

Stateczność zbocza skalnego – klin skalny

Program: Stateczność zbocza skalnego

Plik powiązany: Demo_manual_28.gsk

Celem niniejszego przewodnika jest przedstawienie analizy stateczności zbocza skalnego zbudowanego z zaburzonych sejsmicznie skał średniej i wysokiej wytrzymałości zlokalizowanego w wykopie.

Analizowana wychodnia skalna charakteryzuje się licznymi uskokami i ciosami tektonicznymi, które przestrzennie układają się w kliny skalne o wątpliwej stateczności.

Opis zadania

Problem omawianej wychodni skalnej pojawił się podczas prowadzenia prac odkrywkowych przy budowie dwutorowego tunelu kolejowego Votice umiejscowionego w skale rodzimej z okresu paleozoiku. Struktura skały posiada liczne ciosy wypełnione mikroskopijnymi fragmentami granitu, aplitu oraz granitu amfiboliczno-biotyticznego (najczęściej występujące rodzaje skał w Czechach).

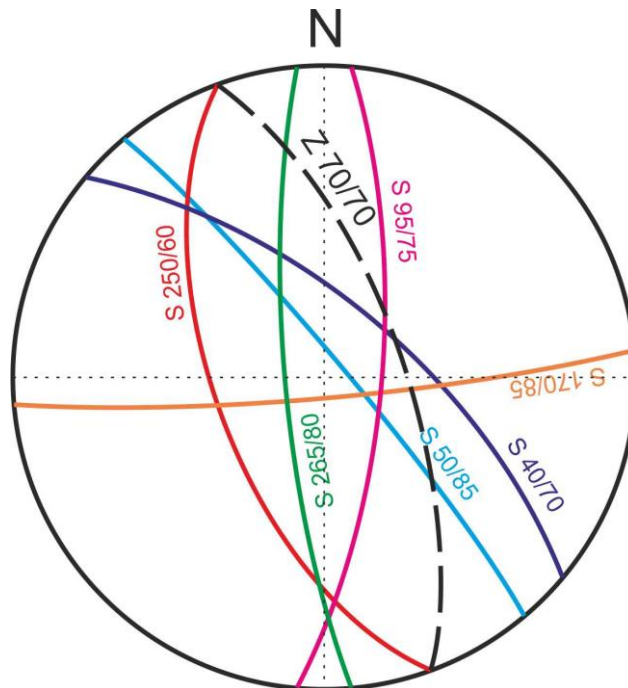
Analizowana wychodnia skalna jest stosunkowo typowa, ale charakteryzuje się niekorzystnym układem nieciągłości (spękań), które negatywnie wpływają na stateczność ściany skalnej tworząc powierzchnie poślizgu i mogą doprowadzić do osunięcia się klinów skalnych (Rys. 1).



Rysunek 1: Zachodnia ściana odkrywki, fot. L. Marik

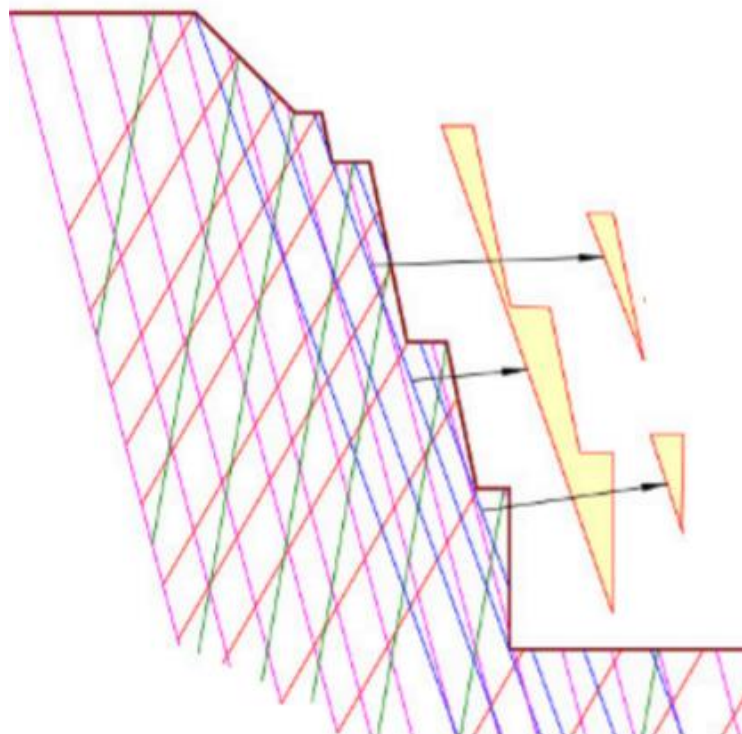
Przeprowadzone rozpoznanie geotechniczne pozwoliło ustalić, że stateczność zbocza skalnego jest zagrożona przez trzy lub cztery układy uskoków oraz ciosów tektonicznych. Masyw skalny jest rozdrobniony i występuje w postaci szerokiego spektrum mniejszych fragmentów skał i bloków skalnych aż po głązy, których rozmiar sięga nawet kilku metrów.

Zrzutowe uskoki skalne (powierzchnie poślizgu) tworzą ze zboczem kąt ostry mniejszy od 45° a nachylenie zbocza skalnego wynosi od 65° do 80° w kierunku wschodnim (Rys. 2).



Rysunek 2: Wykres przedstawiający najczęstsze nieciągłości w odwzorowaniu Lamberta, Z 70/70 (kierunek nachylenia/nachylenie) obrazuje orientację ściany skalnej.

Przedstawiona powyżej niekorzystna orientacja nieciągłości wpłynęła na projektowaną technologię wykonania wykopu ze względu na szerokie niestabilne kliny skalne zsuwające się po zboczu (Rys. 3). Przed rozpoczęciem robót nie można było przewidzieć układu nieciągłości.



Rysunek 3: Główne płaszczyzny poślizgu i ciosy oraz przekrój poprzeczny przez wykop

Niekorzystna sytuacja zbocza wykopu wymusiła konieczność zaprojektowania konstrukcji stabilizującej zbocze – zabezpieczenie aktywnego klina skalnego. Niniejszy Przewodnik Inżyniera przedstawia sposób zabezpieczenia omawianego zbocza.

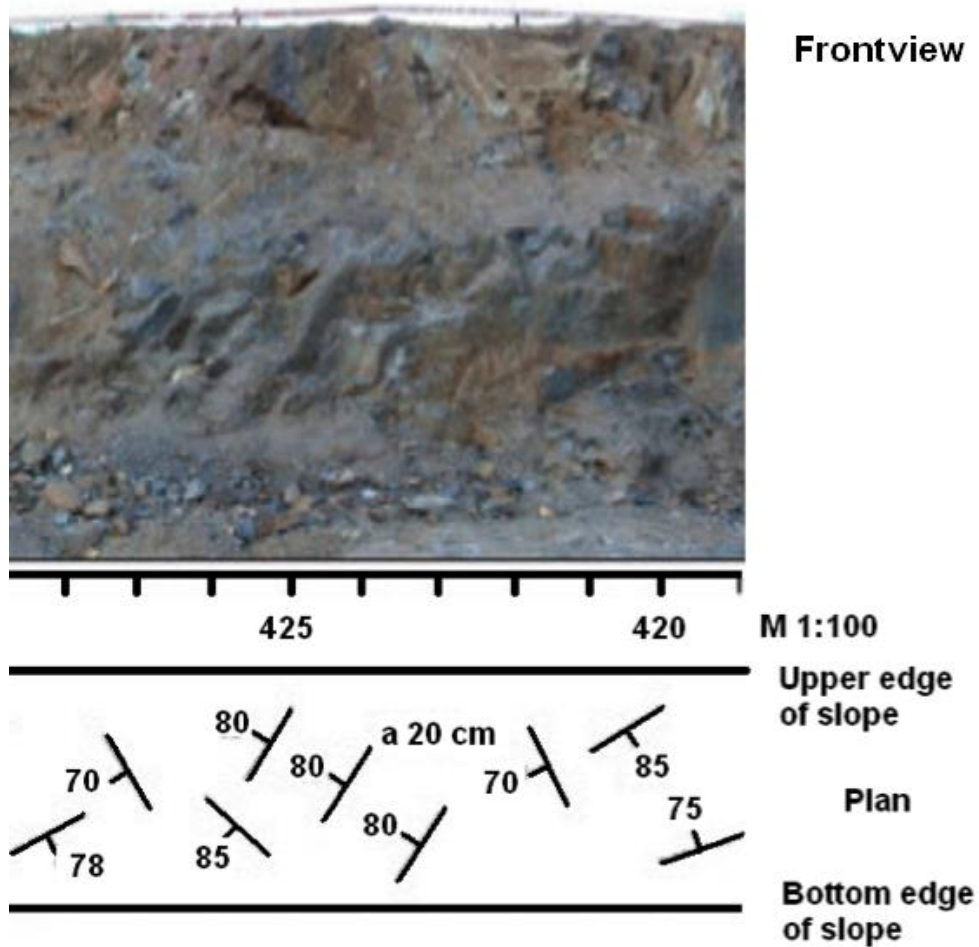
Uwaga: Każdy naturalny masyw skalny zawiera układ co najmniej dwóch głównych typów nieciągłości mających wpływ na stateczność zbocza skalnego. Jeżeli masyw skalny został osłabiony kilkoma powierzchniami nieciągłości o różnych orientacjach, to ich charakter jest kluczowy do oceny stateczności ogólnej zbocza (mechanizmu zniszczenia oraz utraty stateczności).

Ustawienia

Projekt zabezpieczenia niestatecznego klina skalnego 3D przedstawiony zostanie w dalszej części niniejszego Przewodnika na przykładzie wybranego przekroju poprzecznego wykopu realizowanego w celu wykonania portalu tunelu. Do obliczeń przyjęto czas zabezpieczenia jako 100 lat oraz współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 1.5.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania geotechnicznego, pobrane próbki granitu oraz aplitu zakwalifikowane zostały jako wytrzymałe skały klasy R2 oraz R3 (zgodnie z ČSN 73 6133) i mają następujące parametry mechaniczne: $\sigma_c = 15 - 60$ MPa, ciężar objętościowy $\gamma = 27$ kN/m³, efektywny kąt tarcia wewnętrznego $\varphi' = 32 - 42$ °, spójność efektywną $c' = 100 - 150$ kPa, współczynnik Poissona $\nu = 0.20$ oraz moduł odkształcenia $100 - 200$ MPa. Jak widać, część parametrów mechanicznych wskazuje na bardzo dobre właściwości odkształceniowe skał zbadane na małych próbkach, jednakże ogólna wytrzymałość masywu skalnego jest duża niższa ze względu na istotne osłabienie masywu przez spękania (efekt skali). Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyznach poślizgu może zbliżyć się w skrajnych przypadkach do zera.

Warunki hydrogeologiczne są proste, a woda nie występuje w spękaniach skały. Okazjonalne wycieki pojawiają się podczas silnych opadów deszczu oraz podczas topnienia śniegu. Nie stwierdzono ustalonego zwierciadła wody gruntowej. Orientacja ciosów skalnych została pomierzona przez geologa. Pomierzona orientacja ściany skalnej to Z 180/15 (kierunek nachylenia/nachylenie), a dwie główne płaszczyzny poślizgu mają orientację 20/80 oraz 225/70. Wytrzymałość na ścinanie zbadana w płaszczyźnie poślizgu wynosi odpowiednio $\varphi' = 15$ ° oraz spójność $c' = 5$ kPa.



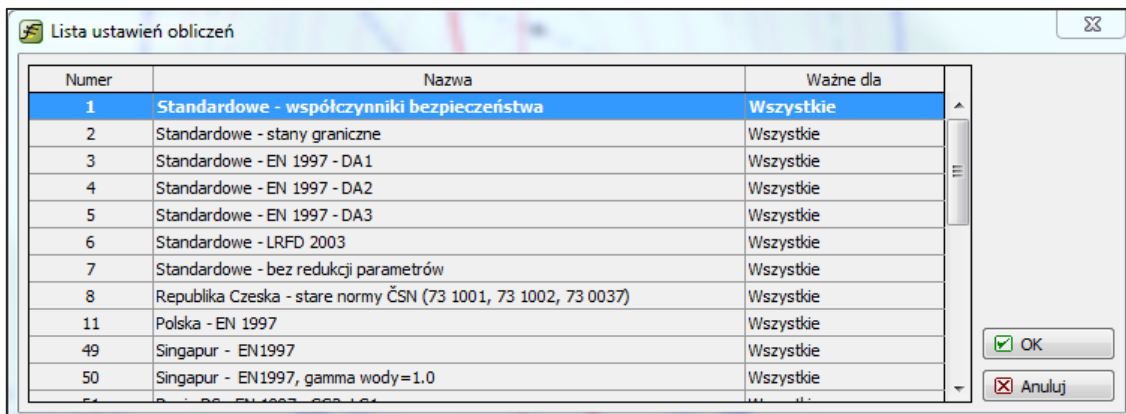
Rozwiązanie

Ocena stateczności zbocza skalnego (klina) w wybranym przekroju poprzecznym oraz jego stabilizacja zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem współczynników bezpieczeństwa (głównie z uwagi na możliwość porównania z obliczeniami wykonanymi ręcznie). Kolejne kroki obliczeń zostały przedstawione w niniejszym Przewodniku.

Ustawienia zadania

Ustawienia obliczeń z uwagi na współczynniki bezpieczeństwa oraz utratę stateczności zbocza

Przechodzimy do ramki "Ustawienia", w której wybieramy przycisk "Wybierz ustawienia", a następnie wybieramy opcję "Współczynniki bezpieczeństwa" jako metodykę obliczeń i potwierdzamy klikając przycisk "OK".



Okno dialogowe "Lista ustawień obliczeń"

Następnie w tym samym oknie wybierzemy jako rodzaj obliczeń opcję "Klin skalny".

Uwaga: Program Stateczność Zbocza Skalnego pozwala na analizę możliwości utraty stateczności zbocza skalnego na skutek poślizgu przy założeniu płaskiej i/lub łamanej powierzchni poślizgu lub też klina skalnego.

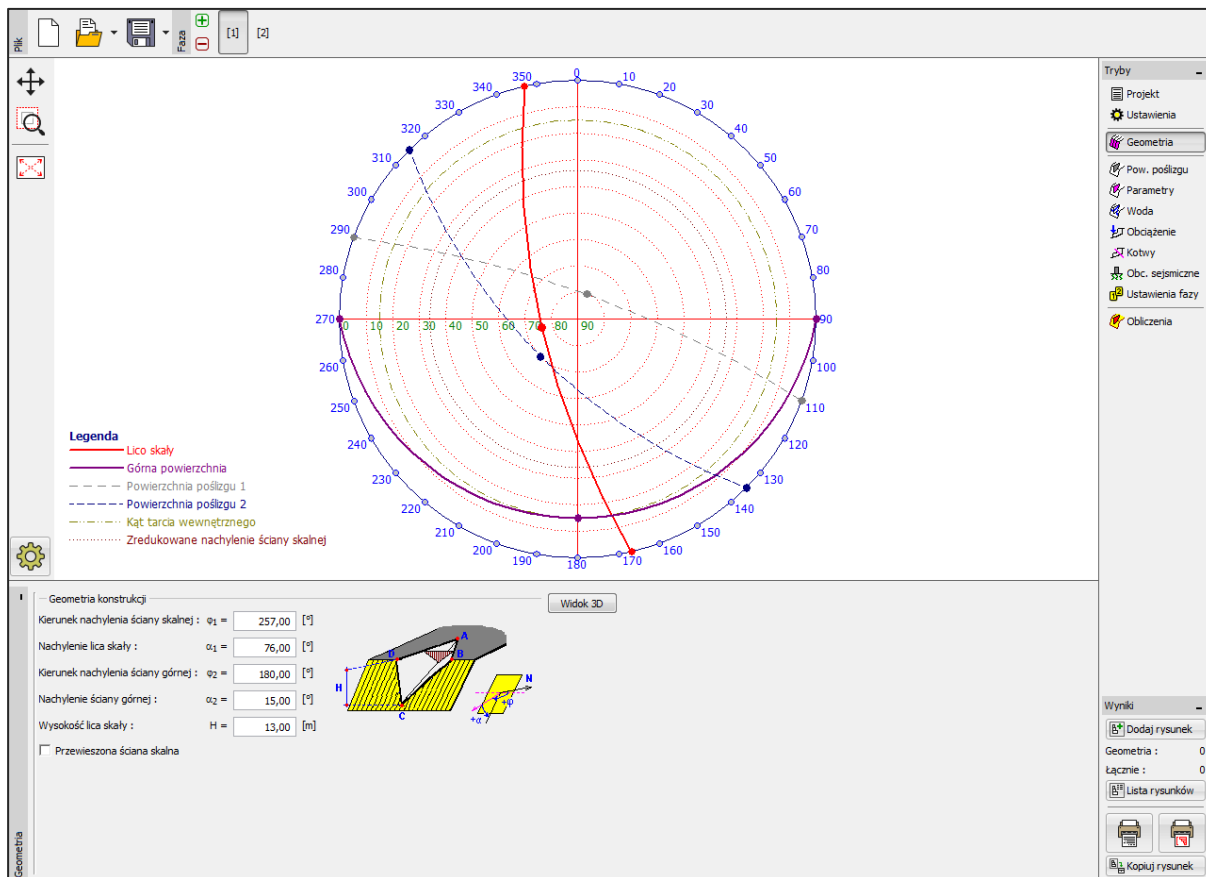
Podstawowa geometria ściany górnej oraz ściany skalnej

Geometria 3D analizowanej ściany górnej (terenu) oraz zbocza wyrobiska (ściany skalnej) jest definiowana w ramce "Teren". Definiowanie zbocza oraz powierzchni terenu odbywa się poprzez wpisanie danych dotyczących kierunku nachylenia oraz nachylenia, które zostały pomierzone podczas rozpoznania geologicznego. Wysokość ściany skalnej wynosi 13m. Wprowadzone płaszczyzny widoczne są w oknie w odwzorowaniu Lamberta – każdy tutek odzwierciedla krzywą przecięcia (projekcję) danej płaszczyzny z dolną półsfery Lamberta po rzutowaniu na płaszczyznę poziomą.

Uwaga: W przypadku, gdy nie zostało przeprowadzone strukturalne rozpoznanie geologiczne skał to parametry płaszczyzny ściany skalnej mogą zostać wyznaczone przez geodetę poprzez podanie współrzędnych przestrzennych trzech punktów dla każdej płaszczyzny (np. 2 punkty na dole zbocza oraz jeden na szczycie zbocza). Innym sposobem jest wykorzystanie taśmy mierniczej oraz fotogrametrii. W bardzo trudnych warunkach istnieje możliwość przybliżonego oszacowania wysokości zbocza poprzez porównanie wysokości człowieka i zbocza.

Geometria konstrukcji (teren oraz ściana skalna)

	Kierunek nachylenia [°]	Nachylenie [°]
Ściana skalna (zbocze)	257	76
Teren (ściana górna)	180	15



Orientacja ściany skalnej oraz powierzchni poślizgu

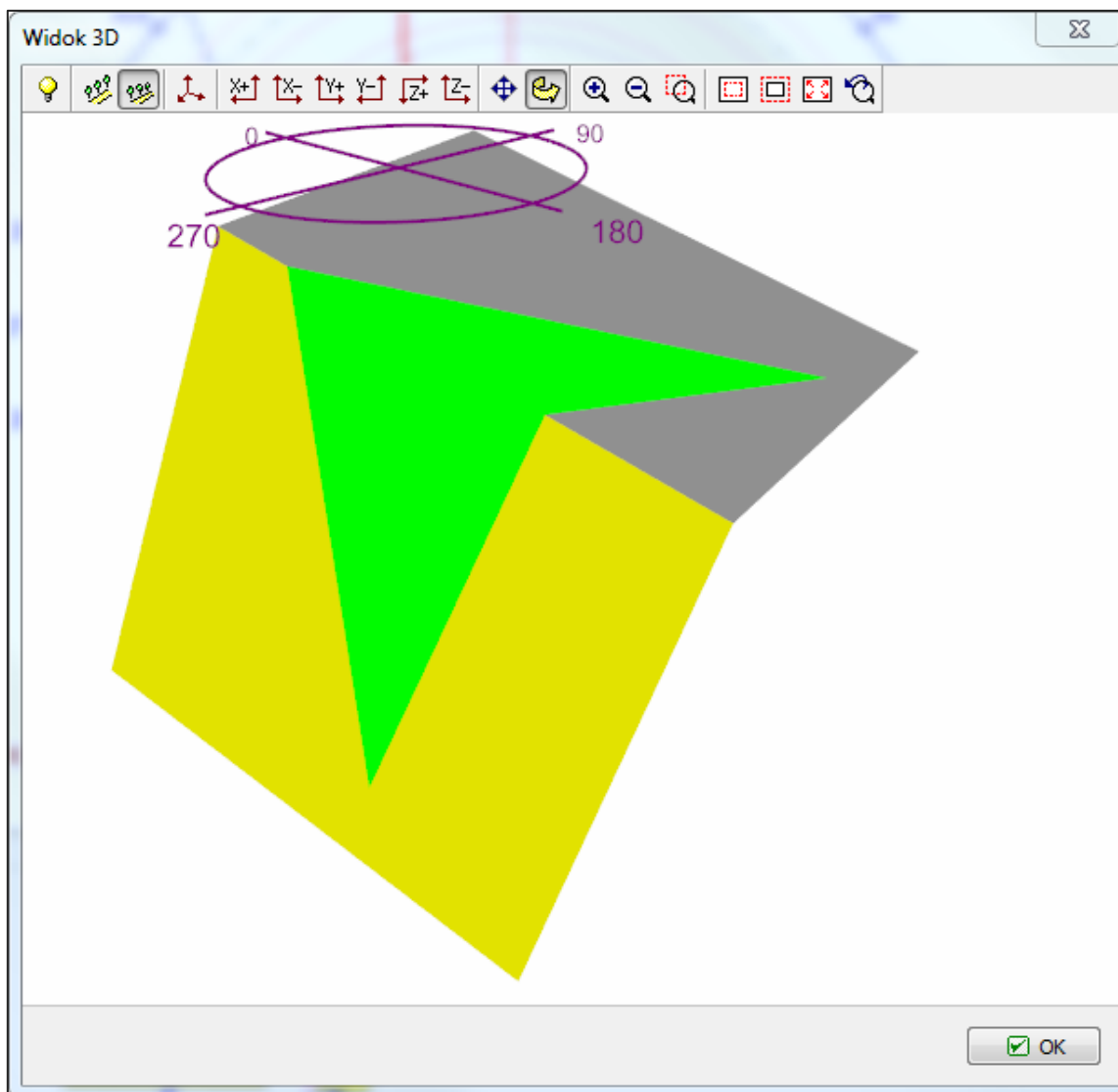
Wprowadzenie powierzchni poślizgu (ścianania)

Orientacja przestrzenna (3D) powierzchni poślizgu (jej geometria) wprowadzana jest w ramce "Powierzchnia Poślizgu". Wprowadzenie orientacji powierzchni poślizgu odbywa się poprzez wpisanie danych dotyczących kierunku nachylenia oraz nachylenia, które zostały pomierzone podczas strukturalnego rozpoznania geologicznego – dane do wprowadzenia podane zostały w poniższej tabeli. Wprowadzanie danych odbywa się poprzez edytor graficzny odzwierciedlający orientację wprowadzonych danych w odwzorowaniu Lamberta.

Geometria powierzchni poślizgu ściany skalnej oraz terenu

	Kierunek nachylenia [°]	Nachylenie [°]
Ściana skalna (zbocze)	20	80
Teren (ściana górna)	225	70

"Widok 3D" jest odpowiednim sposobem na przedstawienie wprowadzonych danych powierzchni poślizgu. Poniższe okno pokazuje opcję obrotu widoku 3D klina skalnego.



Widok 3D klina skalnego w oknie 3D

Uwaga: Przestrzenna orientacja powierzchni poślizgu powiązana jest ściśle ze współrzędnymi geograficznymi. Te współrzędne odnoszą się do geograficznej północy w płaszczyźnie poziomej oraz kierunku działania siły ciężkości w płaszczyźnie pionowej. Orientacja została określona przy pomocy kompasu geologicznego. Główne nieciągłości w masywie skalnym mogą zostać oznaczone przy pomocy pomiarów geofizycznych.

Definiowanie parametrów skały oraz powierzchni poślizgu

Parametry mechaniczne masywu skalnego wprowadza się w ramce "Skała". Należy tutaj podać ciężar objętościowy skały tworzącej masyw oraz parametry powierzchni poślizgu zgodnie z modelem materiału według Mohra-Coulomba. Ciężar objętościowy granitu wynosi $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$, natomiast wytrzymałość na ścinanie zbadana dla obydwu opisywanych wcześniej powierzchni poślizgu wynosi $\varphi' = 15^\circ$ oraz $c' = 5 \text{ kPa}$.

Uwaga: Najprostszym sposobem na zbadanie wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie poślizgu jest ścięcie dwóch fragmentów skały pobranych z masywu (rozdzielonych powierzchnią poślizgu). Pomiar

jest możliwy do wykonania jedynie dla płaskich powierzchni poślizgu bez żadnych deformacji na powierzchni – wystających fragmentów lub zagłębień (fragmentów skał bez kontaktu). Jeżeli powierzchnia poślizgu nie jest płaska, wtedy parametry powinny zostać uzyskane poprzez przeliczenie otrzymanych wyników lub przeprowadzenie trudnych badań terenowych.

Woda

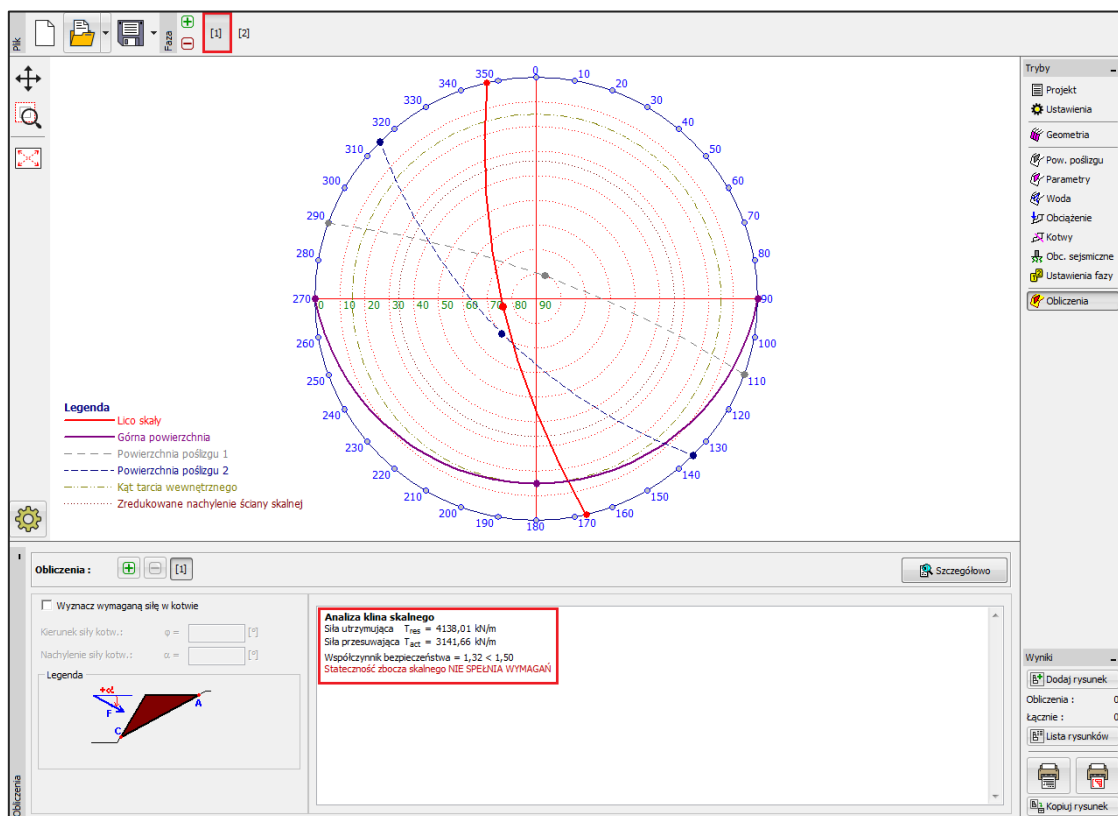
Zwierciadło wody gruntowej wprowadzane jest w ramce “Woda”. Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania hydrogeologicznego nie stwierdzono występowania wody gruntowej.

Ustawienia fazy

W ramce “Ustawienia fazy” wprowadza się ustawienia dotyczące sytuacji obliczeniowej. Biorąc pod uwagę projektowany okres stateczności zbocza skalnego portalu tunelu wynoszący 100 lat do analizy przyjmujemy trwałą sytuację obliczeniową.

Obliczenia

Proces obliczeń rozpoczyna się po wybraniu ikony “Obliczenia”. Podstawowe wyniki obliczeń oraz inne możliwe opcje wyświetlane są w ramce “Obliczenia”. Wyniki szczegółowe obliczeń dostępne są po wybraniu przycisku “Szczegółowo” lub w raporcie z obliczeń. Otrzymano współczynnik bezpieczeństwa o wartości 1.32. Uzyskany współczynnik bezpieczeństwa stateczności klina skalnego nie spełnia założonego poziomu bezpieczeństwa ($F \geq 1.5$). W dłuższej perspektywie czasowej istnieje możliwość lokalnej utraty stateczności masywu skalnego. Biorąc pod uwagę powyższy aspekt należy zaprojektować dodatkowe rozwiązanie techniczne poprawiające poziom stateczności zbocza.



Obliczenia – faza nr 1

Rozwiązanie projektowe poprawiające poziom stateczności zbocza

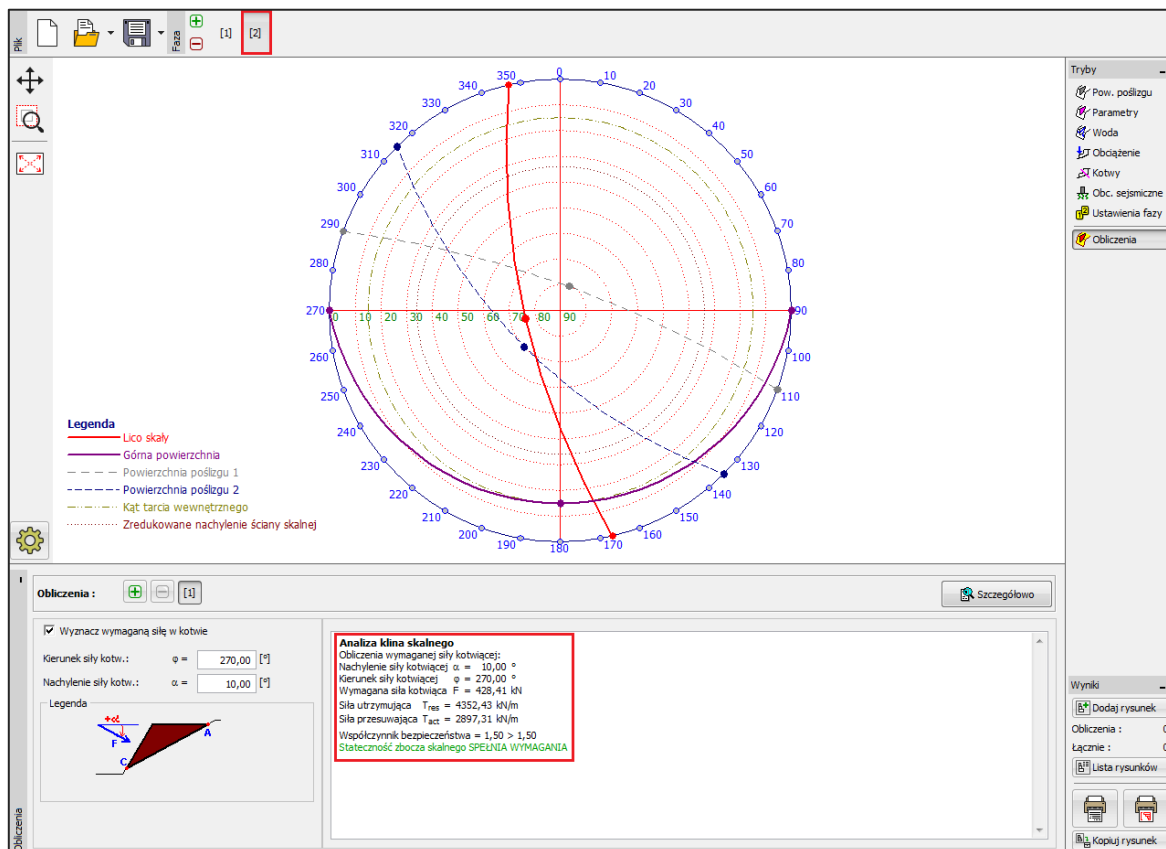
Zwiększenie stateczności klina skalnego jest możliwe poprzez zmianę geometrii zbocza, tj. zmniejszenie jego nachylenia lub zastosowanie wykopów tarasowe. Obydwa rozwiązania niosą za sobą konieczność przeprowadzenia znacznych robót związanych z wykopami oraz wymagają zajęcia dużego obszaru terenu, co czyni propozycję dość kosztowną. Drugą możliwością jest zachowanie obecnego kształtu zbocza oraz zapewnienie stateczności osuwających się klinów skalnych przy pomocy kotew skalnych lub gwoździ. W poniższym fragmencie zaprezentowano drugie z opisywanych rozwiązań.

Kotwy skalne wprowadzone zostaną w drugiej fazie obliczeń – dodajemy następną fazę obliczeń wybierając przycisk “+” w zakładce “Faza”.



Dodawanie kolejnej fazy obliczeń

Przechodząc do ramki “Obliczenia” wybierzemy opcję “Wyznacz wymaganą siłę w kotwie” oraz wprowadzimy kierunek i nachylenie siły w kotwie: kierunek siły wynosi $\varphi = 270^\circ$, a nachylenie siły w kotwie względem poziomu wynosi $\alpha = 10^\circ$. Po wprowadzeniu wymaganych danych program przeprowadza automatycznie obliczenia i podaje wyniki. Dla obliczonej kotwy o nośności 428 kN został uzyskany współczynnik stateczności zbocza na poziomie 1.5.



Szczegółowe wyniki obliczeń w oknie “Obliczenia”

Geometria zbocza pozwala na zastosowanie dla wszystkich kotew takiego samego kierunku oraz nachylenia, a zatem kolejnym krokiem będzie zwymiarowanie odpowiednich kotew skalnych o założonej nośności i obliczenie ich wymaganej liczby (rozstawu). W analizowanym przypadku zastosujemy gwoździe skalne bez dodatkowego sprężenia (gwoździe są iniektowane już podczas wiercenia, system samowiercący). W takich gwoździach mobilizuje się siła o wartości 50 kN bezpośrednio po wykonaniu, a nośność całkowita po 24h wynosi co najmniej 150 kN. Proste obliczenia wskazują, że w celu zabezpieczenia klina skalnego wymagane jest zastosowanie 5. takich kotew, a projektowany rozstaw kotew to 2.5 x 2.5 m. Z uwagi na zwietrzenie masywu skalnego zaleca się zastosowanie dodatkowej siatki przeciwerozrywnej.

Uwaga: W przypadku masywu skalnego z wyraźnie rozgraniczonymi lub zaburzonymi tektonicznie równoległymi warstwami kotwy powinny być wiercone możliwie prostopadle do warstw (minimalny kąt pomiędzy warstwą skały a kotwą powinien wynosić 45°).

Podsumowanie

Początkowy współczynnik bezpieczeństwa stateczności zbocza dla analizowanego klina skalnego wynosił $F=1.32$, co nie było satysfakcjonującym wynikiem. Wymusiło to wdrożenie dodatkowych rozwiązań technicznych zwiększających poziom stateczności zbocza. Ze względów ekonomicznych zdecydowano o zastosowaniu gwoździ skalnych w celu zwiększenia stateczności klina skalnego. W drugiej fazie obliczeń określona została wartość siły w kotwie oraz jej orientacja. Biorąc pod uwagę konieczność ujednoczenia kierunku oraz nachylenia wszystkich kotew w masywie skalnym zaprojektowano/wybrano kotwy skalne odpowiedniego typu i w stosownym rozstawie.