

Analiza obudowy sztolni

Program: MES

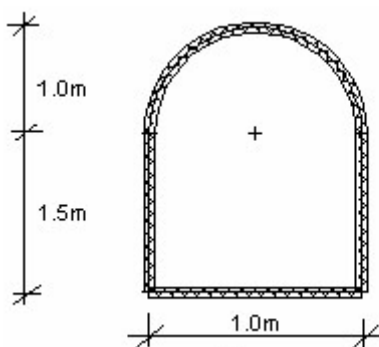
Plik powiązany: Demo_manual_23.gmk

Celem przedmiotowego przewodnika jest przedstawienie analizy sztolni drążonej z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych ze zwróceniem szczególnej uwagi na pracę obudowy sztolni.

Sformułowanie zadania

Określić stan naprężenia i odkształcenia obudowy sztolni drążonej, której wymiary zostały przedstawione na poniższym rysunku. Wyznaczyć siły wewnętrzne w obudowie. Obudowa sztolni o grubości 0.1 m wykonana została z betonu zbrojonego klasy C20/25, a jej dno znajduje się na głębokości 12.0 m. Profil geologiczny gruntu jest jednorodny, a parametry gruntu są następujące:

- Ciężar objętościowy gruntu: $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$
- Moduł sprężystości: $E = 12.0 \text{ MPa}$
- Współczynnik Poissona: $\nu = 0.40$
- Spójność efektywna: $c_{ef} = 12.0 \text{ kPa}$
- Efektywny kąt tarcia wewnętrznego: $\varphi_{ef} = 21.0^\circ$
- Ciężar objętościowy gruntu nawodnionego: $\gamma_{sat} = 22.0 \text{ kN/m}^3$



Schemat ogólny zadania – sztolnia drążona

Stan przemieszczenia oraz siły wewnętrzne w obudowie określimy z wykorzystaniem sprężystego modelu materiałowego gruntu, gdyż nie rozpatrujemy możliwości powstania odkształceń plastycznych w ośrodku. Model gruntu Mohra-Coulomba wykorzystany zostanie następnie do sprawdzenia osiągnięcia przez grunt warunku plastyczności.

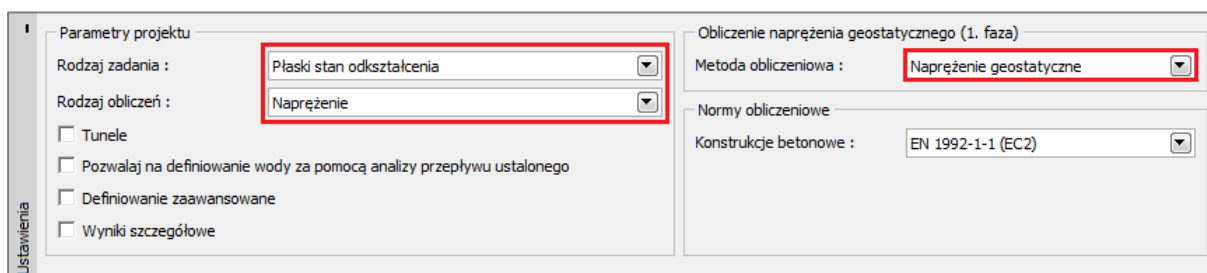
Rozwiązanie

Aby wykonać zadanie skorzystaj z programu MES z pakietu GEO5. Przewodnik przedstawia kolejne kroki rozwiązania tego przykładu:

- Topologia: ustawienia oraz modelowanie zagadnienia (warstwy, punkty oraz linie swobodne – dogęszczanie siatki).
- Faza nr 1: obliczanie naprężeń pierwotnych.
- Faza nr 2: modelowanie elementów belkowych, wyznaczanie przemieszczeń i sił wewnętrznych.
- Analiza wyników: porównanie, wnioski.

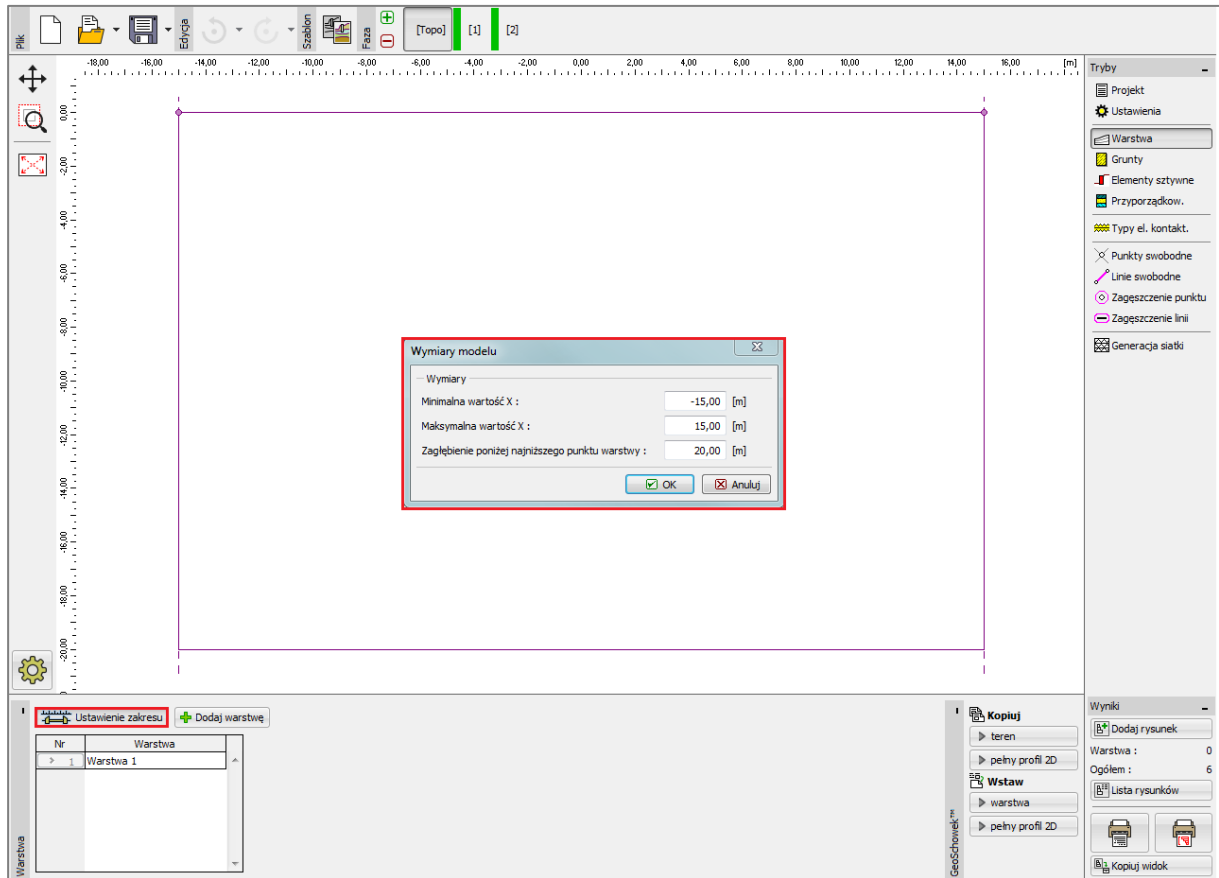
Topologia: ustawienia zadania

Pierwszym krokiem będzie przejście do ramki “Ustawienia”, gdzie wybierzemy metodę obliczania naprężeń geostatycznych do wykonania obliczeń w fazie nr 1. Jako rodzaj zadania wybierzemy opcję *płaski stan odkształcenia*.



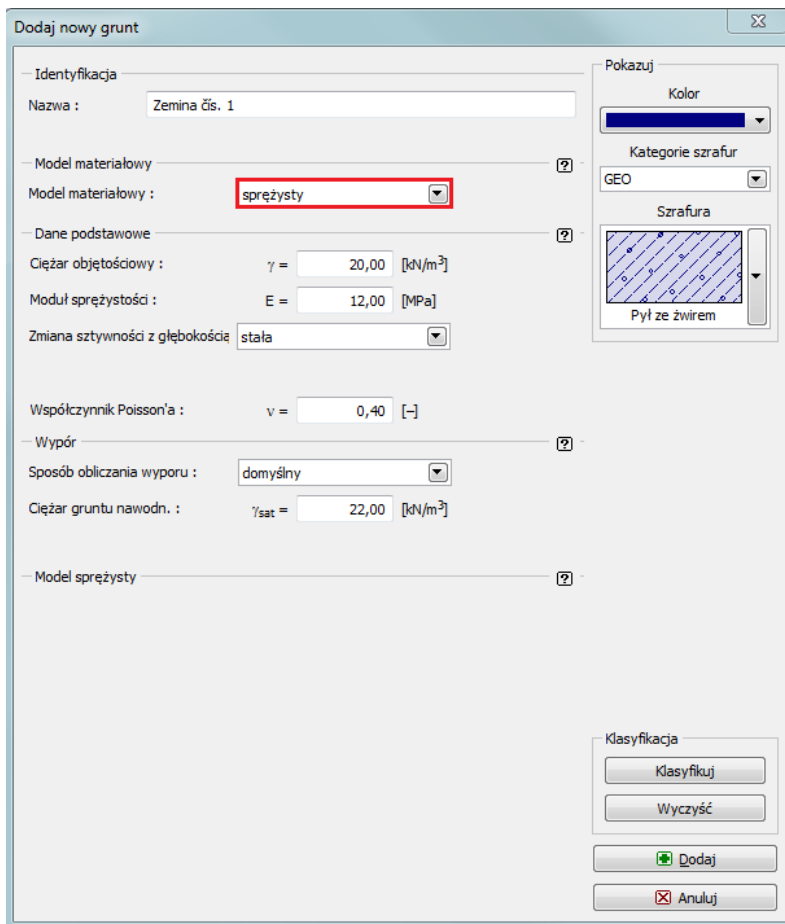
Ramka “Ustawienia”

Następnie wprowadzimy wymiary modelu oraz warstwy. Należy przyjąć wystarczająco duże wymiary modelu, aby zadane warunki brzegowe nie miały wpływu na wyniki obliczeń. Dla analizowanego zadania przyjmijmy zakres modelu $\langle -15\text{ m}; 15\text{ m} \rangle$ oraz zagłębienie poniżej najniższego punktu warstwy jako 20.0 m.



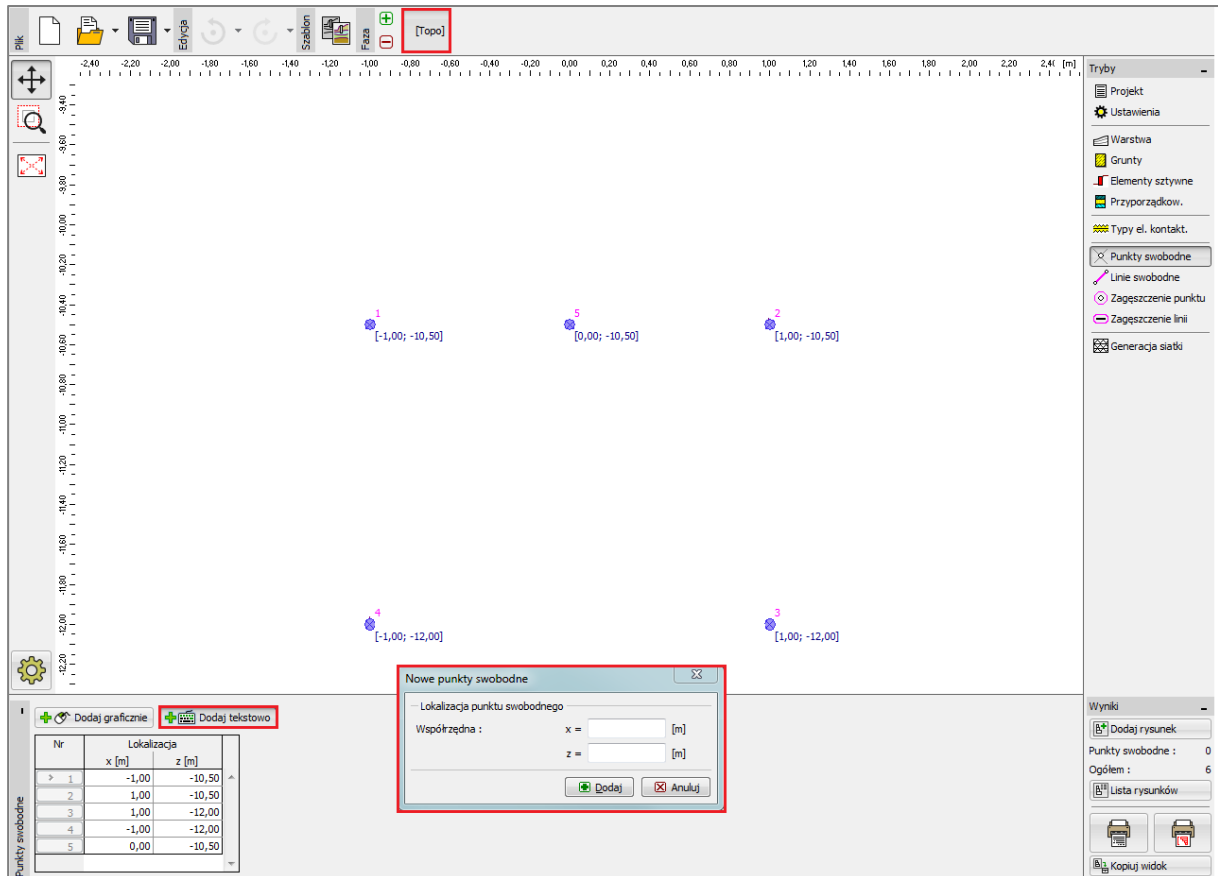
Ramka "Warstwa" + okno dialogowe "Wymiary modelu"

Kolejnym krokiem będzie wybór modelu i wprowadzenie parametrów materiałowych gruntu oraz przyporządkowanie go do utworzonego obszaru warstwy (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



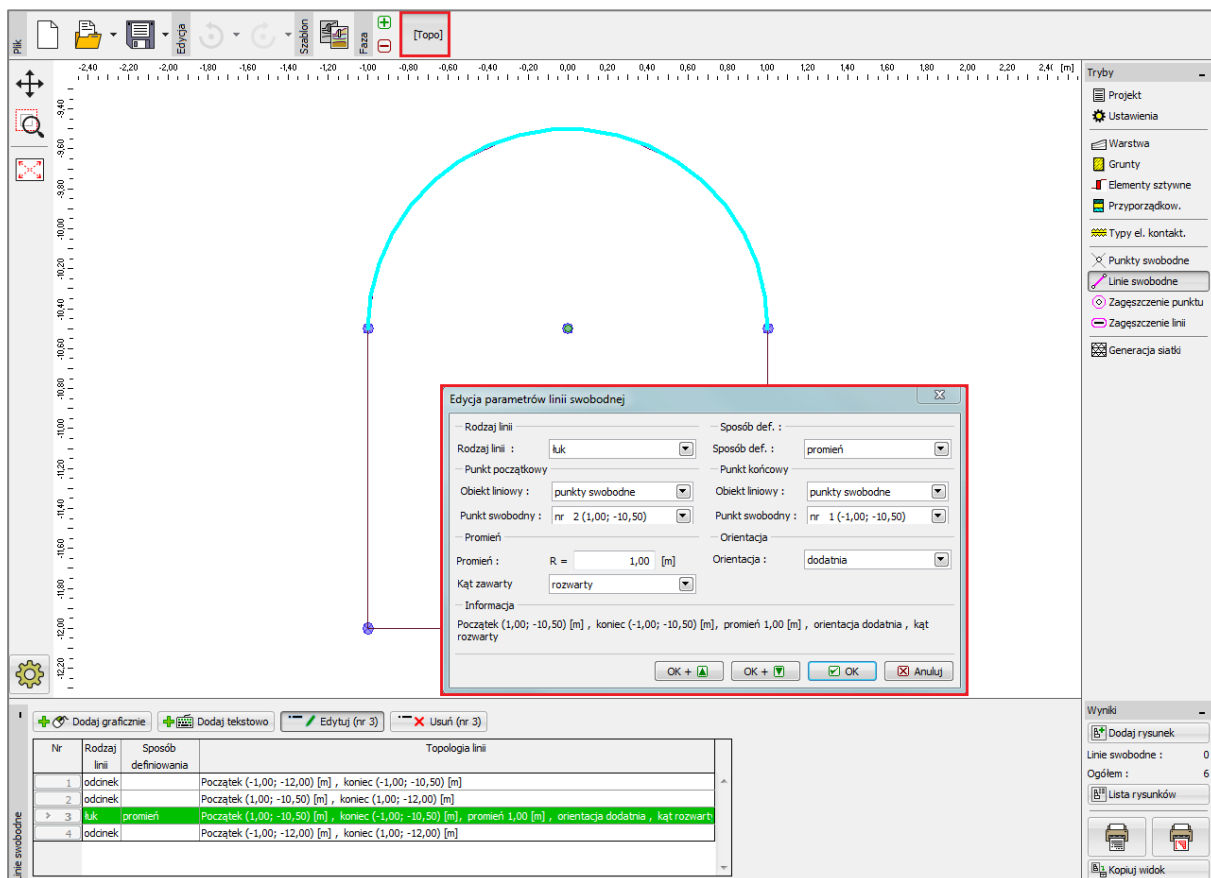
Okno dialogowe "Dodaj nowy grunt"

Następnie zdefiniujemy geometrię konstrukcji. Zaczniemy od wprowadzenia współrzędnych punktów swobodnych (przycisk “Dodaj”) definiując tym samym naroża konstrukcji (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Punkty swobodne” + okno dialogowe “Nowe punkty swobodne”

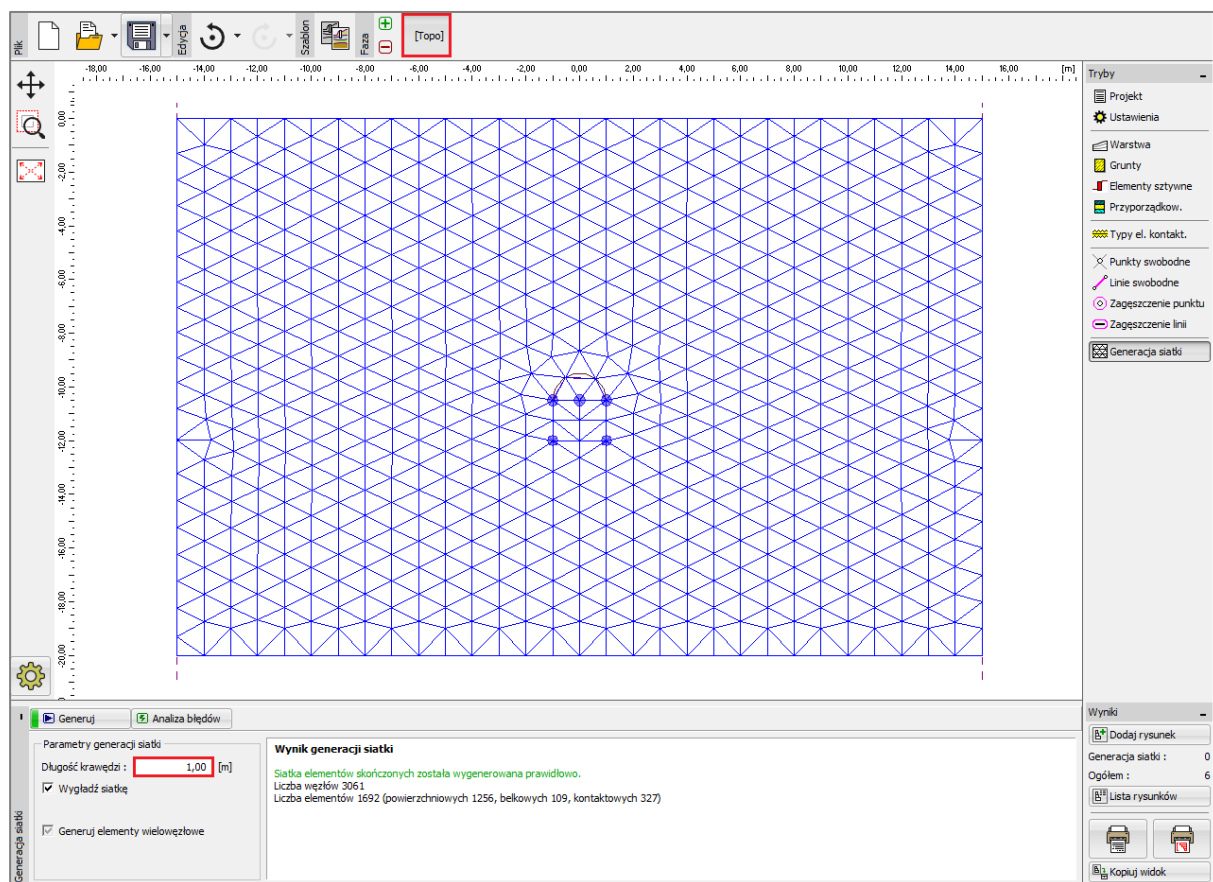
Następnie wybierzemy przycisk “Dodaj” w ramce “Linie swobodne”, co pozwoli na połączenie zdefiniowanych wcześniej punktów za pomocą kursora myszy (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1). Aby wprowadzić łuk o promieniu $R = 1.0\text{ m}$ musimy zmienić rodzaj linii (wybierając przycisk “Edytuj”).



Okno dialogowe “Edycja parametrów linii swobodnej”

Przejrzymy się uzyskanemu w powyższy sposób zarysowi konstrukcji. Geometria sztolni została wprowadzona pomyślnie dzięki czemu możemy przejść do etapu generacji siatki elementów skończonych (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

Do wygenerowania siatki przyjmijmy długość krawędzi elementu o wartości 1.0 m a następnie naciśniemy przycisk **Generuj**. Program automatycznie wygeneruje i wygładzi siatkę ES.



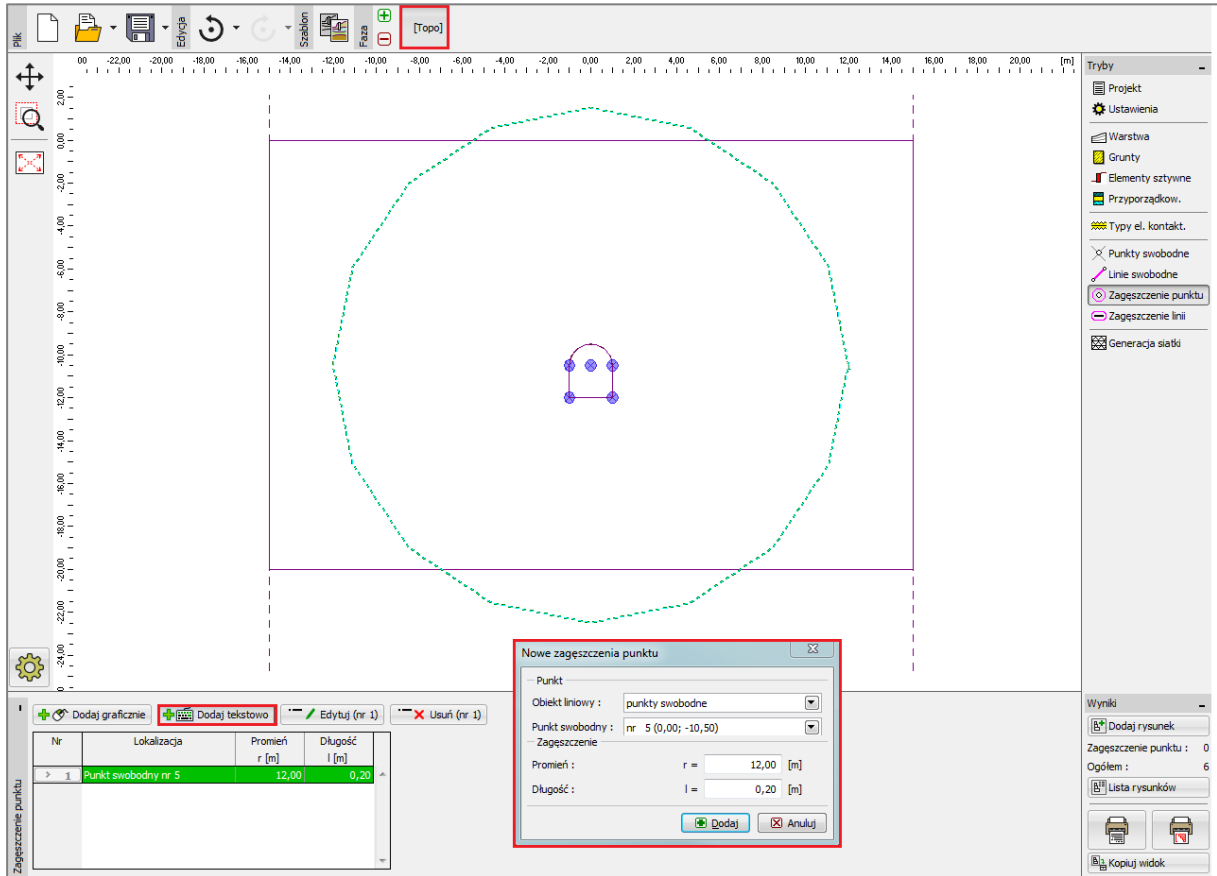
Ramka "Generacja siatki" – elementy skończone o krawędzi 1.0 m (bez lokalnego dogęszczenia)

Na pierwszy rzut oka oczywistym zdaje się, że siatka elementów skończonych w bezpośredniej okolicy sztolni jest zbyt rzadka. Zwiększymy zatem jej gęstość. Możemy lokalnie dogęszczać siatkę w okolicy punktów lub wzdłuż linii swobodnych. Sposób postępowania przy zagęszczaniu siatki w okolicy sztolni (lub generalnie wykopu) jest następujący:

- wybieramy punkt w pobliżu środka otworu,
- dogęszczamy siatkę w okolicy tego punktu.

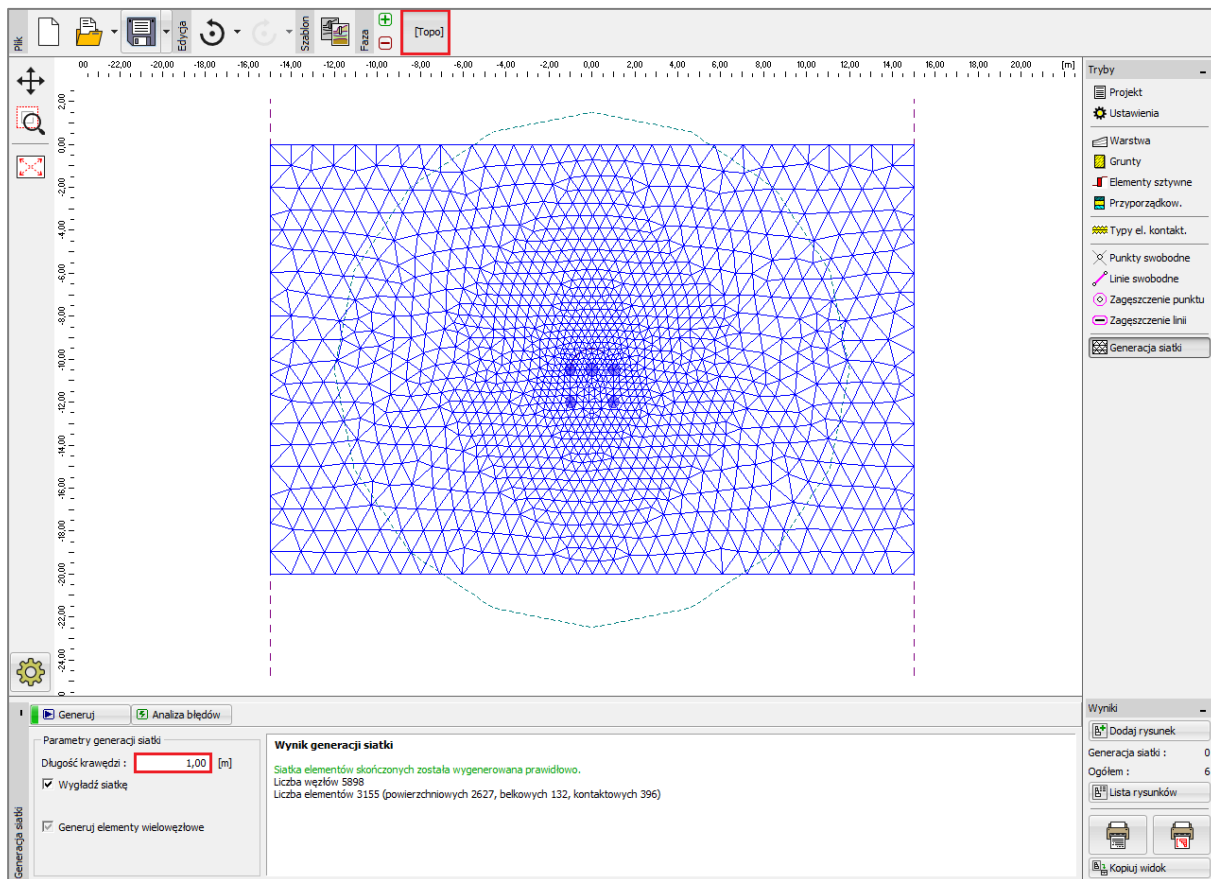
Uwaga: Siły wewnętrzne w belkach obliczane są w poszczególnych punktach siatki a zatem jest konieczne odpowiednie dogęszczenie siatki wzdłuż linii oraz w okolicy punktów (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

Aby zagęścić siatkę elementów skończonych zdefiniujemy promień zagęszczenia o wartości $r = 12.0\text{ m}$ oraz długość krawędzi elementów skończonych $l = 0.2\text{ m}$. Wrócimy następnie do ramki “Generacji siatki” i wygenerujemy ponownie siatkę elementów skończonych.



Okno dialogowe “Nowe zagęszczenie punktów”

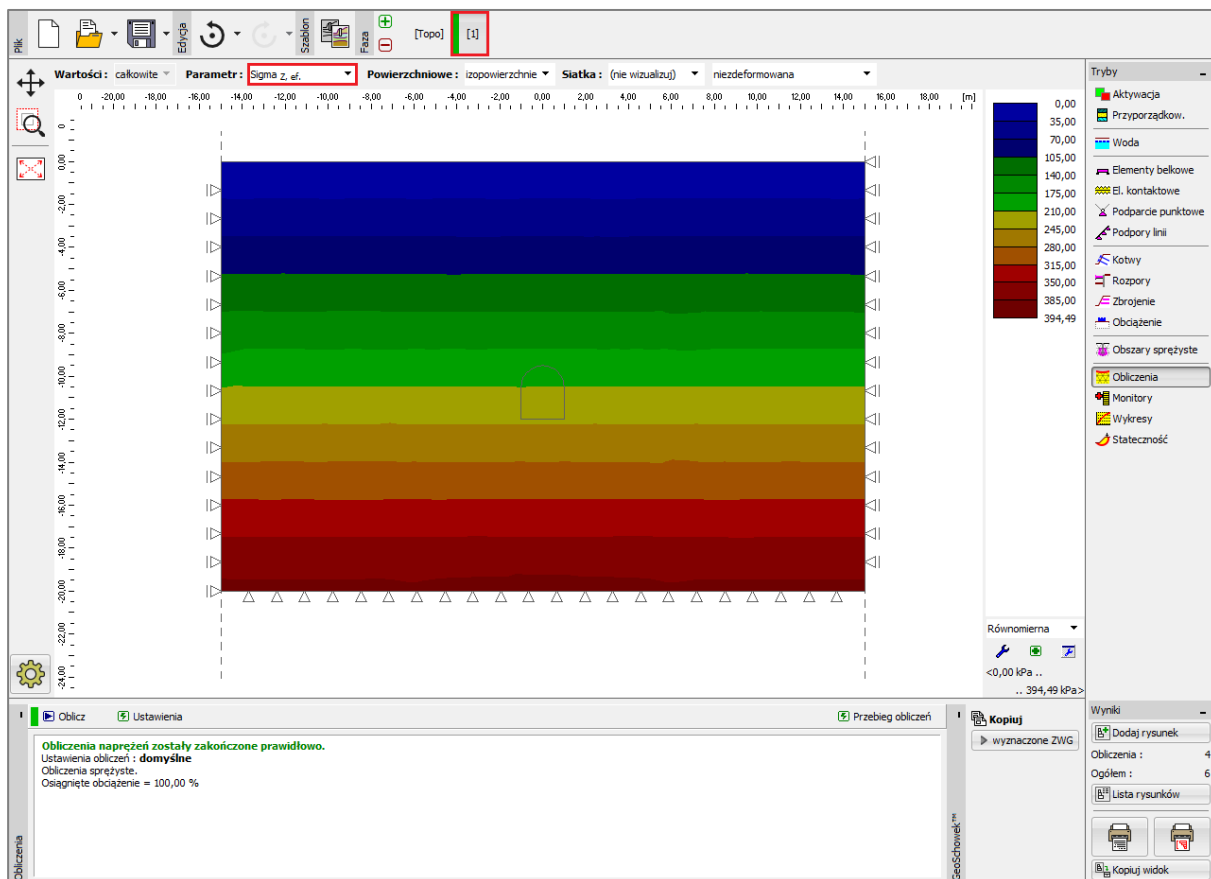
Uwaga: Siatka elementów skończonych powinna być wystarczająco gęsta, szczególnie w obszarach spodziewanych koncentracji naprężeń (podpory punktowe, ostre naroża, otwory itp.). Promień zagęszczenia siatki w obszarach wymagających zagęszczenia powinien być co najmniej 3 do 5 razy większy niż długość krawędzi elementu skończonego po zagęszczeniu w poprawianym obszarze. Wartości promienia zagęszczenia oraz długości krawędzi zagęszczanego elementu skończonego powinny współgrać z gęstością siatki przyjętą dla obszaru otaczającego miejsce zagęszczane. Takie podejście do problemu zapewni gładkie przejście między obszarami o różnej gęstości siatki (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Generacja siatki” – elementy skończone o krawędzi 1.0 m (lokalne dogęszczenie siatki w obszarze analizowanej sztolni)

Faza nr 1: obliczanie naprężeń geostatycznych

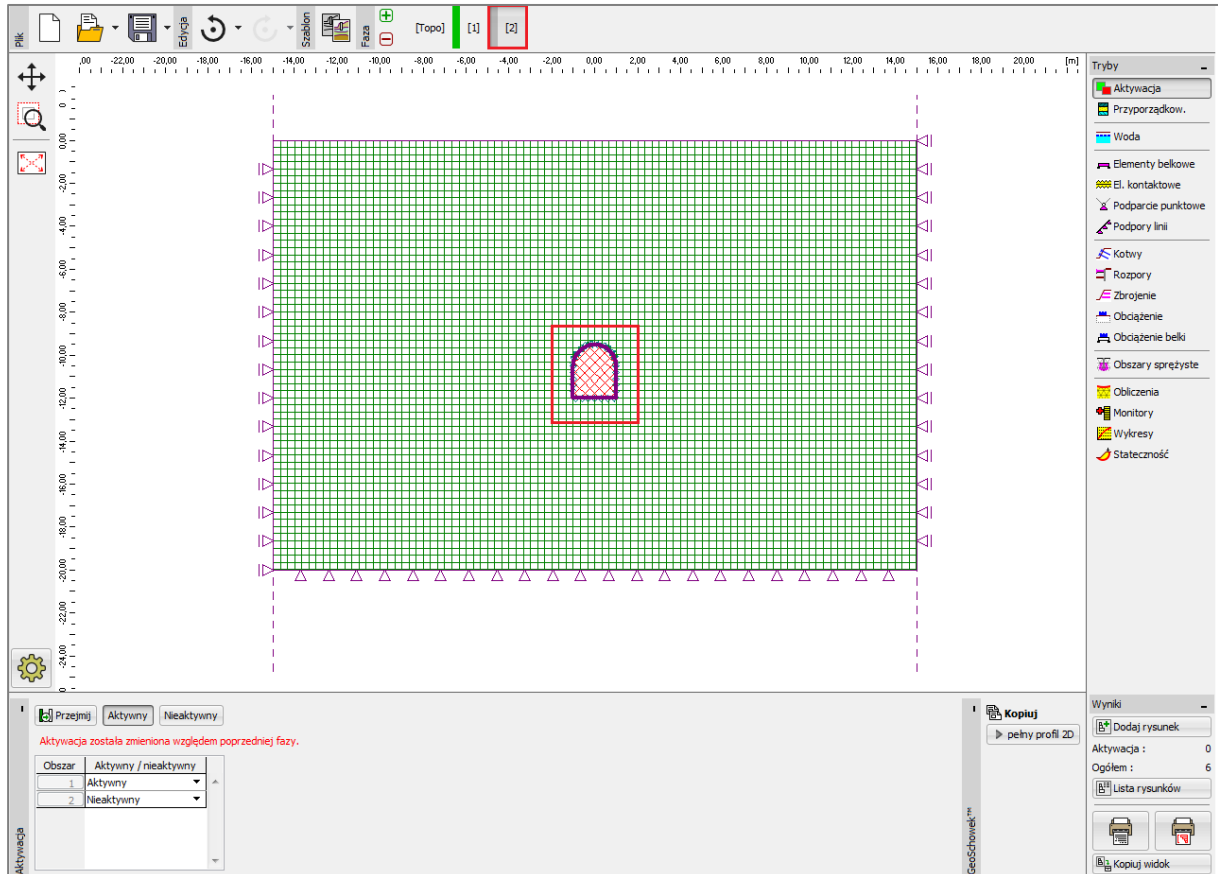
Po kolejnym podejściu siatka ES w pobliżu sztolni wygląda zdecydowanie lepiej. Przejdziemy teraz do fazy nr 1 i przeprowadzimy obliczenia naprężeń geostatycznych w gruncie. Pozostawimy “Ustawienia domyślne” obliczeń (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Obliczenia” – faza nr 1

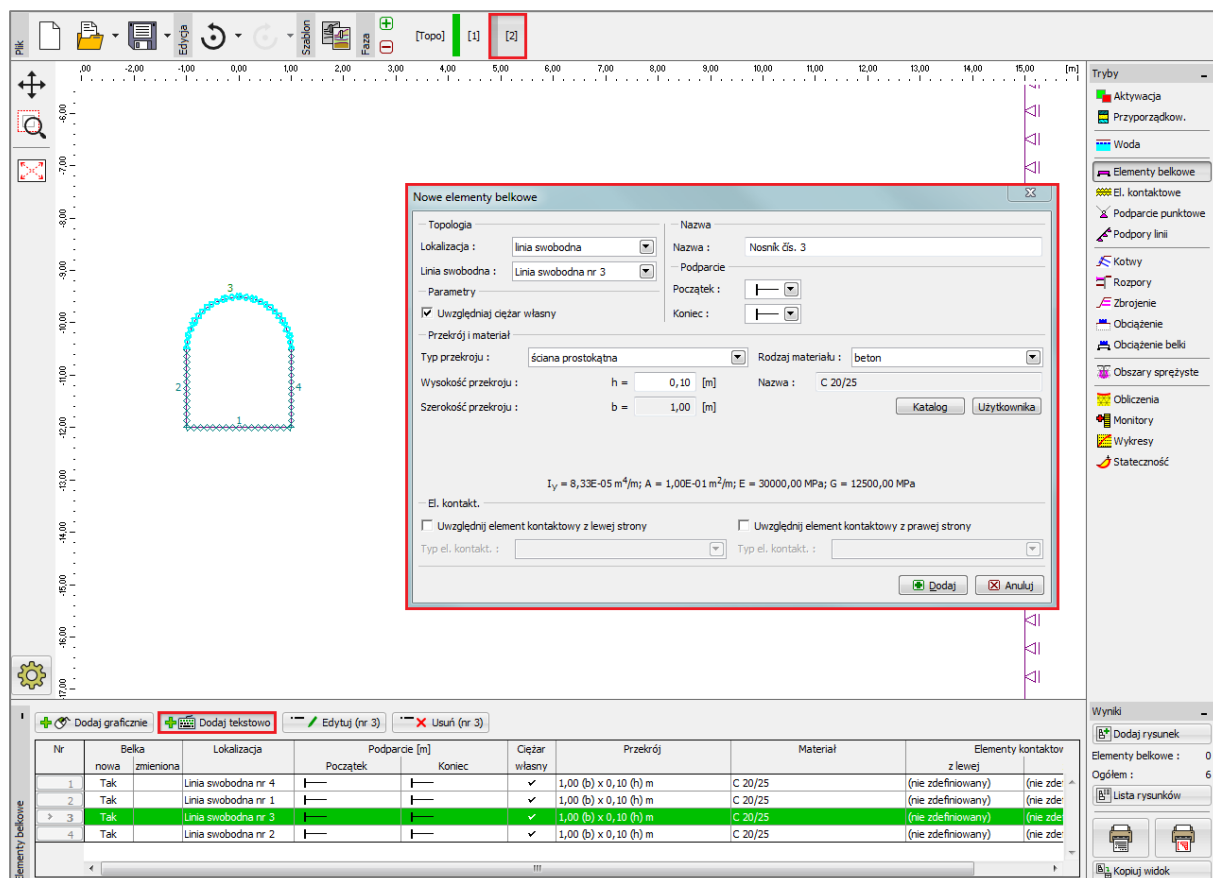
Faza nr 2: modelowanie elementów belkowych

Pierwszym krokiem będzie przejście do ramki “Aktywacja” i zamodelowanie otworu w gruncie na obszarze przekroju sztolni – ustawimy ten konkretny obszar jako nieaktywny (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



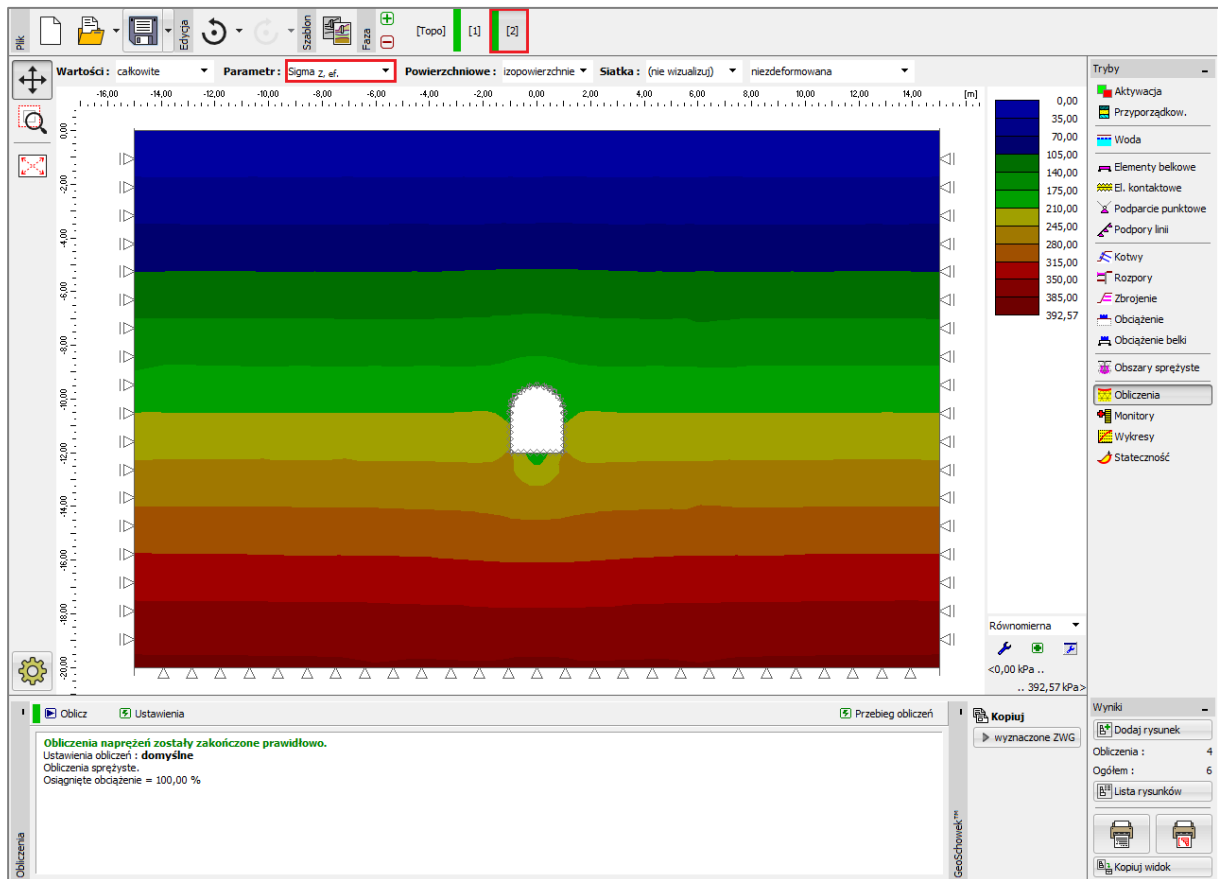
Ramka “Aktywność” – faza nr 2

Następnie przejdziemy do ramki “Elementy belkowe” i zamodelujemy obudowę analizowanej przez nas sztolni. Wprowadzimy następujące parametry – lokalizację belki (uwzględniamy wszystkie linie swobodne), materiał i klasę betonu, wysokość przekroju poprzecznego (0.1 m) oraz sposób podparcia na końcach belki (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



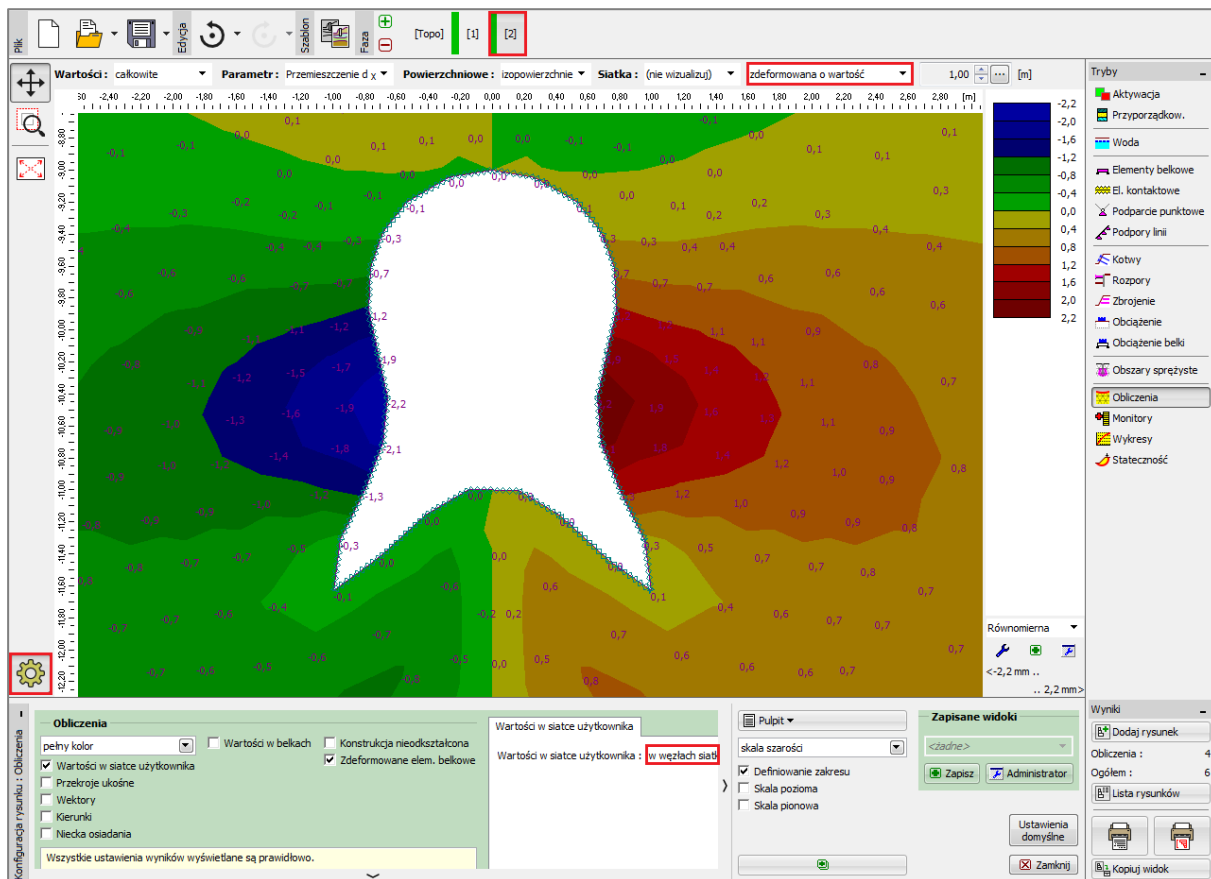
Okno dialogowe “Nowe elementy belkowe” – faza nr 2

Następnie przeprowadzimy obliczenia i przejdziemy do analizy wykresów pionowego naprężenia normalnego $\sigma_{z,ef}$ [kPa], przemieszczenia poziomego d_x [mm] oraz sił wewnętrznych w obudowie projektowanej sztolni.



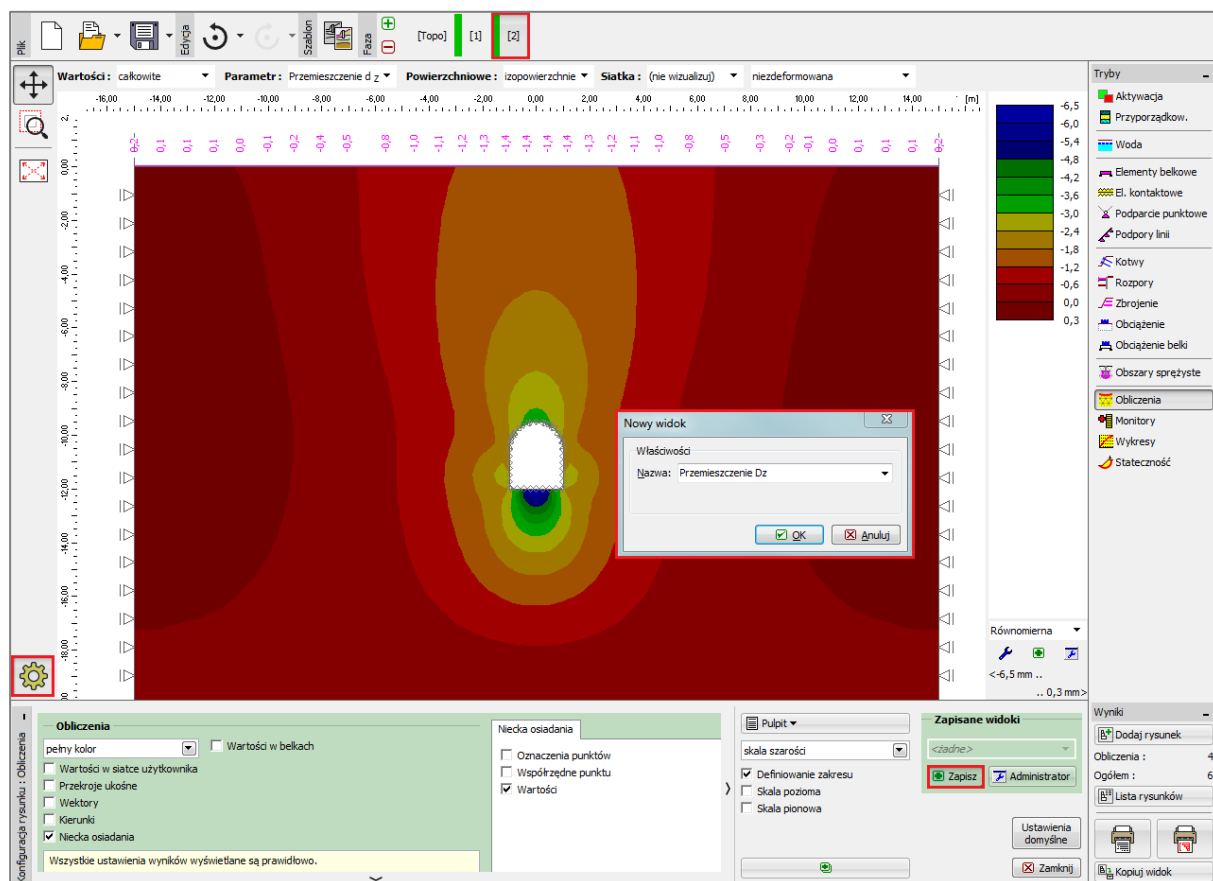
Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (pionowe naprężenia normalne $\sigma_{z,ef}$)

Maksymalna wartość przemieszczenia poziomego odczytana z rysunku wynosi 2.2 mm (sztolnia zachowuje się jak ciało sztywne). Aby lepiej zrozumieć zachowanie konstrukcji wyniki przedstawimy na tle zdeformowanej siatki elementów skończonych (lista rozwijana w prawym górnym rogu ekranu).



Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (przemieszczenie poziome d_x po wydrążeniu sztolni)

Uwaga: Bieżące widoki ekranu mogą zostać zapisane jako niezależne obiekty. Co więcej można nimi później zarządzać. Można w ten sposób znacząco przyspieszyć wyświetlanie wyników (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

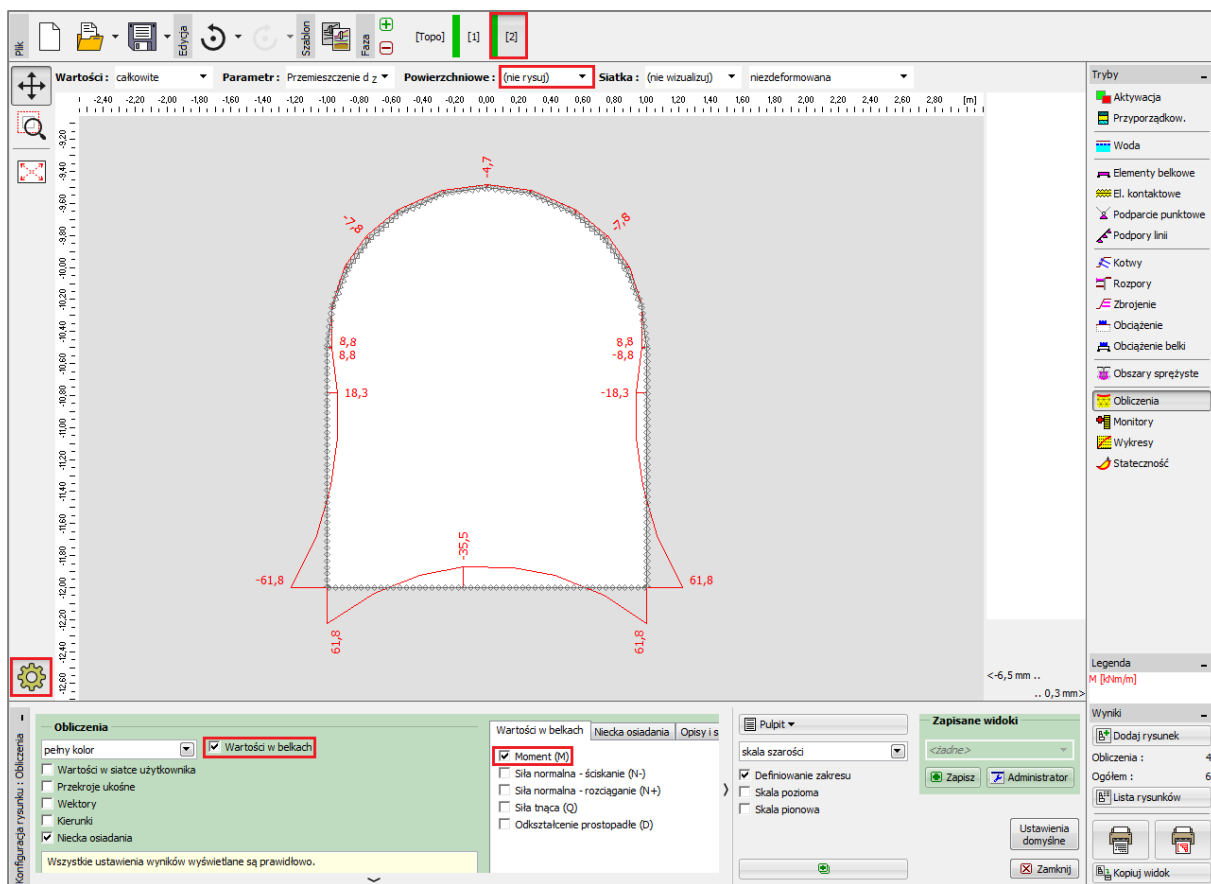


Okno dialogowe "Nowy widok"

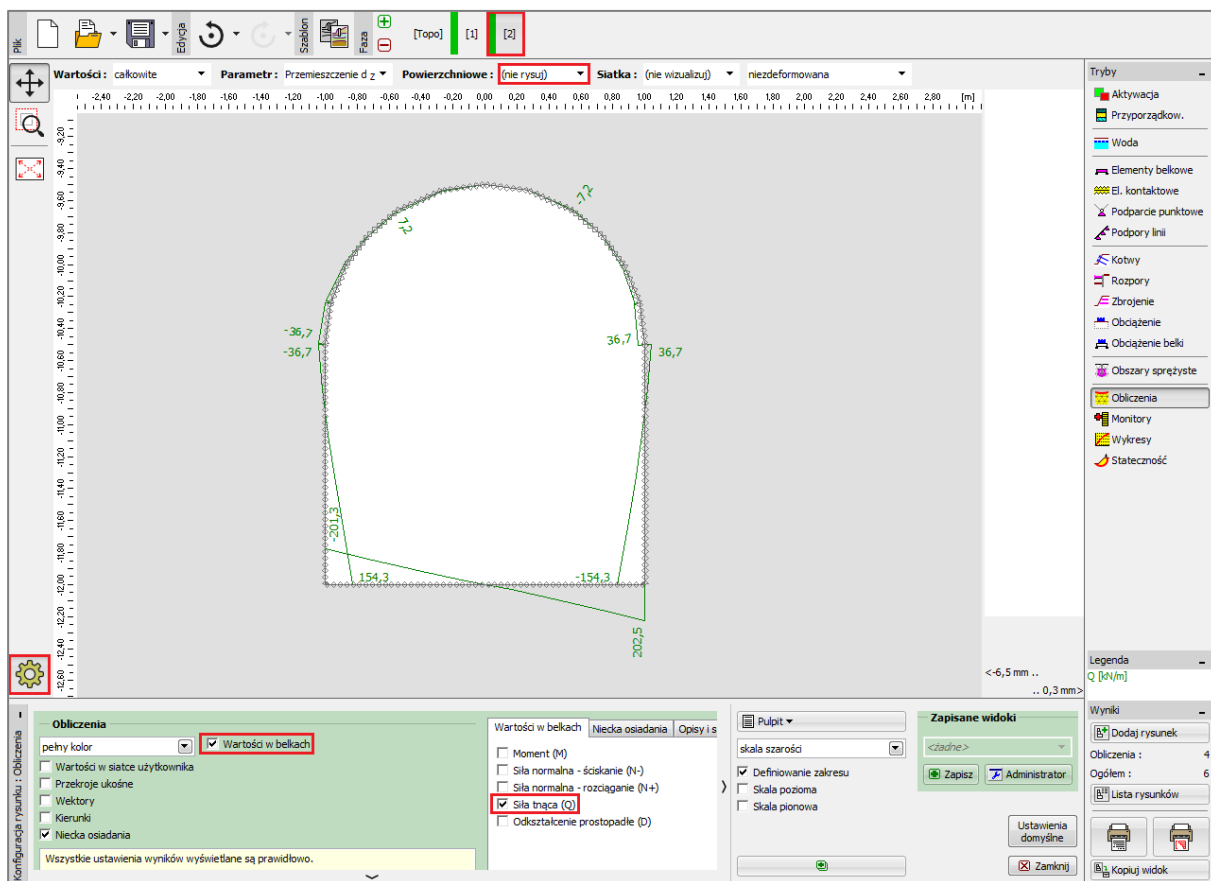
Przeanalizujemy następnie wykresy momentu zginającego M [kNm/m], siły tnącej Q [kN/m] oraz siły normalnej ściskającej N^- [kN/m] w fazie nr 2 (wybieramy przycisk "Ustawienia" i zaznaczamy opcję "Wartości w belkach").

Uwaga: Niektóre wyniki ze względu na konieczność zachowania przejrzystości oraz jednoznaczności nie mogą być wyświetlane jednocześnie. Przykładowo, nie jest możliwe jednoczesne narysowanie osi odkształconej oraz sił wewnętrznych na długości belki. Należy zawsze wybrać jeden wariant. Program wyświetla komunikat błędu, na dole okna dialogowego, w przypadku wybrania niedopuszczalnej kombinacji wydruków (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

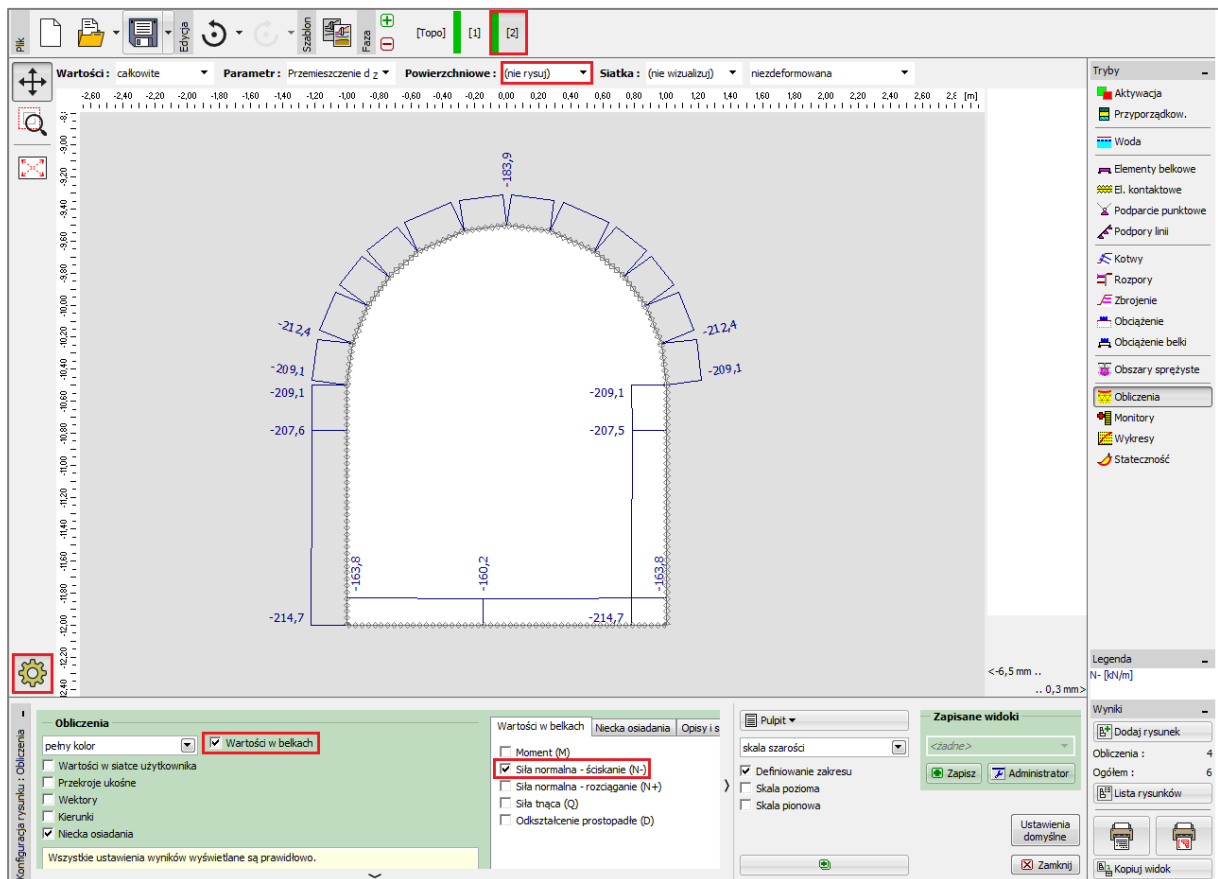
Zbrojenie obudowy sztolni można zaprojektować z wykorzystaniem otrzymanych wartości w dowolnym programie do analizy statyki liniowej (np. FIN EC – CONCRETE 2D). Wartości sił wewnętrznych przedstawimy dodatkowo w tabeli podsumowującej obliczenia.



Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (wykres momentu zginającego M)



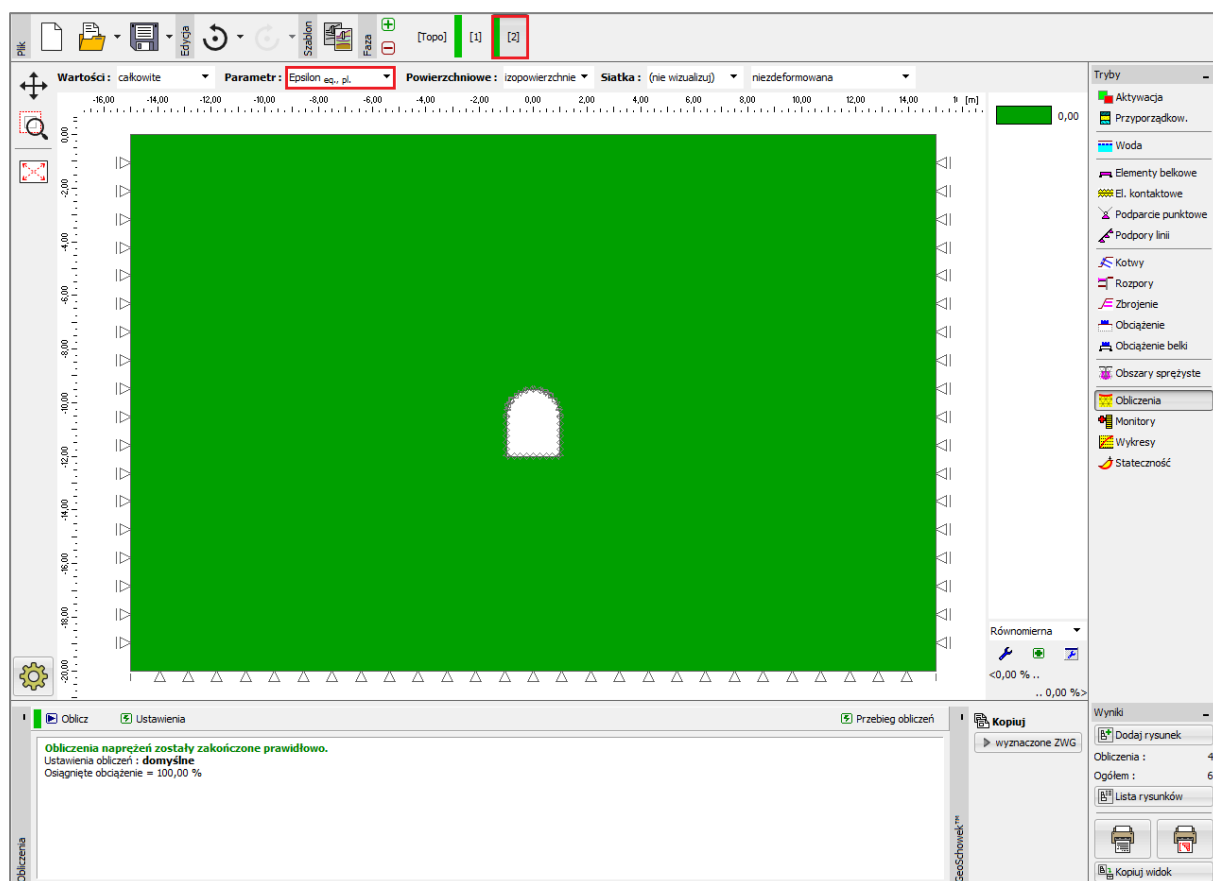
Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (wykres siły tnącej Q)



Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (wykres siły normalnej N^-)

Sprawdzenie kryterium plastyczności: model gruntu Mohra-Coulomba

Kolejnym krokiem będzie sprawdzenie, czy przyjmując nieliniowy model materiałowy powstaną w gruncie odkształcenia plastyczne. Wróćmy do fazy “Topologia” i w ramce “Grunty” zmienmy przyjęty model materiałowy na model „Mohr-Coulomb”. Po przeprowadzeniu ponownych obliczeń przeanalizujemy wykres ekwiwalentnych odkształceń plastycznych.



Ramka “Obliczenia” – faza nr 2 (ekwiwalentne odkształcenie plastyczne $\varepsilon_{eq.,pl.}$, model Mohra-Coulomba)

Zamieszczony powyżej rysunek dowodzi, że warunek plastyczności przy zastosowaniu modelu materiałowego gruntu Mohra-Coulomba nie został przekroczony – ekwiwalentne odkształcenia plastyczne $\varepsilon_{eq.,pl.}$ wynoszą zero, co odpowiada zachowaniu konstrukcji przy założeniu modelu sprężystego gruntu. Uzyskane wyniki przemieszczenia, naprężeń geostatycznych i sił wewnętrznych są zatem identyczne dla obydwu modeli.

Analiza wyników

Przedstawiona poniżej tabela zawiera wyniki ekstremalnych sił wewnętrznych w obudowie sztolni w fazie obliczeniowej nr 2 (wartości momentów zginających, sił tnących oraz sił normalnych). Obliczenia przeprowadzone zostały przy zastosowaniu sprężystego modelu materiałowego gruntu oraz lokalnie dogęszczonej trójkątnej siatki elementów skończonych.

Model materiału	Faza nr 2		
	$N^- [kN/m]$	$M [kNm/m]$	$Q [kN/m]$
Sprężysty	- 160.2	+ 61.8	+ 202.5
	- 214.7	- 61.8	- 201.3

Siły wewnętrzne w obudowie (ekstrema) – faza nr 2

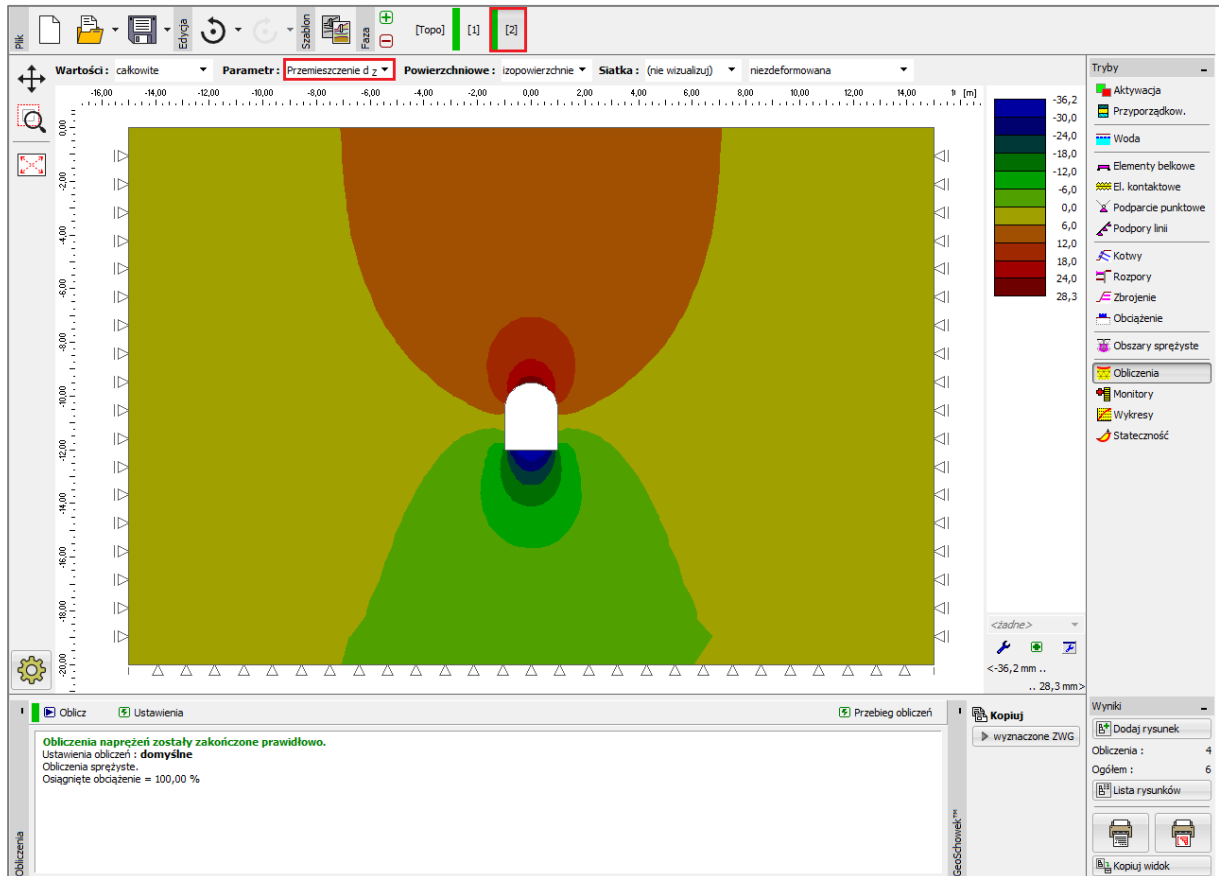
Wnioski

Wyniki obliczeń pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

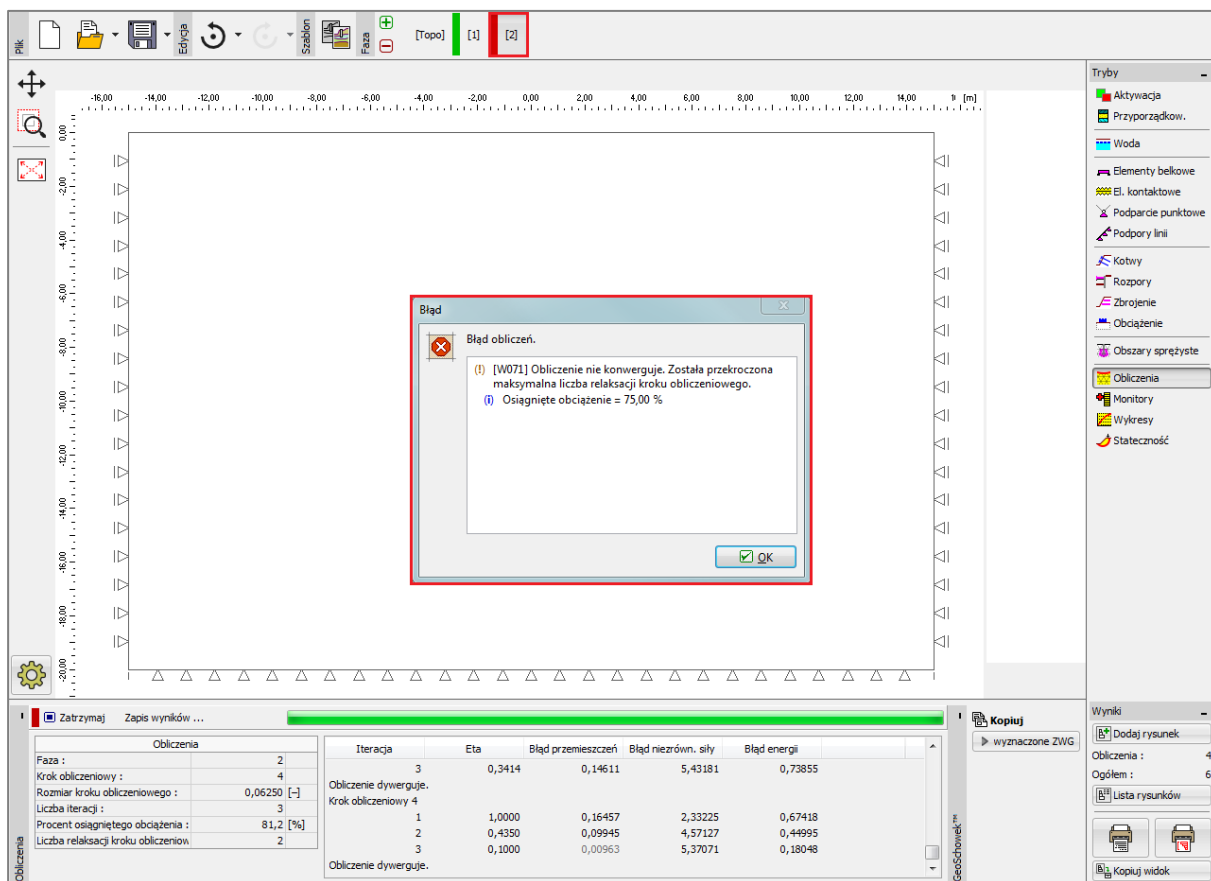
- Lokalne zagęszczenie siatki elementów skończonych prowadzi do uzyskiwania dokładniejszych wyników obliczeń.
- Jeżeli zastosowany nieliniowy model materiałowy gruntu (np. Mohra-Coulomba) prowadzi do zerowych ekwiwalentnych odkształceń plastycznych $\varepsilon_{eq.,pl.}$, to konstrukcja zachowuje się w sposób sprężysty, a wartości sił wewnętrznych, przemieszczeń oraz naprężeń są identyczne dla obydwu modeli.

Uwaga: Przeprowadzone obliczenia oparte są na nierealistycznym założeniu, że obudowa sztolni powstaje dokładnie w tym samym momencie, gdy usuwany jest grunt z wyrobiska. Jest to zasadne tylko w przypadku wykonywania konstrukcji metodą przecisków (wciskanie gotowej konstrukcji w grunt). W rzeczywistości masyw gruntowy wokół wyrobiska ulega odprężeniu i odkształceniu do wnętrza wyrobiska (konwergencji) podczas wybierania urobku. Właściwy przykład modelowania tunelu przedstawiony został w Przewodniku Inżyniera nr 26 - Modelowanie numeryczne wyrobiska tunelowego wykonywanego metodą konwencjonalną (NATM).

Jeżeli, w analizowanym przez nas przypadku, obudowa tunelu nie zostałaby aktywowana od razu (mogłaby zostać zamodelowana w następnej fazie bez definiowania elementów belkowych) wyrobisko uległoby zawaleniu – model sprężysty charakteryzuje się bardzo dużymi dopuszczalnymi odkształceniami – lub program nie mógłby znaleźć rozwiązania w przypadku modelu nieliniowego.



Obliczenia bez elementów belkowych (przemieszczenie d_z według modelu sprężystego)



Okno dialogowe "Błąd" – obliczenia bez elementów belkowych (model Mohra-Coulomba)