



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

# **Mechanika gruntów 5 Odształcalność podłoża gruntowego**

**Marek Cała, Michał Kowalski**

**Nazwa wydziału: Górnictwa i Geoinżynierii**

**Nazwa katedry: Geomechaniki, Budownictwa  
i Geotechniki**

## Odkształcalność ośrodków ciągłych i rozdrobnionych

Każdy ośrodek odkształca się po zmianie układu i wartości działających nań sił. Ośrodki o budowie ciągłej (skały) odkształcają się stosunkowo niewiele, ale bardzo szybko. Odkształcenia te są praktycznie rzecz biorąc całkowicie odwracalne (jeżeli pozostają w zakresie odkształceń sprężystych i nie powodują utraty ciągłości ośrodka).

**Ośrodki rozdrobnione** (spękane skały, grunty) **odkształcają się stosunkowo dużo i wolno**, w zależności od spękania, porowatości i spójności utworów oraz wartości działających na nie sił. Odkształcenia te są tylko częściowo odwracalne.

## Odształcalność ośrodków ciągłych i rozdrobnionych

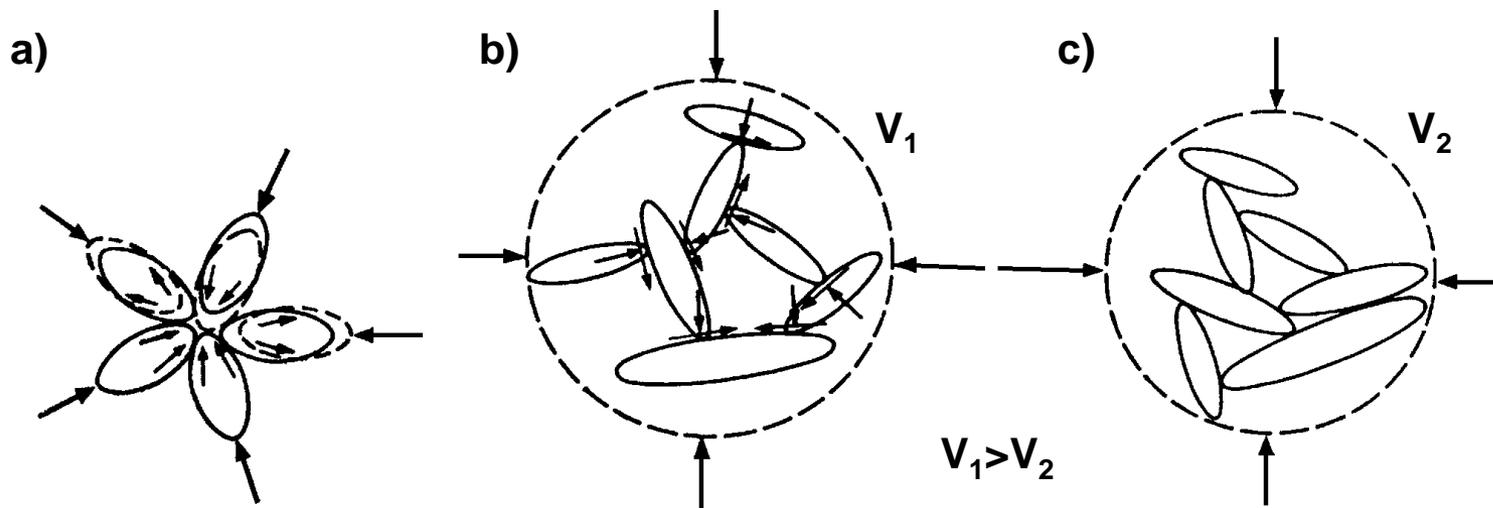
Ośrodek rozdrobniony charakteryzuje się istnieniem dużych porów między ziarnami i małych sił wewnętrznych. Nieregularny układ ziaren i cząstek powoduje, że przy czystym ściskaniu niektóre elementy są bardziej obciążone, co prowadzi do wzajemnego **trwałego przemieszczenia ziarn i cząstek**, a więc do nieliniowych i najczęściej **nieodwracalnych odkształceń** ośrodka rozdrobnionego.

Należy także pamiętać, że w punktach kontaktu ziaren lub cząstek występują znacznie większe naprężenia obliczeniowe, odniesione do całego przekroju gruntu.

## Odształcalność ośrodków ciągłych i rozdrobnionych

Zależność odkształcenia jednostkowego  $\varepsilon$  i naprężenia  $\sigma$  w ciałach sprężystych (prawo Hook'a):

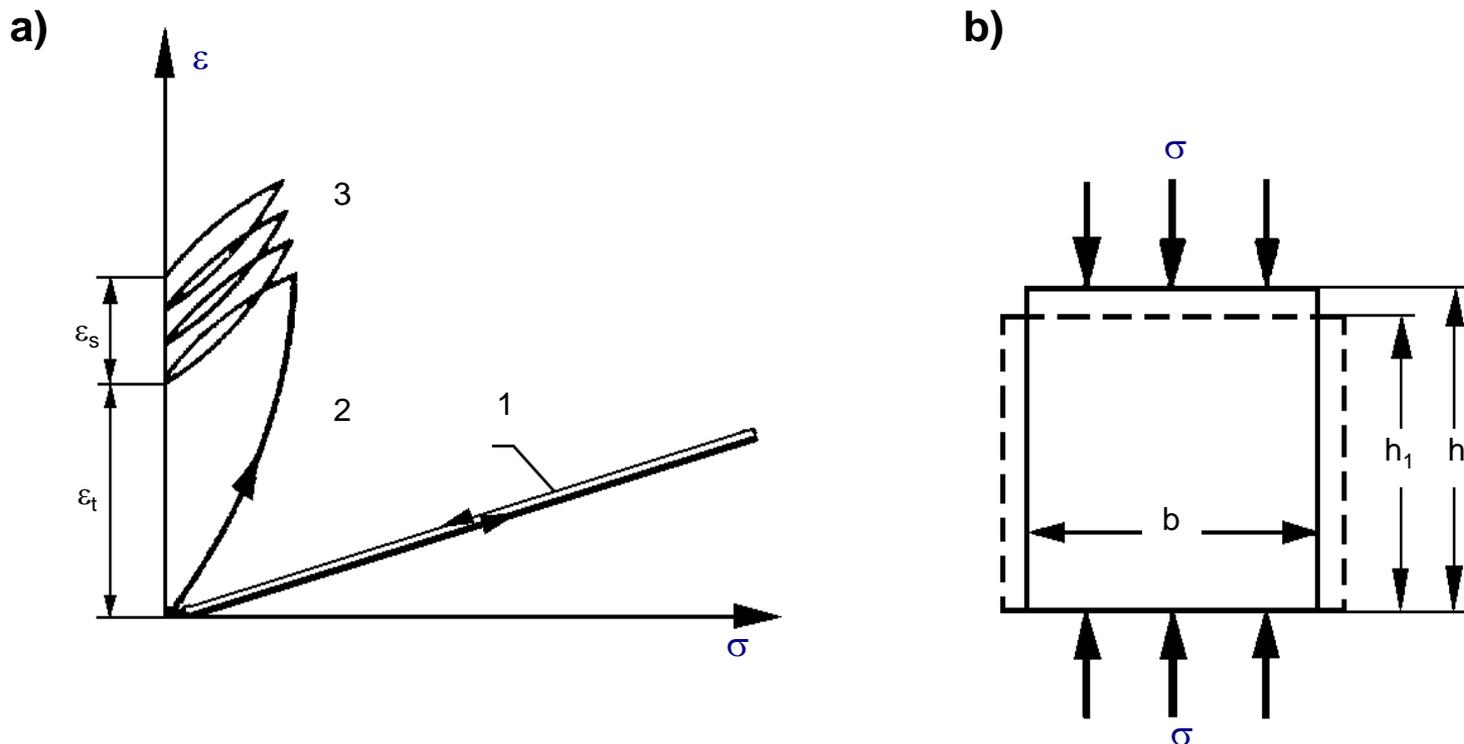
$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$



Zmiany układu ziaren i cząstek pod wpływem „czystego” ściskania;

a) w gruncie niespoistym, b) w gruncie spoistym, c) po obciążeniu i odkształceniu.

# Odkształcalność ośrodków ciągłych i rozdrobnionych



**Krzywe odkształcalności przy ścisnaniu „prostym”;**

**a) zależność  $\epsilon$  od  $\sigma$ , b) schemat obciążenia i odkształcenia: 1 – ośrodka ciągłego, 2 – ośrodka rozdrobnionego, 3 – wielokrotnie obciążonego ośrodka rozdrobnionego;  $\epsilon_s$  – odkształcenie jednostkowe sprężyste,  $\epsilon_t$  – odkształcenie trwałe.**

## Odkształcalność ośrodków ciągłych i rozdrobnionych

W ośrodkach gruntowych między odkształceniami i naprężeniami nie ma zależności liniowej. Dla odróżnienia parametrów odkształcalności gruntów od ciał sprężystych wprowadzony został:

- **moduł odkształcenia  $E$**  – w warunkach jednoosiowego ściskania i swobodnej bocznej rozszerzalności gruntu
- **moduł ściśliwości  $M$**  – w warunkach jednoosiowego ściskania, lecz przy niemożliwej bocznej rozszerzalności próbki gruntu

Przy powtórnych obciążeniach i odciążeniach krzywe odkształcalności gruntu są powtarzalne i równoległe do siebie – można więc mówić o pewnej sprężystości gruntu.

Wyznaczone z tych krzywych moduły odkształceń nazywa się modułami odkształcenia wtórnego  $E$ , a uzyskane moduły odkształcenia przy pierwszym obciążeniu nazywa się modułami odkształcenia pierwotnego  $E_0$ .

## Ścisłość gruntów

**Ścisłość** to cecha gruntu polegająca na zmniejszaniu się jego objętości pod wpływem przyłożonego obciążenia.

**Odprężenie** to zwiększenie objętości gruntu wskutek zmniejszenia obciążenia (wynik odkształceń sprężystych)

**Konsolidacja** to proces równoczesnego zmniejszania się zawartości wody i objętości porów w gruntach pod wpływem przyrostu naprężeń. (Jeżeli pory są całkowicie wypełnione wodą, lecz jej odpływ jest niemożliwy, to przyłożone obciążenie powoduje zwiększenie ciśnienia wody w porach, nie powodując wzrostu naprężenia efektywnego  $\sigma'$ . Cząstki gruntu nie ulegają przesunięciu i konsolidacja nie występuje).

## Ścisłość gruntów

Ścisłość gruntu opisuje się zależnością porowatości od naprężenia. Od historii naprężenia zależy kształt krzywej ścisłości gruntów spoistych. Wyróżnia się grunty:

- **normalnie skonsolidowane** – w których obecnie występujące w gruncie naprężenie efektywne jest największe ze wszystkich, jakie dotychczas w danym gruncie wystąpiły. Kształt krzywej ścisłości jest prostoliniowy (lub zbliżony) i nosi ona nazwę **pierwotnej**.
- **prekonsolidowane** – które przenosiły już w swej historii większe naprężenia, (np. teren obciążony był lodowcem albo warstwami gruntu, następnie wyerodowanymi przez rzekę). Krzywa ścisłości w podziałce półlogarytmicznej będzie miała kształt zakrzywiony.



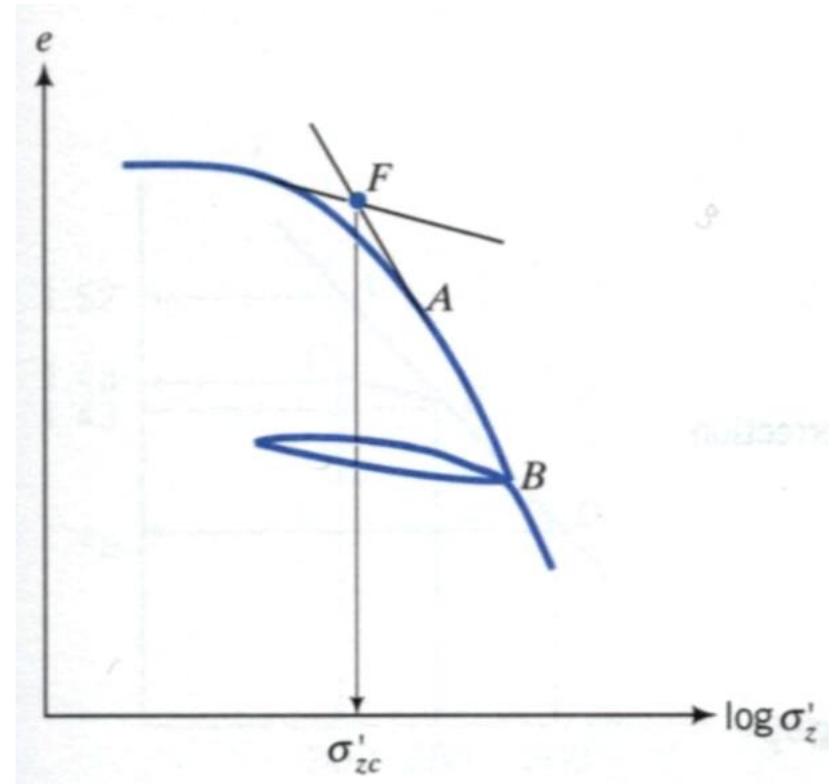
# AGH Ścisłość gruntów

**Współczynnikiem prekonsolidacji** nazywa się stosunek największej wartości naprężenia efektywnego  $\sigma_{zc}'$ , które wystąpiło w gruncie w przeszłości, do wartości naprężenia od ciężaru własnego występującego obecnie  $\sigma_0'$

$$OCR = \frac{\sigma_{zc}'}{\sigma_0'}$$

$OCR = 1$  – grunty normalnie skonsolidowane

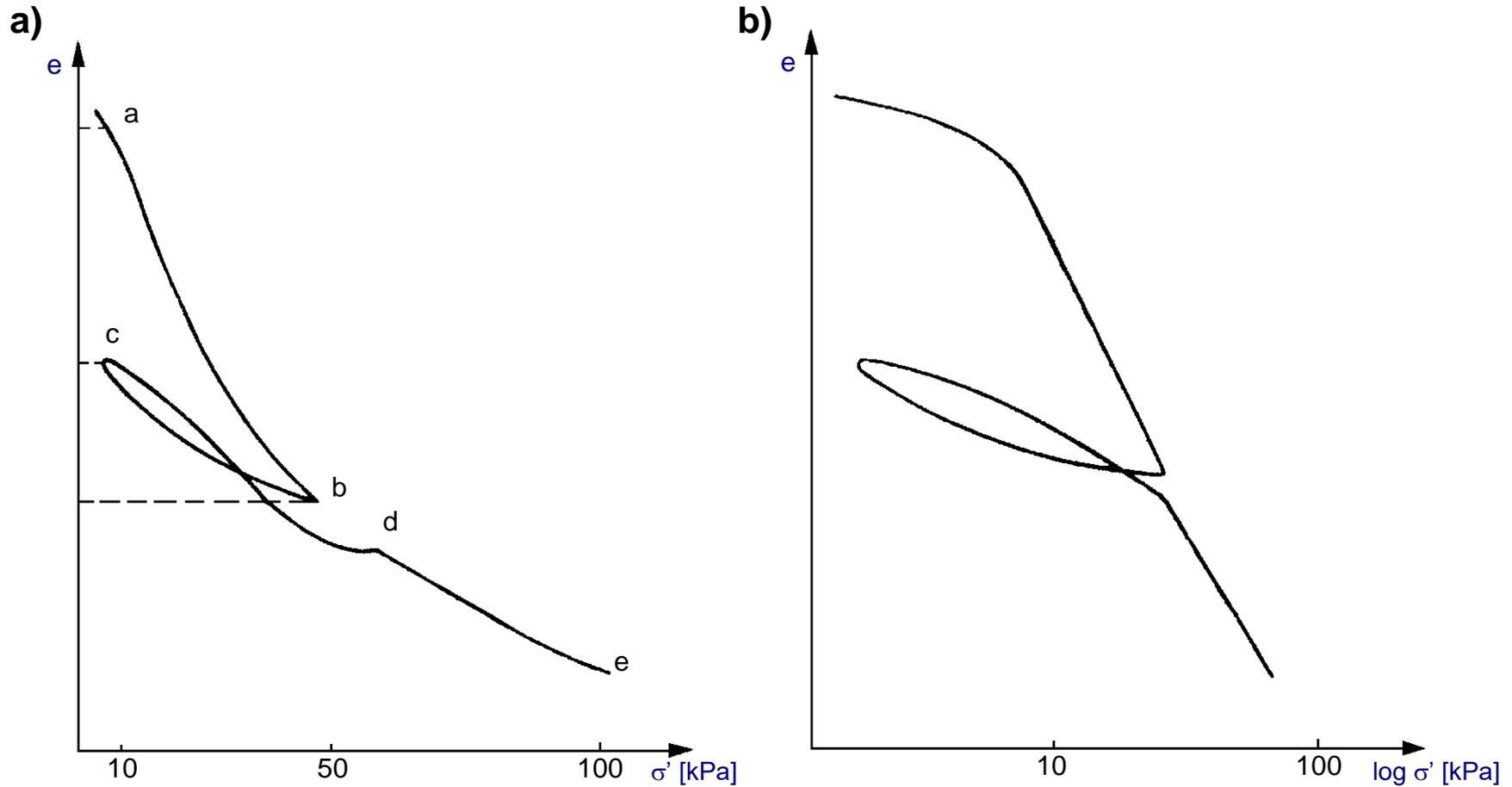
$OCR > 1$  – grunty prekonsolidowane





AGH

# Ściśliwość gruntów



**Krzywa ściśliwości:**

**a) w podziałce liniowej, b) w podziałce półlogarytmicznej.**

# Ściśliwość gruntów

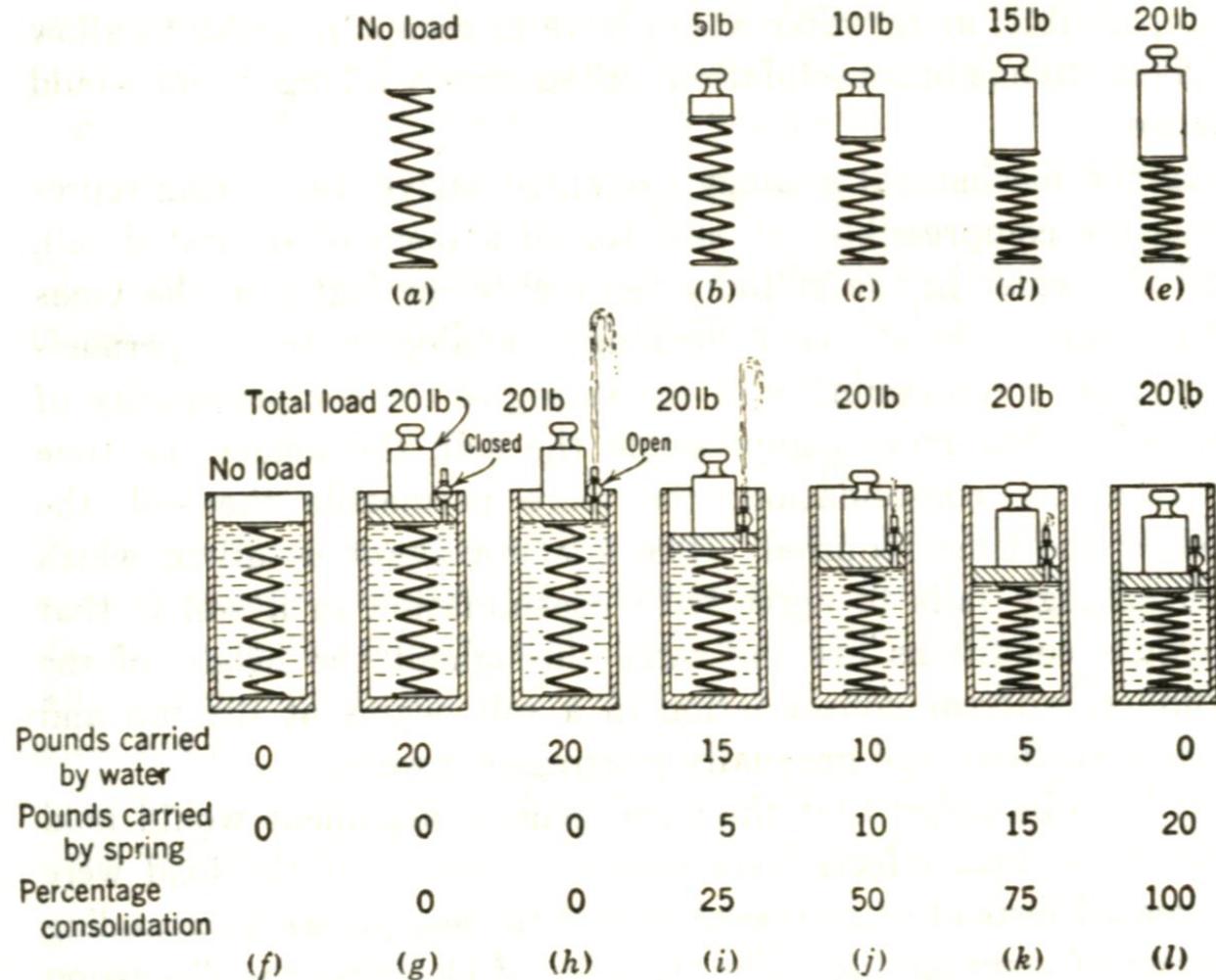


FIG. 10·8 The piston and spring analogy.



AGH

# Ściśliwość gruntów

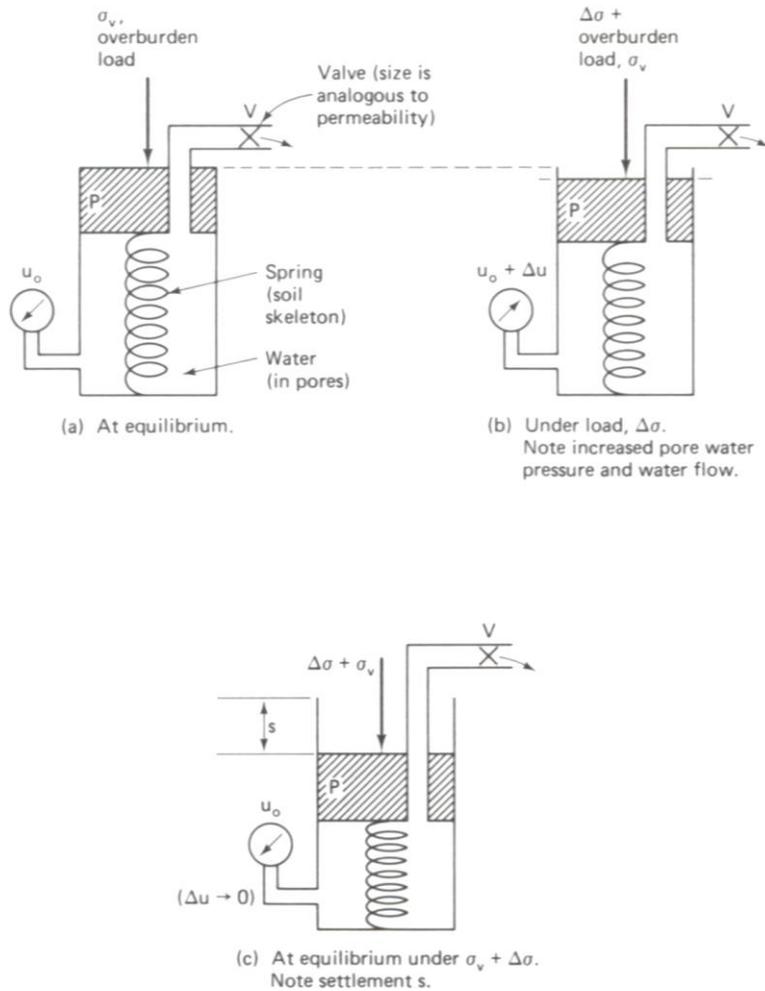
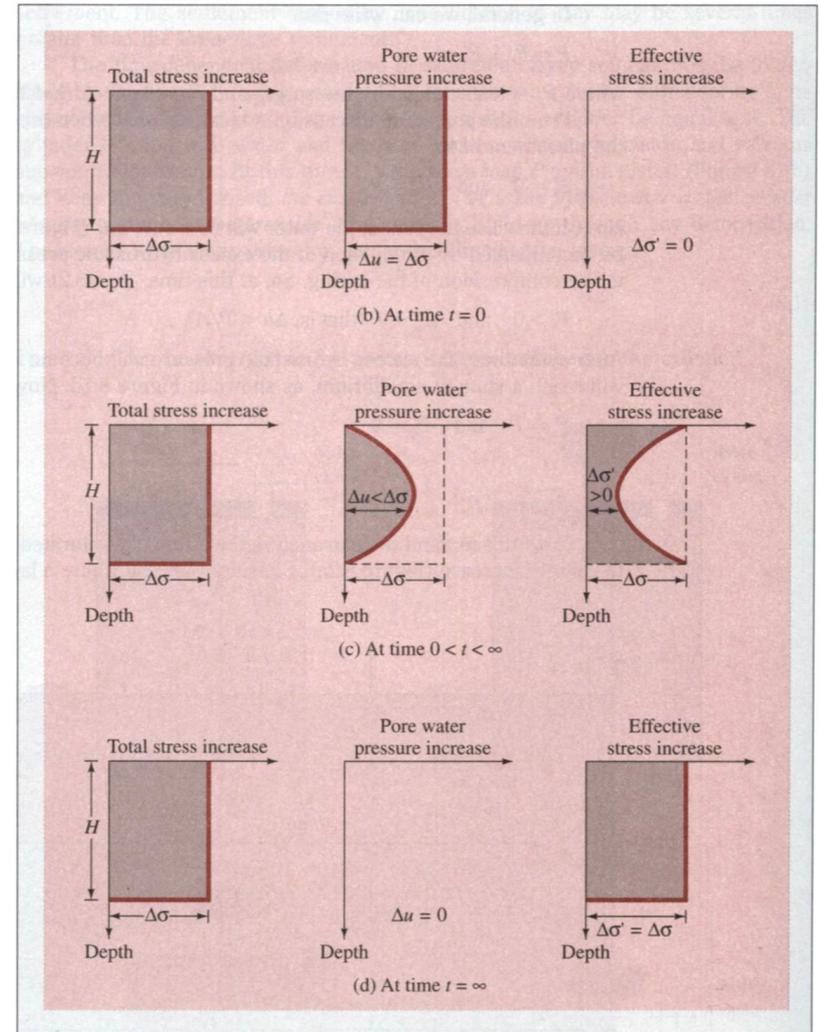


Fig. 8.2 Spring analogy as applied to consolidation.

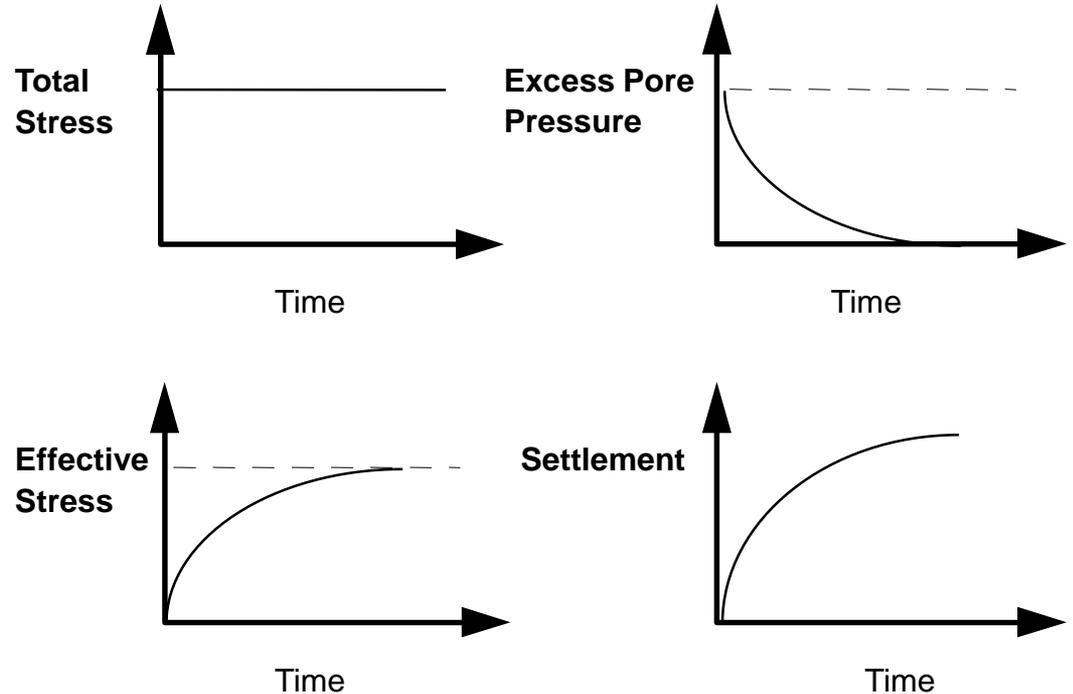




AGH

## Ściśliwość gruntów

**Grunty ściśliwe mają bardzo małą wodoprzepuszczalność i proces konsolidacji (a także procesy pęcznienia lub odprężenia) przebiegają w nich bardzo powoli. Powolnemu odkształcaniu się tych gruntów towarzyszy (po ich odciążeniu) zmiana naprężeń efektywnych w szkielecie gruntu i ciśnień w wodzie i porach gruntu.**

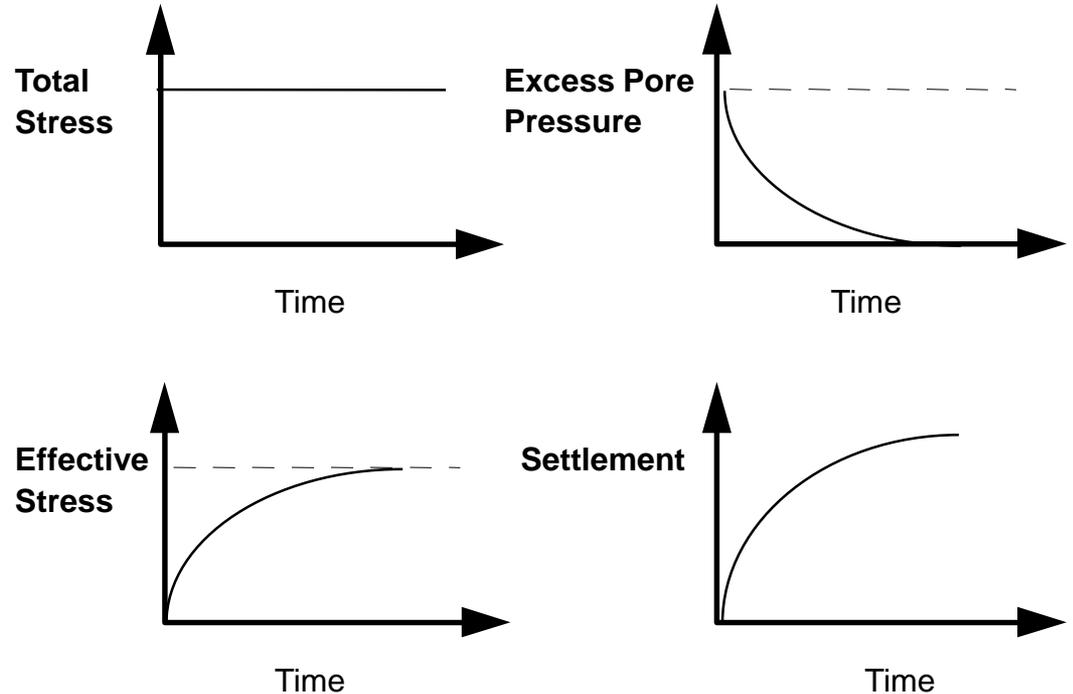




AGH

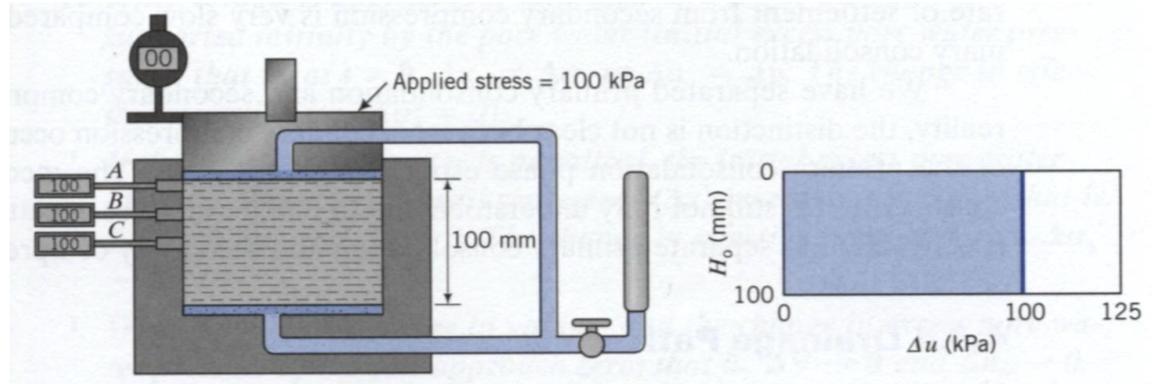
## Ścisłość gruntów

Bezpośrednio po zwiększeniu obciążenia gruntu cały przyrost nacisku przejmuje woda w porach gruntu jako nadciśnienie, a przyrost naprężeń efektywnych jest znikomy. W miarę upływu czasu nadciśnienie w wodzie maleje wskutek odpływu wody poza strefę obciążoną.

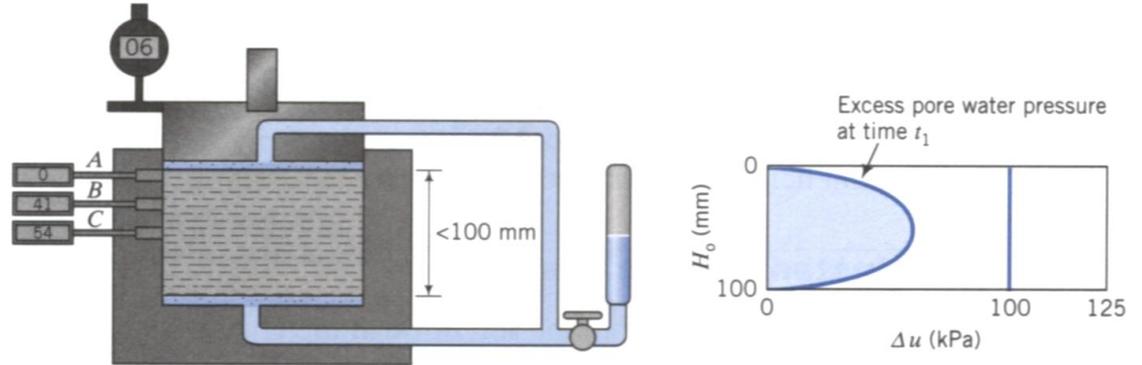


Jednocześnie następuje przyrost naprężeń efektywnych w szkielecie gruntu. Po zakończeniu procesu konsolidacji ciśnienie w wodzie jest równe ciśnieniu hydrostatycznemu, jakie istniało przed zwiększeniem obciążenia gruntu, a naprężenia efektywne zwiększają się o cały przyrost nacisku na grunt.

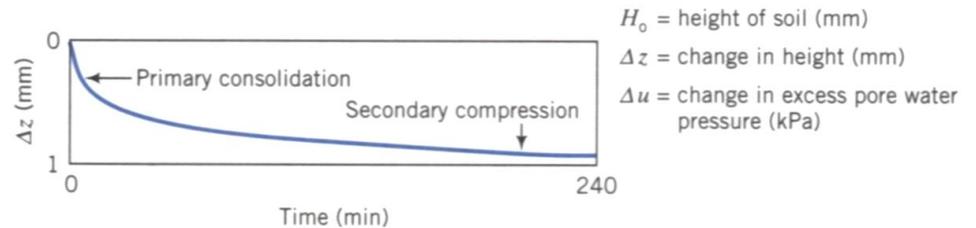
# Ścisłość gruntów



**Konsolidacja  
filtracyjna  
(pierwotna)**



**Konsolidacja  
strukturalna  
(wtórna)**

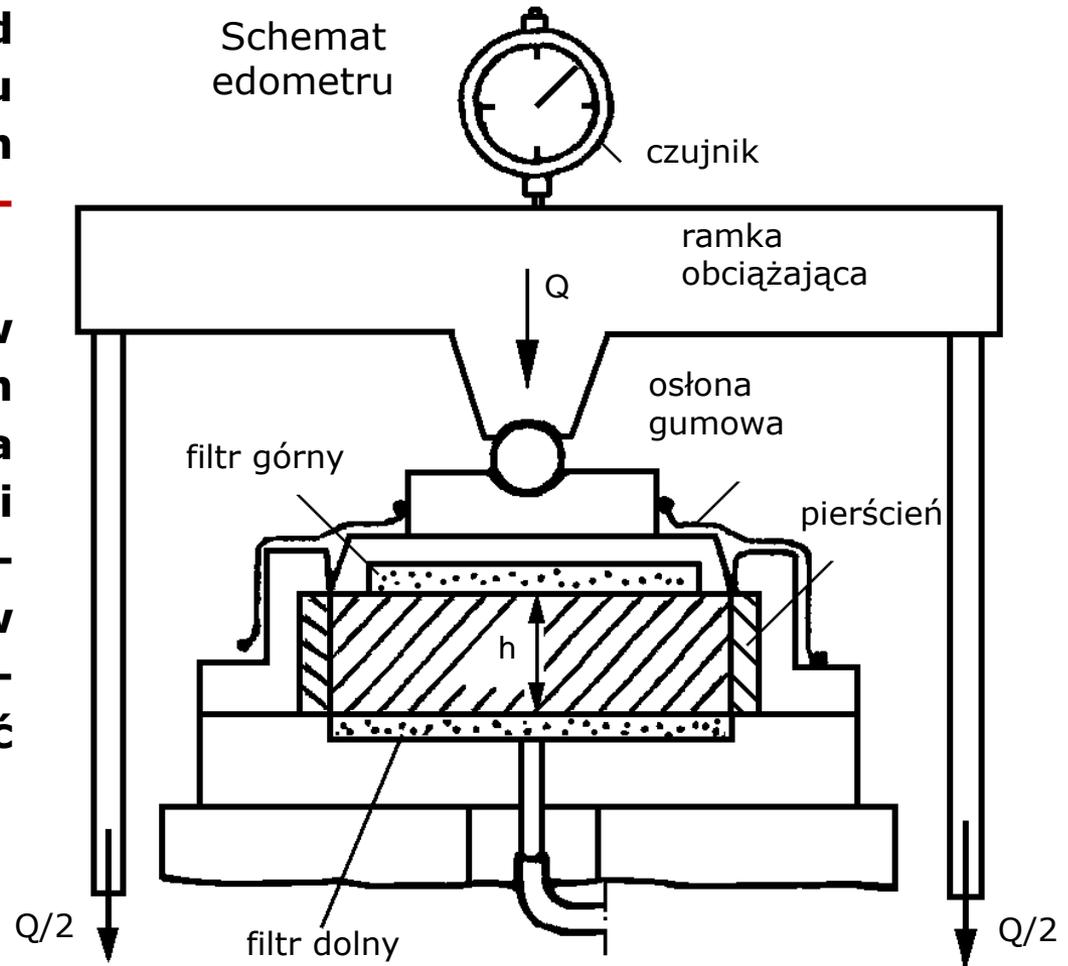




# AGH Ściśliwość gruntów

Zachowanie się gruntu pod obciążeniem lub po odciążeniu bada się w laboratorium **edometrem** lub **konsolidometrem**.

Badanie ściśliwości gruntu w edometrze jest badaniem modelowym – polega na stopniowym obciążaniu próbki gruntu umieszczonej w metalowym pierścieniu, a więc w warunkach uniemożliwiających boczną rozszerzalność próbki.

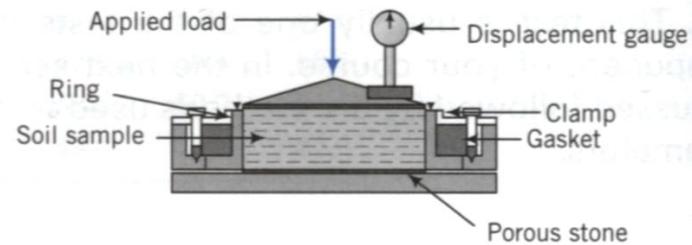
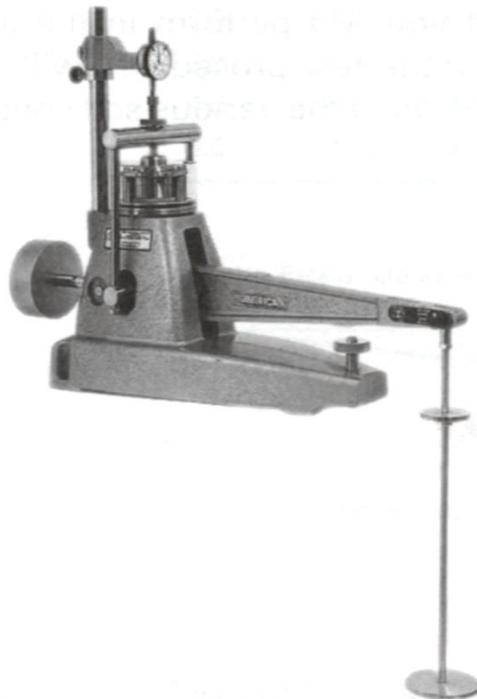




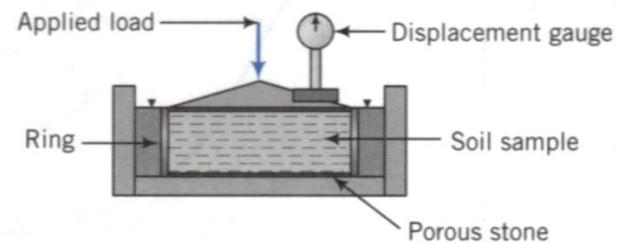
AGH

## Parametry plastyczności gruntów

Warunki badania gruntu w edometrze w dość dużym stopniu odpowiadają warunkom pracy elementu gruntu w naturze pod dużym fundamentem, gdzie boczna rozszerzalność każdego elementu jest również częściowo ograniczona sąsiednimi elementami gruntu.



(b) Fixed ring cell



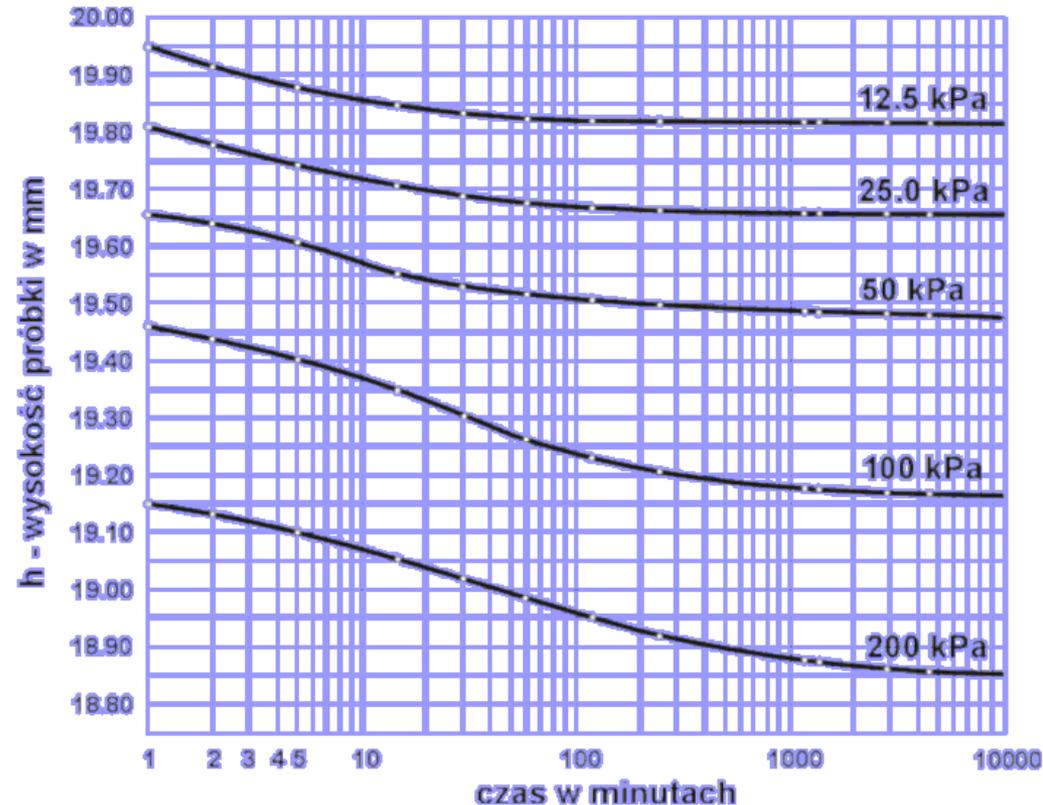
(c) Floating ring cell



AGH

## Ściśliwość gruntów

Badania ściśliwości gruntów w edometrach przeprowadza się obciążając próbkę stopniowo, tj. zwiększając obciążenie za każdym razem dwukrotnie w stosunku do poprzedniego (np. 12.5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa). Odczyty osiadania notuje się po upływie czasów: 30", 1', 2', 4', 6', 8', 30' oraz po 1, 2, 4, 19 i ewentualnie po 24 h.

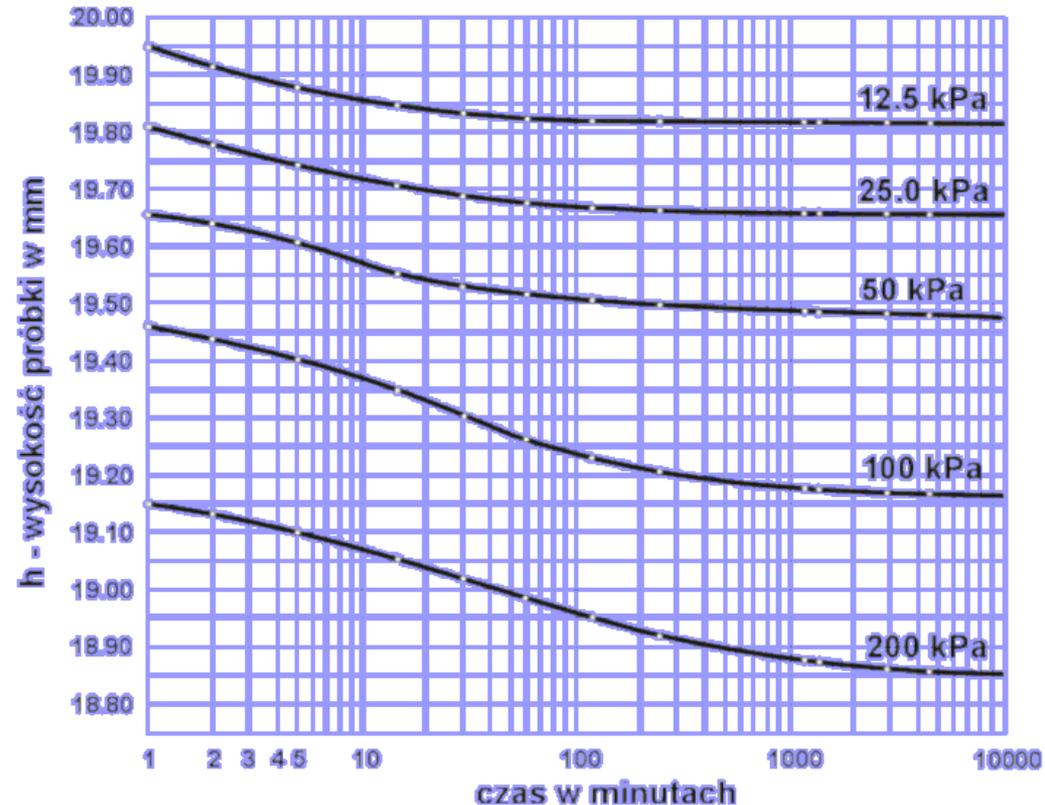




AGH

## Ścisłość gruntów

Bardzo duży wpływ na przebieg ścisłości ma wartość stopni obciążeń. Im większy stosuje się skok obciążeń, tym większą otrzymuje się ścisłość. Prawdopodobnie jest to wywołane powstaniem zbyt dużych naporów w wodzie porowej, co powoduje duże spadki hydrauliczne i może niszczyć układ naturalny szkieletu gruntowego i zwiększać osiadania.



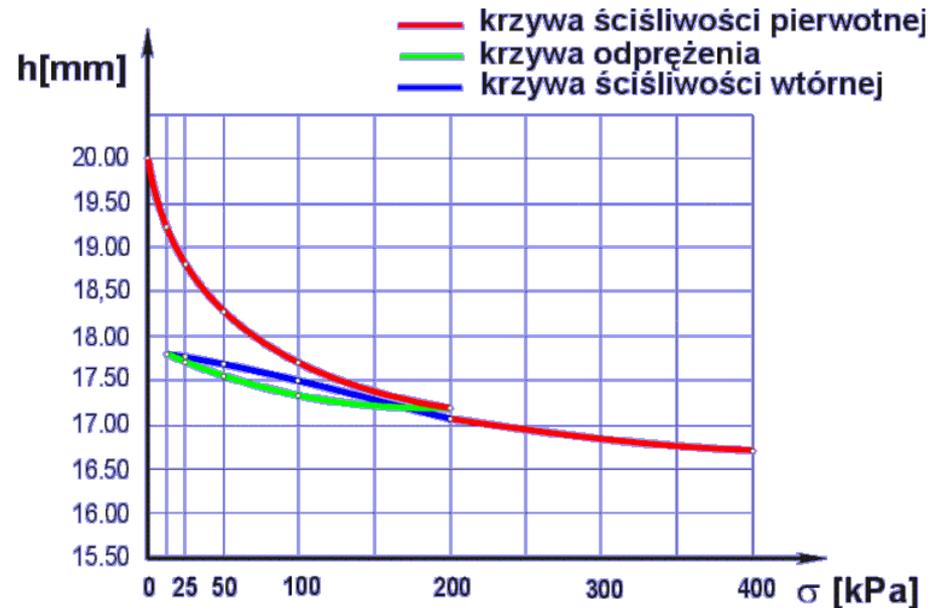


AGH

## Ścisłość gruntów

Mając wartości osiadań przy każdym stopniu obciążenia sporządza się wykres ścisłości (lub odprężenia) gruntu.

Badając w edometrze ścisłość pasty gruntowej uzyskujemy krzywą ścisłości pierwotnej. Przerywając przy pewnym naciśku dalsze obciążenie uzyskujemy krzywą odprężenia.



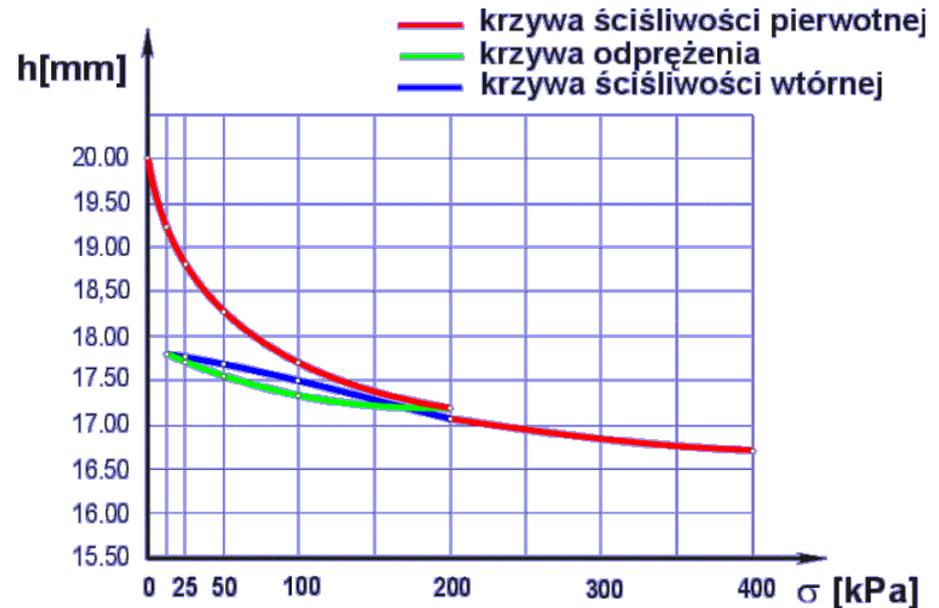


AGH

## Ściśliwość gruntów

Przechodzi ona znacznie poniżej krzywej ściśliwości pierwotnej. Po powtórny obciążeniu krzywa ściśliwości wtórnej początkowo przebiega ponad krzywą odprężenia, potem przecina ją tworząc pętlę histerezy i następnie wpisuje się w kierunek pierwotnej krzywej ściśliwości.

Nachylenie krzywej ściśliwości wtórnej jest znacznie mniejsze niż nachylenie krzywej ściśliwości pierwotnej, co oznacza, że grunt po obciążeniu wtórnym jest mniej ściśliwy niż po obciążeniu po raz pierwszy.





AGH

## Ścisłość gruntów

Wartość **edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej** określa się ze wzoru:

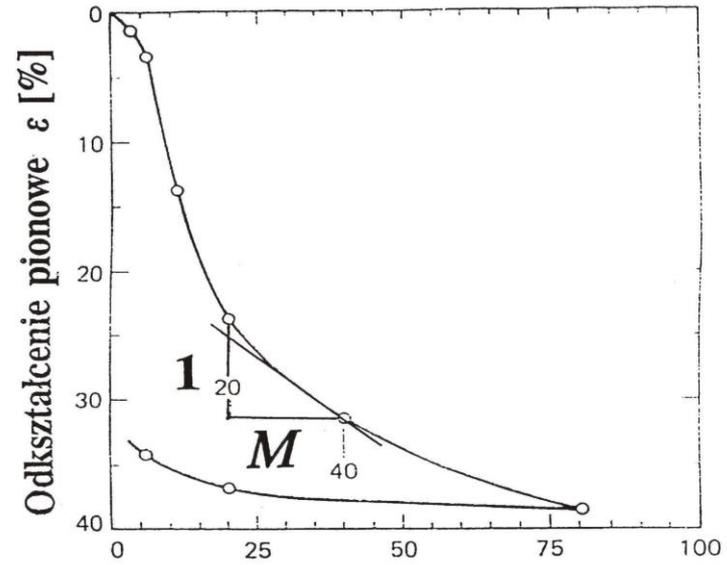
$$M_{0i} = \frac{\Delta\sigma_i'}{\frac{\Delta h_i}{h_i}} = \frac{\Delta\sigma_i' h_i}{\Delta h_i}$$

gdzie:

$\Delta\sigma_i$  – przyrost naprężenia efektywnego w szkielecie gruntu

$\frac{\Delta h_i}{h_i}$  – skrócenie jednostkowe próbki gruntu według krzywej ścisłości pierwotnej, przy czym  $\Delta h_i$  jest osiadaniem próbki na skutek zwiększenia naprężenia efektywnego o  $\Delta\sigma_i'$ .

Moduły ścisłości wtórnej określa się także z powyższego wzoru przyjmując  $\Delta h_i$  oraz  $h_i$  z krzywej ścisłości wtórnej.



Składowa pionowa naprężenia efektywnego  $\sigma'_v$  [kPa]



# AGH Ścisłość gruntów

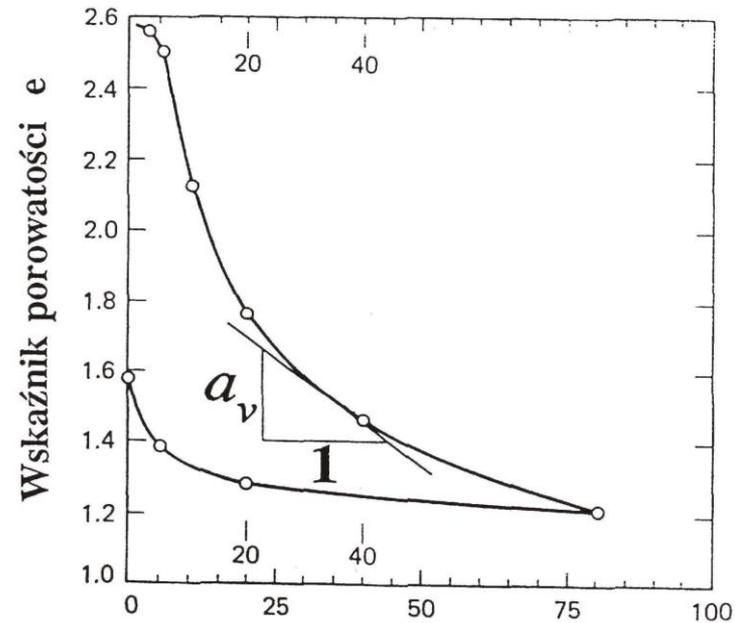
Ścisłość podłoża można także określić za pomocą **współczynnika ścisłości  $a_v$** , który obrazuje zależność zmiany wskaźnika porowatości od zmiany obciążenia gruntu w warunkach niemożliwej jego rozszerzalności bocznej (np. w edometrze).

$$a_v = \frac{\Delta e_i}{\Delta \sigma_i'}$$

gdzie:

$\Delta e_i$  – zmiana wskaźnika porowatości przy zmianie naprężenia w gruncie o  $\Delta \sigma_i'$

$$M_{0i} = \frac{\Delta \sigma_i' h_i}{\Delta h_i} = \frac{\Delta \sigma_i' (1 + e_0)}{\Delta e_i} = \frac{1 + e_0}{a_v}$$



Składowa pionowa naprężenia efektywnego  $\sigma'_v$  [kPa]

## Ścisłość gruntów

W literaturze angielskojęzycznej rozpowszechniony jest **współczynnik ścisłości objętościowej** (współczynnik zmiany objętości gruntu)  $m_v$ :

$$m_v = \frac{1}{M} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma'} = \frac{\Delta h}{\Delta\sigma' \Delta h_0} = \frac{e_0 - e_1}{(1 + e_0)\Delta\sigma'}$$

Pomiędzy **modułem odkształcenia  $E$**  i **edometrycznym modułem ścisłości  $M$**  występuje następująca zależność:

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

$\nu$  – współczynnik Poissona

## Konsolidacja

**Konsolidacja** to proces polegający na odkształceniu gruntu spoistego wskutek przyłożonego obciążenia równocześnie z rozpraszaniem się nadwyżki ciśnienia wody  $\Delta u$ . Proces ten związany jest z odpływem z gruntu wody (zmniejsza się jej objętość w porach), a zatem zależy od filtracyjnych właściwości gruntu.

Etapy procesu konsolidacji:

- **ściśliwość natychmiastowa lub początkowa** – odkształcenie to występuje w chwili przyłożenia obciążenia,
- **konsolidacja pierwotna** odpowiadająca procesowi konsolidacji wg teorii *Terzaghiego*; proces odkształcenia jest w tym etapie uwarunkowany odpływem wody,
- **ściśliwość wtórna**, występująca po rozproszeniu nadwyżki ciśnienia wody w porach spowodowanej obciążeniem; proces ten postępuje przy stałym naprężeniu efektywnym.

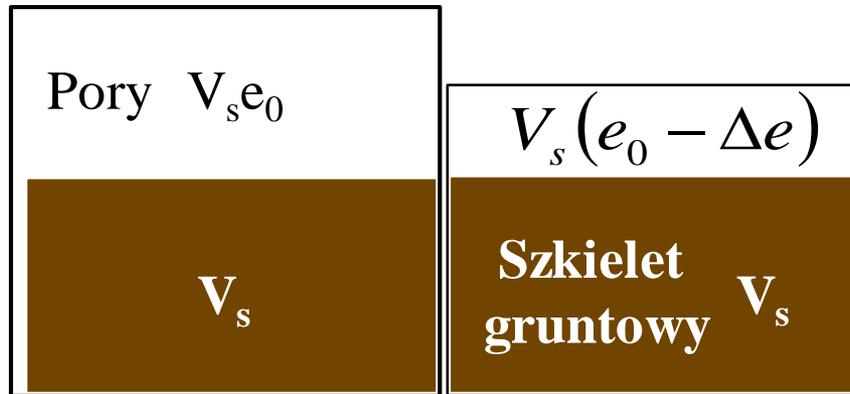


# AGH Ścisliwość gruntów

**AB – krzywa obciążenia wtórnego,**

**BC – krzywa odciążenia**

**CD – krzywa obciążenia pierwotnego (oznacza że grunt był w przeszłości geologicznej obciążony do punktu B)**

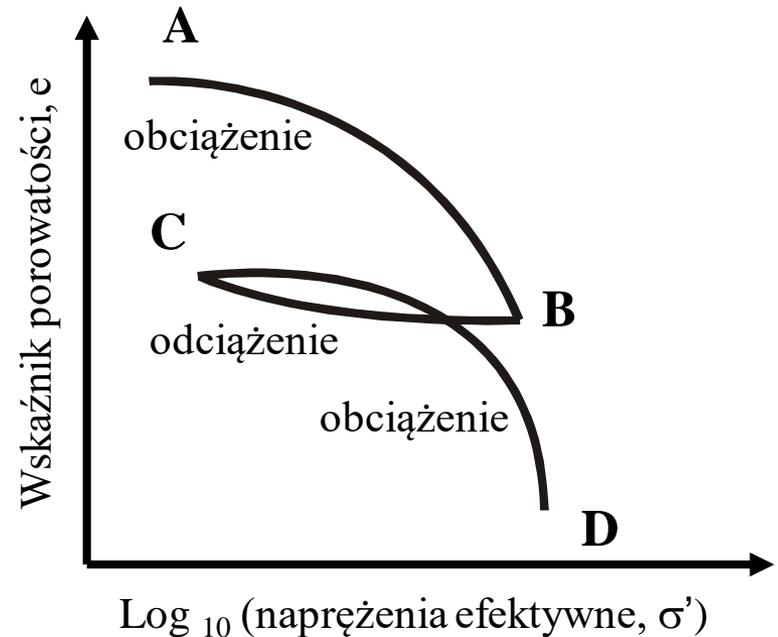


**Przed obciążeniem**

**Po obciążeniu**

**Odształcenie próbki gruntu:**

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta e V_s}{(1 + e_0) V_s}$$



$$\begin{aligned} e &= e_0 - \Delta e = e_0 - \varepsilon_z (1 + e_0) = \\ &= 1 + e_0 - \varepsilon_z (1 + e_0) - 1 = \\ &= (1 - \varepsilon_z)(1 + e_0) - 1 \end{aligned}$$



# AGH Ścisliwość gruntów

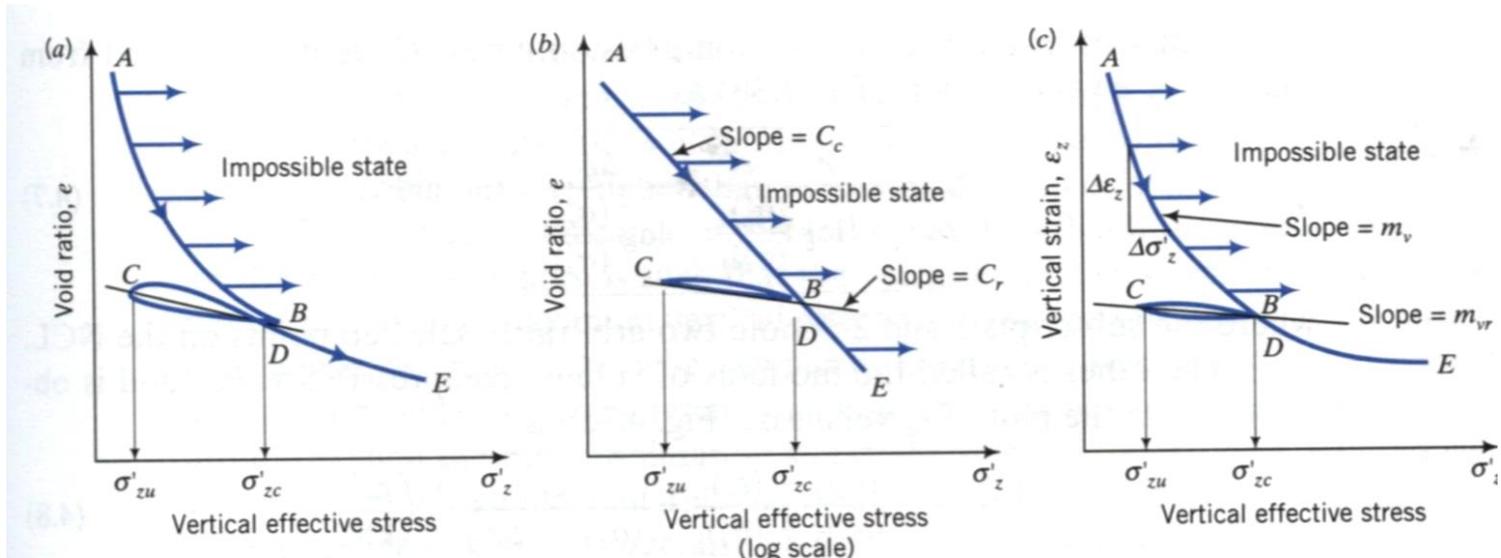
**Napężenie prekonsolidacyjne (pierwotne)** jest to największe napężenie, które było kiedykolwiek wcześniej przyłożone do elementu gruntu (oznaczenia  $\sigma_{zc}'$ ,  $\sigma_c'$ )

Grunt jest **prekonsolidowany (OC)** jeżeli:

Aktualne napężenie efektywne < napężenie prekonsolidacyjne

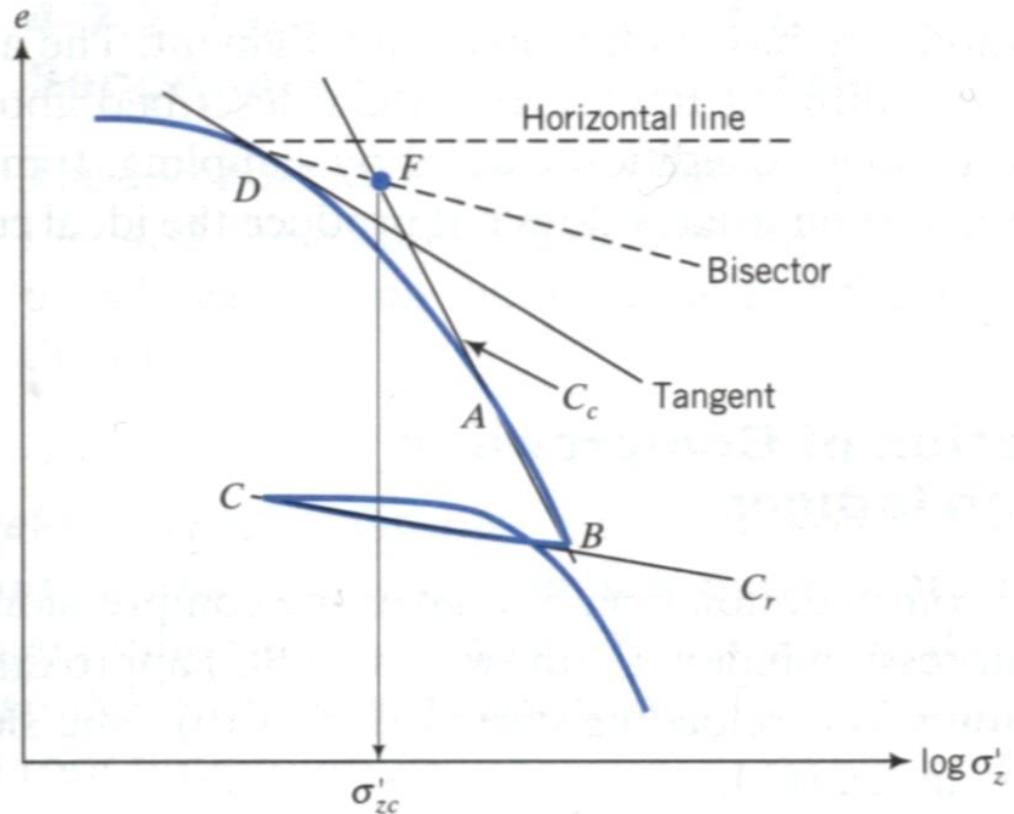
Grunt jest **normalnie skonsolidowany (NC)** jeżeli:

Aktualne napężenie efektywne = napężenia prekonsolidacyjne



## Metoda Casagrande wyznaczania naprężenia prekonsolidacyjnego

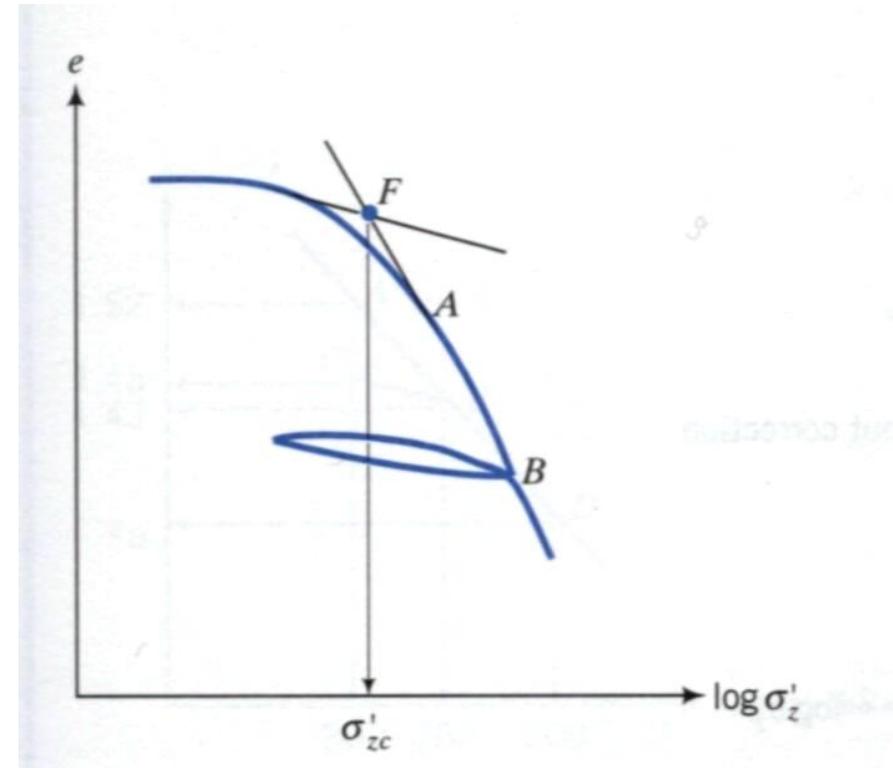
1. Wyznaczyć punkt o największej krzywiznie (D).
2. Narysować linię poziomą z punktu D.
3. Narysować styczną do krzywej w punkcie D.
4. Narysować dwusieczną kąta wyznaczonego przez proste z p. 3 i 4.
5. Narysować styczną do krzywej AB.
6. Przecięcie stycznej do krzywej AB i dwusiecznej daje punkt F wyznaczający naprężenie prekonsolidacyjne



## Metoda uproszczona wyznaczania naprężenia prekonsolidacyjnego

A simple method is that is also used in practice is to project the straight portion of the initial recompression curve to intersect the backward projection of the normal consolidation line at  $F$  as shown in the figure below. The abscissa of  $F$  is  $\sigma_{zc}'$ .

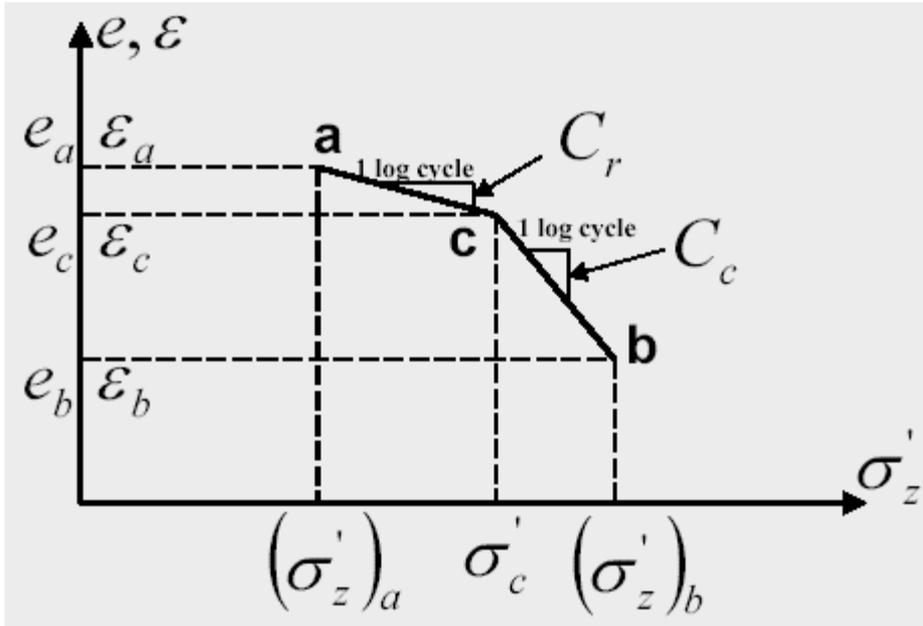
Both of these methods are based on **individual judgment**. The actual value of  $\sigma_{zc}'$  for real soils is more difficult to ascertain than described above. Degradation of the soil from its intact condition caused by sampling, transportation, handling, and sample preparation usually does not produce the ideal curve shown above.





AGH

## Ścisłość gruntów



$C_c$  – wskaźnik ścisłości gruntu

$C_r$  – wskaźnik ścisłości gruntu przy powtórnym obciążeniu

$$\frac{1}{C_{10}} = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad C_{10} = \frac{C}{2.3}$$

$$C_r = \frac{e_a - e_c}{(\log \sigma'_c) - (\log \sigma'_z)_a}$$

$$\frac{C_r}{1 + e_0} = \frac{(\varepsilon_z)_c - (\varepsilon_z)_a}{(\log \sigma'_c) - (\log \sigma'_z)_a}$$

$$C_c = \frac{e_c - e_b}{(\log \sigma'_z)_b - (\log \sigma'_c)}$$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} = \frac{(\varepsilon_z)_b - (\varepsilon_z)_c}{(\log \sigma'_z)_b - (\log \sigma'_c)}$$



AGH

## Ścisłość gruntów normalnie skonsolidowanych

Dla gruntów normalnie skonsolidowanych przyjmuje się:

$$\sigma'_{z0} \cong \sigma'_c$$

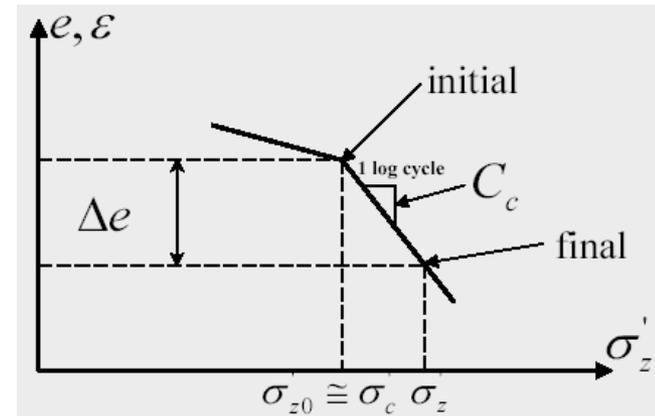
Oznacza to, że obciążenie początkowe jest równe naprężeniu prekonsolidacyjnemu.

Odształcenie pionowe elementu gruntu:

$$\varepsilon_z = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \right) \quad \varepsilon_z = -\frac{1}{C} \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \right)$$

Przemieszczenie pionowe (osiadanie) elementu gruntu:

$$S = \int \varepsilon_z dz = \int \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \right) dz$$



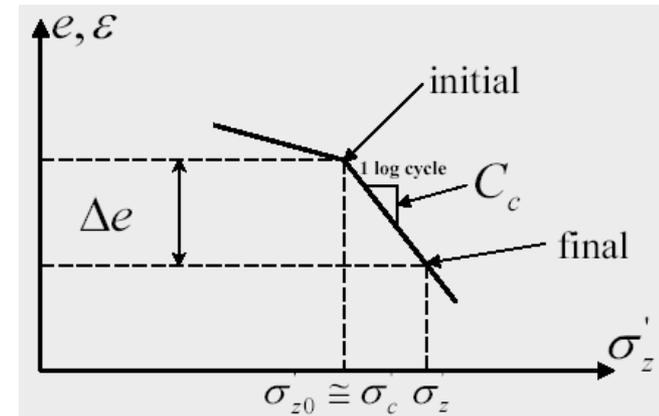


AGH

## Ścisłość gruntów normalnie skonsolidowanych

Praktycznie dla rozwiązywania wszystkich problemów geotechnicznych wystarczający jest podział gruntu na skończoną ilość warstw, obliczenie osiadań dla środka każdej warstwy i zsumowanie osiadań wg wzoru:

$$s = \sum \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \right)$$





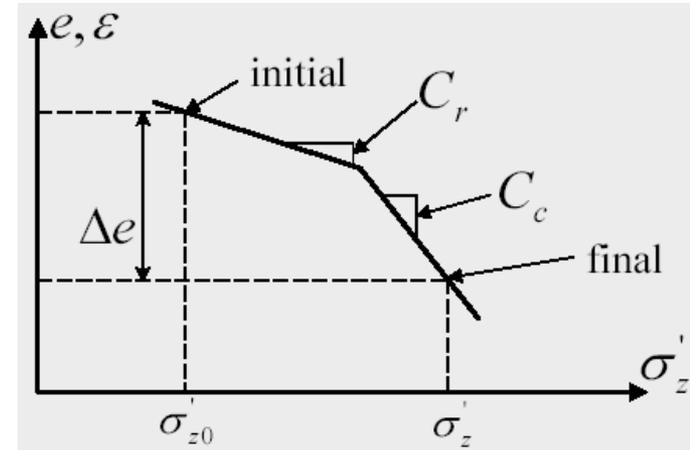
AGH

## Ścisłość gruntów preskonsolidowanych

Dla gruntów normalnie preskonsolidowanych należy uwzględnić, że proces konsolidacji obejmuje zarówno krzywą osiadania wtórnego jak i pierwotnego.

Praktycznie dla rozwiązywania wszystkich problemów geotechnicznych wystarczający jest podział gruntu na skończoną ilość warstw, obliczenie osiadań dla środka każdej warstwy i zsumowanie osiadań wg wzoru:

$$S = \sum \left[ \frac{C_r}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z0}} \right) + \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_c} \right) \right]$$



# Ultimate Consolidation Settlement Analysis Procedure

1. Divide the compressible soil profile into strata and identify unit weight for each stratum
2. Determine if each stratum is normally consolidated (NC) or overconsolidated (OC)
3. For each soil stratum assign value for  $C_c(1 + e_0)$  or  $C_r(1 + e_0)$
4. Working downward from the original ground surface divide soil profile into horizontal thin layers (no more than 2÷5 m thick; thinner layers are especially appropriate near the ground surface)
5. Calculate at midpoint of each layer !!!

Overconsolidation margin:

$$\sigma_m' = \sigma_c' - \sigma_{z0}'$$





AGH

## Przykład liczbowy 1

Na gruncie o profilu pokazanym na rysunku planuje się budowę nasypu. Badania laboratoryjne na próbce iltu pobranej w punkcie A dały następujące wyniki:

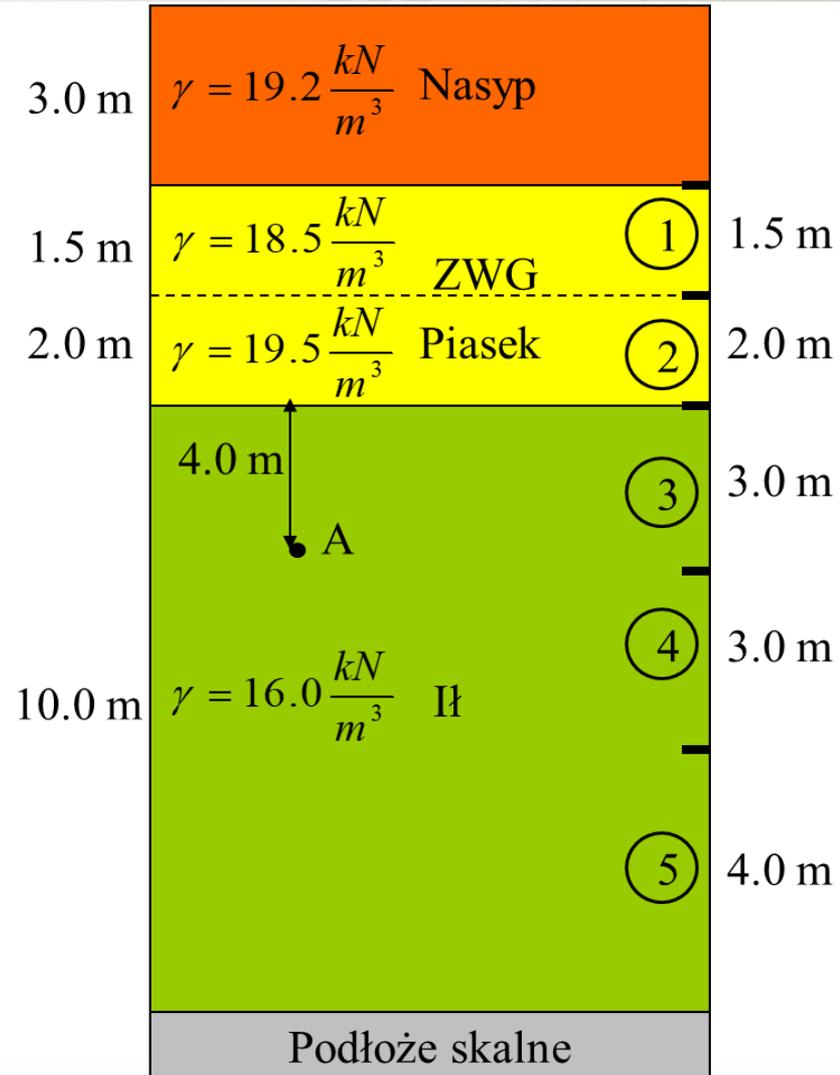
$$C_c = 0.4 \quad e_0 = 1.1$$

$$C_r = 0.08 \quad \sigma_c' = 70 \text{ kPa}$$

Dla piasku należy przyjąć:

$$\frac{C_c}{1+e_0} = 0.008$$

Określić całkowite osiadania gruntu spowodowane budową nasypu.





AGH

## Przykład liczbowy 1

**Naprężenia efektywne w gruncie będą sumą pionowych naprężeń efektywnych i obciążenia od nasypu:**

$$\sigma_z' = \sigma_{z0}' + 3.0 \cdot 19.2 = \sigma_{z0}' + 57.6 \text{ kPa}$$

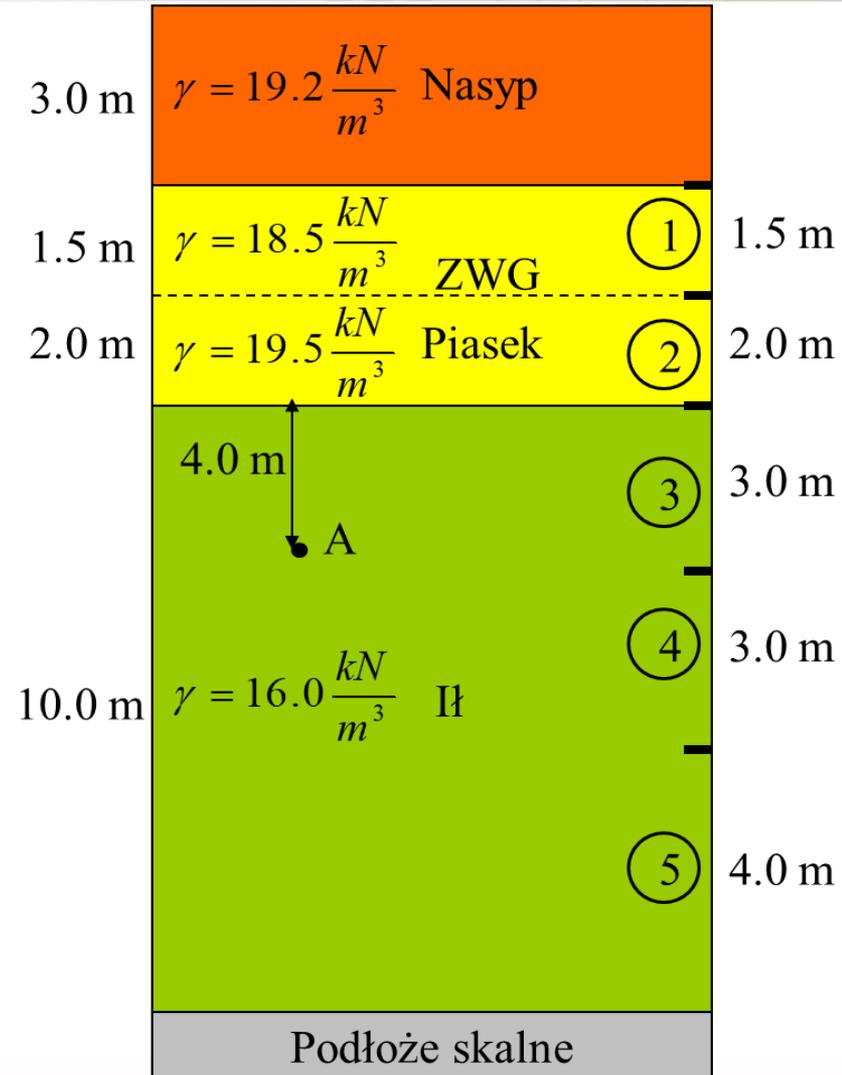
**Naprężenia efektywne w punkcie A:**

$$\sigma_{z0}' = \sum_{i=1}^n (\gamma_i h_i - u) = 18.5 \cdot 1.5 + 19.5 \cdot 2 + 16 \cdot 4 - 9.8 \cdot 6 = 72 \text{ kPa}$$

$$\frac{c_c}{1+e_0} = \frac{0.4}{1+1.1} = 0.19$$

**W punkcie A zachodzi:  $\sigma_c' \cong \sigma_{z0}'$**

**czyli łą jest normalnie skonsolidowany**





## AGH Przykład liczbowy 1

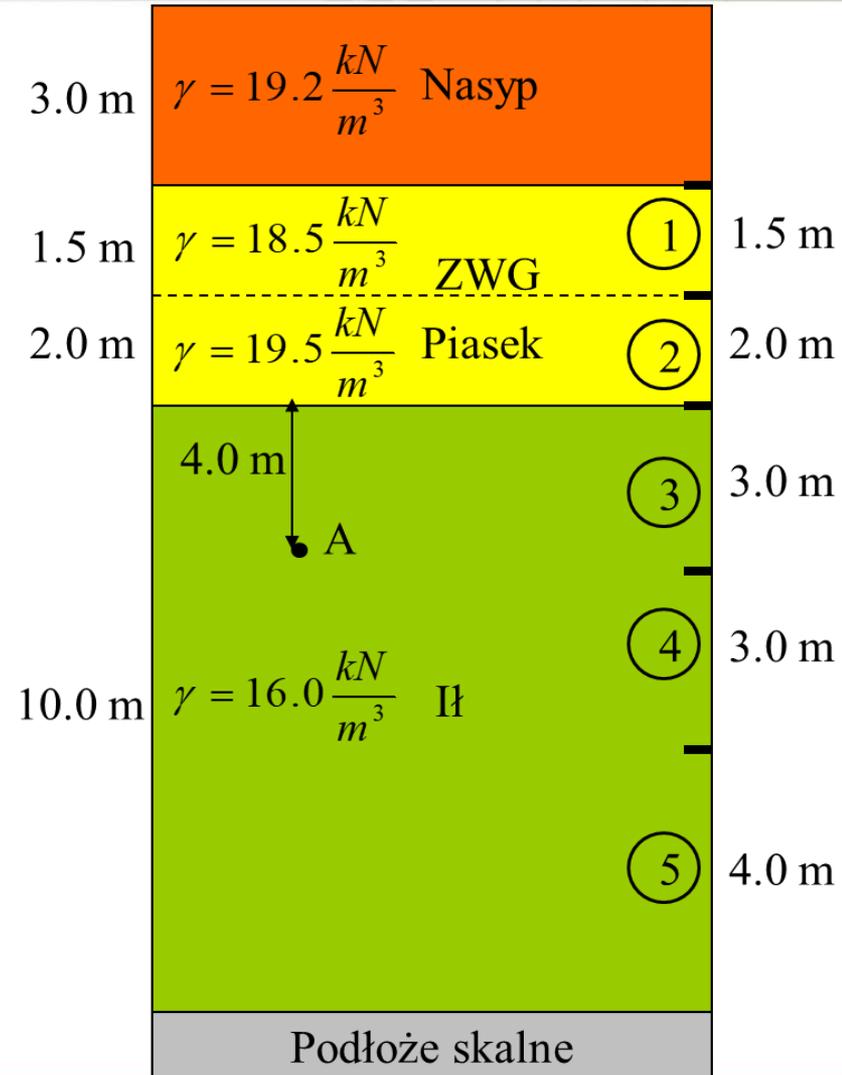
Zakładamy, że próbka pobrana w punkcie A jest reprezentatywna dla całej warstwy iltu i przyjmujemy, że jest on normalnie skonsolidowany.

Zakładamy także, że pod zwierciadłem wody grunty są w pełni nasycone.

Wzór ogólny na określanie osiadania przy przyjęciu powyższych założeń przyjmuje postać:

$$s = \sum \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \right)$$

Obliczenia zamieszczono na następnym slajdzie w formie tabeli dla kolejnych warstw oznaczonych numerami w kółkach.





AGH

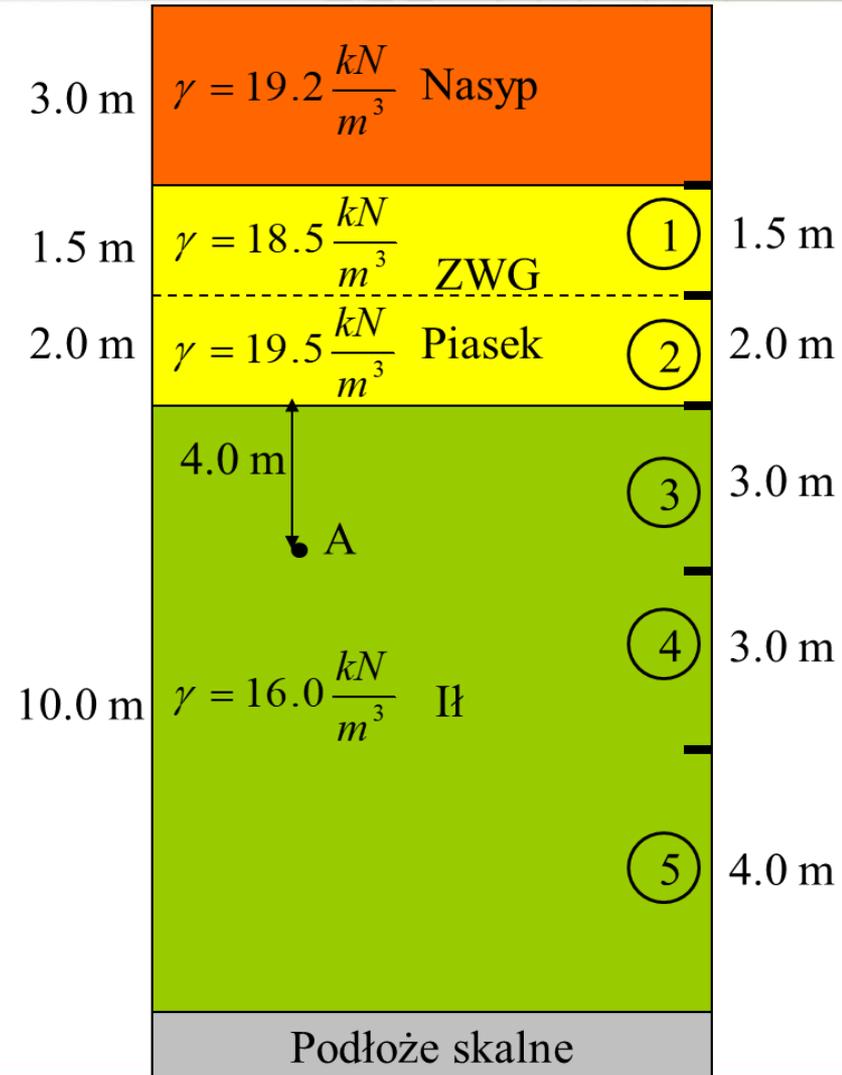
## Przykład liczbowy 1

W-wa	H, m	$\sigma'_{z0}$	$\sigma'_z$	$\frac{C_c}{1+e_0}$	S, mm
1	1.5	13.875	71.5	0.008	8.5
2	2.0	37.25	95	0.008	6.5
3	3.0	56.4	114	0.19	174.1
4	3.0	75	132.6	0.19	141
5	4.0	96.7	154.3	0.19	154.2

**Osiadanie całkowite jest sumą osiadań dla poszczególnych warstw:**

$$S = 484.27 \text{ mm}$$

**UWAGA: naprężenia  $\sigma'_{z0}$  i  $\sigma'_z$  liczymy w ŚRODKU poszczególnych warstw**





AGH

## Przykład liczbowy 2

Na gruncie o profilu pokazanym na rysunku planuje się budowę nasypu. Badania laboratoryjne na próbce iltu pobranej w punkcie A dały następujące wyniki:

$$C_c = 0.25 \quad e_0 = 0.66$$

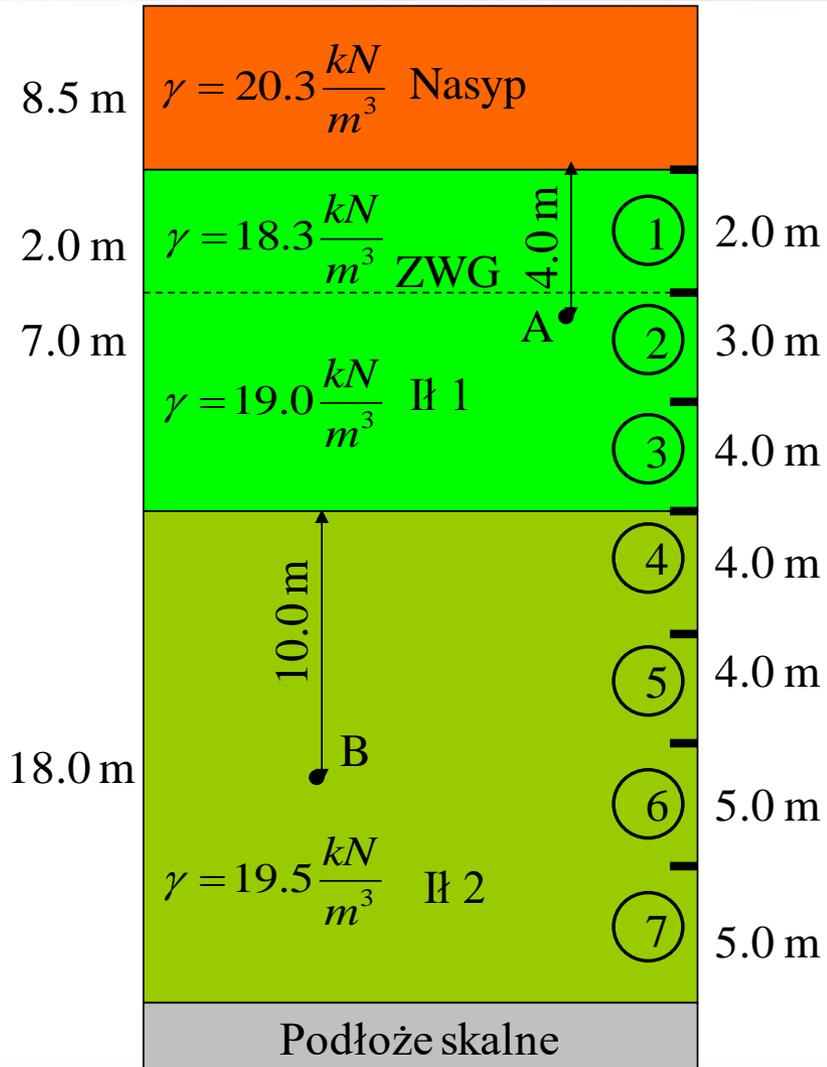
$$C_r = 0.08 \quad \sigma'_c = 101 \text{ kPa}$$

Zaś w próbce B:

$$C_c = 0.2 \quad e_0 = 0.45$$

$$C_r = 0.06 \quad \sigma'_c = 510 \text{ kPa}$$

Określić całkowite osiadania gruntu spowodowane budową nasypu.





AGH

## Przykład liczbowy 2

**Naprężenia efektywne w gruncie:**

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} + 8.5 \cdot 20.3 = \sigma'_{z0} + 172.6 \text{ kPa}$$

**Naprężenia efektywne w punkcie A:**

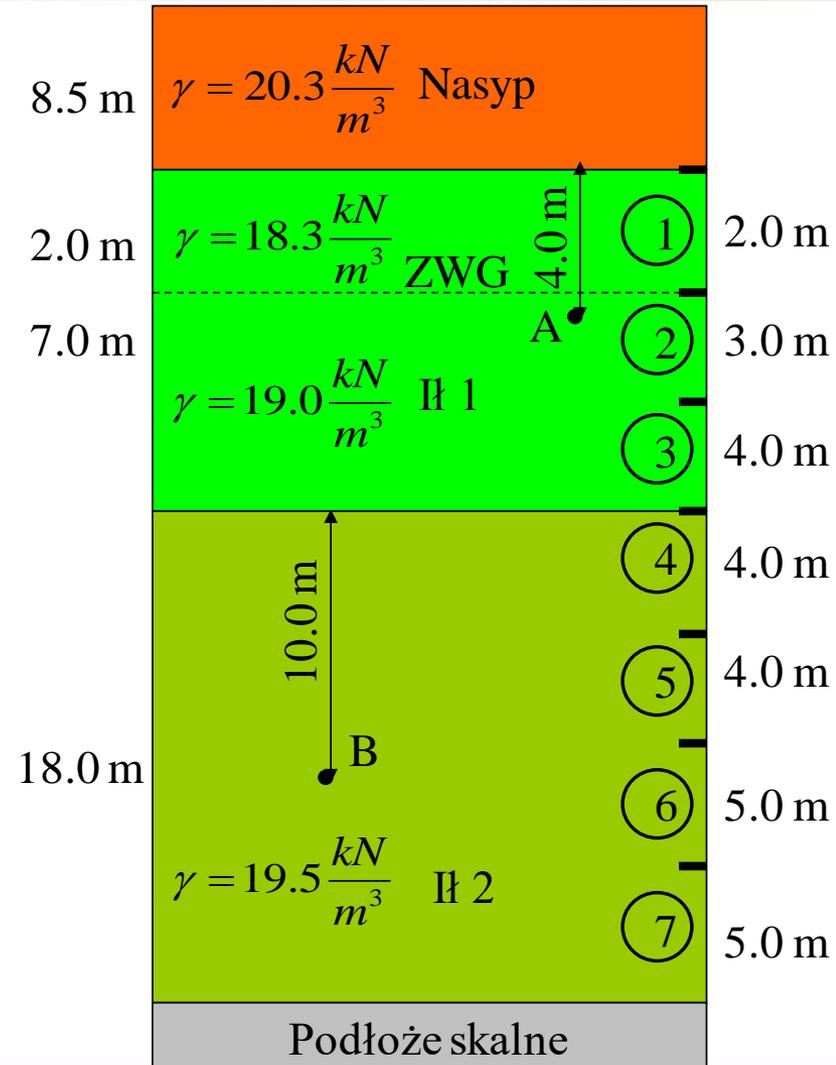
$$\sigma'_{z0} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i - u = 18.3 \cdot 2.0 + \\ + 19.0 \cdot 2.0 - 9.8 \cdot 2.0 = 55.0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} + 172.6 \text{ kPa} = 55 \text{ kPa} + \\ + 172.6 \text{ kPa} = 227.6 \text{ kPa}$$

**W punkcie A zachodzi więc:**

$$\sigma'_{z0} < \sigma'_c < \sigma'_z$$

**Czyli łą 1 jest prekonsolidowany**



## Przykład liczbowy 2

Zakładamy, że próbka pobrana w punkcie A jest reprezentatywna dla całej warstwy iltu 1 i przyjmujemy, że jest on prekonsolidowany.

Zakładamy także, że pod zwierciadłem wody grunty są w pełni nasycone.

Wzór ogólny na określanie osiadania przy przyjęciu powyższych założeń przyjmuje postać:

$$S = \sum \left[ \frac{C_r}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma'_{z0}} \right) + \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_z}{\sigma'_c} \right) \right]$$

**Naprężenia efektywne w punkcie B:**

$$\sigma'_{z0} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i - u = 18.3 \cdot 2 + 19.0 \cdot 7 + 19.5 \cdot 10 - 9.8 \cdot 17 = 198 \text{ kPa}$$



AGH

## Przykład liczbowy 2

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} + 172.6 \text{ kPa} = 198 \text{ kPa} + 172.6 \text{ kPa} = 370.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{z0} < \sigma'_c \quad \sigma'_z < \sigma'_c$$

**Czyli ił 2 jest prekonsolidowany**

**Wzór ogólny na określanie osiadania przy przyjęciu powyższych założeń ma postać:**

$$S = \sum \frac{C_r}{1 + e_0} H \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma'_{z0}} \right)$$



AGH

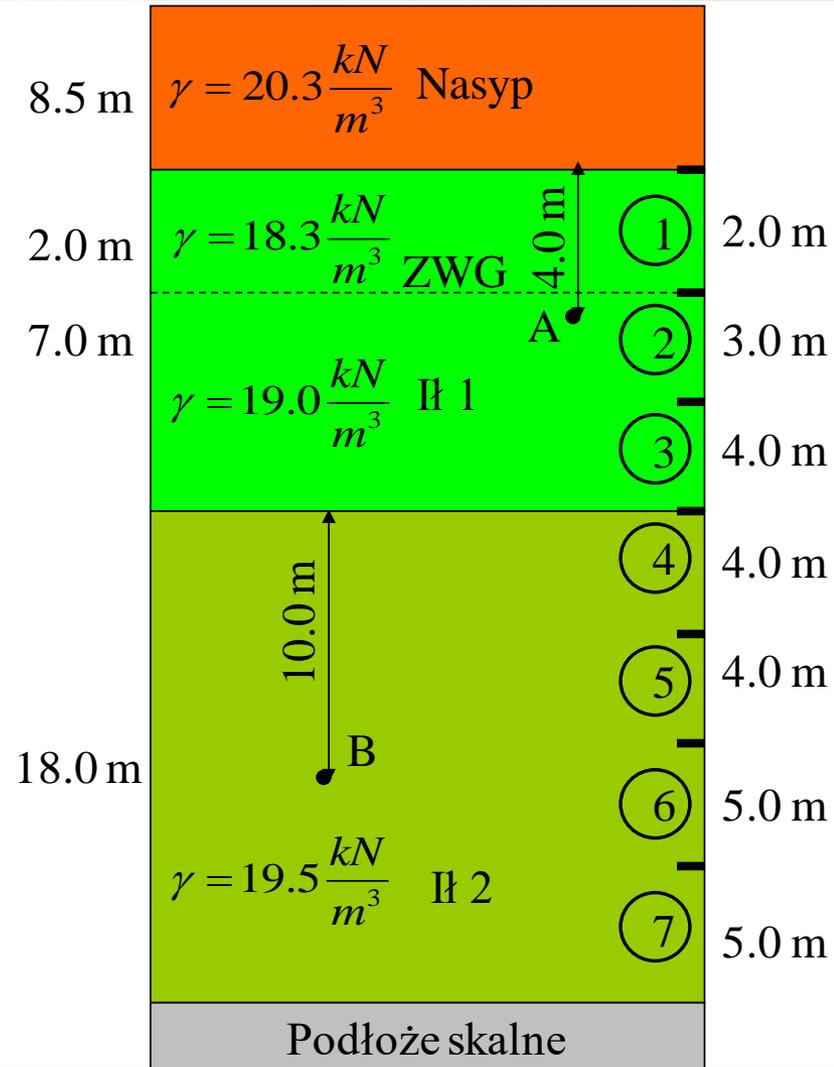
## Przykład liczbowy 2

Obliczenia zamieszczono w formie tabeli dla kolejnych warstw oznaczonych numerami w kółkach.

W-wa	H, m	$\sigma'_{z0}$	$\sigma'_c$	$\sigma'_z$	$\frac{C_r}{1+e_0}$	$\frac{C_c}{1+e_0}$	S, mm
1	2.0	18.3	64.3	190.9	0.05	0.15	196.3
2	3.0	50.4	96.9	223.0	0.05	0.15	206.1
3	4.0	82.6	128.6	255.2	0.05	0.15	217.0
4	4.0	120.4	-	293.0	0.04	0.14	61.8
5	4.0	159.2	-	331.8	0.04	0.14	51.0
6	5.0	202.8	-	375.4	0.04	0.14	53.5
7	5.0	251.4	-	424.0	0.04	0.14	45.4

Osiadanie całkowite jest sumą osiadań dla poszczególnych warstw:

$$S = 831.08 \text{ mm}$$



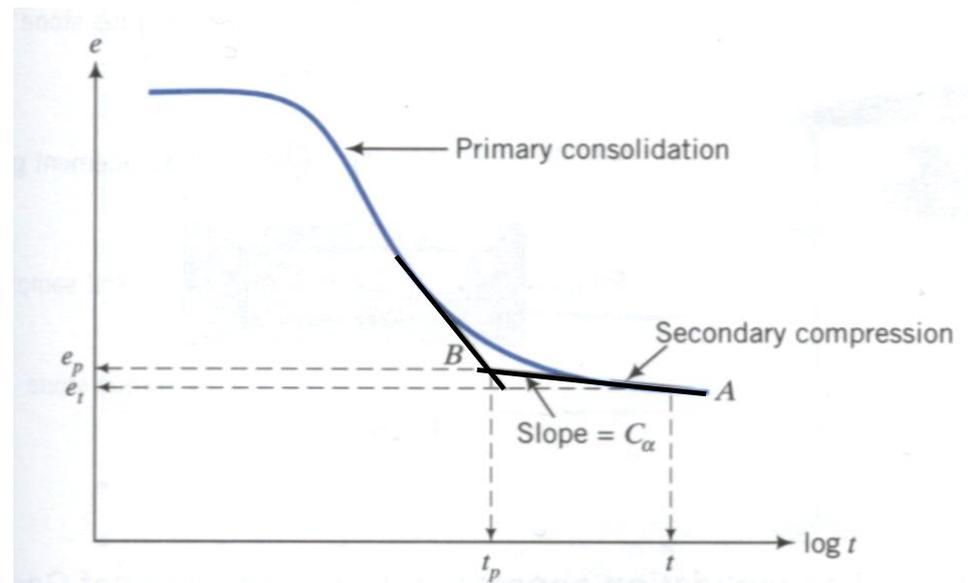
## Ścisłość gruntów

**Ścisłością wtórną** nazywane jest zjawisko odkształcenia próbki przebiegające po rozproszeniu się (spowodowane obciążeniem) ciśnienia wody w porach. Odkształcenie to zachodzi bardzo powoli, przy stałym naprężeniu efektywnym.

**Współczynnik ścisłości wtórnej  $C_\alpha$**  jest parametrem opisującym to zjawisko i jest zdefiniowany wzorem:

$$C_\alpha = - \frac{d\varepsilon_z}{d \log t} = \frac{e_t - e_p}{\log \frac{t}{t_p}}$$

$$\frac{C_\alpha}{1 + e_p} = \frac{d\varepsilon_z}{d \log t}$$



## Ścisłość gruntów

Osiadania wywołane ścisłością wtórną:

$$S = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} H \log \left( \frac{t}{t_p} \right)$$

Usually the secondary compression settlement is much smaller than consolidation settlement, and thus is not a major consideration. However, in some situations, it can be very important. For example, the consolidation settlement in sanitary landfills is typically complete within the few years, while the secondary compression settlement continues for many decades. Secondary compression settlement on the order of 1 % of the refuse thickness per year have been measured in a 10-year-old landfill.

Significant structures are rarely built on soils that have the potential for significant secondary compression. However highways and other transportation facilities are sometimes built on such a soils (Coduto, 1999).

## Przykład liczbowy 3

Założmy, że pewna warstwa łu o miąższości 10 m charakteryzuje się wartością:

$$\frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} = 0.018$$

Zakładając, że osiadania gruntu na skutek konsolidacji po 40 latach od obciążenia będą stanowiły 95 % całkowitych, policzmy osiadania wywołane ścisłością wtórną, które wystąpią podczas następnych 30 lat:

$$S = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} H \log \left( \frac{t}{t_p} \right) = (0.018 \cdot 10000 \text{ mm}) \cdot \log \frac{40 \text{ lat} + 30 \text{ lat}}{40 \text{ lat}} = 40 \text{ mm}$$

- **Szymański A. – Wykłady z mechaniki gruntów i budownictwa ziemnego**
- **Wiłun Z. – Zarys geotechniki**
- **Lambe T. W. Whitman R.V (1976, 1977) Mechanika gruntów, Tom I i II, Arkady, Warszawa**
- **Verruijt A. 2001. Soil Mechanics**
- **Coduto D.P. 1999. Geotechnical Engineering.**
- **Coduto D.P. 2001. Foundation design.**
- **Jarominiak A. 1999. Lekkie konstrukcje oporowe.**
- **Myślińska E. 2001. Laboratoryjne badania gruntów.**
- **Obrycki M., Pisarczyk S. 1999. Zbiór zadań z mechaniki gruntów.**