

## STATECZNOŚĆ SKARP

W przypadku obiektu wykonanego z gruntów niespoistych zaprojektowanie bezpiecznego nachylenia skarp sprowadza się do przekształcenia wzoru na współczynnik stateczności do postaci:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \phi}{n}$$

gdzie:

$\alpha$  - kąt nachylenia skarpy [°],

$\phi$  - kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],

$n$  – współczynnik stateczności, przyjmowany na podstawie znaczenia obiektu budowlanego, w większości przypadków wartość tego współczynnika zawiera się w przedziale od 1.1 do 1.3.

Współczynnik nachylenia skarpy ( $m$ ) oblicza się ze wzoru:

$$m = c \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha}$$

W przypadku, gdy w pobliżu powierzchni skarpy odbywa się przepływ filtracyjny wody wzór na współczynnik stateczności, uwzględniający wpływ ciśnienia sphywowego przybiera postać:

$$n = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \alpha \left( \frac{\gamma' + \gamma_w}{\gamma_w} \right)} \approx \frac{\operatorname{tg} \phi}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

w którym:

$\gamma'$  – ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wyporu wody [ $\text{kN/m}^3$ ],

$\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [ $\text{kN/m}^3$ ].

W przypadku, gdy obiekt budowlany wykonany jest z gruntów spoistych projektowanie bezpiecznego i ekonomicznego nachylenia skarp odbywa się w czterech etapach:

1. Założenie nachylenia skarpy.
2. Sprawdzenie stateczności skarpy (obliczenie współczynnika stateczności dla wielu powierzchni poślizgu).
3. Wybranie z wielu analizowanych powierzchni poślizgu najbardziej niebezpiecznej powierzchni, która decyduje o stateczności skarpy (określenie  $n_{min}$ ).
4. Porównanie wartości współczynnika stateczności ( $n_{min}$ ) z wartością wymaganą dla badanego obiektu ( $n_{dop}$ ).

W przypadku gdy:

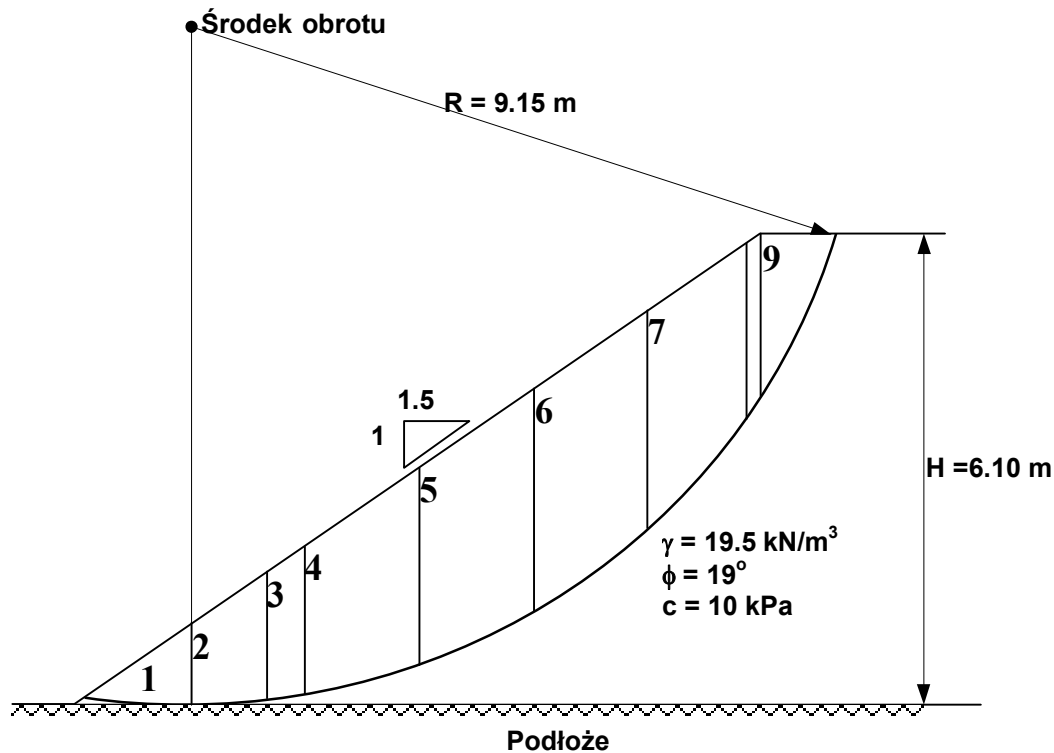
$n_{min} > n_{dop}$ , proces projektowania zostaje zakończony;

$n_{min} \geq n_{dop}$ , skarpa jest zaprojektowana ze zbyt dużym zapasem bezpieczeństwa. Należy zmniejszyć nachylenie skarpy i powrócić do punktu nr 1;

$n_{min} < n_{dop}$ , skarpa o założonym nachyleniu nie jest stateczna. Należy zwiększyć nachylenie skarpy i powrócić do punktu nr 1.

## Sprawdzenie stateczności skarpy metodą Felleniusa (szwedzką)

Schemat obliczeniowy (przykład):



Rys. 2 Schemat obliczeniowy do sprawdzenia stateczności bryły zsuwu metodą Felleniusa

Współczynnik stateczności według tej metody oblicza się ze wzoru:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m (G_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \phi + c \cdot l_i)}{\sum_{i=1}^m G_i \cdot \sin \alpha_i}$$

$$l_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i}$$

gdzie:

$G_i$  – ciężar bloku obliczeniowego [kN],

$\alpha_i$  – kąt zawarty pomiędzy prostą pionową przechodzącą przez środek obrotu a prostą łączącą środek obrotu ze środkiem podstawy bloku obliczeniowego,

$\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [ $^\circ$ ],

$c$  – spójność gruntu [kPa],

$l_i$  – długość podstawy bloku obliczeniowego [m],

$b_i$  – szerokość bloku [m],

$i$  – numer bloku obliczeniowego,  
 $m$  – ilość bloków obliczeniowych.

Obliczenia najwygodniej jest przeprowadzić w tabelach podanych poniżej.

**Tabela 1. Obliczenie ciężaru bloków**

Nr bloku	Szer. bloku (m)	Średnia wys. bloku (m)	Ciężar bloku (kN)
1	1.4	0.5	13.65
2	1.0	1.3	25.35
3	0.5	1.8	17.55
4	1.5	2.3	67.28
5	1.5	2.7	78.98
6	1.5	2.8	81.90
7	1.3	2.6	65.91
8	0.2	2.0	7.80
9	1.0	1.2	23.40
			381.81

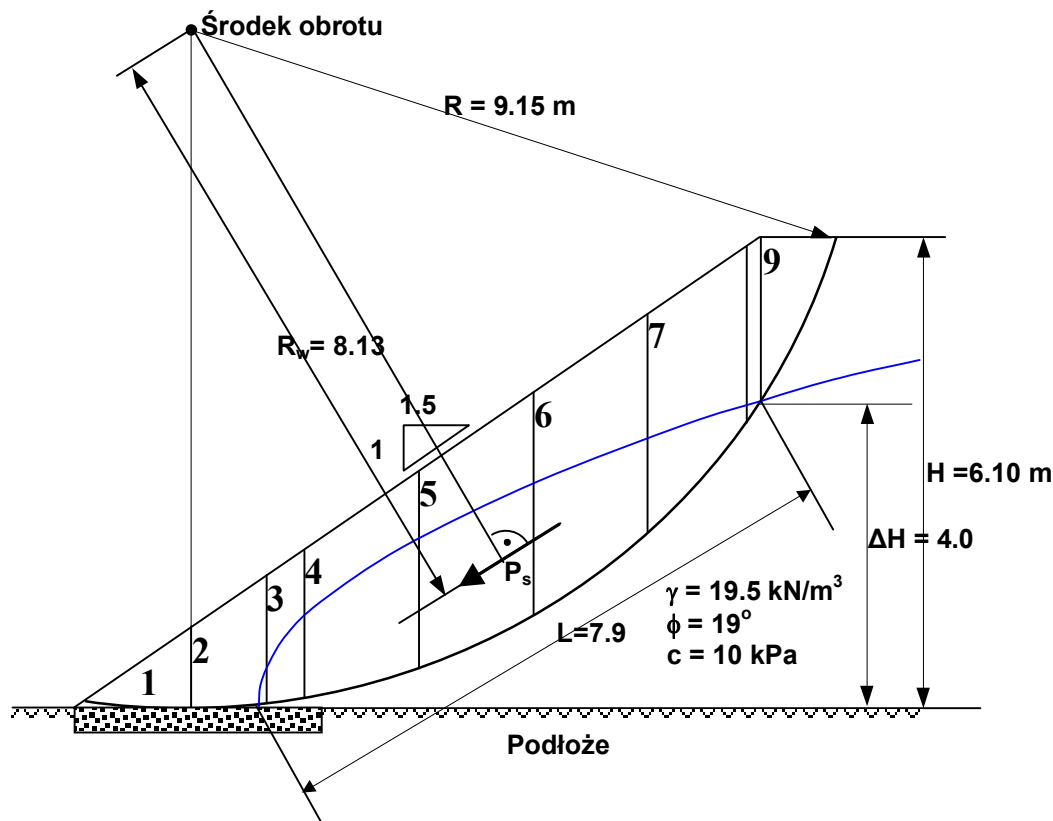
**Tabela 2. Obliczenie współczynnika stateczności**

Nr bloku	$G_i$ (kN)	$\sin\alpha_i$	$G_i \sin\alpha_i$ (kN)	$\cos\alpha_i$	$G_i \cos\alpha_i$ (kN)	$l_i=b_i/\cos\alpha_i$ (m)
10	13.65	-0.07	-0.99	1.00	13.61	1.40
11	25.35	0.05	1.29	1.00	25.32	1.00
12	17.55	0.13	2.30	0.99	17.40	0.51
13	67.28	0.24	16.18	0.97	65.30	1.55
14	78.98	0.41	32.22	0.91	72.10	1.65
15	81.90	0.57	46.54	0.82	67.39	1.85
16	65.91	0.72	47.54	0.69	45.65	1.94
17	7.80	0.80	6.25	0.60	4.66	0.35
18	23.40	0.87	20.46	0.49	11.36	2.04
			171.79		322.79	12.28

$$n = \frac{322.79 \cdot \operatorname{tg} 19^\circ + 10 \cdot 12.28}{171.79} = 1.36$$

## Uwzględnienie siły filtracji w obliczaniu stateczności metodą Felleniusa.

Schemat obliczeniowy (przykład):



**Rys. 2 Schemat obliczeniowy do sprawdzenia stateczności bryły zsuwu metodą Felleniusa z uwzględnieniem wpływu siły filtracji**

Gdy w gruncie poniżej powierzchni skarpy odbywa się przepływ filtracyjny wody, krzywa depresji dzieli bryłę zsuwu na dwie części:

- część zawartą pomiędzy powierzchnią skarpy a krzywą depresji, która posiada ciężar objętościowy  $\gamma$ ,
- część zawartą między krzywą depresji a powierzchnią poślizgu, na ziarna i cząstki szkieletu oddziałuje tutaj wypór wody (ciężar objętościowy gruntu wynosi  $\gamma' = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w)$ ).

Współczynnik stateczności oblicza się ze wzoru

$$n = \frac{R \sum_{i=1}^m (G'_i \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \phi + c l_i)}{R \sum_{i=1}^m G'_i \sin \alpha_i + M_w}$$

gdzie:

$R$  – promień cylindrycznej powierzchni poślizgu [m];

$G'_i$  – ciężar bloku obliczeniowego obliczony jako suma ciężaru części bloku powyżej krzywej depresji (o ciężarze objętościowym  $\gamma$ ) i części bloku poniżej krzywej depresji (o ciężarze objętościowym  $\gamma'$ ), [kN];

$M_w$  – moment siły sphywowej [kNm]

$$M_w = R_w \cdot P_s$$

gdzie:

$R_w$  - ramię działania siły spływowej (rys. 2) [m];

$P_s$ - siła spływowa [kN].

Wartość siły spływowej  $P_s$  może być obliczona jako iloczyn objętości zawartej pomiędzy powierzchnią poślizgu i powierzchnią zwierciadła wody oraz średnim jednostkowym ciśnieniem spływowym:

$$P_s = V_w \cdot p_s,$$

$$p_s = i \cdot \gamma_w = \frac{\Delta H}{L} \cdot \gamma_w$$

gdzie:

$V_w$  – objętość części bryły osuwiskowej zawarta pomiędzy powierzchnią poślizgu a krzywą depresji,

$i$  – średni spadek hydrauliczny w obrębie bryły osuwiskowej,

$\Delta H$  – różnica wysokości piezometrycznych (rys. 2) [m],

$L$  – długość drogi filtracji (rys. 2) [m].

Poniżej przedstawiono przykład obliczenia stateczności skarpy z uwzględnieniem siły spływowej dla bryły osuwiskowej oraz danych przedstawionych na rys. 2.

Według danych pomierzonych na rys 2 średni spadek hydrauliczny w obrębie bryły osuwiskowej wynosi:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{4.0}{7.9} = 0.506,$$

wartość ciśnienia spływowego jest równa:

$$p_s = i \cdot \gamma_w = 0.506 \cdot 9.81 = 4.97 \text{ kN/m}^3$$

**Tabela 3. Obliczenie ciężaru bloków**

Nr bloku	Szer. części bloku poniżej krzywej depresji (m)	Średnia wys. części bloku poniżej krzywej depresji (m)	Objętość części bloku poniżej krzywej depresji (kN)
1	–	–	–
2	0.15	0.2	0.03
3	0.5	0.9	0.45
4	1.5	1.5	2.25
5	1.5	1.8	2.70
6	1.5	1.6	2.40
7	1.3	0.9	1.17
8	0.3	0.15	0.05
9	–	–	–
			$V_w = 9.05 \text{ m}^3$

**Tabela 3. Obliczenie ciężaru bloków c.d.**

Nr bloku	Objętość bloku $V_i$ ( $m^3$ )	Objętość części bloku poniżej krzywej depresji $V_{wi}$ ( $m^3$ )	Objętość części bloku powyżej krzywej depresji $V_{pi}$ ( $m^3$ )	Ciężar bloku $G_i' = V_{pi} \cdot \gamma + V_{wi} \cdot \gamma'$ (kN)
1	0.7	–	0.70	13.65
2	1.3	0.03	1.27	25.10
3	0.9	0.45	0.45	13.73
4	3.45	2.25	1.20	48.15
5	4.05	2.70	1.35	56.03
6	4.2	2.40	1.80	61.50
7	3.38	1.17	2.21	55.97
8	0.4	0.05	0.36	7.42
9	1.2	–	1.20	23.40

Wartość siły spływowej wynosi

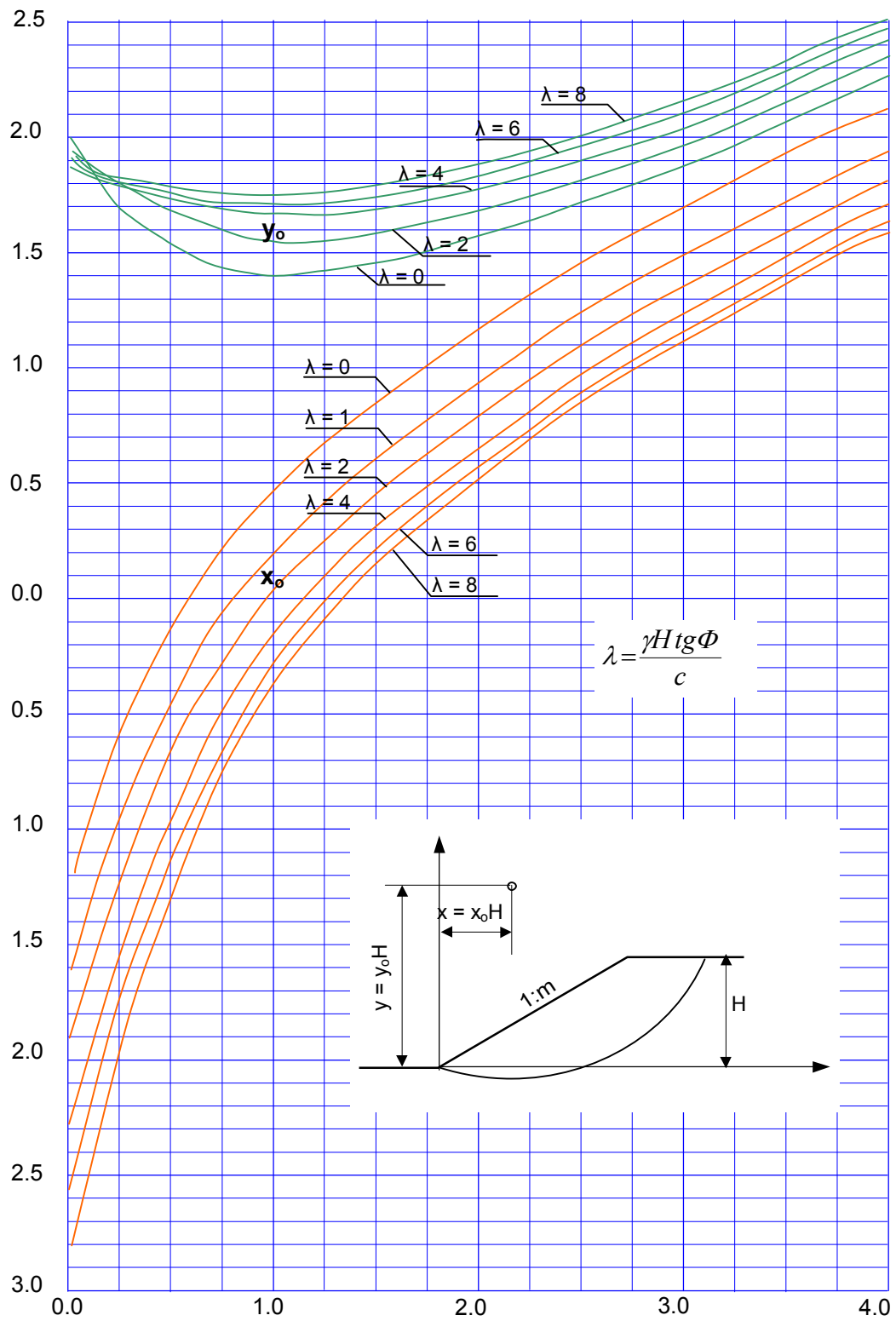
$$P_s = V_w \cdot p_s = 9.05 \cdot 4.97 = 44.98 \text{ kN}$$

**Tabela 4. Obliczenie współczynnika stateczności**

Nr bloku	$G_i'$ (kN)	$\sin \alpha_i$	$G_i' \sin \alpha_i$ (kN)	$\cos \alpha_i$	$G_i' \cos \alpha_i$ (kN)	$l_i = b_i / \cos \alpha_i$ (m)
10	13.65	-0.07	-0.99	1.00	13.61	1.40
11	25.10	0.05	1.28	1.00	25.06	1.00
12	13.73	0.13	1.80	0.99	13.61	0.51
13	48.15	0.24	11.58	0.97	46.74	1.55
14	56.03	0.41	22.86	0.91	51.15	1.65
15	61.50	0.57	34.95	0.82	50.60	1.85
16	55.97	0.72	40.37	0.69	38.76	1.94
17	7.42	0.80	5.94	0.60	4.44	0.35
18	23.40	0.87	20.46	0.49	11.36	2.04
			138.24		255.33	12.28

$$n = \frac{9.15 \cdot (255.33 \cdot \operatorname{tg} 19^\circ + 10 \cdot 12.28)}{9.15 \cdot 138.24 + 8.13 \cdot 44.98} = 1.18$$

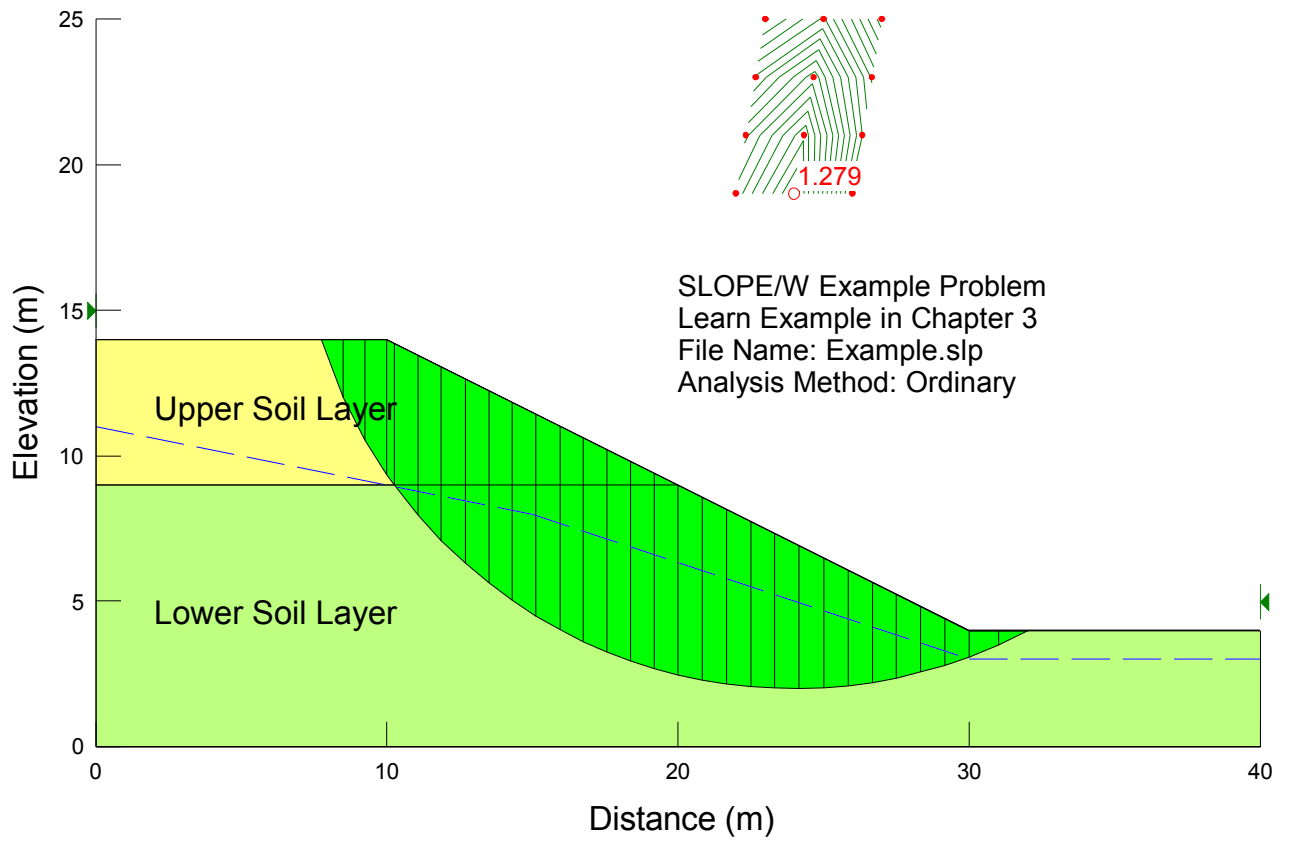
Sprawdzenie stateczności skarpy o założonym nachyleniu należy przeprowadzić dla wielu różnych powierzchni poślizgu. Obliczenia te są bardzo czasochłonne. W ramach ćwiczeń z przedmiotu Mechanika Gruntów i Fundamentowanie, w celu ograniczenia nakładu pracy sprawdzenie stateczności skarpy w każdym przypadku zostanie przeprowadzone tylko dla jednej powierzchni poślizgu, której położenie należy wyznaczyć, korzystając z nomogramu opracowanego przez Janbu.



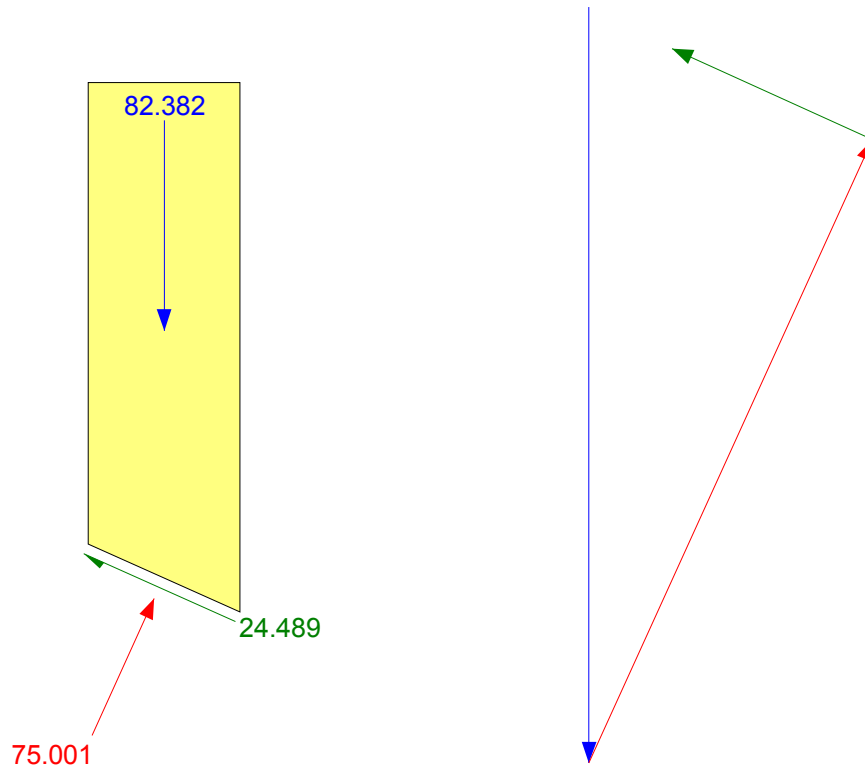
**Rys. 3** Nomogram Janbu do wyznaczania położenia środka obrotu najniekorzystniejszej powierzchni poślizgu

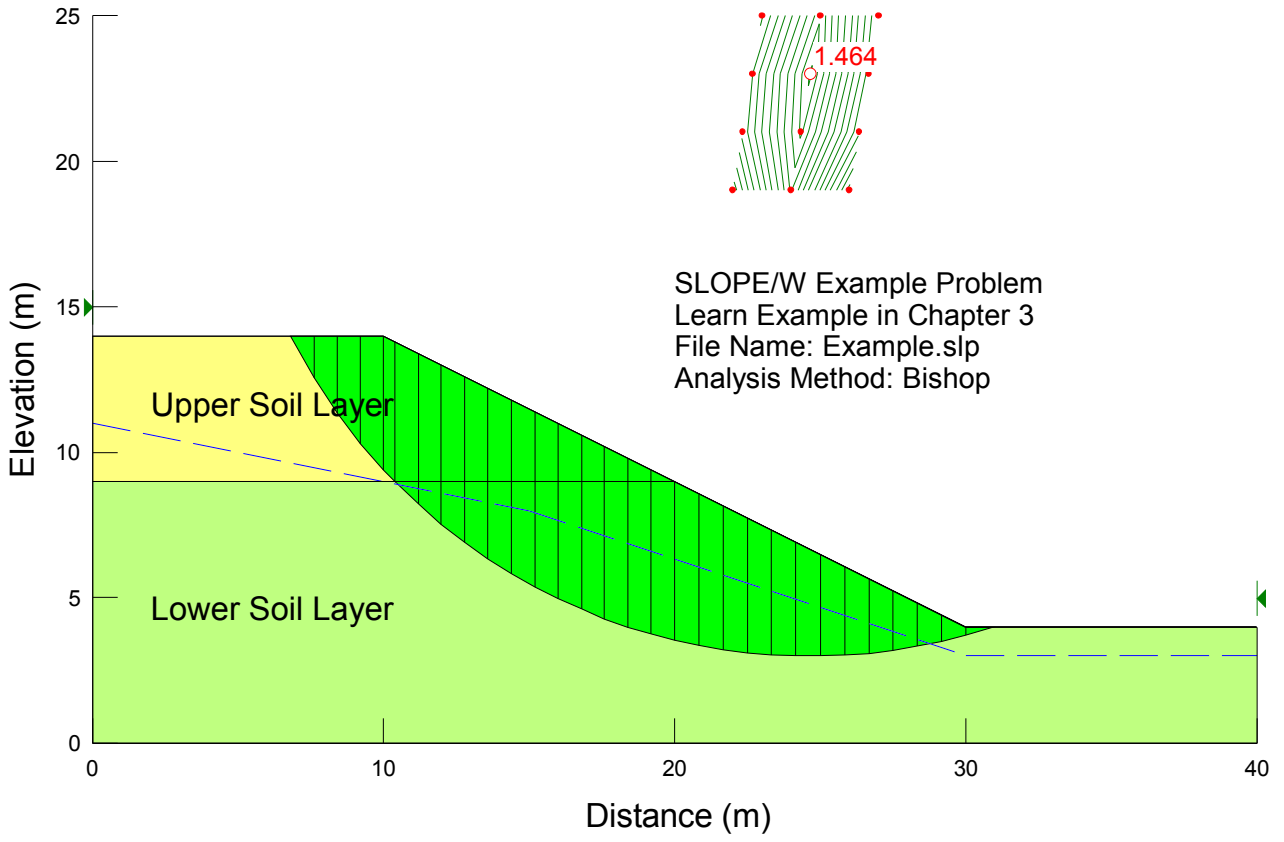
W ostatnich czasach w celu przyspieszenia obliczeń oraz zwiększenia ich dokładności opracowano szereg programów komputerowych, które z reguły umożliwiają sprawdzenie stateczności skarp różnymi metodami obliczeniowymi, uwzględniając bardzo skomplikowane warunki geotechniczne. Liderem w tej dziedzinie jest kanadyjska firma GEO-SLOPE z Calgary <http://www.geo-slope.com/>, akademickie wersje swoich programów(student license), które posiadają pewne ograniczenia w stosunku do produktów komercyjnych firma **udostępnia bezpłatnie**. Na kolejnych stronach niniejszych materiałów przedstawiono wyniki obliczeń stateczności skarpy wykonane przy wykorzystaniu programu GEO-SLOPE/W, trzema różnymi metodami obliczeniowymi: metodą Felleniusa (ordinary method), oraz bardziej skomplikowanymi metodami Bishopa oraz Janbu.



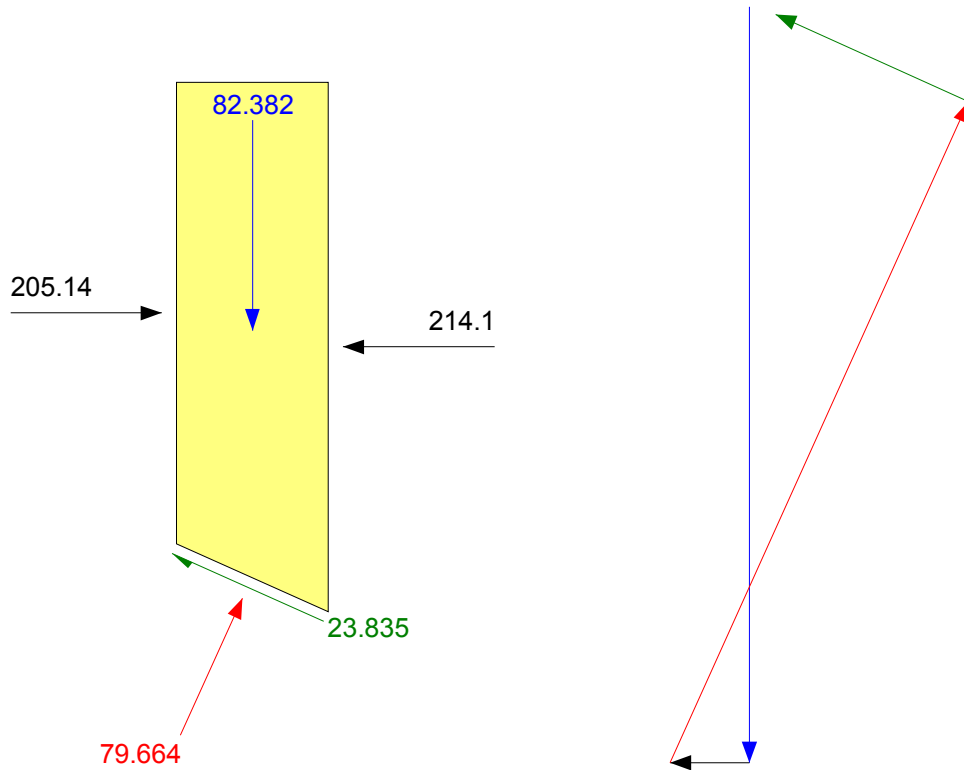


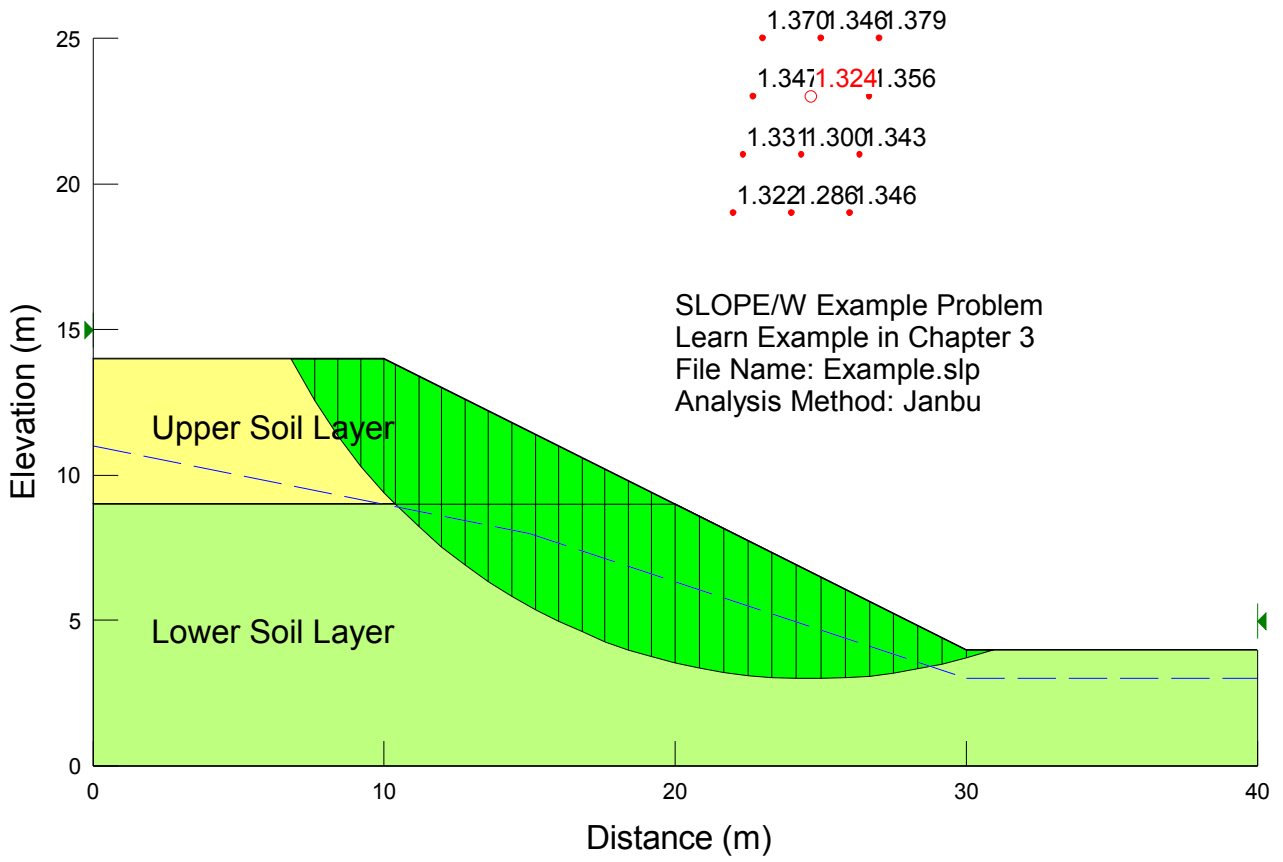
### Slice 13 - Ordinary Method





Slice 13 - Bishop Method





### Slice 13 - Janbu Method

