

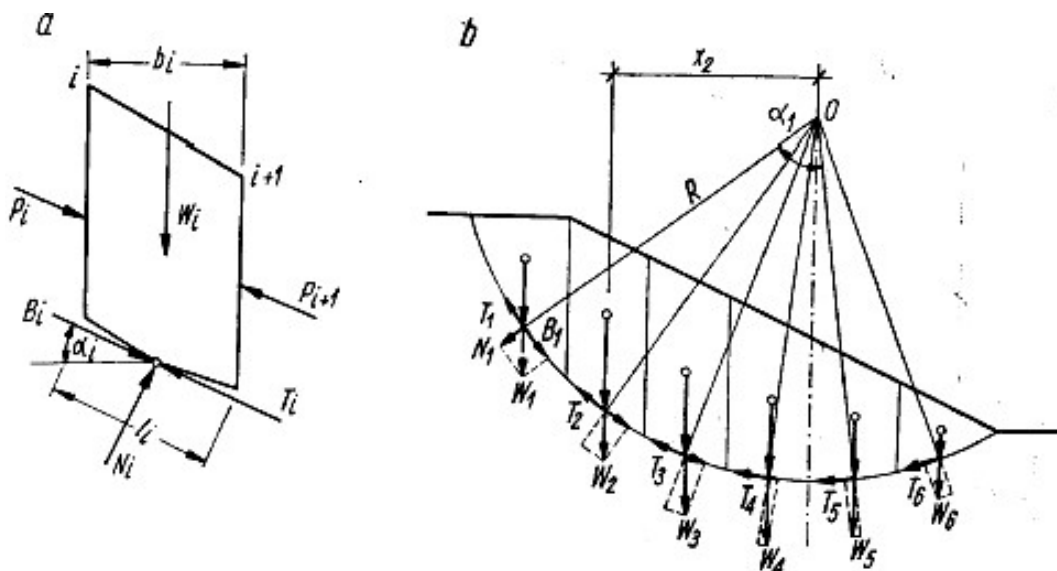
Stateczność skarpy

Metoda Felleniusa (1925 r.) - opis

Metoda Felleniusa jest najstarszą z metod, które umożliwiają przeprowadzenie analizy stateczności dla różnych od prostoliniowej powierzchni poślizgu. Opracowana ona została na podstawie wyników badań Szwedzkiej Komisji Geotechnicznej, której prace prowadzone były w latach 1916-1925. Metoda ta wykorzystuje podział potencjalnej bryły osuwiskowej na bloki (paski) pionowe. Z powyższych względów metoda ta znana jest również pod nazwą metody Pettersona-Felleniusa lub metody szwedzkiej.

W metodzie Felleniusa przyjęto następujące założenia:

- **powierzchnia poślizgu ma kształt walca cylindrycznego,**
- siły oddziaływania pomiędzy blokami są równoległe do podstawy bloku i nie wpływają na wartość reakcji normalnej do podstawy bloku oraz wartość sił oporu ścinania,
- wskaźnik stateczności definiowany jest jako stosunek momentów sił biernych (utrzymujących równowagę) i sił czynnych (zsuwających).



Rys. 1. Schemat sił działających na oddzielny blok i na całą bryłę osuwiskową
 (WIŁUN 1976)

$$\text{Współczynnik stateczności: } F = \frac{\sum U_i}{\sum Z_i} = \frac{\sum M_u}{\sum M_{ob}} = \frac{\sum T_i}{\sum B_i}$$

Przyjmuje się, że dla danego konturu zbocza (skarpy) istnieje jedna najbardziej niebezpieczna powierzchnia poślizgu, charakteryzująca się najmniejszym współczynnikiem pewności. Zakłada się przy tym najczęściej możliwość poślizgu w powierzchniach walcowych przechodzących przez dolną krawędź skarpy. Położenie środka obrotu, wokół którego może powstać poślizg skarpy o najmniejszym współczynniku bezpieczeństwa, w najogólniejszym przypadku należy wyznaczyć na podstawie prób.

Obliczenia te są bardzo czasochłonne. W ramach ćwiczeń w celu ograniczenia nakładu pracy sprawdzenie stateczności skarpy w każdym przypadku zostanie przeprowadzone tylko dla jednej powierzchni poślizgu.

Bryłę dzieli się na pionowe paski (bloki) (minimum = 10 pasków, maksimum = 20 pasków). Paski mogą być o różnej szerokości b_i ale szerokości te powinny być zbliżone do siebie. Na każdy pasek (blok) badanej bryły osuwiskowej działają następujące siły:

W_i – ciężar bloku i ;

P_i i P_{i+1} – siły o nieznanej wartości, działające na pionowe ścianki bloku i , równoległe do podstawy bloku i ;

$N_i = W_i \cos \alpha_i$ – składowa normalna siły W_i ;

$B_i = W_i \sin \alpha_i$ – składowa styczna siły W_i ;

W przypadku gruntu powyżej zwierciadła wody:

$T_i = N_i \tan \Phi + l_i c_i$ – siła oporu tarcia i kohezji gruntu (spójności), przeciwstawiająca się sile zsuwającej.

W przypadku gruntu poniżej zwierciadła wody należy uwzględnić naprężenie efektywne w poziomie powierzchni poślizgu, czyli uwzględnić ciśnienie wody w porach u :

$$T_i = N'_i \tan \Phi + l_i c_i ; N'_i = W_i \cos \alpha_i - u l_i.$$

Przyjęcie równoległości sił P_i do podstaw bloków umożliwia wyznaczenie sił N_i . Wypadkowa sił oddziaływania pomiędzy blokami wywołuje wprawdzie moment przy analizie pojedynczego bloku, ale uważając je za siły wewnętrzne osuwającej się bryły pomija się siły boczne P_i . Przy rozpatrywaniu warunków równowagi całego spełzającego masywu moment sił dla całej bryły względem dowolnego punktu powinien być równy zeru.

Moment sił obracających bryłę względem punktu O jest równy.

$$M_{ob} = \sum_{i=1}^n W_i x_i = \sum_{i=1}^n W_i R \sin \alpha_i = R \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i$$

W przypadku gruntu powyżej zwierciadła wody moment sił utrzymujących bryłę względem punktu O :

$$M_u = \sum_{i=1}^n T_i R = R \sum_{i=1}^n (N_i \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i) = R \sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i)$$

Współczynnik pewności (bezpieczeństwa) wyznacza się jako stosunek M_u do M_{ob} :

$$F = \frac{M_u}{M_{ob}} = \frac{R \sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i)}{R \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

Analiza stateczności skarpy (zbocza) o danym konturze i z gruntu jednorodnego powinna więc sprowadzać się do ustalenia drogą kolejnych prób takiej powierzchni poślizgu, która dawałaby najmniejszy współczynnik pewności $F_{\min}$:

$$F_{\min} \geq F_{\text{dop}}$$

Wartości F_{dop} przy stosowaniu metody Felleniusa przyjmuje się w granicach 1,1 do 1,3.

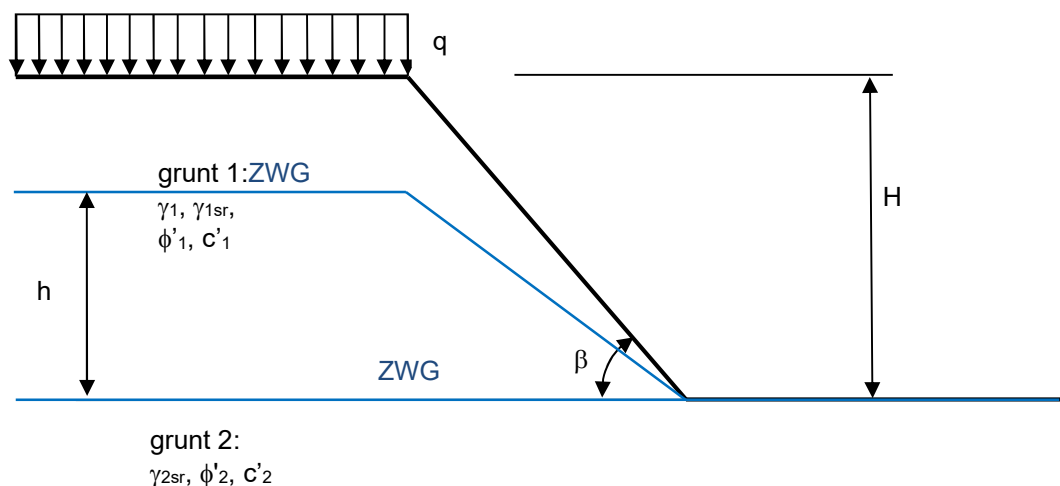
Informacje na stronach WWW pracowników Katedry:

1. Ireneusz Dyka: <http://pracownicy.uwm.edu.pl/i.dyka/grunty.htm>
2. Piotr Srokosz: <http://www.uwm.edu.pl/edu/piotrsrokosz/mg2.htm>

Stateczność skarpy

Treść zadania:

Oceń stateczność skarpy metodą Felleniusa dla indywidualnych danych według załączonego schematu obliczeniowego.



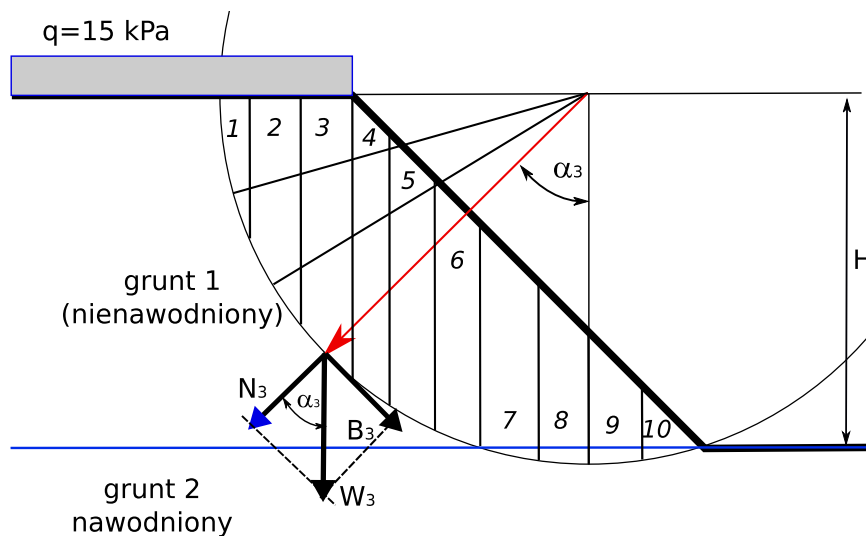
Rys. 1. Schemat obliczeniowy

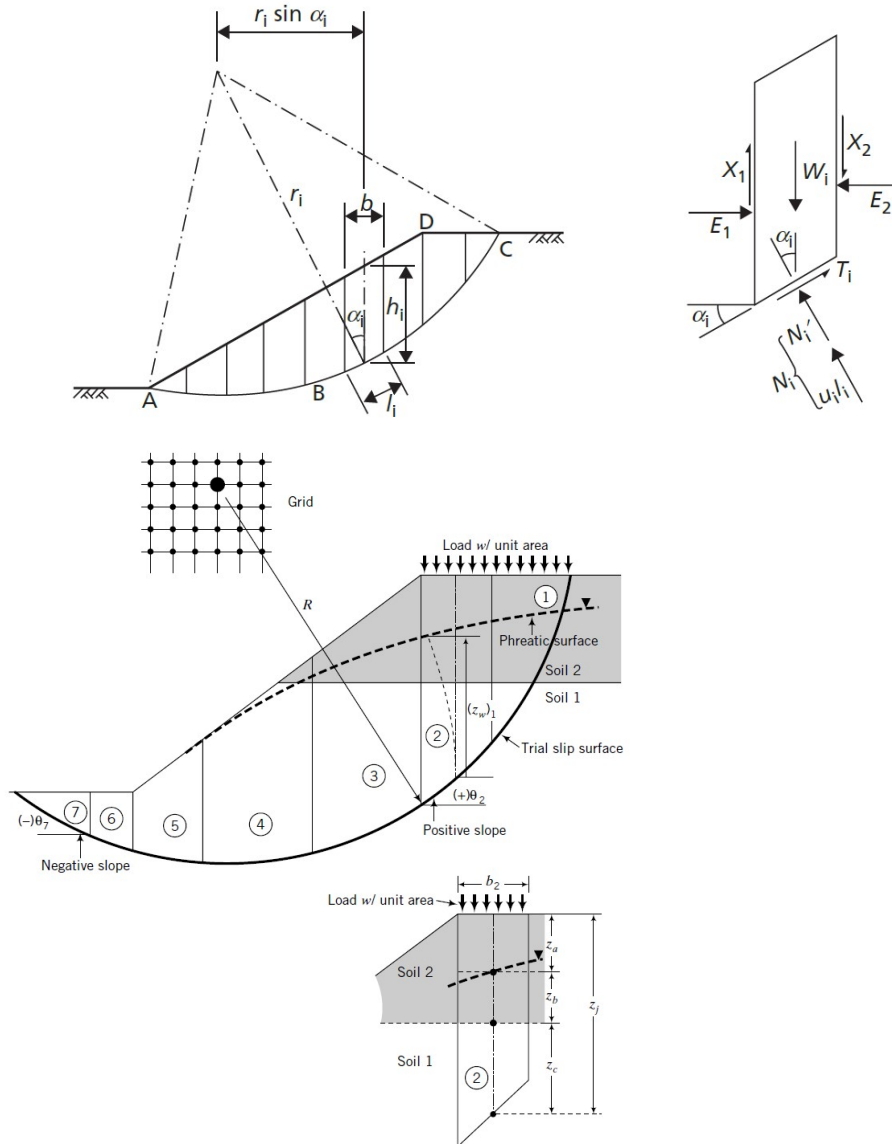
Przykład. Dane:

ϕ'_1 [deg]	c'_1 [kPa]	γ_1 [kN/m³]	γ_{1sr} [kN/m³]	ϕ'_2 [deg]	c'_2 [kPa]	γ_{2sr} [kN/m³]	h [m]	H [m]	β [deg]	q [kPa]
18	10	19.5	21.5	29	0	20.5	1.5	2.35	45	15

Wariant 1.

Schemat z wodą gruntową na poziomie naziomu dolnego.





$$F = \frac{\sum U_i}{\sum Z_i} = \frac{\sum M_u}{\sum M_{ob}} = \frac{\sum T_i}{\sum B_i}$$

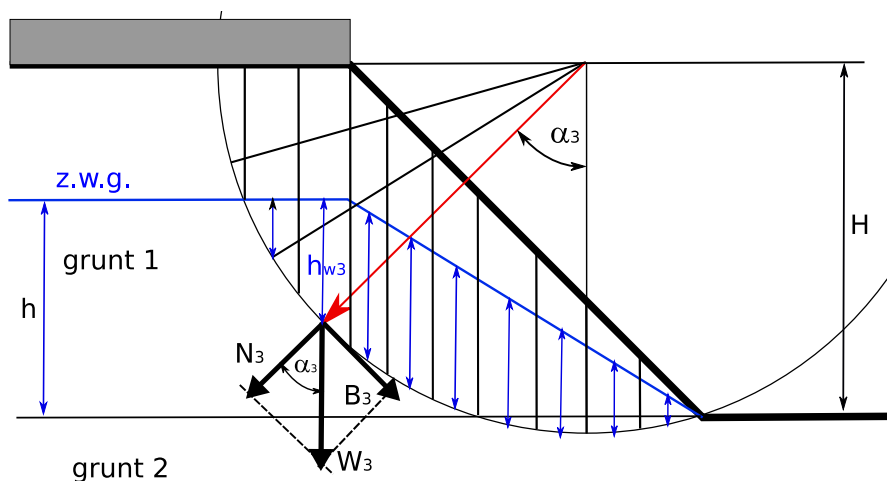
$$B_i = W_i \sin \alpha_i$$

$$T_i = N'_i \tan \phi'_i + l_i c'_i$$

$$N'_i = W_i \cos \alpha_i - l_i u_i$$

$$l = \frac{b}{\cos(\alpha)}$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n B_i} = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \phi'_i + l_i c'_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$



Nr	b [m]	q [kPa]	A ₁ [m ²]	γ ₁ [kN/m ³]	A _{1sr} [m ²]	γ _{sr1} [kN/m ³]	A _{2sr} [m ²]	γ _{sr2} [kN/m ³]	W [kN/m]	α	φ'	c' [kPa]	l [m]	h _w [m]	u [kPa]	B [kN/m]	N [kN/m]	T [kN/m]
1	0.20	15	0.134	19.5	0	21.5	0	20.5	5.62	74	18	10	0.726	0	0	5.398	1.548	7.759
2	0.35	15	0.309	19.5	0.13	21.5	0	20.5	14.06	59	18	10	0.680	0.37	3.63	12.053	4.776	7.546
3	0.35	15	0.308	19.5	0.284	21.5	0	20.5	17.35	46	18	10	0.504	0.81	7.946	12.482	8.050	6.353
4	0.25	0	0.194	19.5	0.248	21.5	0	20.5	9.10	39	18	10	0.322	0.99	9.712	5.729	3.950	3.485
5	0.30	0	0.212	19.5	0.306	21.5	0	20.5	10.72	29	18	10	0.343	1.02	10.01	5.197	5.944	4.246
6	0.30	0	0.194	19.5	0.282	21.5	0	20.5	9.84	20	18	10	0.319	0.94	9.221	3.367	6.306	4.285
7	0.40	0	0.195	19.5	0.325	21.5	0.015	20.5	11.10	11	29	0	0.407	0.85	8.339	2.119	7.502	2.275
8	0.35	0	0.102	19.5	0.222	21.5	0.027	20.5	7.31	4	29	0	0.351	0.71	6.965	0.510	4.848	1.333
9	0.35	0	0.060	19.5	0.141	21.5	0.027	20.5	4.76	-4	29	0	0.351	0.48	4.709	-0.332	3.096	0.800
10	0.40	0	0.015	19.5	0.065	21.5	0.015	20.5	2.00	-11	29	0	0.407	0.20	1.962	-0.382	1.167	0.204

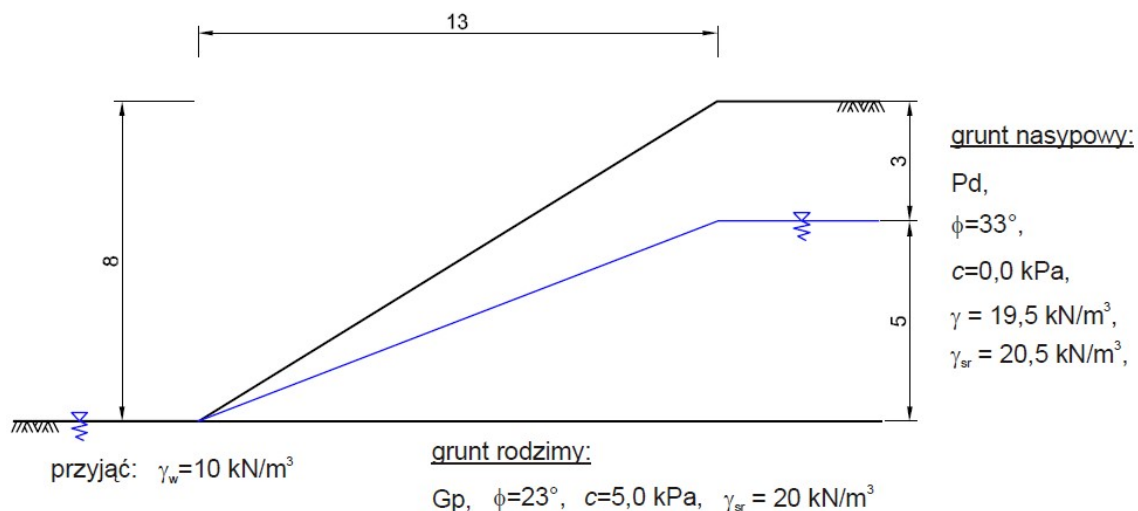
46.14

38.29

F= 0.83

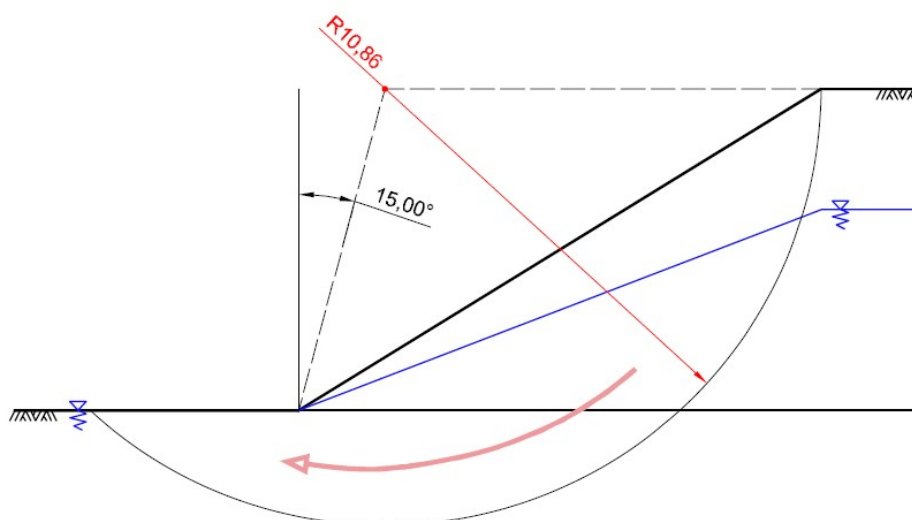
Przykład (dr inż. Marcin Cudny, Politechnika Gdańska)

Sprawdź współczynnik stateczności zbocza przedstawionego na rysunku metodą Felleniusa. W gruncie nasypowym oraz w podłożu naturalnym występuje woda gruntowa, której zwierciadło zaznaczono na rysunku. W celu uproszczenia obliczeń należy pominąć siłę spływową, natomiast obecność wody gruntowej uwzględnić tylko poprzez ciśnienie wody w porach.

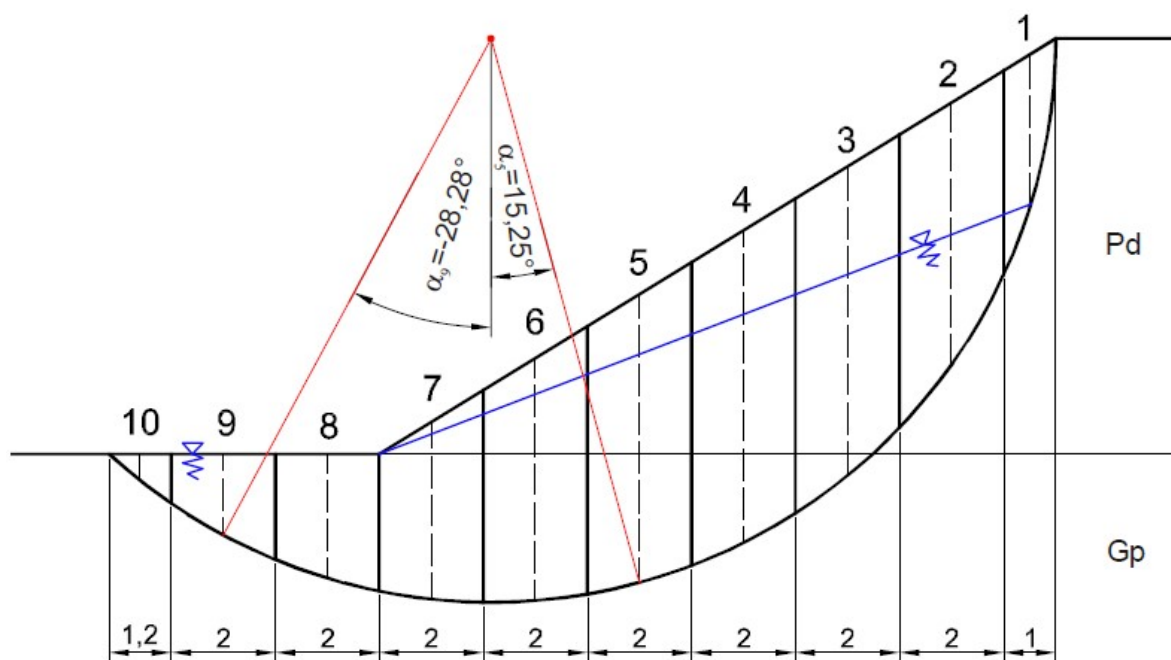


Przyjęcie środka obrotu oraz promienia walcowej bryły osuwiska w praktyce polega na wielokrotnym sprawdzaniu różnych konfiguracji, z których ostatecznie wybiera się tę dającą najniższą wartość współczynnika stateczności, czyli najbardziej niekorzystną z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Wielokrotne obliczenia są bardzo pracochłonne i wykonuje się je przy pomocy programów komputerowych. W rozpatrywanym przykładzie zaleca się przyjęcie następującego walcowego mechanizmu utraty stateczności:



Przyjętą bryłę osuwiska dzieli się w modelu obliczeniowym na pewną liczbę pionowych pasków, których szerokość zależy głównie od komplikacji geometrii rozpatrywanego zagadnienia. Dokładność obliczeń jest oczywiście większa przy małej szerokości pasków i ich dużej liczbie, co jednak przy prostej metodzie realizacji obliczeń jest żmudne rachunkowo. Podział bryły osuwiska na paski obliczeniowe, przyjęty w rozpatrywanym przykładzie, przedstawiono na poniższym rysunku.



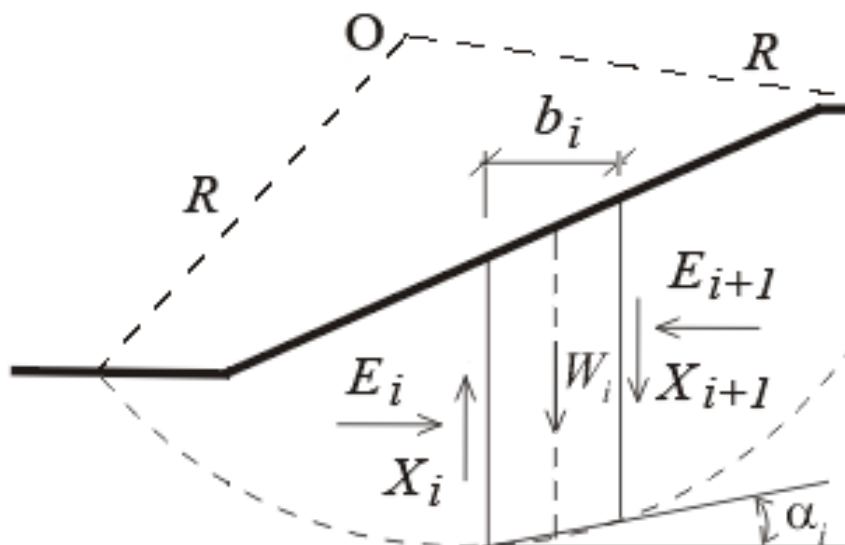
Nr	α_i [°]	b_i [m]	$l_i = b_i / \cos \alpha_i$ [m]	h_{wi} [m]	u [kPa]	W_i [kN/m]	ϕ_i [°]	c_i [kPa]	$c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u l_i) \tan \phi_i$ [kN/m]	$W_i \sin \alpha_i$ [kN/m]
1	72.54	1.0	3.33	0.06	0.6	57.39	33	0.0	9.88	54.75
2	54.66	2.0	3.46	2.19	21.9	201.97	33	0.0	26.69	164.75
3	39.16	2.0	2.58	3.38	33.8	239.78	23	5.0	54.81	151.42
4	26.57	2.0	2.24	3.83	38.3	241.87	23	5.0	66.65	108.19
5	15.25	2.0	2.07	3.83	38.3	222.77	23	5.0	67.89	58.60
6	4.52	2.0	2.01	3.46	34.6	186.86	23	5.0	59.64	14.73
7	-6.05	2.0	2.01	2.80	28.0	136.55	23	5.0	43.79	-14.39
8	-16.83	2.0	2.09	2.39	23.9	95.60	23	5.0	28.09	-27.68
9	-28.28	2.0	2.27	1.56	15.6	62.40	23	5.0	19.64	-29.56
10	-38.39	1.2	1.53	0.51	5.1	20.40	23	5.0	11.13	-12.67
Σ									388.22	468.12

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n=10} [(W_i \cos \alpha_i - u l_i) \tan \phi_i + c_i l_i]}{\sum_{i=1}^{n=10} W_i \sin \alpha_i} = \frac{388.22}{468.12} = 0.83$$

Metoda Bishopa - opis

Metoda Bishopa jest pewną modyfikacją metody Felleniusa, polegającą na innym określeniu współczynnika bezpieczeństwa i odmiennym sposobie określenia sił działających na bokach każdego paska.

Jej podstawowe założenia są takie, jak dla metody Felleniusa, z tym, że siły między blokami są skierowane poziomo – ich rzut na kierunek pionowy jest równy zero, a ich wartość określa się za pomocą kolejnych przybliżeń z zastosowaniem ogólnych równań równowagi wewnętrznej, wartość normalnej określa się z sumy rzutów na kierunek pionowy. W równaniu równowagi momentów sił względem środka potencjalnej powierzchni poślizgu, z którego określa się wskaźnik stateczności F , nie uwzględnia się oddziaływania pomiędzy blokami – ich wypadkowa wywołuje moment przy analizie pojedynczego bloku, ale traktowane są one jako siły wewnętrzne, więc wywołany przez nie moment dla całej bryły jest równy zero.



Współczynnik bezpieczeństwa przyjęto jako stosunek wytrzymałości na ścinanie τ_f do rzeczywistych naprężeń ścinających obliczonych w naprężeniach efektywnych w podstawie paska.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau}$$

Wartość tak określonego współczynnika bezpieczeństwa jest jednakowa dla spójności i dla tarcia wewnętrznego gruntu. Jest również stała wzdłuż całej linii poślizgu.

W metodzie tej operuje się naprężeniami czynnymi (efektywnymi), a siły działające na wydzielone paski spełniają równania równowagi momentów dla całej bryły oraz warunki równowagi sumy rzutów sił na oś pionową dla poszczególnych pasków.

$$\tau = (\sigma - u) \frac{\operatorname{tg} \phi'}{F} + \frac{c'}{F}$$

W naprężeniach całkowitych:

$$\tau = \sigma \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} + \frac{c}{F}$$

$$\tau = \frac{N}{l} \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} + \frac{c}{F} = \frac{T}{l} \rightarrow T = N \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} + \frac{c \cdot l}{F}$$

Z warunku rzutu sił na oś pionową otrzymujemy:

$$N \cdot \cos \alpha + X_i - X_{i+1} - W + T \cdot \sin \alpha = 0 \rightarrow$$

$$N \cdot \cos \alpha + X_i - X_{i+1} - W + \left(N \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} + \frac{c \cdot l}{F} \right) \cdot \sin \alpha = 0$$

$$N \cdot \cos \alpha + N \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} \cdot \sin \alpha = \Delta X + W - \frac{c \cdot l}{F} \cdot \sin \alpha$$

$$N \cdot \left(\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} \cdot \sin \alpha \right) = \Delta X + W - \frac{c \cdot l}{F} \cdot \sin \alpha$$

$$N = \frac{\Delta X + W - \frac{c \cdot l}{F} \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} \cdot \sin \alpha} = \frac{\Delta X + W - \frac{c \cdot l}{F} \cdot \sin \alpha}{m_\alpha}$$

$$F = \frac{M_u}{M_{ob}} = \frac{R \sum_{i=1}^n (N_i \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i)}{R \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta X_i + W_i - \frac{c_i \cdot l_i}{F} \cdot \sin \alpha_i}{m_{ai}} \operatorname{tg} \phi_i + l_i c_i \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(\Delta X_i + W_i) \cdot \operatorname{tg} \phi_i + b_i c_i}{m_{ai}} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}, \text{ gdzie } m_{ai} = \cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \phi}{F} \cdot \sin \alpha$$

Uproszczona metoda Bishopa dla z uwzględnieniem położenia zwierciadła wody gruntowej:

Formuła obliczeniowa

Przy obliczeniach współczynnika stateczności korzystamy z poniższego wzoru:

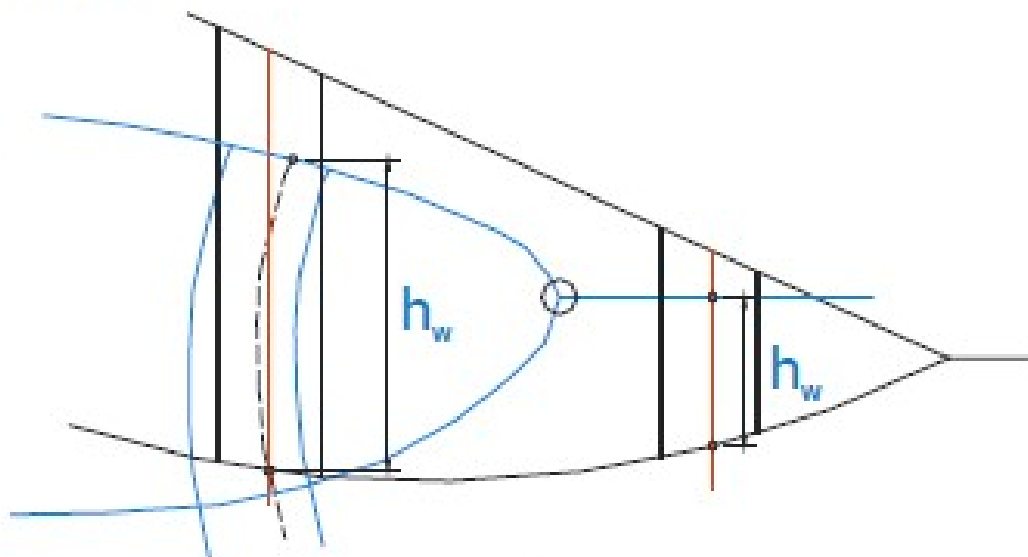
$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(\overline{W}_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi' + c' \cdot b_i}{m_{ai}} \right]}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i \cdot \sin \alpha_i}$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi'}{F} \cdot \tan \alpha_i \right)$$

gdzie: i jest numerem paska, $\overline{W}$ jego ciężarem, α nachyleniem stycznej do podstawy paska, b szerokością paska, ϕ' efektywny kąt tarcia wewnętrznego i efektywna kohezja c' dla gruntu w podstawie paska, u ciśnienie porowe w podstawie paska.

Ciśnienie porowe

Do wyznaczenia wartości ciśnienia porowego u wykorzystujemy siatkę hydrodynamiczną. Rysunek poniżej przypomina jak odczytać wysokość ciśnienia h_w w dowolnym punkcie pod krzywą filtracji. W prezentowanym przypadku, punkt znajduje się w podstawie paska, w miejscu, gdzie usytuowana jest styczna do krzywej poślizgu.



Mając wysokość ciśnienia h_w , wartość ciśnienia porowego u wyliczymy ze znanej formuły:

$$u = h_w \cdot \gamma_w$$

gdzie: γ_w – ciężar objętościowy wody.