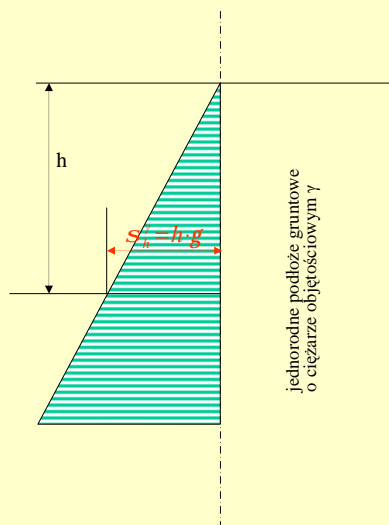


# Naprężenia w ośrodku gruntowym

- Naprężenia geostatyczne (pierwotne)
- Wpływ wody gruntowej na naprężenia pierwotne
- Naprężenia wywołane siłą skupioną
- Naprężenia pochodzące od obciążenia równomiernie rozłożonego
- Naprężenia pod fundamentem bezpośrednim
- Osiadania fundamentu bezpośredniego

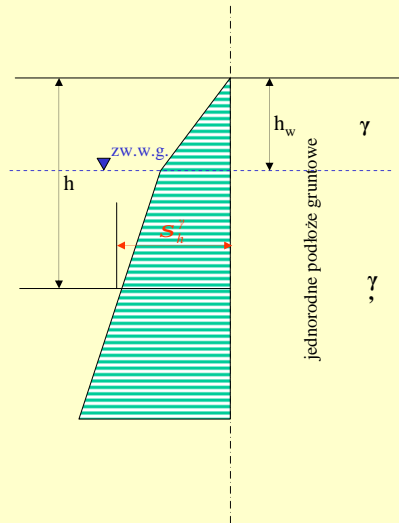
## Naprężenia wywołane ciężarem własnym gruntu (n. geostatyczne)



wzór ogólny w przypadku podłoża uwarstwionego:

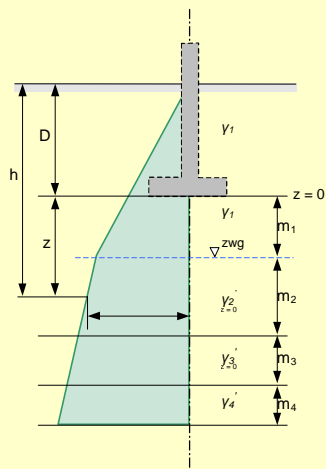
$$S_n^g = \sum_{i=1}^n m_i \cdot g_i$$

## Wpływ wody gruntowej na naprężenia pierwotne



$$s_h^g = h_w \cdot g + (h - h_w) \cdot g'$$

## Naprężenia wywołane ciężarem własnym gruntu (n. geostatyczne)



Podziałka głębokości:  $\frac{1}{1\text{ m}}$

Podziałka naprężeń:  $\frac{1}{20\text{ kPa}}$

$$s_D^z = D \cdot \gamma_1$$

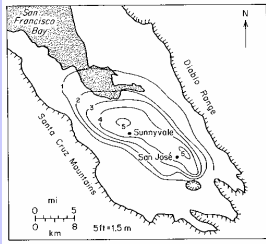
$$s_h^z = D \cdot \gamma_1 + m_1 \cdot g_1 + (z - m_1) \cdot \gamma_2'$$

## Osiadanie terenu wywołane obniżeniem poziomu wód podziemnych



Związek pomiędzy osiadciami terenu a poziomem wody gruntowej na terenie Santa Clara Valley, Kalifornia.

Źródło: Environmental Geology, Bennett M. R., Doyle P. John Wiley & Sons, 1997



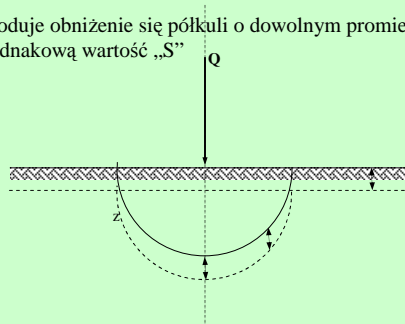
Osiadanie terenu w latach 1934–1960 na terenie Santa Clara Valley, Kalifornia.

Źródło: Groundwater, Freeze A. R., Cherry A. J. Prentice Hall, 1979

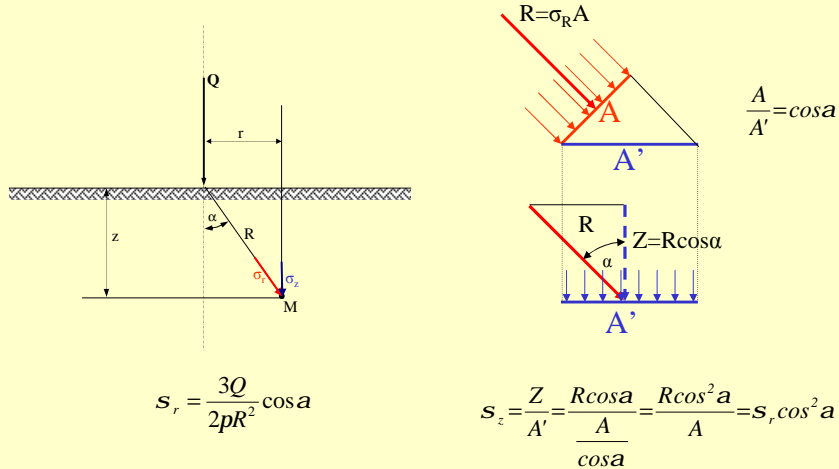
## Naprężenia pionowe w półprzestrzeni gruntowej obciążonej siłą skupioną - rozwiązanie Boussinesq'a (1885)

Założenia:

1. Ośrodek gruntowy jest jednorodny i izotropowy (tzn. działanie jednakowych naprężeń w dowolnym kierunku powoduje jednakowe odkształcenia)
2. Grunt jest materiałem sprężystym, tzn. podlega prawu Hooke'a
3. Naprężenia rozchodzą się promieniście od punktu przyłożenia siły
4. Nie uwzględnia się ciężaru własnego gruntu
5. Obowiązuje zasada superpozycji
6. Pionowo działająca siła powoduje obniżenie się półkuli o dowolnym promieniu ze środkiem w punkcie zaczepienia siły o jednakową wartość „ $S^*$ ”

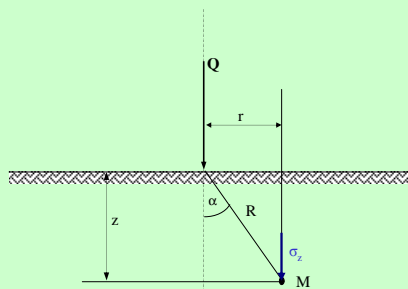


Naprężenia radialne w półprzestrzeni gruntowej obciążonej siłą skupioną - rozwiązanie Boussinesq'a (1885)



Naprężenia pionowe w półprzestrzeni gruntowej obciążonej siłą skupioną - rozwiązanie Boussinesq'a (1885)

Schemat obciążenia podłoża



Podstawowe zależności:

$$\cos a = \frac{z}{R}$$

$$R = \sqrt{z^2 + r^2}$$

Wzory

$$s_z = \frac{3Q}{2pR^2} \cos^3 a$$

$$s_z = \frac{3Q}{2pz^2} \cos^5 a$$

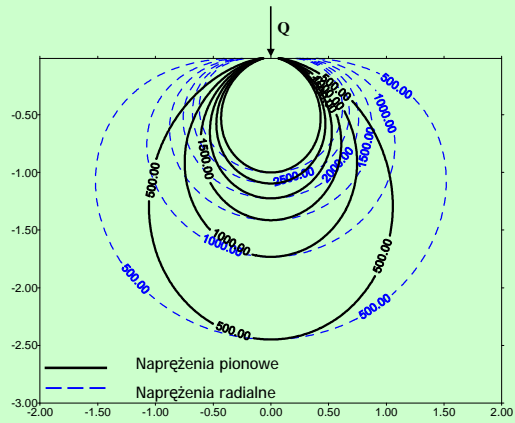
$$s_z = \frac{3Qz^3}{2pR^5}$$

$$s_z = \frac{3Qz^3}{2p(z^2 + r^2)^{5/2}}$$

$$s_z = \frac{3Q}{2pz^2 \left[ 1 + \left( \frac{r}{z} \right)^2 \right]^{5/2}}$$

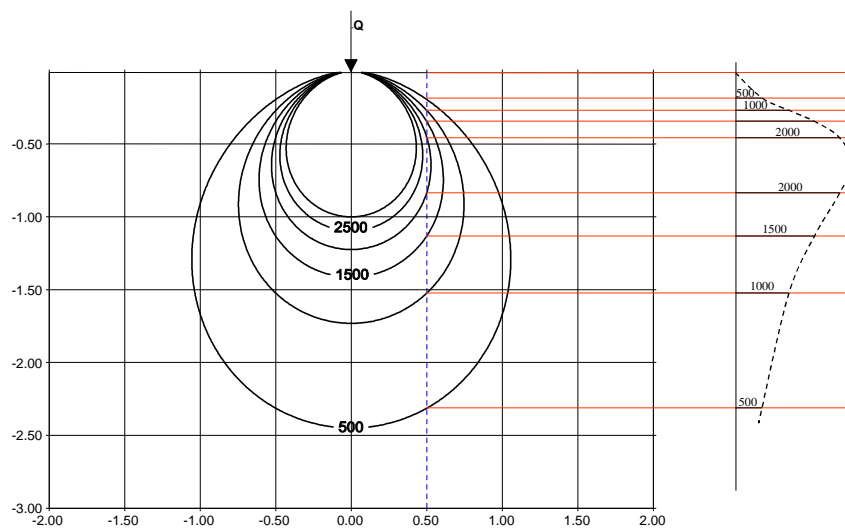
## Graficzna ilustracja naprężeń

Izobary naprężeń radialnych i naprężeń pionowych



## Graficzna ilustracja naprężeń

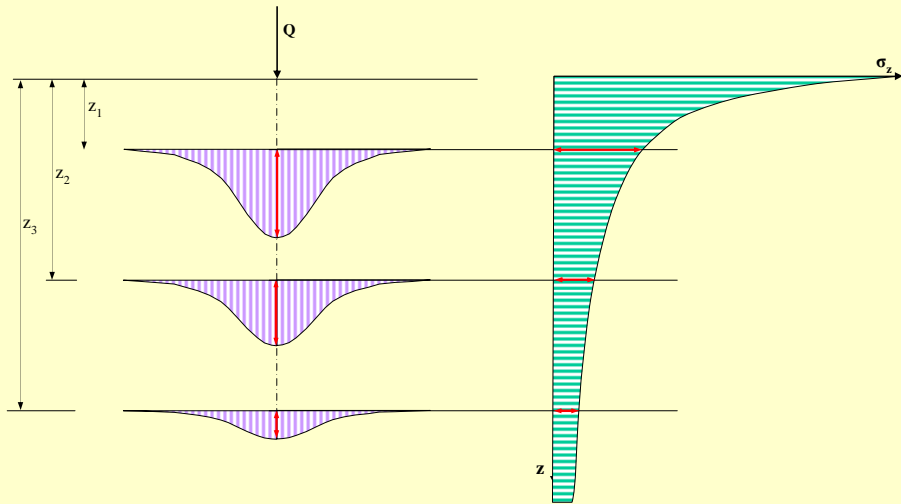
Izobary naprężeń pionowych – konstrukcja graficzna



## Graficzna ilustracja naprężeń

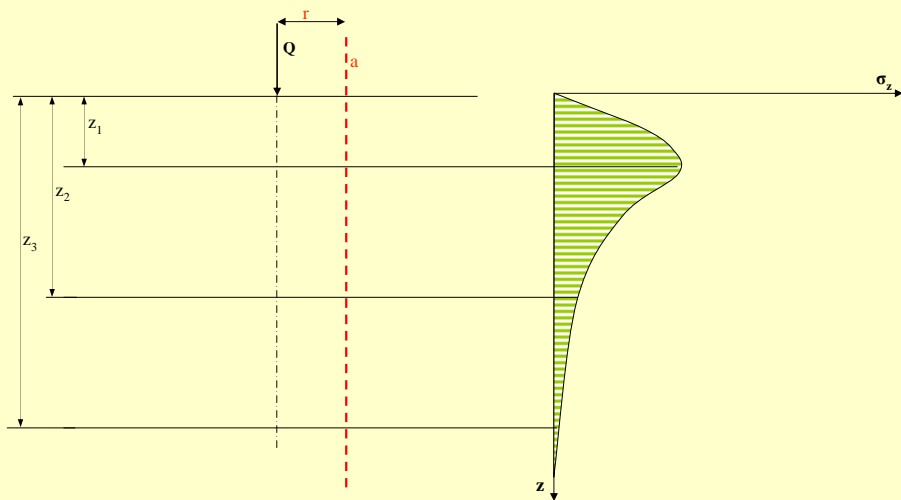
Rozkład naprężeń na różnych głębokościach

Krzywa zanikania naprężeń



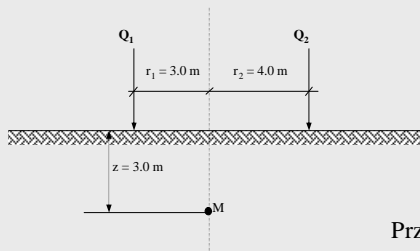
## Graficzna ilustracja naprężeń

Rozkład naprężeń wzdłuż prostej  $a$ , równoległej do kierunku działania siły  $Q$



## Zasada superpozycji (Bolzmanna) - sumowania naprężeń

Jeżeli siła  $Q_1$ , powoduje w określonym miejscu ośrodka gruntowego naprężenie  $\sigma_1$ , zaś siła  $Q_2$  wywołuje w tym samym miejscu naprężenie  $\sigma_2$ , to całkowite naprężenie w tym punkcie ośrodka jest sumą naprężeń wywołanych przez każdą z sił z osobna.



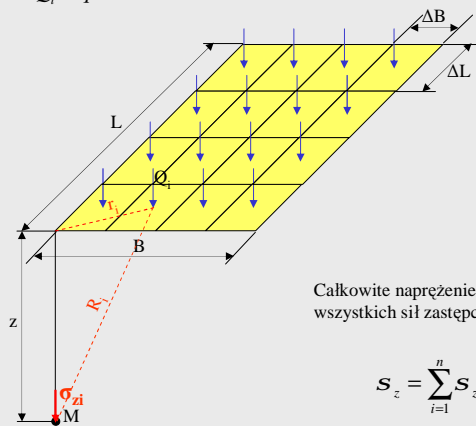
Przykład obliczenia naprężenia:

$$s_z^M = s_{z(Q_1)} + s_{z(Q_2)} = \frac{3Q}{2pz^2} (\cos^3 a_1 + \cos^3 a_2) = \frac{3Q}{2pz^2} \left( \left( \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} \right)^3 + \left( \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_2^2}} \right)^3 \right)$$

$$s_z^M = \frac{3Q}{2p \cdot 3^2} \left( \left( \frac{3}{\sqrt{18}} \right)^3 + \left( \frac{3}{5} \right)^3 \right) = \frac{Q}{6p} (0.177 + 0.078) = 0.0135Q \text{ [kPa]}$$

## Zamiana obciążenia równomiernie rozłożonego na zastępcze siły skupione

$$Q_i = q \cdot DB \cdot DL$$



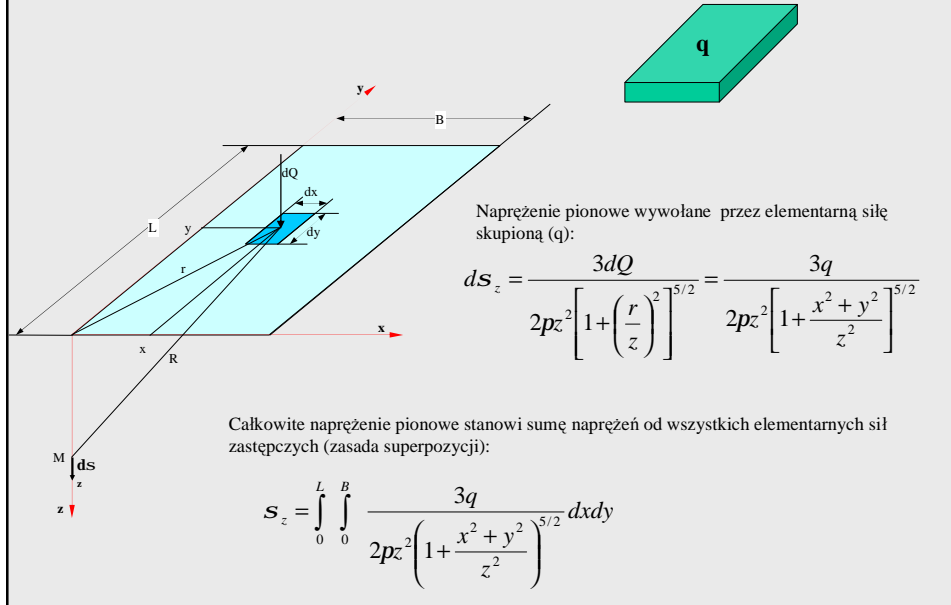
Naprężenie pionowe wywołane pojedynczą siłą zastępczą wynosi:

$$s_{zi} = \frac{3Q_i}{2pz^2 \left[ 1 + \left( \frac{r_i}{z} \right)^2 \right]^{5/2}}$$

Całkowite naprężenie pionowe stanowi sumę naprężeń od wszystkich sił zastępczych (zasada superpozycji)

$$s_z = \sum_{i=1}^n s_{zi} = \frac{3Q_i}{2pz^2} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ 1 + \left( \frac{r_i}{z} \right)^2 \right]^{5/2}$$

## Wyznaczenie naprężenia pionowego $S_z$ od obciążenia ciągłego $q$ za pomocą elementarnych sił skupionych



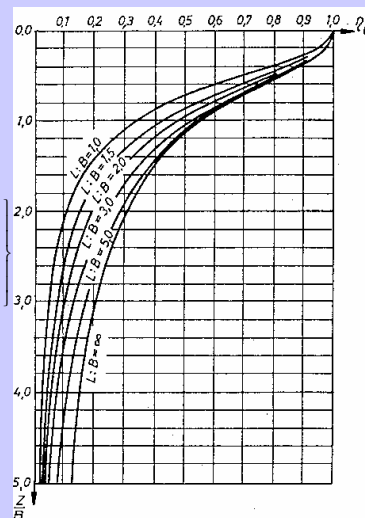
## Metoda punktów środkowych (Newmark i Polszin, 1935)

W przypadku gdy rozpatrywany punkt  $M$  znajduje się pod geometrycznym środkiem obciążającej powierzchni prostokątnej naprężenie pionowe w tym punkcie oblicza się ze wzoru:

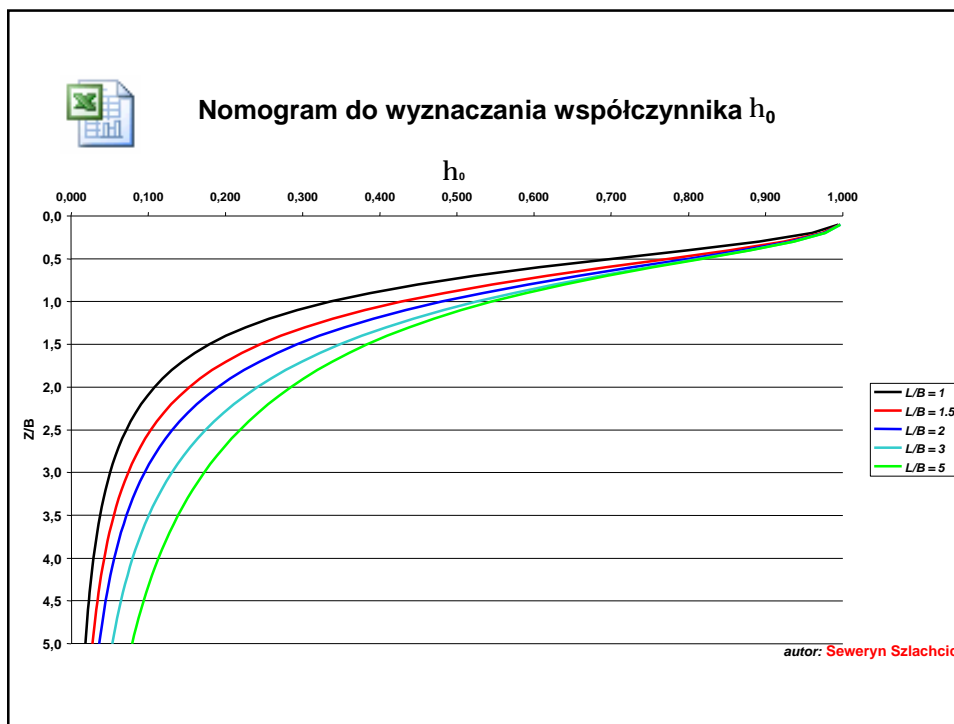
$$S_z = q \cdot h_0$$

gdzie:

$$h_0 = \frac{2}{p} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\frac{L}{B}}{2 \frac{z}{B} \sqrt{1 + \left( \frac{L}{B} \right)^2 + 4 \left( \frac{z}{B} \right)^2}} + \frac{2 \frac{L}{B} \cdot \frac{z}{B}}{\sqrt{1 + \left( \frac{L}{B} \right)^2 + 4 \left( \frac{z}{B} \right)^2}} \left[ \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{z}{B} \right)^2} + \frac{1}{\left( \frac{L}{B} \right)^2 + 4 \left( \frac{z}{B} \right)^2} \right] \right]$$







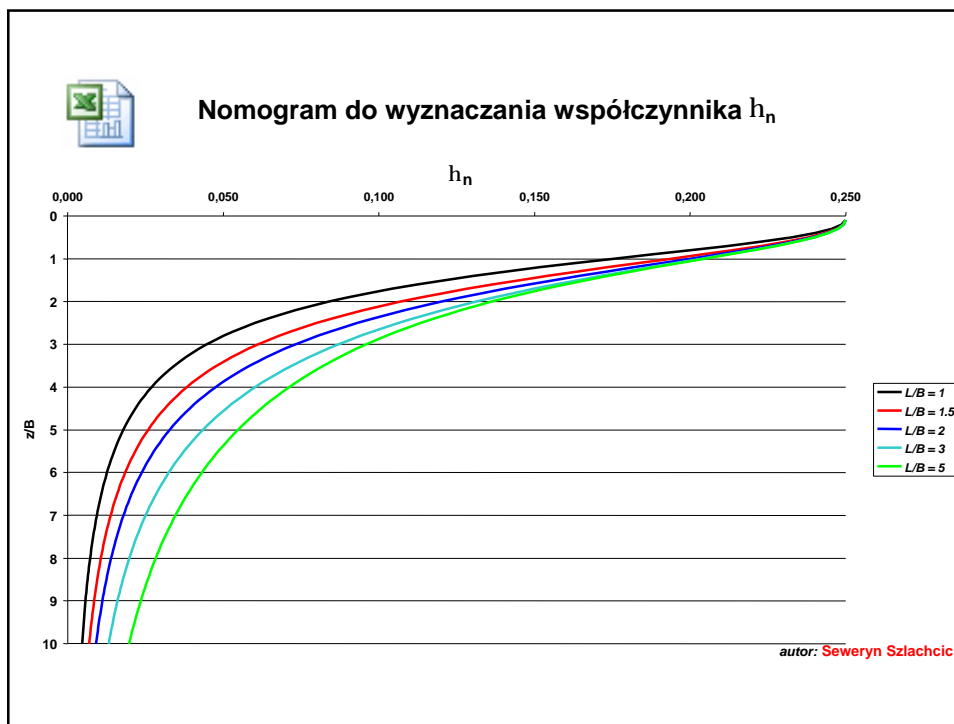
### Metoda punktów narożnych (Steinbrenner, 1936)

W przypadku gdy rozpatrywany punkt **M** znajduje się pod narożnikiem obciążającej powierzchni prostokątnej naprężenie pionowe w tym punkcie oblicza się ze wzoru:

$$s_z = q \cdot h_n$$

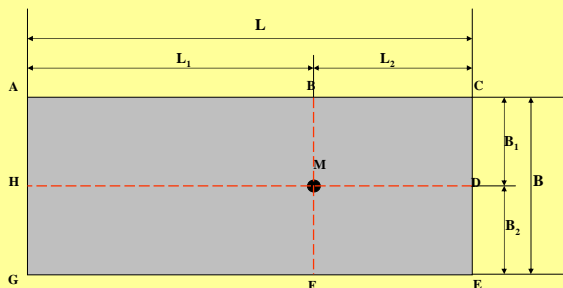
gdzie:

$$h_n = \frac{1}{2p} \left[ \arctg \frac{\frac{L}{B}}{\frac{z}{B} \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} + \left(\frac{z}{B}\right)^2} + \frac{\frac{L}{B} \cdot \frac{z}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2} + \left(\frac{z}{B}\right)^2} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} \right] \right]$$



### Zastosowanie metody punktów narożnych do obliczania naprężeń pionowych w dowolnym miejscu półprzestrzeni gruntowej (1).

W przypadku, gdy rozpatrywany punkt **M** leży pod obrysem powierzchni prostokątnej należy podzielić tak powierzchnię prostokątną, aby punkt ten stanowił naroże nowo utworzonych prostokątów i posłużyć się następującym schematem:



$$h_{nMHAB} = f\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{z}{B_1}\right)$$

$$h_{nMBCD} = f\left(\frac{L_2}{B_1}, \frac{z}{B_1}\right)$$

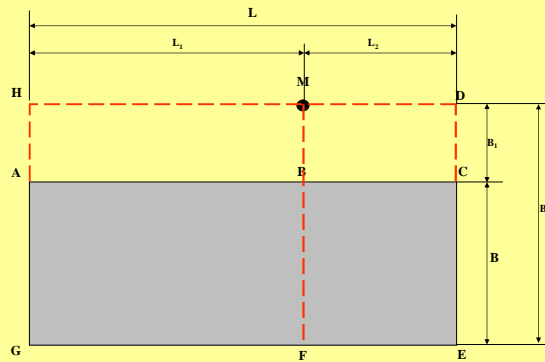
$$h_{nMDEF} = f\left(\frac{L_2}{B_2}, \frac{z}{B_2}\right)$$

$$h_{nMFGH} = f\left(\frac{L_1}{B_2}, \frac{z}{B_2}\right)$$

$$s_z = q \cdot (h_{nMHAB} + h_{nMBCD} + h_{nMDEF} + h_{nMFGH})$$

## Zastosowanie metody punktów narożnych do obliczania naprężeń pionowych w dowolnym miejscu półprzestrzeni gruntowej (2).

W przypadku, gdy rozpatrywany punkt **M** leży poza obrysem powierzchni prostokątnej należy wprowadzić dodatkowe powierzchnie prostokątne w taki sposób, aby punkt ten stanowił naroże nowo powstałych prostokątów i posłużyć się następującym schematem:



$$h_{nMFGH} = f\left(\frac{L_1}{B_2}, \frac{z}{B_2}\right)$$

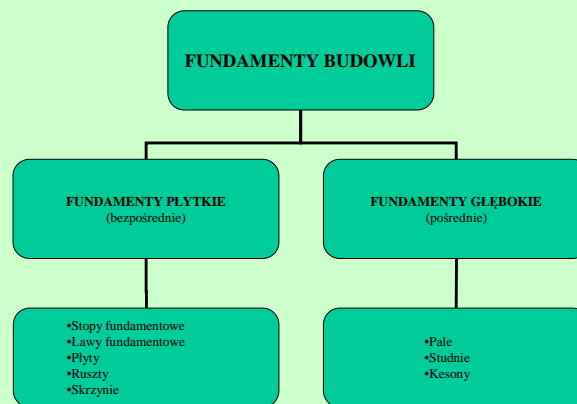
$$h_{nMDEF} = f\left(\frac{B_2}{L_2}, \frac{z}{B_2}\right)$$

$$h_{nMBAH} = f\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{z}{B_1}\right)$$

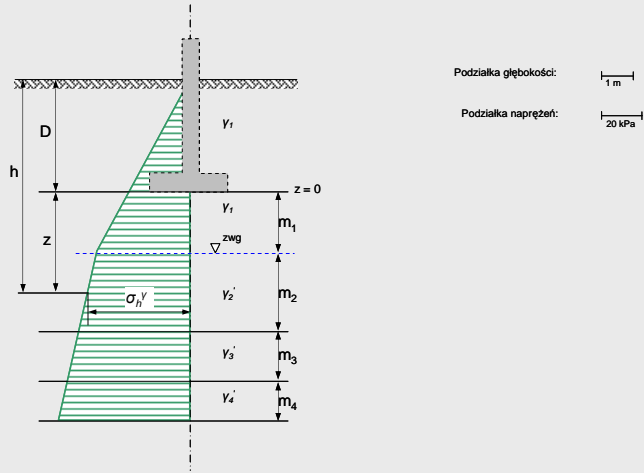
$$h_{nMDCB} = f\left(\frac{L_2}{B_1}, \frac{z}{B_1}\right)$$

$$s_z = q \cdot (h_{nMFGH} + h_{nMDEF} - h_{nMBAH} - h_{nMDCB})$$

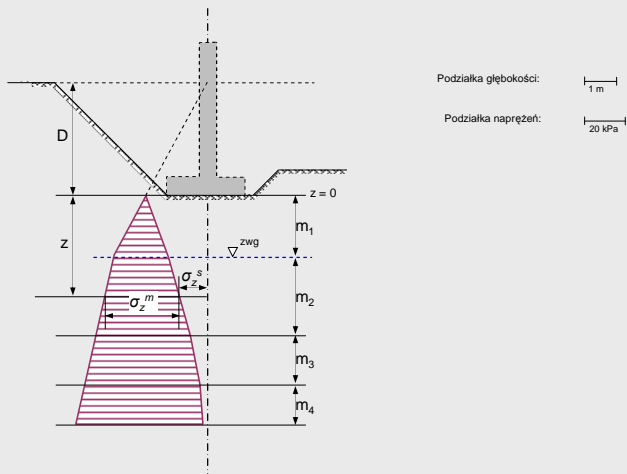
## Fundamenty budowli (podział)



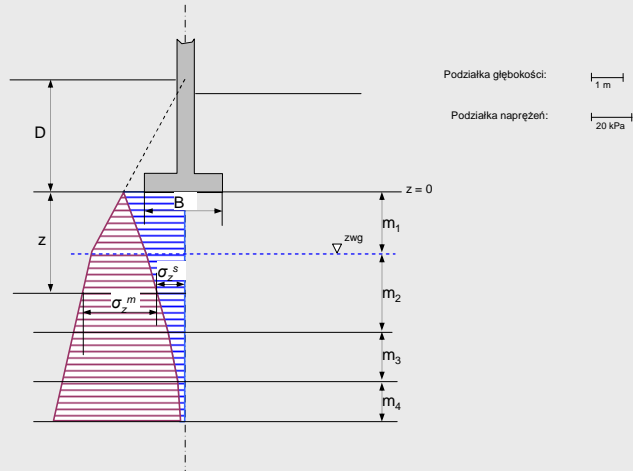
### I. Stan przed rozpoczęciem budowy



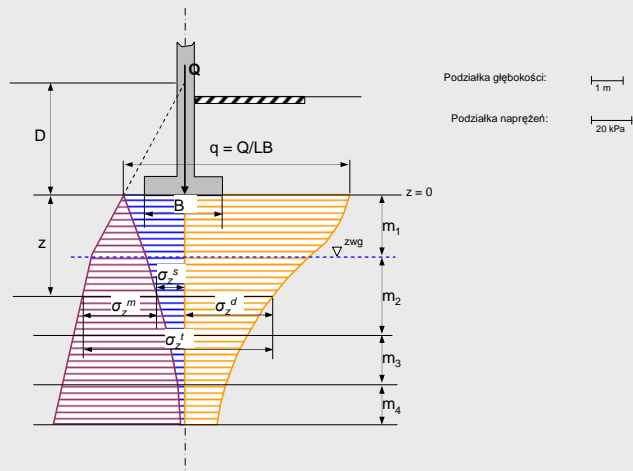
### II. Stan po wykonaniu wykopu fundamentowego



### III. Stan po zasypaniu wykopu fundamentowego



### IV. Stan po wykonaniu obiektu budowlanego



## Obliczanie osiadania fundamentów

Obliczanie osiadania zaleca się przeprowadzić metodą naprężeń. Osiadanie  $S_i$  warstwy należy wyznaczyć jako sumę osiadania wtórnego  $S_i''$  w zakresie naprężenia wtórnego  $S_{zi}^s$ , z zastosowaniem modułu ścisłości wtórnej gruntu  $M$  (lub modułu wtórnego odkształcenia  $E$ , w zależności od metody obliczania), oraz osiadania pierwotnego  $S_i'$  w zakresie naprężenia dodatkowego  $S_{zi}^d$ , z zastosowaniem modułu ścisłości pierwotnej gruntu  $M_o$  (lub  $E_o$ ).

Osiadanie  $S_i$  warstwy podłoża o miąższości  $m_i$  oblicza się wg wzorów:

$$S_i = S_i'' + S_i'$$

$$S_i'' = I \frac{S_{zi}^s \cdot m_i}{M_i}$$

$$S_i' = \frac{S_{zi}^d \cdot m_i}{M_{oi}}$$

$S_i''$  – osiadanie wtórne warstwy  $i$ , [cm],

$S_i'$  – osiadanie pierwotne warstwy  $i$ , [cm],

$S_{zi}^s, S_{zi}^d$  – odpowiednio wtórne i dodatkowe naprężenie w podłożu pod fundamentem, w połowie grubości warstwy, [kPa],

$M_p, M_{oi}$  – edometryczny moduł ścisłości, odpowiednio wtórnej i pierwotnej, ustalony dla gruntu warstwy  $i$ , kPa,

$m_i$  – grubość warstwy  $i$ , cm,

$\lambda$  – współczynnik uwzględniający stopień odprężenia podłoża po wykonaniu wykopu, którego wartość należy przyjmować:

$\lambda = 0$  – gdy czas wznoszenia budowli (od wykonania wykopów fundamentowych do zakończenia stanu surowego, z montażem urządzeń stanowiących obciążenie stałe) nie trwa dłużej niż 1 rok,

$\lambda = 1$  – gdy czas wznoszenia budowli jest dłuższy niż 1 rok.

Warstwy o grubości większej niż połowa szerokości  $B$  fundamentu należy dzielić dodatkowo na części o miąższości nie przekraczającej  $0.5B$ .

Całkowite osiadanie podłoża pod fundamentem bezpośrednim, a zatem osiadanie całej budowli oblicza się sumując osiadania wszystkich warstw cząstkowych według wzoru:

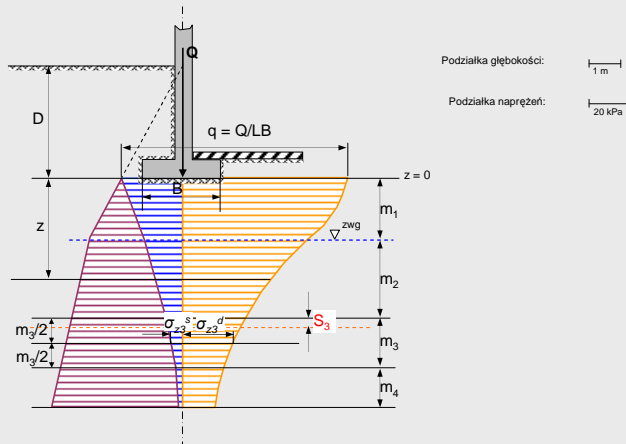
$$S = \sum_{i=1}^n S_i$$

gdzie:

$i$  – numer warstwy cząstkowej;

$n$  – ilość warstw,

$S_i$  – osiadanie warstwy  $i$ -tej.



## Wyznaczenie głębokości podłoża budowlanego ( $z_{max}$ )

