

Analiza stateczności zbocza

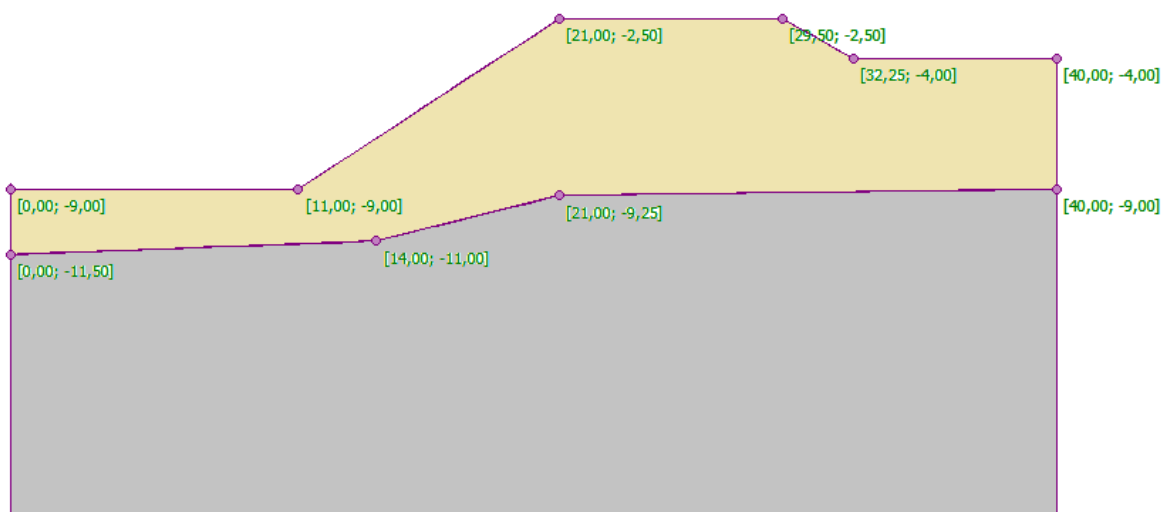
Program: MES

Plik powiązany: Demo_manual_25.gmk

Celem niniejszego przewodnika jest analiza stateczności zbocza (wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa) z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

Sformułowanie zadania

Określić współczynnik stateczności zbocza bez dodatkowego obciążenia oraz pod działaniem pasmowego obciążenia zewnętrznego o wartości $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$. Schemat geometrii zbocza (z uwzględnieniem punktów charakterystycznych warstw) we wszystkich fazach obliczeniowych został przedstawiony na poniższym rysunku. Przeprowadzić następnie analizę możliwości stabilizacji zbocza przy pomocy kotew gruntowych.



Schemat modelowanego zbocza – punkty poszczególnych warstw

Profil geologiczny podłoża składa się z dwóch warstw gruntów o następujących parametrach:

| Parametry gruntu / klasyfikacja | Grunt nr 1 | Grunt nr 2 |
|---|------------|------------|
| Ciężar objętościowy gruntu: $\gamma \text{ [kN/m}^3]$ | 18 | 20 |
| Moduł sprężystości: $E \text{ [MPa]}$ | 21 | 300 |
| Współczynnik Poissona: $\nu [-]$ | 0.3 | 0.2 |
| Spójność efektywna gruntu: $c_{eff} \text{ [kPa]}$ | 9 | 120 |

| | | |
|---|----|----|
| Efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu: φ_{eff} [°] | 23 | 38 |
| Kąt dyatacji: ψ [°] | 0 | 0 |
| Ciężar objętościowy gruntu nawodnionego: γ_{sat} [kN/m ³] | 20 | 22 |

Tabela z parametrami gruntów – analiza stateczności zbocza

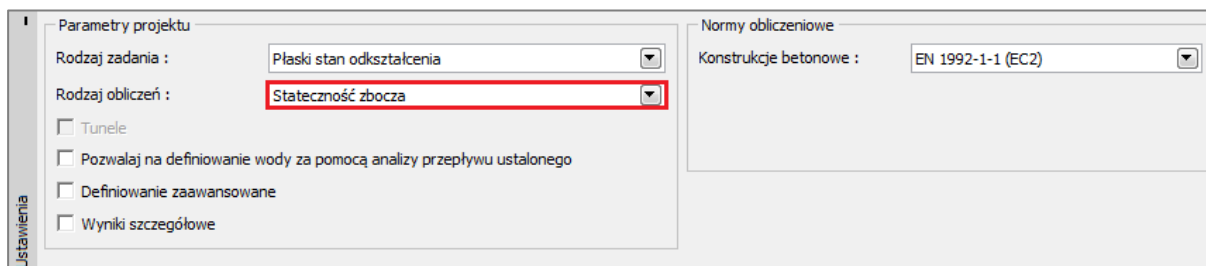
Rozwiązanie

W celu wykonania zadania skorzystaj z programu GEO5 MES. Przewodnik przedstawia kolejne kroki rozwiązania tego przykładu:

- Topologia: ustawienia oraz modelowanie zagadnienia (warstwy, generacja siatki).
- Faza nr 1: obliczenie współczynnika bezpieczeństwa zbocza bez obciążenia.
- Faza nr 2: obliczenie współczynnika bezpieczeństwa zbocza pod obciążeniem pasmowym.
- Faza nr 3: stabilizacja zbocza za pomocą kotew gruntowych, analiza stateczności zbocza.
- Analiza wyników: porównanie, wnioski.

Topologia: ustawienia zadania

Pierwszym krokiem będzie przejście do ramki “Ustawienia”, w której wybierzemy rodzaj obliczeń jako *Stateczność zbocza*. Pozostałe parametry nie ulegają zmianie.

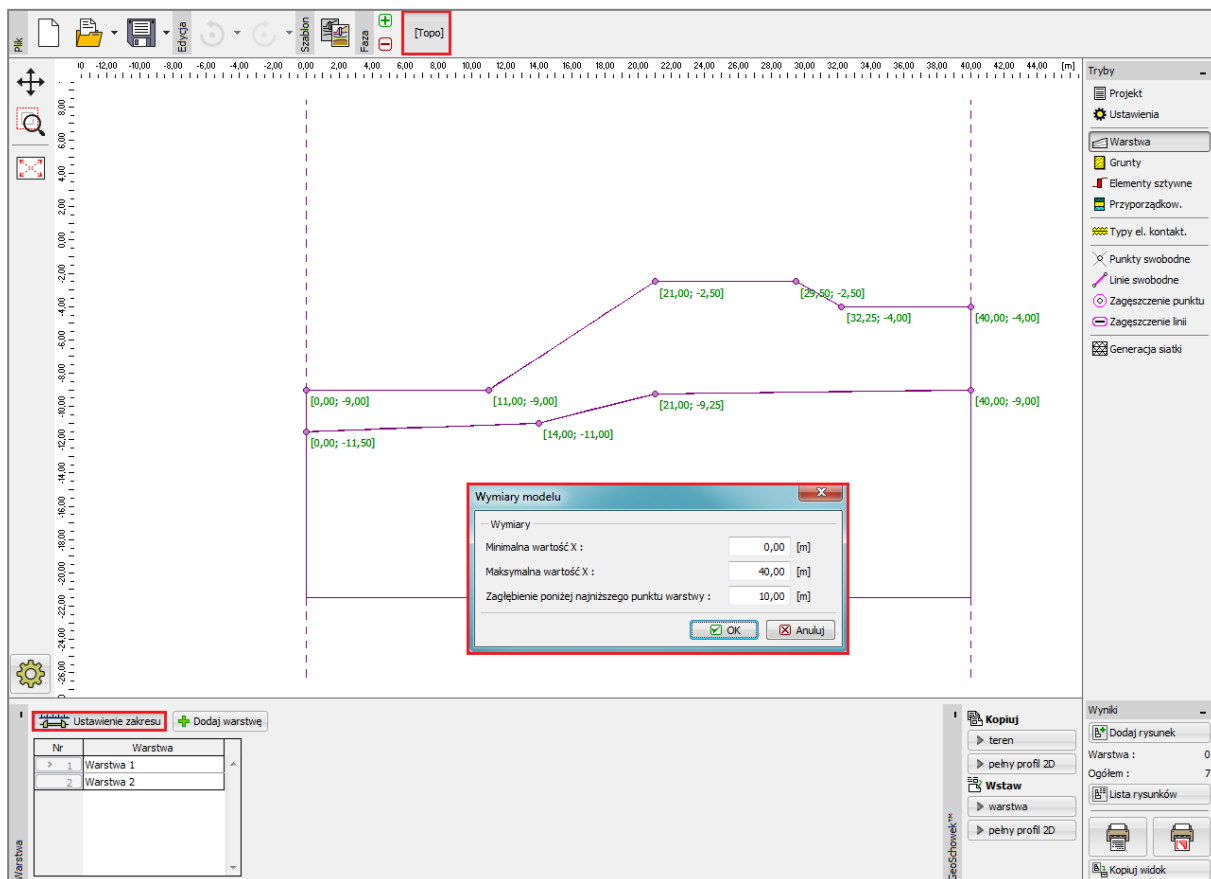


Ramka “Ustawienia”

Uwaga: Definiowanie i rozwijanie modelu w trybie “Stateczność zbocza” wygląda dokładnie tak samo jak w trybie “Napężenie”. Analiza stateczności zbocza przeprowadzana jest po wybraniu przycisku “Oblicz”. Poszczególne analizy stateczności zbocza w kolejnych fazach obliczeniowych są całkowicie niezależne i nie mają związku z poprzednimi fazami i wykonanymi wcześniej obliczeniami (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

Następnie zdefiniujemy wymiary modelu. Należy przyjąć wystarczająco duże wymiary modelu, aby zadane warunki brzegowe nie miały wpływu na wyniki obliczeń. Dla analizowanego zadania przyjmujemy zakres modelu $\langle 0\text{ m}; 40\text{ m} \rangle$ oraz zagłębienie poniżej najniższego punktu warstwy 10.0 m.

Kolejnym krokiem będzie zdefiniowanie punktów warstw poszczególnych wydzielen geotechnicznych zgodnie z danymi zawartymi w poniższej tabeli.



Okno dialogowe "Wymiary modelu"

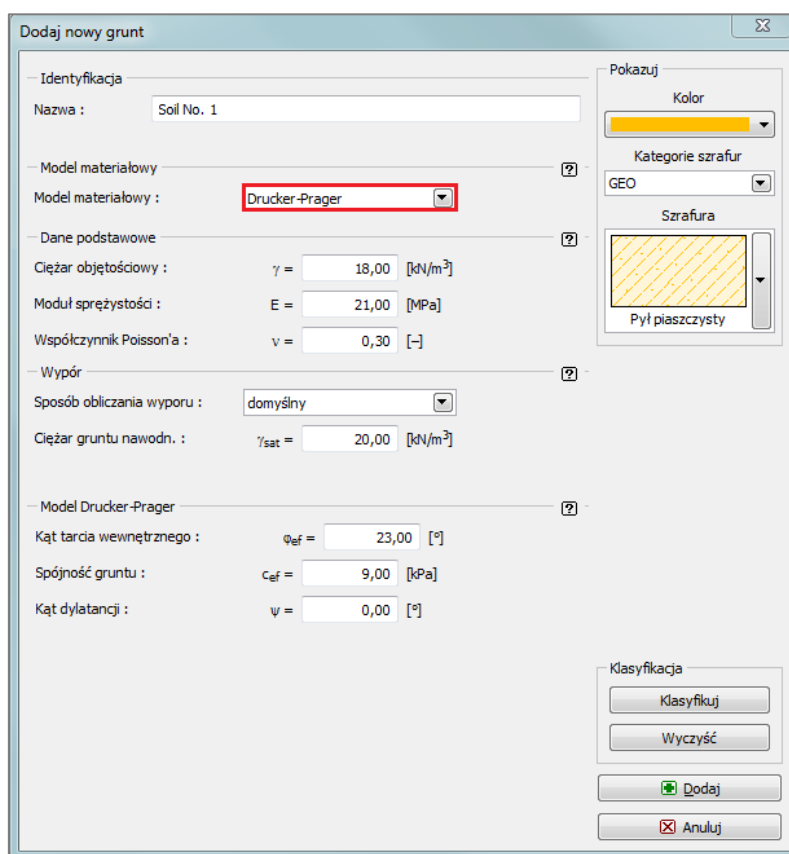
| | warstwa nr 1 | | warstwa nr 2 | |
|---|--------------|-------|--------------|--------|
| | x [m] | z [m] | x [m] | z [m] |
| 1 | 0,00 | -9,00 | 0,00 | -11,50 |
| 2 | 11,00 | -9,00 | 14,00 | -11,00 |
| 3 | 21,00 | -2,50 | 21,00 | -9,25 |
| 4 | 29,50 | -2,50 | 40,00 | -9,00 |
| 5 | 32,25 | -4,00 | | |
| 6 | 40,00 | -4,00 | | |

Współrzędne punktów poszczególnych warstw gruntów

Następnie przejdziemy do definiowania parametrów materiałowych gruntu oraz przyporządkowania ich do utworzonych warstw. Wybierzemy model materiałowy gruntu Druckera-Pragera (więcej informacji – patrz *uwaga*). Przyjmiemy kąt dylatacji ψ dla obydwu warstw gruntu równy zero, co znaczy, że grunt nie ulega zmianie objętości przy ścinaniu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

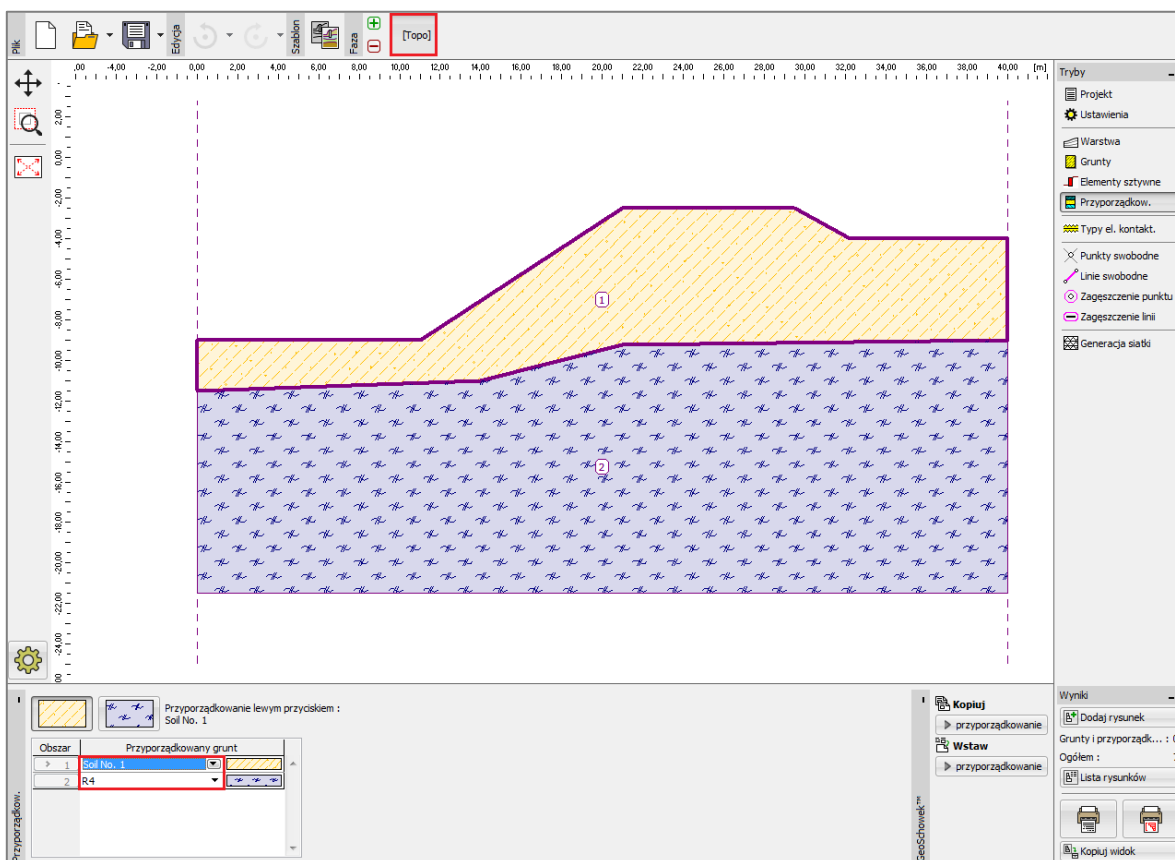
Uwaga: Do analizy stateczności zbocza niezbędne jest przyjęcie nieliniowego modelu materiałowego gruntu, gdyż uwzględnia on możliwość powstania odkształceń plastycznych i bazuje na parametrach wytrzymałościowych gruntów na ścinanie c oraz φ .

Do analizy przedmiotowego przykładu przyjmimy model materiałowy Druckera-Pragera z uwagi na bardziej plastyczne zachowanie gruntu niż w klasycznym modelu Mohra-Coulomba (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1). Porównanie wyników uzyskanych przy zastosowaniu różnych nieliniowych modeli materiałowych gruntu przedstawiono w tabeli na końcu tego przykładu.



Okno dialogowe "Dodaj nowy grunt"

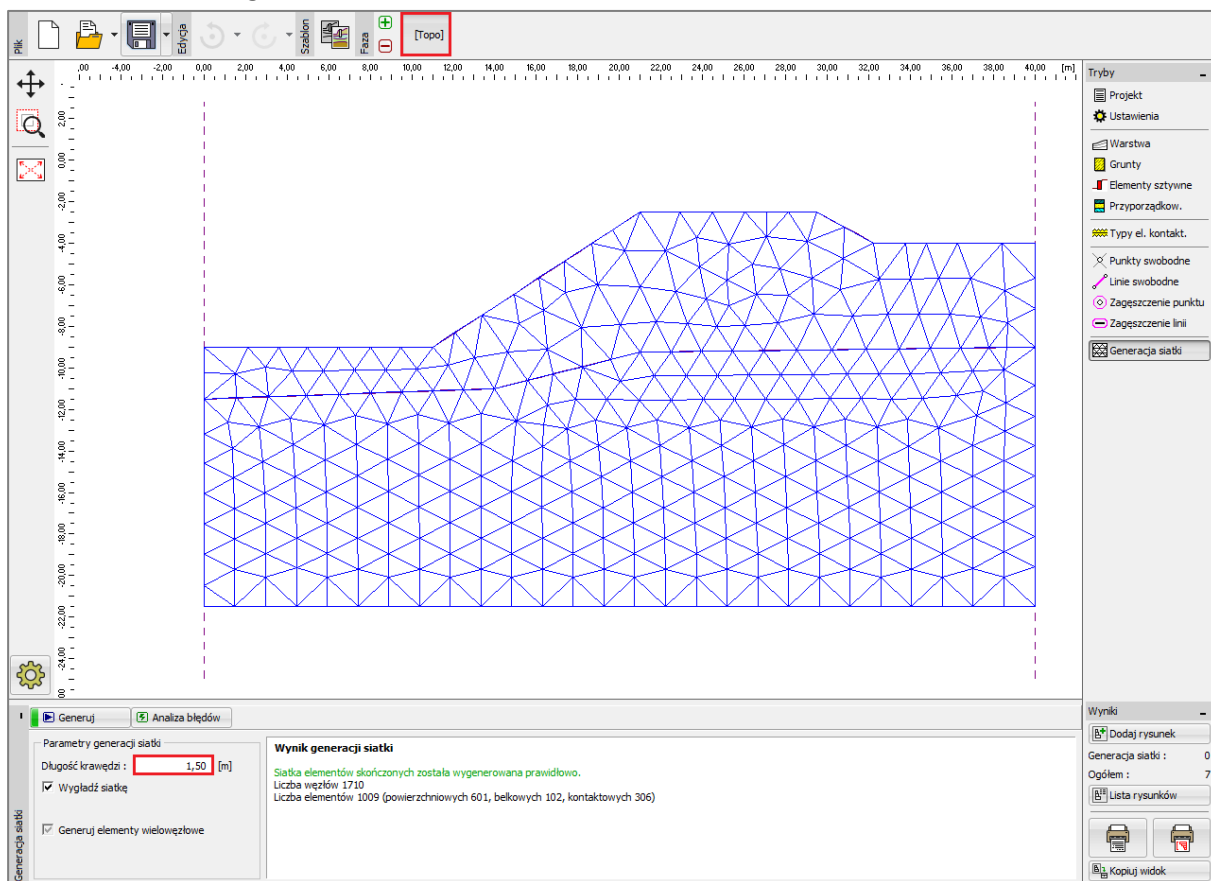
Przedstawiony poniżej rysunek obrazuje przyporządkowanie gruntów do warstw.



Ramka "Przyporządkowanie"

Ostatnim krokiem definiowania topologii zadania jest generowanie siatki elementów skończonych. Gęstość siatki ma istotny wpływ na stateczność zbocza (współczynnik bezpieczeństwa), stąd należy zawsze stosować odpowiednio gęstą siatkę elementów skończonych.

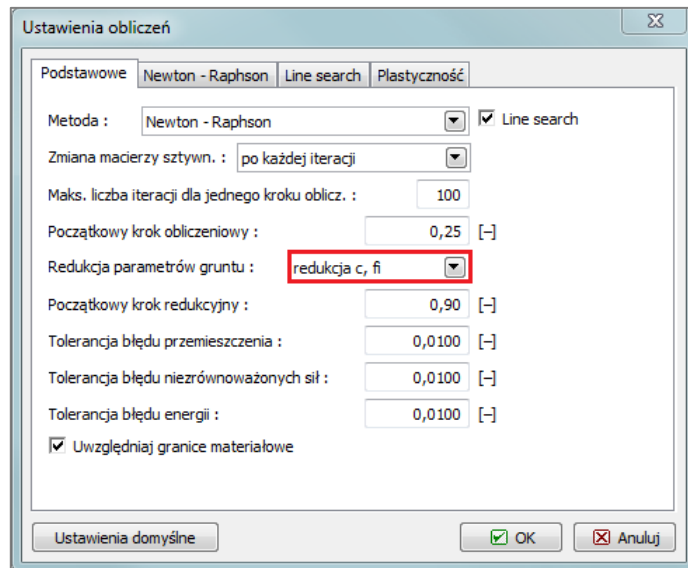
W analizowanym przykładzie wygenerujemy siatkę elementów skończonych o długości krawędzi 1.5 m (naciskając przycisk **“Generuj”**). Wartości współczynnika bezpieczeństwa obliczonego przy pomocy programu GEO 5 MES przy zastosowaniu siatek o długości krawędzi 1.0, 1.5 oraz 2.0 zebrano w tabeli na końcu tego rozdziału.



Ramka “Generacja siatki” – elementy skończone o krawędzi 1.5 m

Faza nr 1: analiza stateczności zbocza (wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa)

Po wygenerowaniu siatki elementów skończonych przejdziemy do fazy nr 1 i przeprowadzimy obliczenia (naciskając przycisk “Oblicz”). Pozostawimy “Ustawienia domyślne” obliczeń.



Okno dialogowe “Ustawienia obliczeń”

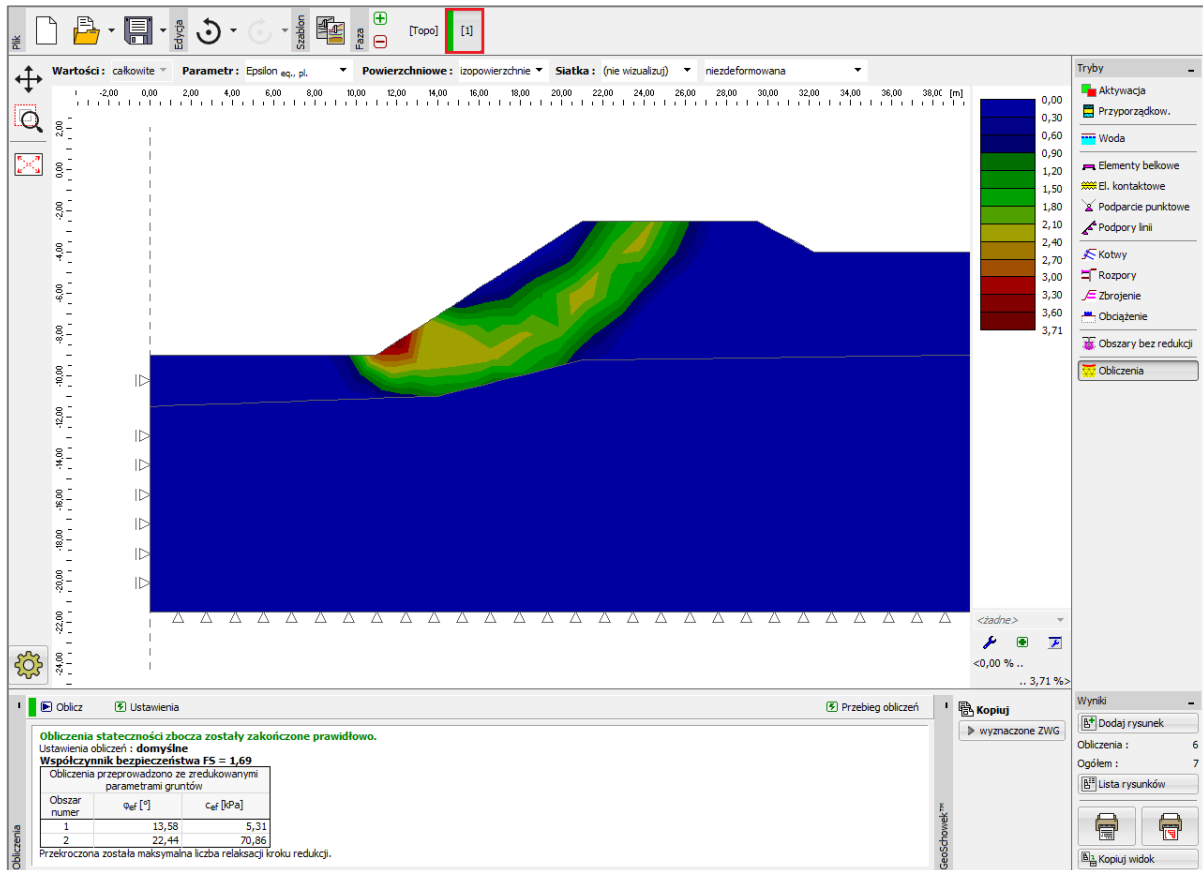
*Uwaga: Obliczenia stateczności zbocza polegają na **redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntów** - kąta tarcia wewnętrznego φ oraz spójności c . Współczynnik bezpieczeństwa definiowany jest w tej metodzie jako parametr, redukujący wartości parametrów φ i c , który prowadzi do utraty stateczności zbocza (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1). Współczynnik bezpieczeństwa stateczności zbocza definiowany jest zatem następującą zależnością:*

$$FS = \tan \varphi^s / \tan \varphi^p$$

gdzie: φ^s – rzeczywista wartość kąta tarcia wewnętrznego,

φ^p – wartość kąta tarcia wewnętrznego powodującego utratę stateczności.

Jedną z danych wyjściowych bardzo przydatną do analizy stateczności zbocza jest mapa wektorów przemieszczenia oraz ekwiwalentnych odkształceń plastycznych $\varepsilon_{eq.,pl.}$. Odkształcenia plastyczne pokazują kształt oraz zasięg potencjalnej powierzchni poślizgu (patrz rysunek).

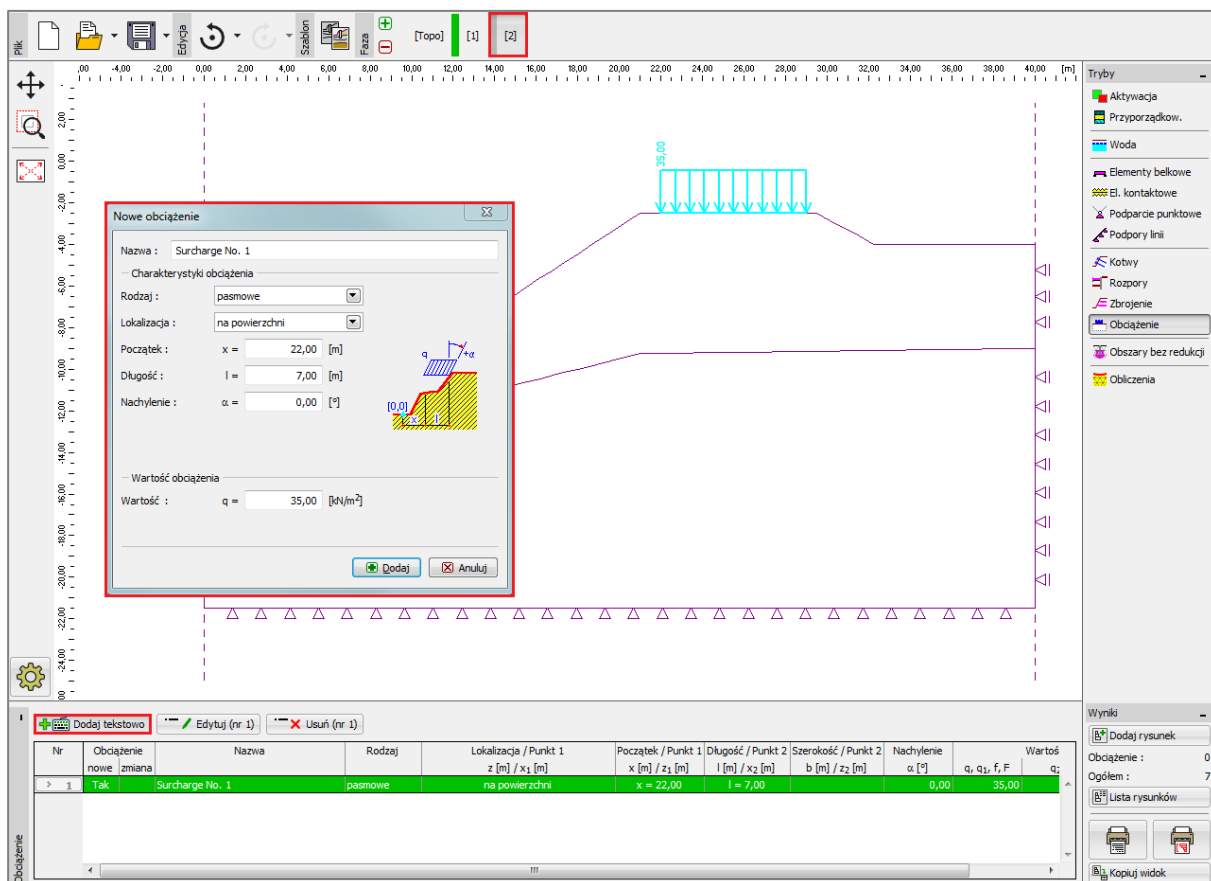


Ramka "Obliczenia" – faza nr 1 (ekwiwalentne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{eq.,pl.}$)

Uwaga: Tryb obliczeń "Stateczność" pozwala na drukowanie w programie map przemieszczeń (w kierunku Z oraz X), a także odkształceń (całkowitych lub plastycznych). Obraz deformacji konstrukcji odpowiada obliczeniom przeprowadzonym przy zredukowanych parametrach gruntów, a zatem nie ma żadnego związku z rzeczywistym odkształceniem – pokazuje jedynie charakter zachowania zbocza w momencie zniszczenia (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

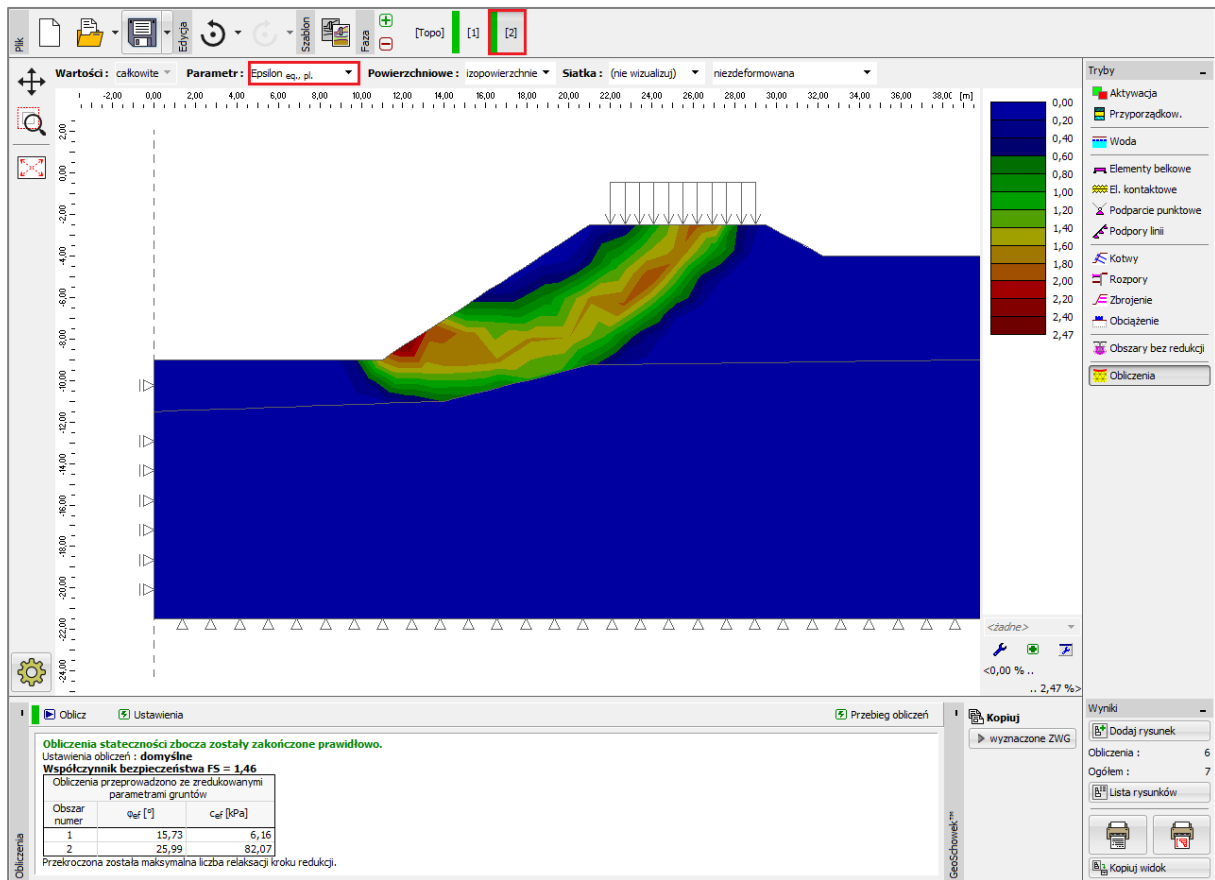
Faza nr 2: definiowanie obciążenia, analiza stateczności zbocza

W tym etapie obliczeń przejdziemy najpierw do ramki "Obciążenie", w której zdefiniujemy następujące parametry – charakterystyki oraz wartość obciążenia.



Okno dialogowe "Nowe obciążenie" – faza nr 2

Następnie przeprowadzimy obliczenia w fazie nr 2 i przejdziemy do analizy mapy ekwiwalentnych odkształceń plastycznych.



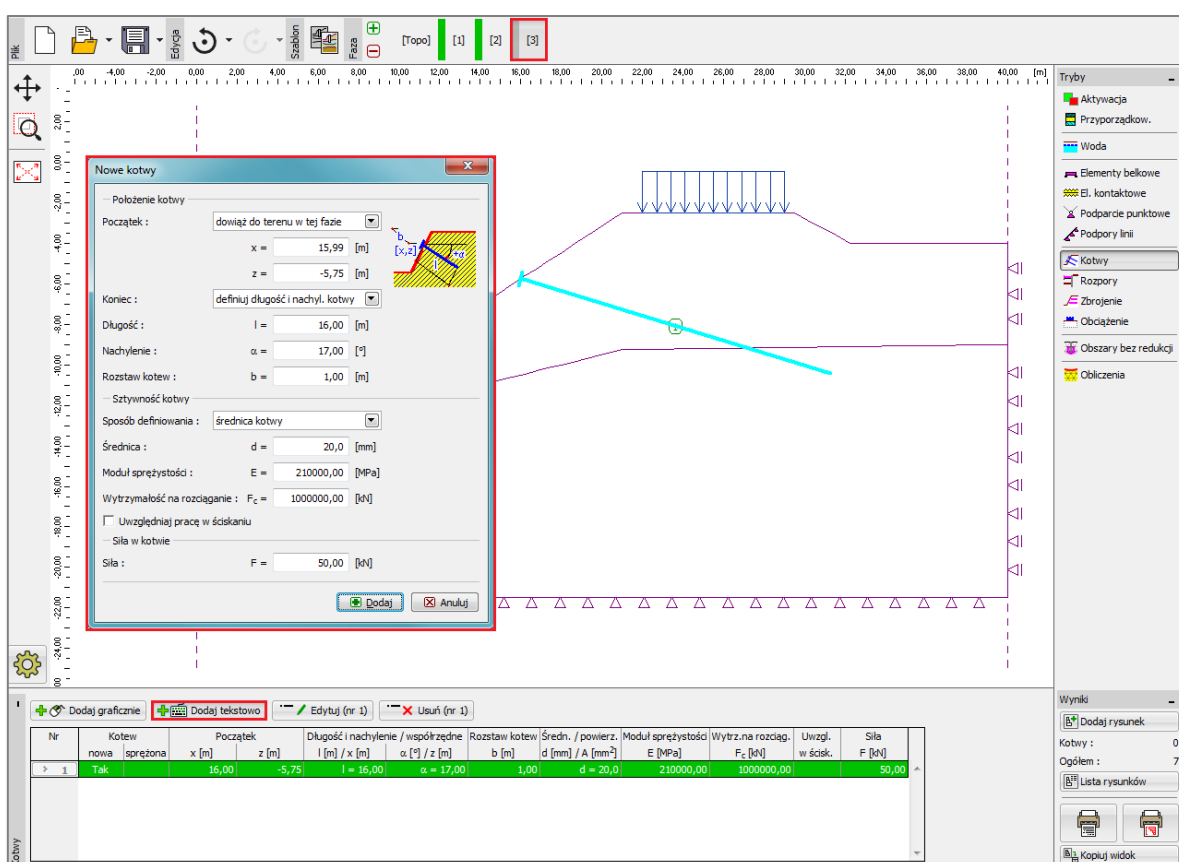
Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (ekwiwalentne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{eq,pl}$)

Faza nr 3: stabilizacja zbocza za pomocą kotew, analiza stateczności zbocza

Dodamy teraz fazę obliczeń nr 3, a następnie w ramce “Kotwy” wybierzemy przycisk “Dodaj tekstowo” i zdefiniujemy w oknie dialogowym “Nowe kotwy” kotwy o sile sprężającej $F = 50 \text{ kN}$.

Przyjmijmy następujące parametry kotew:

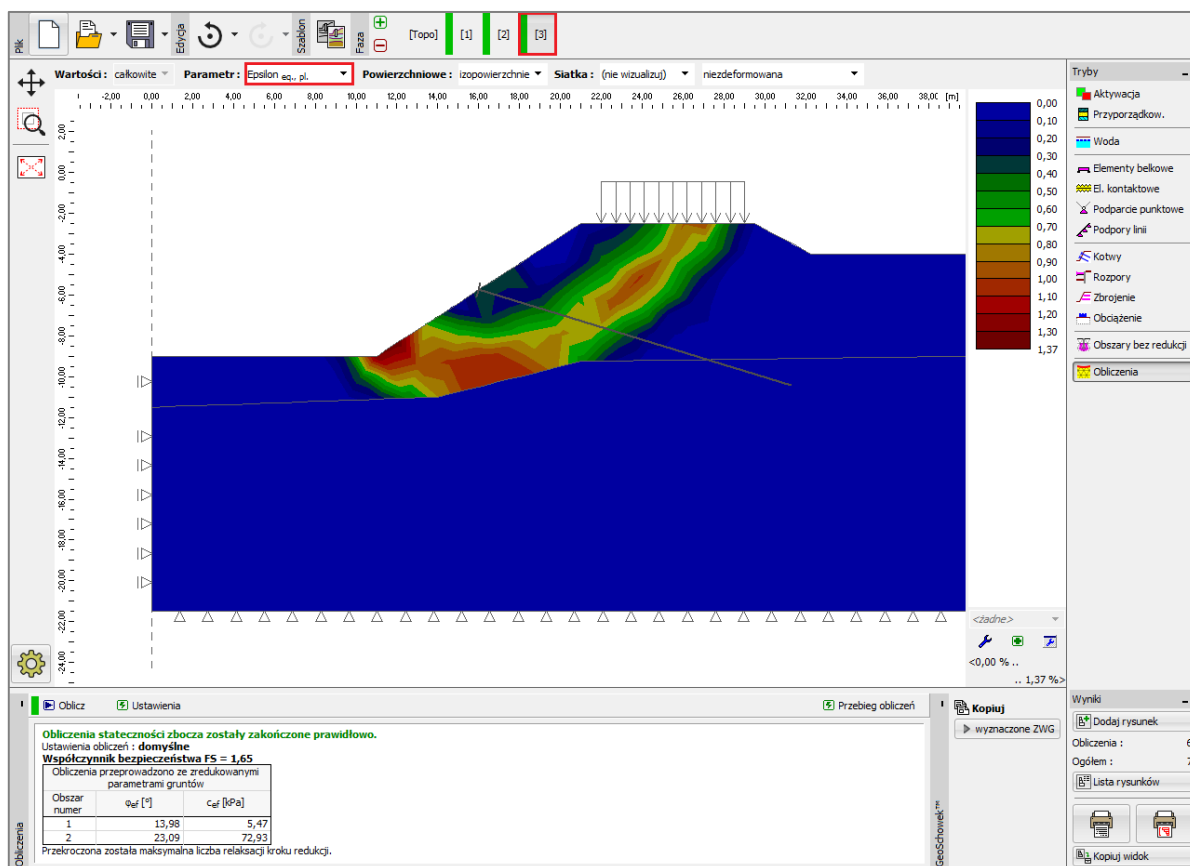
- Długość kotwy: $l = 16 \text{ m}$,
- Kąt nachylenia: $\alpha = 17^\circ$,
- Średnica kotwy: $d = 20 \text{ mm}$,
- Rozstaw kotew: $b = 1 \text{ m}$.



Okno dialogowe “Nowe kotwy” – faza nr 3

Uwaga: Podczas obliczeń stateczności zbocza kotwy gruntowe modelowane są jako obciążenie siłą sprężającą przyłożone do głowicy kotwy – sztywność kotwy nie ma żadnego wpływu na obliczenia stateczności. Niemniej jednak grunt w okolicy głowicy kotwy może się uplastyczyć. Należy zatem po zakończeniu obliczeń przeanalizować położenie oraz możliwość faktycznego powstania odkształceń plastycznych w danym miejscu odzwierciedlających powierzchnię poślizgu. W przypadku uplastycznienia gruntu poniżej głowicy kotwy należy zmodyfikować model (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

Pozostałe parametry wejściowe nie ulegają zmianie. Przeprowadzimy teraz obliczenia w fazie nr 3 i przejdziemy do analizy wyników (podobnie jak w poprzednich fazach obliczeniowych).

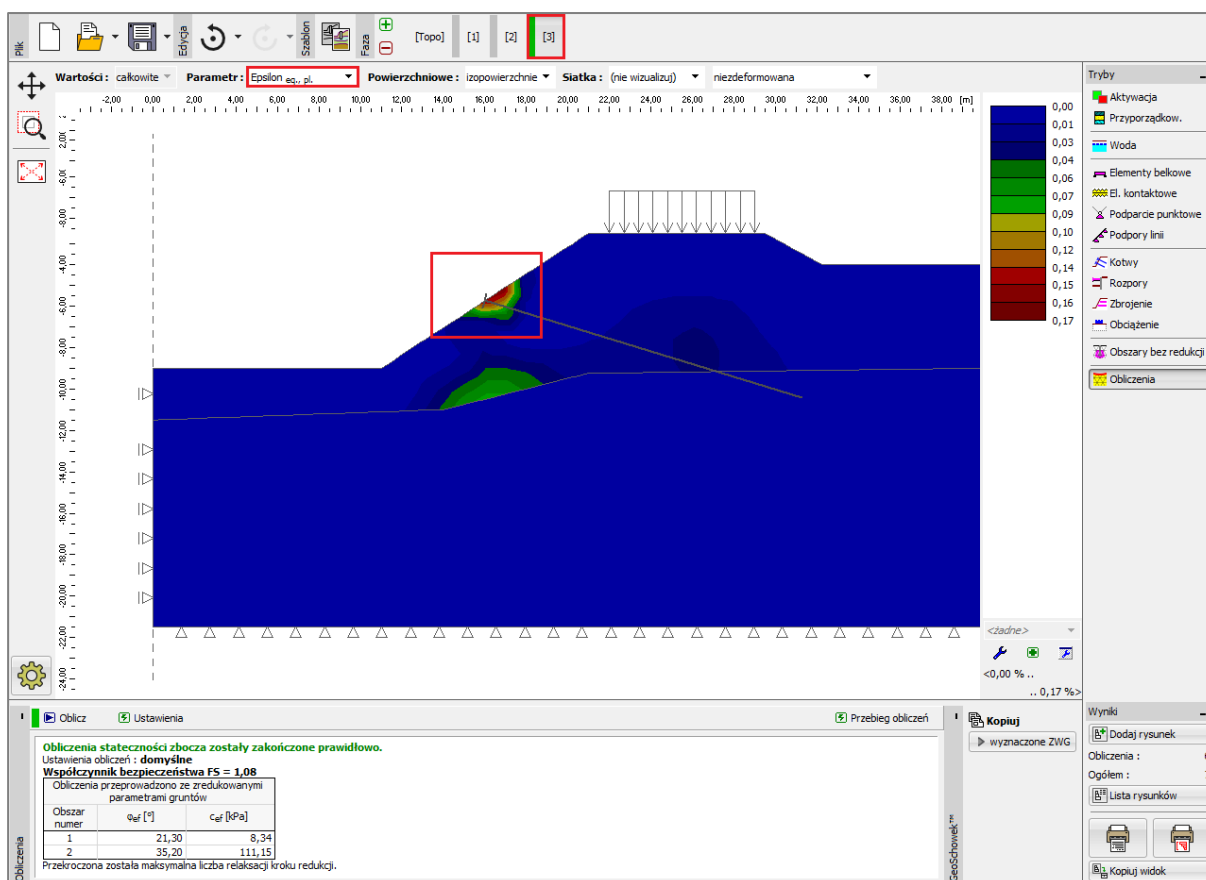


Ramka "Obliczenia" – faza nr 3 (ekwiwalentne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{eq., pl.}$)

Wykonaliśmy wszystkie kroki rozwiązania tego zadania. Wartości współczynnika bezpieczeństwa w kolejnych fazach obliczeniowych zapiszemy w tabeli, a następnie przeprowadzimy takie same obliczenia z zastosowaniem innych modeli materiałowych gruntu (model Mohra-Coulomba oraz Modyfikowany Mohra-Coulomba).

Uwaga: Sprawdzenie kształtu powierzchni poślizgu jest w niektórych przypadkach bardzo istotne, ponieważ do lokalnego zniszczenia konstrukcji może dojść w innych miejscach niż przewidywane (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1). Na poniższym rysunku można zauważyć powstawanie strefy gruntu uplastycznionego w pobliżu głowicy kotwy przy obliczeniach z wykorzystaniem modelu Druckera-Pragera i siatki elementów skończonych o krawędzi 1.0 m. Jeżeli dochodzi do takiej sytuacji warto zmodyfikować istniejący model, co można zrobić w następujący sposób:

- zwiększyć długość krawędzi elementów skończonych,
- wprowadzić w pobliżu głowicy kotwy grunt o zwiększonych wartościach parametrów wytrzymałościowych φ oraz c ,
- wprowadzić element belkowy w miejscu głowicy kotwy (lepsze przekazanie obciążenia na grunt)
- zastosować obszar bez redukcji parametrów gruntowych (więcej informacji – Przewodnik Inżyniera nr 35 Obszary bez redukcji parametrów)



Ramka "Obliczenia" – faza nr 3 (uplastyczniony obszar gruntu poniżej głowicy kotwy, model materiałowy Druckera-Pragera z siatką elementów skończonych o krawędzi 1.0 m)

Analiza wyników

Przedstawiona poniżej tabela zawiera wartości współczynnika bezpieczeństwa stateczności zbocza w kolejnych fazach obliczeniowych. Obliczenia przeprowadzone zostały przy zastosowaniu wybranych nieliniowych modeli materiałowych gruntu dostępnych w programie GEO5 MES oraz przy różnych gęstościach siatki ES. W celach porównawczych przedstawione zostały dodatkowo wyniki otrzymane w programie GEO5 Stateczność zbocza (obliczenia według Bishopa i Spencera).

| Model materiałowy | Siatka ES [m] | Faza 1 <i>FS</i> | Faza 2 <i>FS</i> | Faza 3 <i>FS</i> | Uwagi |
|---------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|
| DP | 1.0 | 1.67 | 1.44 | 1.03 * | * Grunt poniżej głowicy uległ uplastycznieniu. |
| DP | 1.5 | 1.69 | 1.46 | 1.65 | |
| DP | 2.0 | 1.74 | 1.48 | 1.69 | |
| MC | 1.0 | 1.56 | 1.35 | 0.90 * | * Grunt poniżej głowicy uległ uplastycznieniu. |
| MC | 1.5 | 1.58 | 1.35 | 1.56 | |
| MC | 2.0 | 1.60 | 1.41 | 1.56 | |
| MCM | 1.0 | 1.78 | 1.56 | 1.14 * | * Grunt poniżej głowicy uległ uplastycznieniu. |
| MCM | 1.5 | 1.81 | 1.54 | 1.78 | |
| MCM | 2.0 | 1.85 | 1.60 | 1.81 | |
| BISHOPA (rozwiązanie analityczne) | --- | 1.51 | 1.33 | 1.47 | patrz poniżej |
| SPENCERA (rozwiązanie analityczne) | --- | 1.51 | 1.32 | 1.52 | patrz poniżej |

Podsumowanie wyników – stateczność zbocza (współczynnik bezpieczeństwa)

Uwaga: Do analizy przyjęto zestaw ustawień obliczeń "Standardowe – współczynniki bezpieczeństwa". Przeprowadzono następnie obliczenia według metody Bishopa i Spencera z optymalizacją kołowej powierzchni poślizgu (bez ograniczeń).

Wnioski

Wyniki obliczeń pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Lokalne zagęszczenie siatki ES prowadzi do uzyskiwania dokładniejszych wyników obliczeń, ale wydłuża się czas obliczeń każdej fazy.
- Konieczne jest zastosowanie do obliczeń nieliniowego modelu materiałowego gruntu, co pozwala na powstawanie odkształceń plastycznych.
- Maksymalne ekwiwalentne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{eq.,pl.}$ odzwierciedlają obszary potencjalnego zniszczenia, czyli położenie powierzchni poślizgu.
- Model gruntu Druckera-Pragera pozwala na bardziej plastyczne zachowanie gruntu niż klasyczny model Mohra-Coulomba.