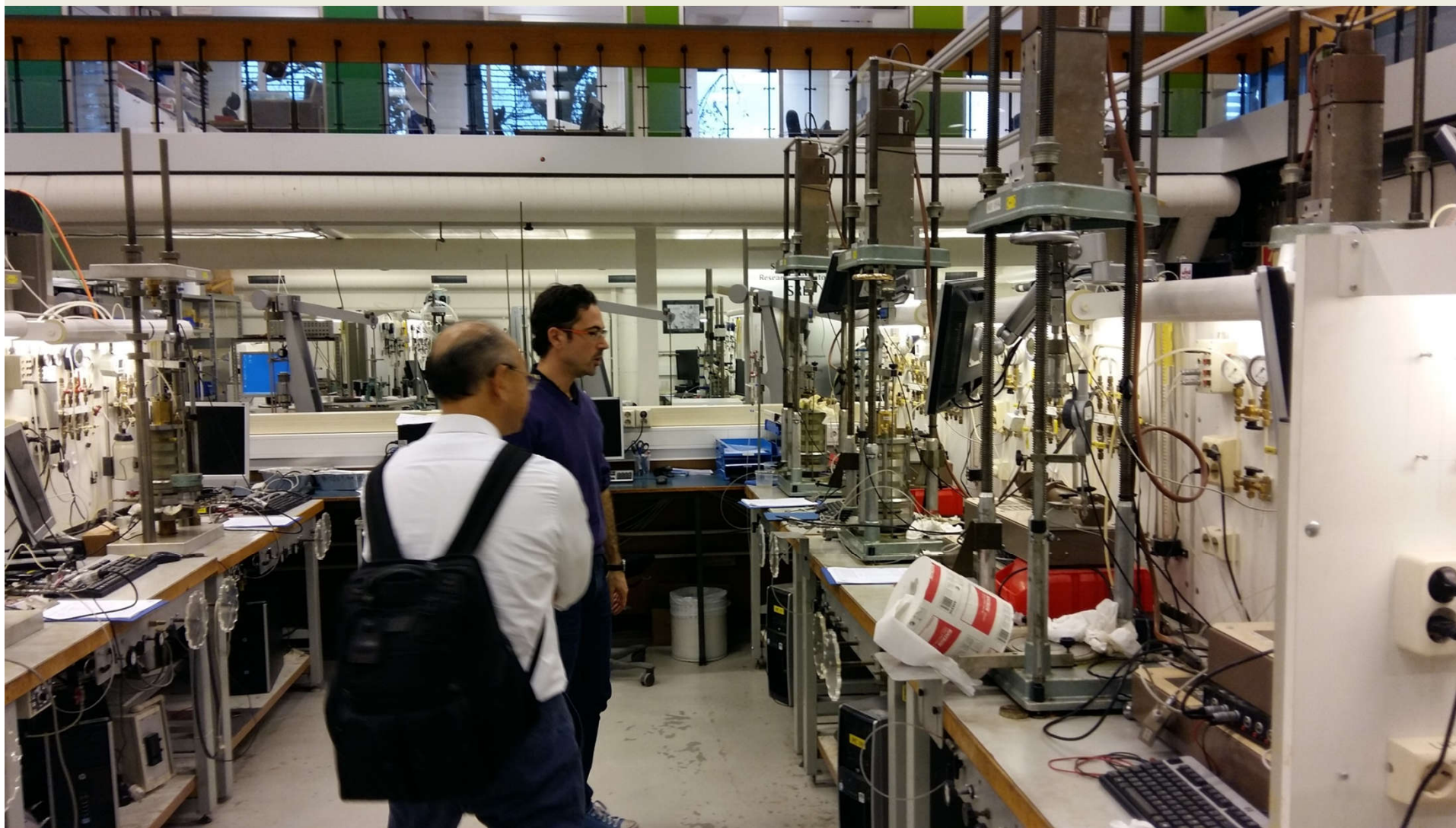
**GS:      BADANIA GEOTECHNICZNE**



GS:

# BADANIA GEOTECHNICZNE

NGI



GS:

## BADANIA GEOTECHNICZNE

