

## Analiza numeryczna ścianki szczelnej

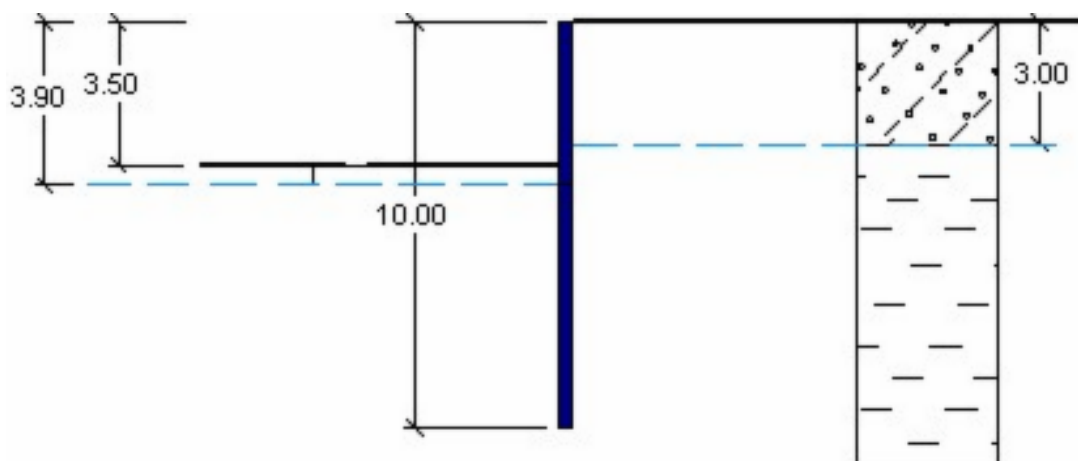
Program: MES

Plik powiązany: Demo\_manual\_24.gmk

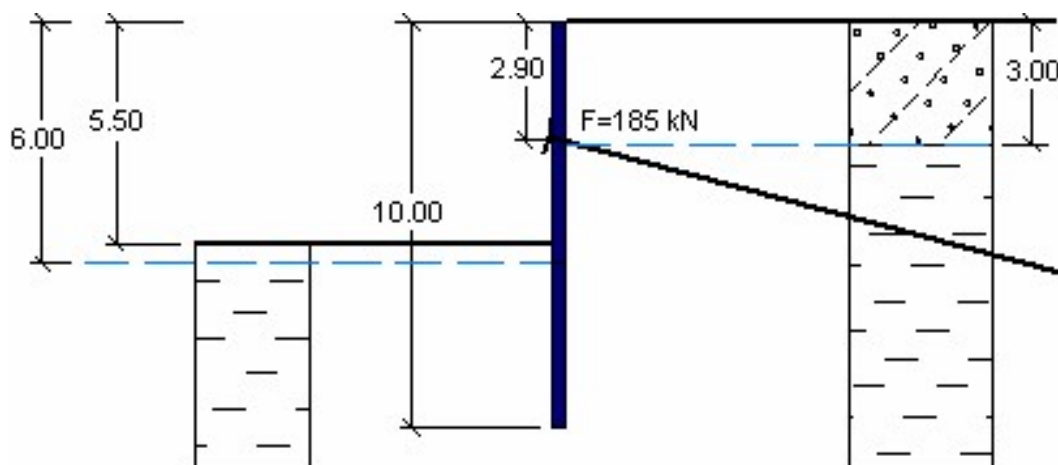
Celem niniejszego przewodnika jest analiza stanu odkształcenia oraz wyznaczenie sił wewnętrznych w kotwionej ścianie szczelnej z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

### Sformułowanie zadania

Określić stan naprężenia i odkształcenia kotwionej ścianki szczelnej zbudowanej z profili VL 503 o wymiarach 500x340x9,7 mm łączonych za pomocą zamków. Schemat konstrukcji w kolejnych fazach wznoszenia przedstawiono na poniższych rysunkach. Wyznaczyć siły wewnętrzne działające na wysokości ścianki. Profile wykonane są ze stali Fe 360 zgodnie z normą EN 10 025. Wysokość ścianki wynosi 10 m.



*Faza budowy nr 2 – głębienie wykopu do głębokości 3.5 m*



*Faza budowy nr 3 – zakotwienie ścianki i głębienie wykopu do głębokości 5.5 m*

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

- od 0.0 do 3.0 m: Piasek pylasty (grunt średniozagęszczony),
- poniżej 3.0 m: Gлина (stan twardoplastyczny).

Parametry gruntu / Klasyfikacja	Piasek pylasty	Gлина
Ciężar objętościowy gruntu: $\gamma \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$	18	21
Moduł sprężystości: $E \left[ MPa \right]$	10	4,5
Współczynnik Poissona: $\nu \left[ - \right]$	0,3	0,4
Spójność efektywna gruntu: $c_{eff} \left[ kPa \right]$	5	12
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu: $\varphi_{eff} \left[ ^\circ \right]$	29	19
Kąt dyatacji: $\psi \left[ ^\circ \right]$	0	0
Ciężar objętościowy gruntu nawodnionego: $\gamma_{sat} \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$	20	23

*Tabela z parametrami gruntów – kotwiona ścianka szczelna*

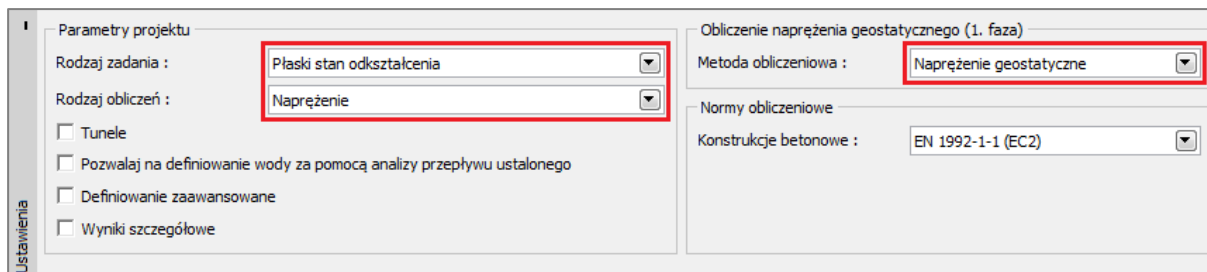
## Rozwiązanie

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

- Topologia: ustawienia oraz modelowanie zagadnienia (warstwy, elementy kontaktowe, dogęszczanie siatki).
- Faza budowy nr 1: obliczanie naprężeń pierwotnych, definiowanie monitorów.
- Faza budowy nr 2: aktywacja obszarów, modelowanie elementów belkowych, obliczanie przemieszczenia i sił wewnętrznych.
- Faza budowy nr 3: wykonanie wykopu, definiowanie kotew, analiza wyników + monitory.
- Analiza wyników: porównanie, wnioski.

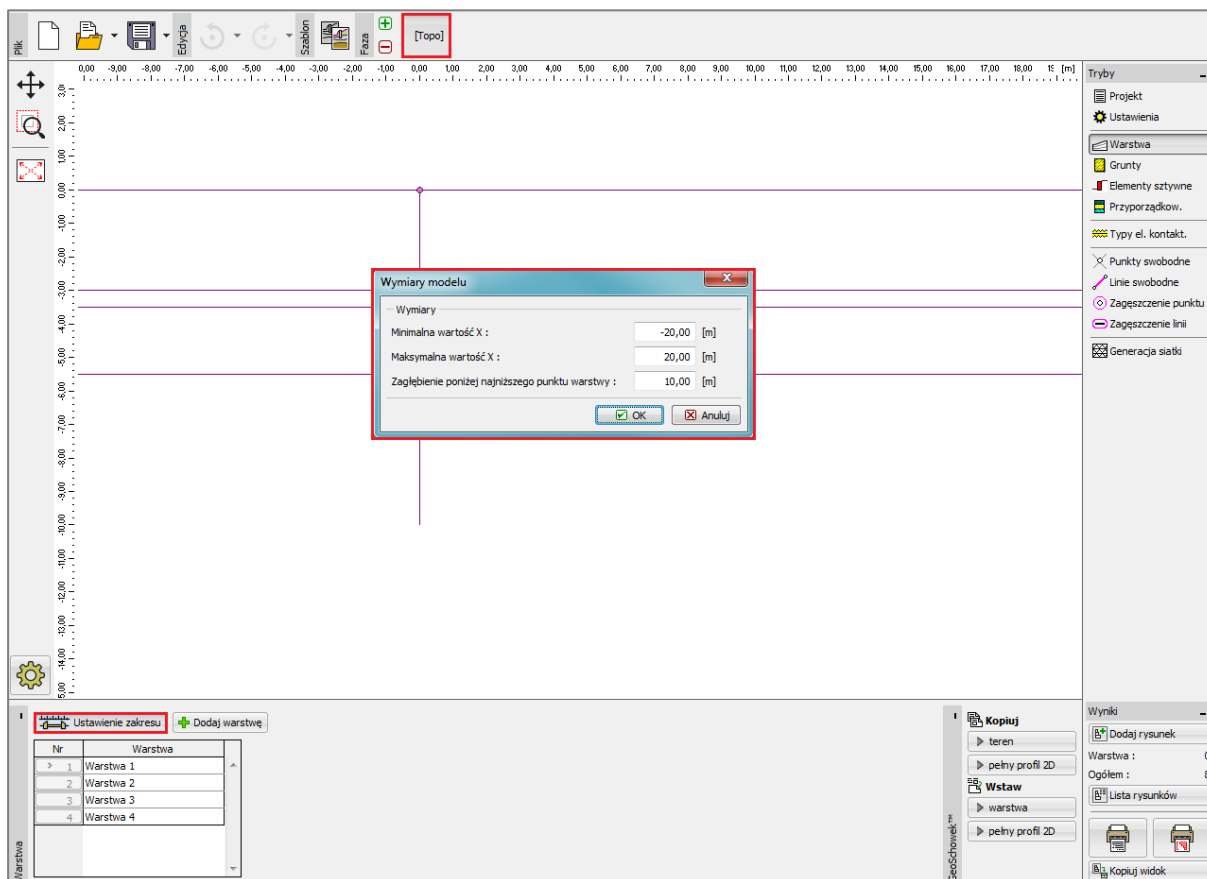
## Topologia: ustawienia zadania

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



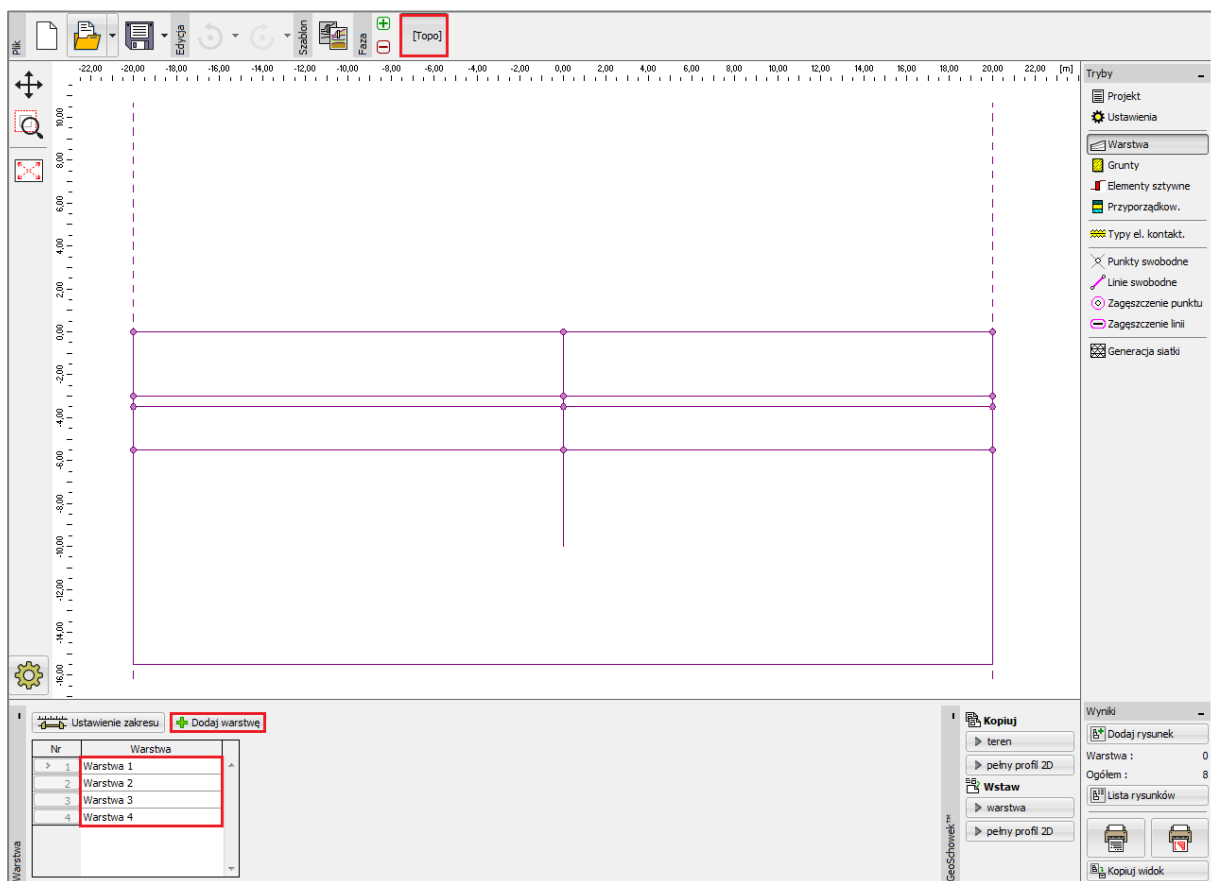
Ramka “Ustawienia”

Następnie wprowadzimy wymiary modelu, należy przyjąć wystarczająco duże wymiary modelu, aby zadane warunki brzegowe nie miały wpływu na wyniki obliczeń. Dla analizowanego zadania przyjmujemy zakres modelu  $\langle -20\text{ m}; 20\text{ m} \rangle$  oraz zagłębienie poniżej najniższego punktu warstwy 10.0 m.



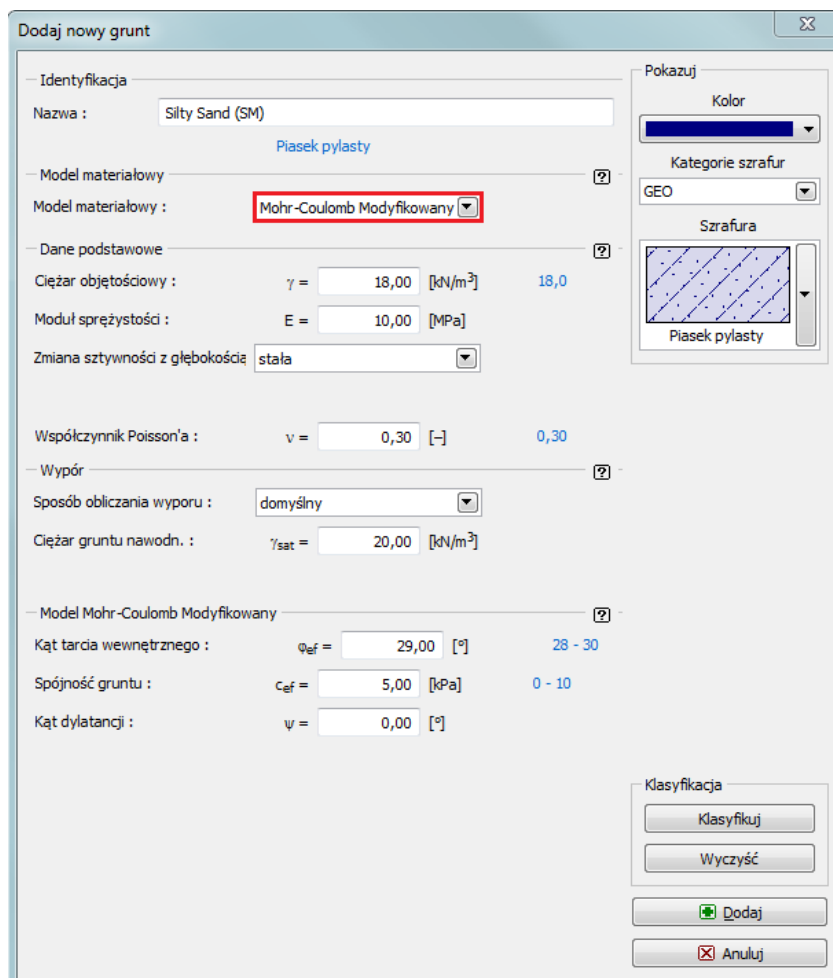
Okno dialogowe “Wymiary modelu”

Podczas projektowania ścianki szczelnej należy zdefiniować linie odpowiadające głębokości, do których głąbiony będzie wykop w kolejnych fazach realizacji. W tym przypadku przyjmujemy powierzchnię terenu na poziomie 0.0 m, a kolejne warstwy odpowiadające etapom głąbienia na głębokościach 3.0 m, 3.5 oraz 5.5 m. Punkt o współrzędnych [0.0; 0.0] znajduje się na koronie ścianki szczelnej.



*Ramka "Warstwa"*

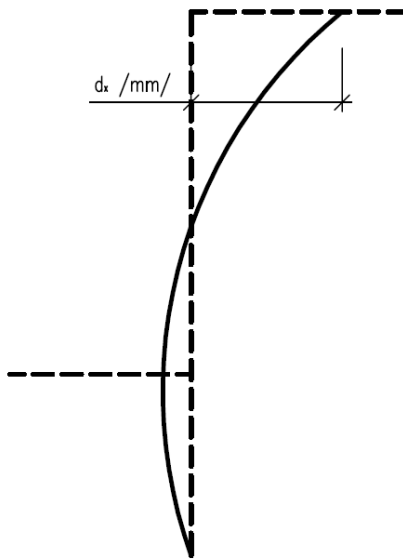
Kolejnym krokiem będzie wprowadzenie parametrów materiałowych gruntu oraz przyporządkowanie ich do utworzonych obszarów warstw. Wybierzemy model materiałowy gruntu Modyfikowany Mohra-Coulomba (więcej informacji – patrz *uwaga*).



Okno dialogowe "Dodaj nowy grunt"

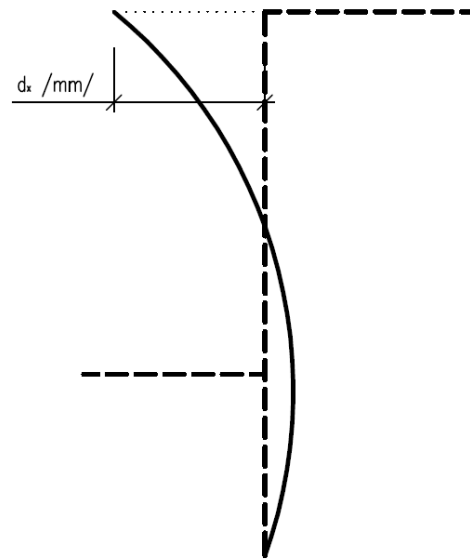
*Uwaga: Podczas projektowania obudowy wykopu należy wprowadzić elementy kontaktowe między gruntem a belką. Prowadzenie obliczeń bez elementów kontaktowych prowadzi do mało realistycznych wyników (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

**Rozwiązanie bez elementów kontaktowych**



przesunięcie ścianki szczelnej w kierunku  
gruntu (błędne)

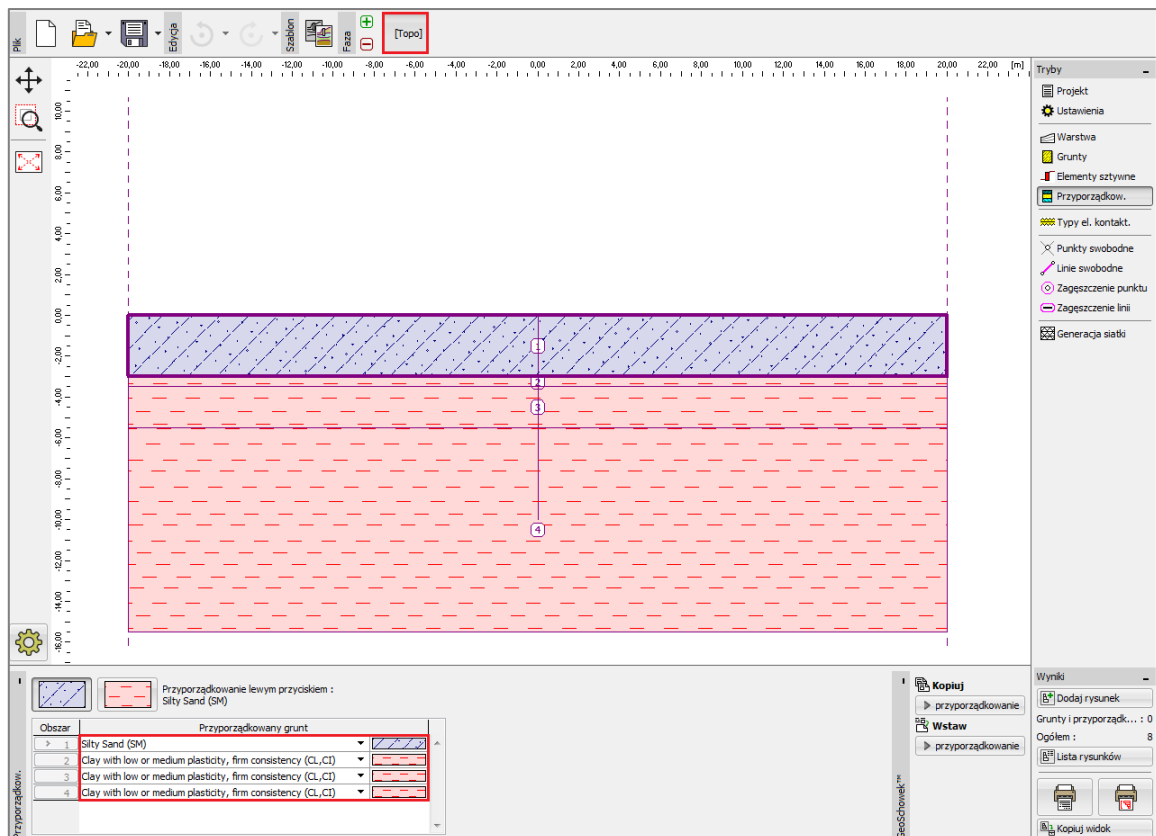
**Rozwiązanie z elementami kontaktowymi**



przesunięcie ścianki szczelnej w kierunku  
wykopu (poprawne)

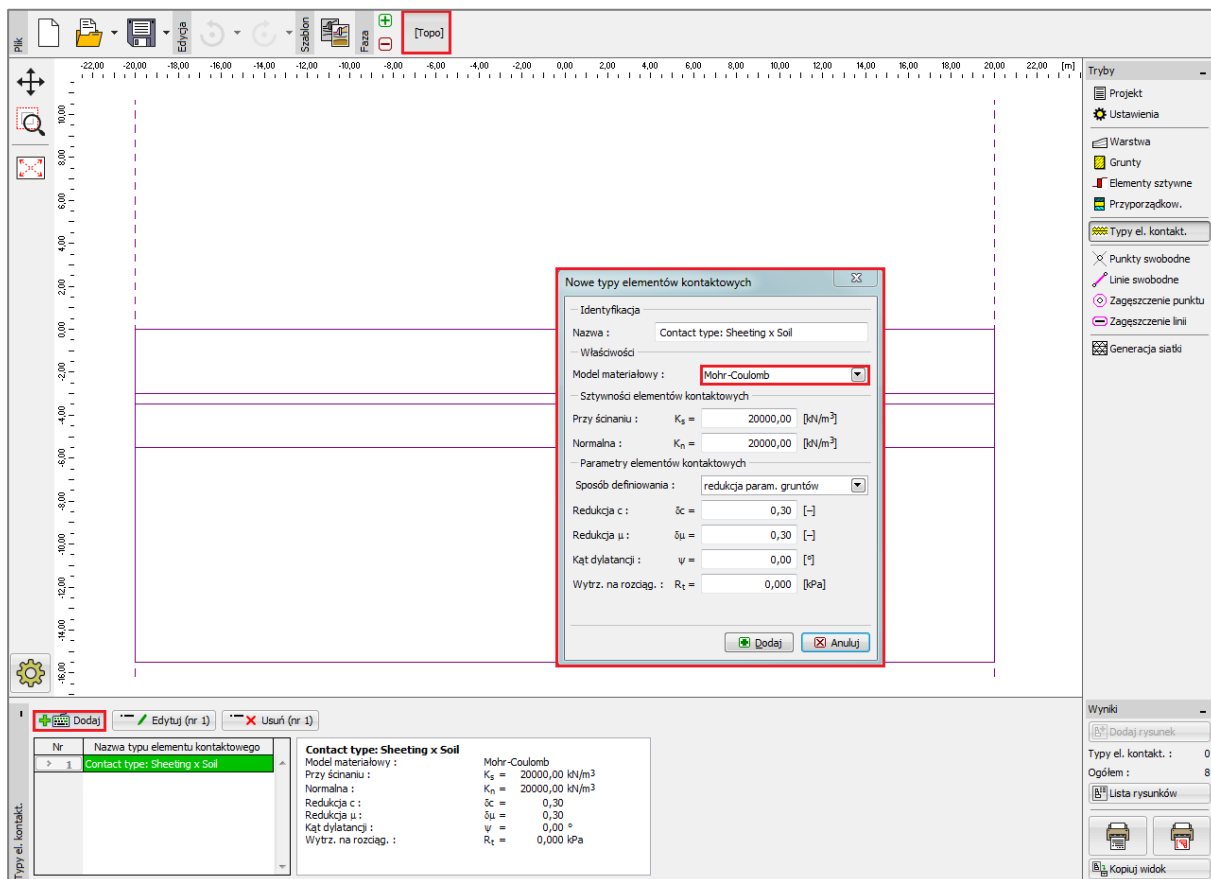
*Zastosowanie właściwego modelu materiałowego do analizy numerycznej obudowy wykopu*

Przedstawiony poniżej rysunek przedstawia przyporządkowanie gruntów do obszarów warstw.



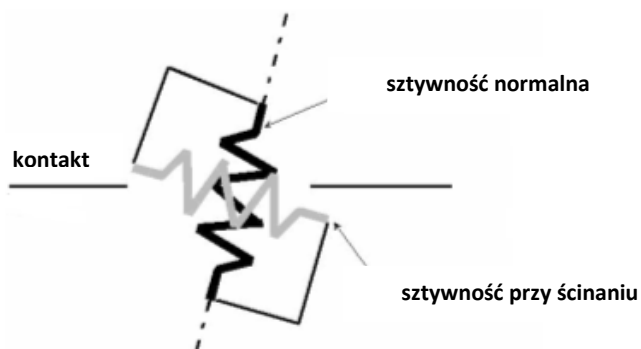
*Ramka "Przyporządkowanie"*

Następnym krokiem będzie zdefiniowanie typów elementów kontaktowych (wybieramy przycisk “Dodaj” zgodnie z poniższym rysunkiem). Podczas obliczania obudów wykopów konieczne jest zdefiniowanie elementu kontaktowego, aby właściwie zamodelować wzajemne oddziaływanie konstrukcji modelowanej jako belka z gruntem opisywanym modelem nieliniowym. W tym przypadku wybierzemy model materiałowy gruntu Mohra-Coulomba, aby uzyskać możliwie realistyczne wyniki obliczeń. Założymy współczynniki redukcji parametrów gruntu dla elementu kontaktowego o wartości  $\delta c = \delta \mu = 0.3$  oraz przyjmijmy standardowe wartości sztywności elementów kontaktowych  $K_s = K_n = 20\,000\text{ kN/m}^3$ .



Okno dialogowe “Nowe elementy kontaktowe”

*Uwaga: Elementy kontaktowe znajdują zastosowanie w sytuacjach, gdy niezbędne jest przeanalizowanie wzajemnego oddziaływania między konstrukcją i otoczeniem – powierzchni styku dwóch różnych materiałów (grunt – obudowa). Typowym przykładem zastosowania jest analizowanie obudów wykopów, ścian oporowych lub obudów tuneli, gdzie elementy kontaktowe modelują cienką warstwę gruntu lub skały, w której występują znaczne naprężenia, zwłaszcza ścinające. Elementy kontaktowe mogą być również definiowane pomiędzy dwiema warstwami gruntu. Element kontaktowy nie ma grubości i wyraża zależność między naprężeniami kontaktowymi a przemieszczeniami względnymi na długości elementu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

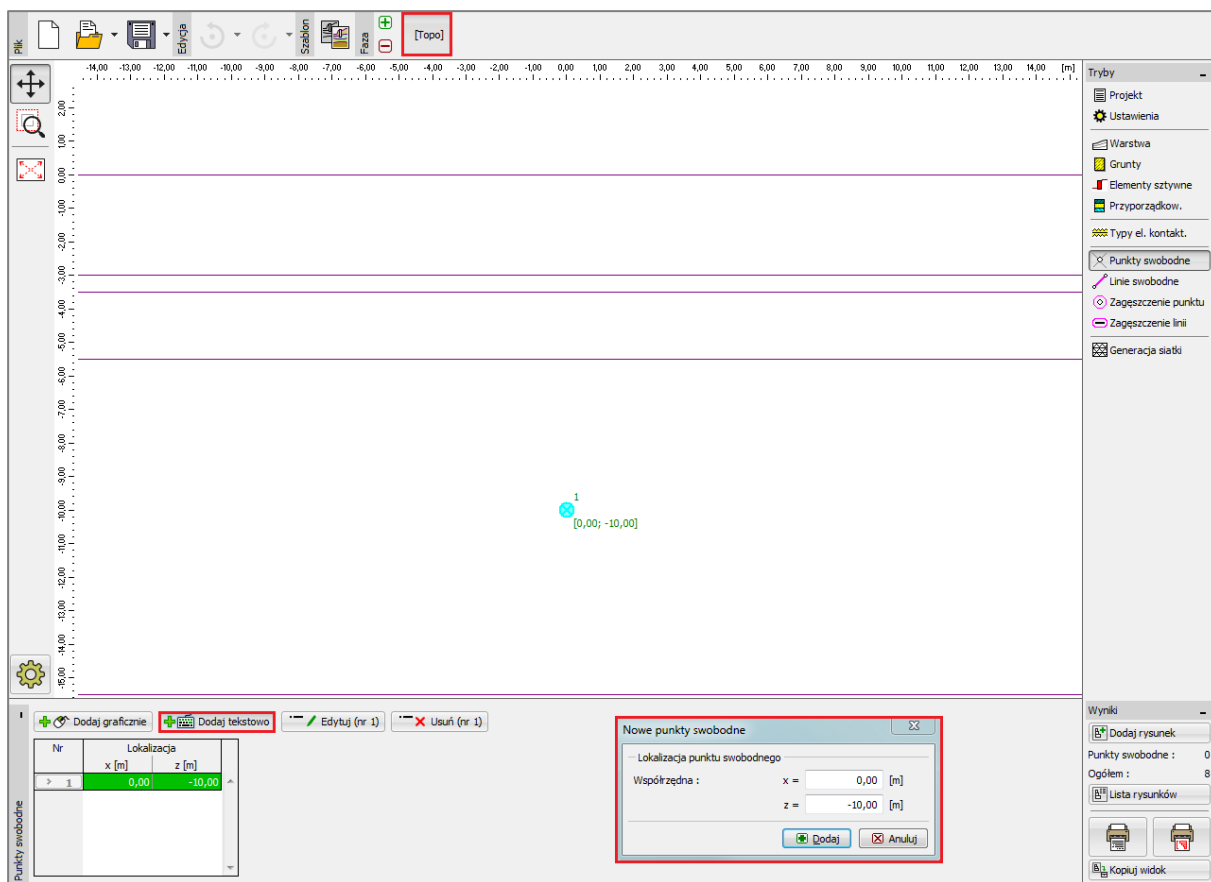


*Schemat budowy elementu kontaktowego*

*Uwaga: Pomijając fakt, że dobór parametru  $K_s$  nie ma większego znaczenia w kontekście zachowania czysto plastycznego elementu kontaktowego to jego wartość odgrywa kluczową rolę przy obliczaniu zadań nieliniowych. Zbyt wysoka wartość sztywności (powyżej  $100\,000\text{ kN/m}^3$ ) może prowadzić do braku zbieżności rozwiązania numerycznego. Z drugiej strony zbyt niskie wartości sztywności  $K_s$  oraz  $K_n$  (poniżej  $10\,000\text{ kN/m}^3$ ) mogą prowadzić do otrzymywania mało realistycznego obrazu deformacji konstrukcji. Warto nadmienić, że wartości naprężeń kontaktowych nie zależą w większym stopniu od przyjętych wartości sztywności  $K_s$  oraz  $K_n$  (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

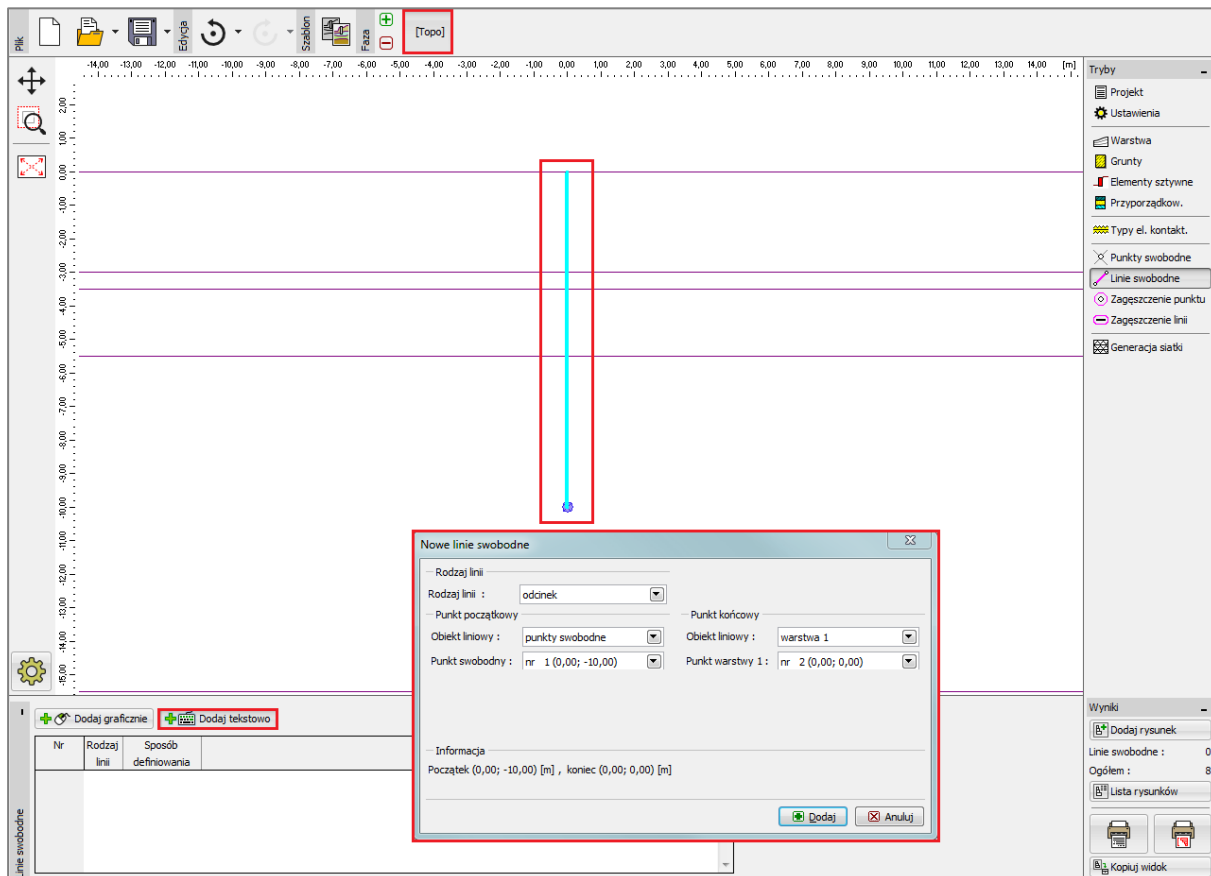


Określimy następnie geometrię ścianki szczelnej definiując nowe elementy w ramach “Punkty swobodne” oraz “Linie swobodne”. Zasady wprowadzania punktów swobodnych oraz linii swobodnych podane zostały w poprzednim rozdziale *Przewodniku Inżyniera nr 23 Analiza obudowy sztolni*.



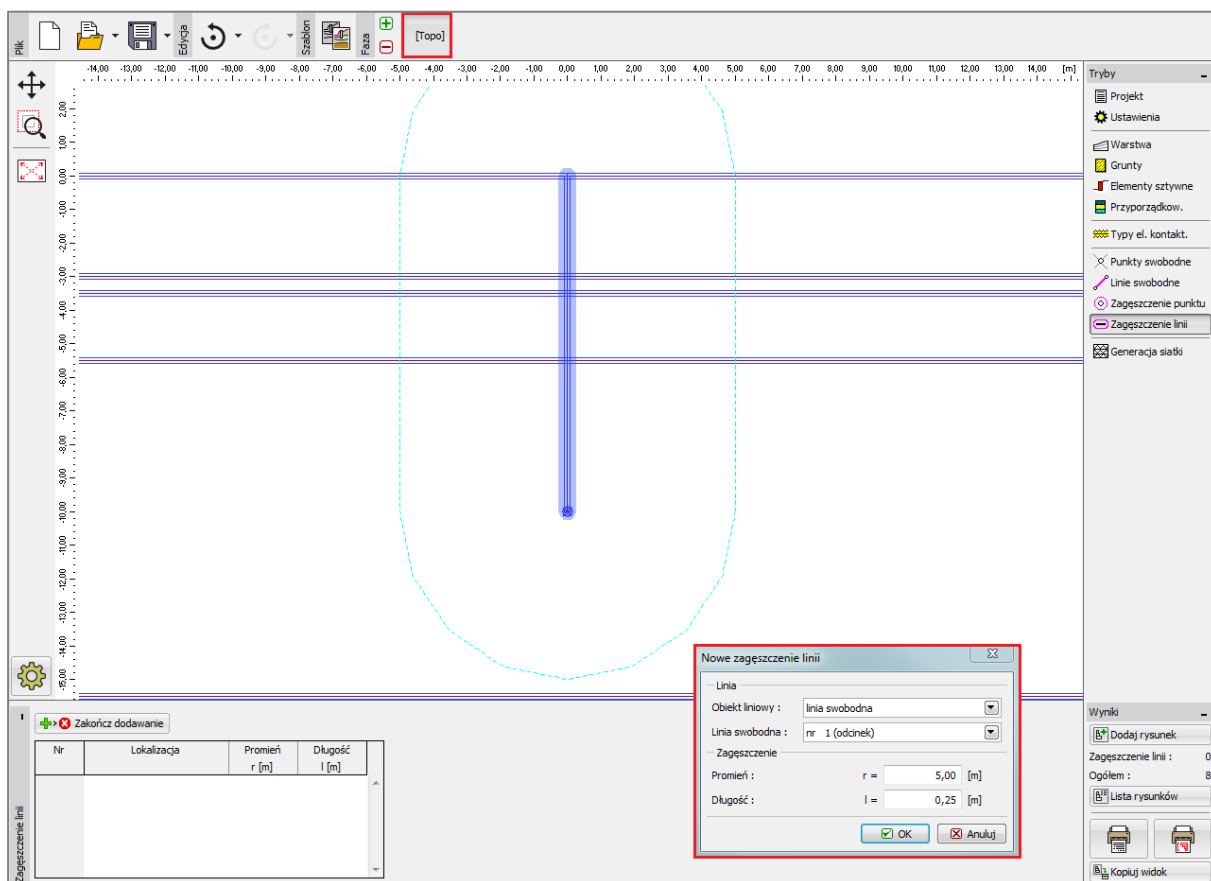
Okno dialogowe “Nowe punkty swobodne”

Zacniemy od wprowadzenia nowego punktu swobodnego o współrzędnych [0.0; – 10.0]. Linia swobodna odzwierciedlająca geometrię ścianki szczelnej utworzona zostanie poprzez połączenie nowo utworzonego punktu z powierzchnią terenu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Okno dialogowe "Nowe linie swobodne"

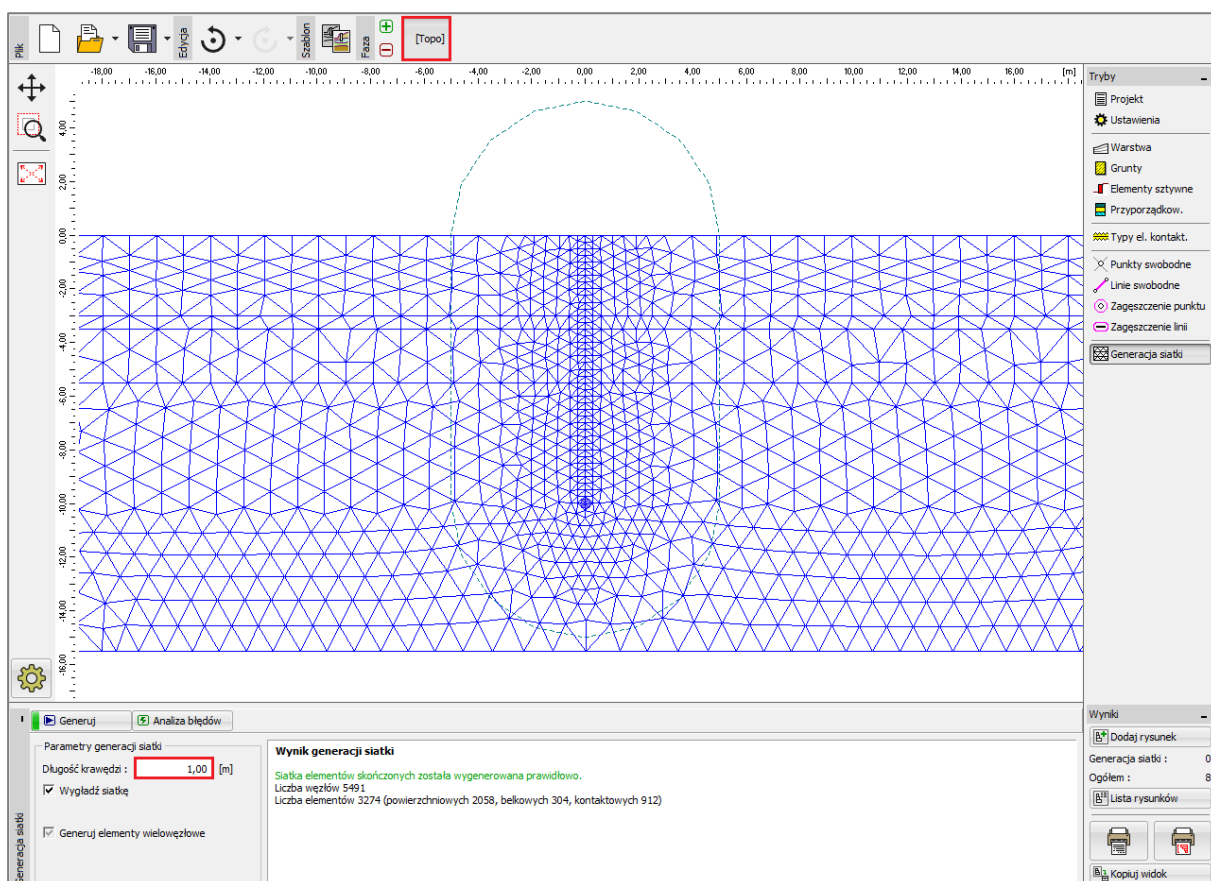
Ostatnim krokiem definiowania topologii zadania jest generowanie siatki elementów skończonych. Warto zagęścić siatkę elementów skończonych w okolicy ścianki szczelnej. Przechodzimy do ramki "Zagęszczenie linii" i definiujemy promień zagęszczenia o wartości  $r = 5.0\text{ m}$  oraz długość krawędzi elementów skończonych  $l = 0.25\text{ m}$ .



Okno dialogowe "Nowe zagęszczenie linii"

Przejdziemy następnie do ramki “Generacja siatki” i wygenerujemy siatkę elementów skończonych o długości krawędzi 1.0 m (naciskając przycisk “**Generuj**”). Program automatycznie wygładzi zagęszczoną siatkę ES.

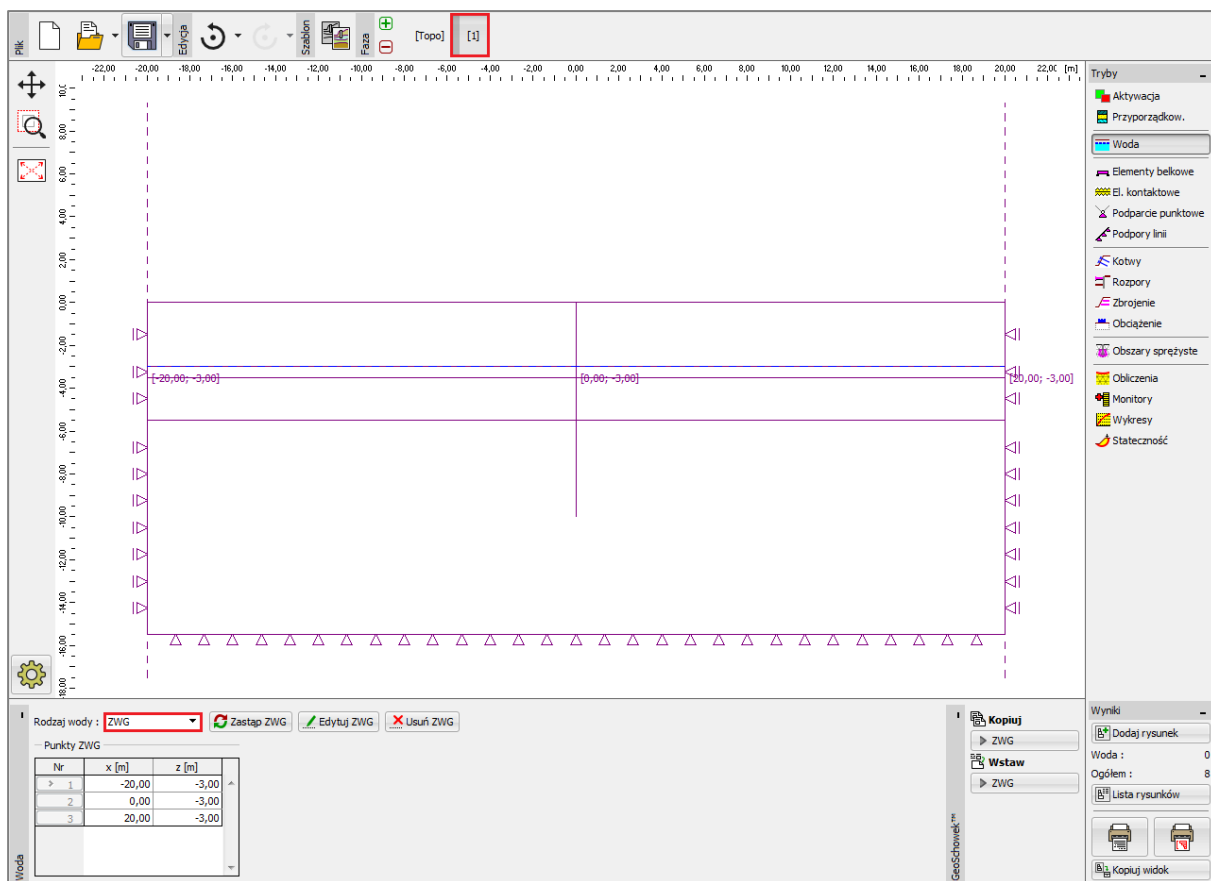
*Uwaga: Sprawdzimy następnie czy wygenerowana siatka elementów skończonych jest odpowiednio gęsta w odniesieniu do wielkości i stopnia złożoności analizowanego problemu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1). Zwiększona gęstość siatki wpływa pozytywnie na stabilność obliczeń modeli nieliniowych podobnie jak zmniejszenie sztywności przy ścinaniu  $K_s$ .*



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

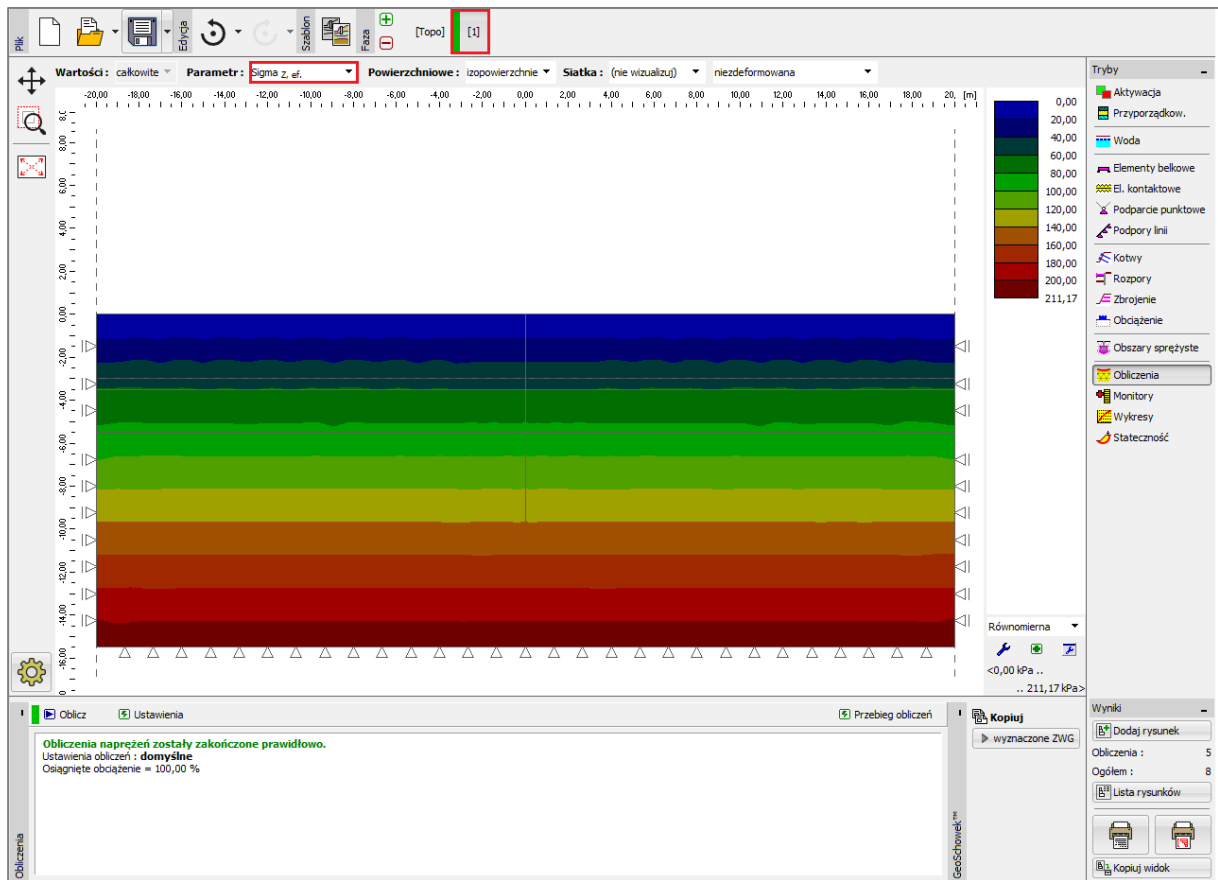
## Faza nr 1: obliczanie naprężeń geostatycznych

Po wygenerowaniu siatki elementów skończonych przejdziemy do fazy nr 1 i wprowadzimy poziom zwierciadła wody gruntowej (nazywanego dalej skrótowo ZWG) na głębokości 3.0 m poniżej powierzchni terenu (patrz rysunek).



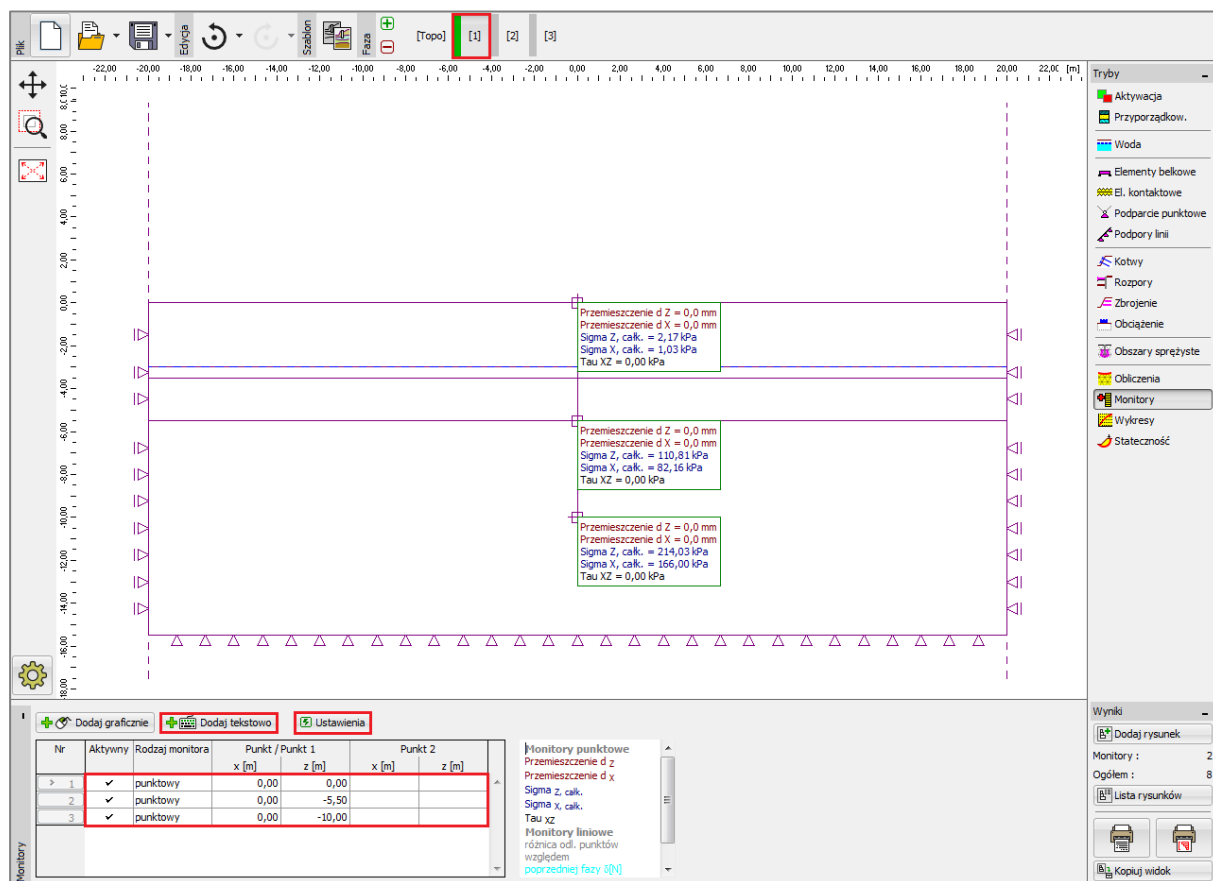
Ramka "Woda" – faza nr 1 (ZWG na głębokości 3.0 m)

Przeprowadzimy teraz obliczenia naprężeń pierwotnych w gruncie. Pozostawimy “Ustawienia domyślne” obliczeń (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Obliczenia” – faza nr 1 (pionowe naprężenia geostatyczne  $\sigma_{z,ef}$ )

W celu umożliwienia śledzenia wartości wybranych wielkości (podczas obliczeń poszczególnych faz) zdefiniujemy w programie tak zwane *monitory punktowe* (wybierając przycisk “Dodaj”). Wskażemy położenie punktów odpowiadających koronie oraz podstawie projektowanej ścianki szczelnej, czyli punkty o współrzędnych [0.0; 0.0] oraz [0.0; – 10.0], a następnie w obszarze wykopu wprowadzimy punkt w dnie wykopu [0.0; – 5.5].

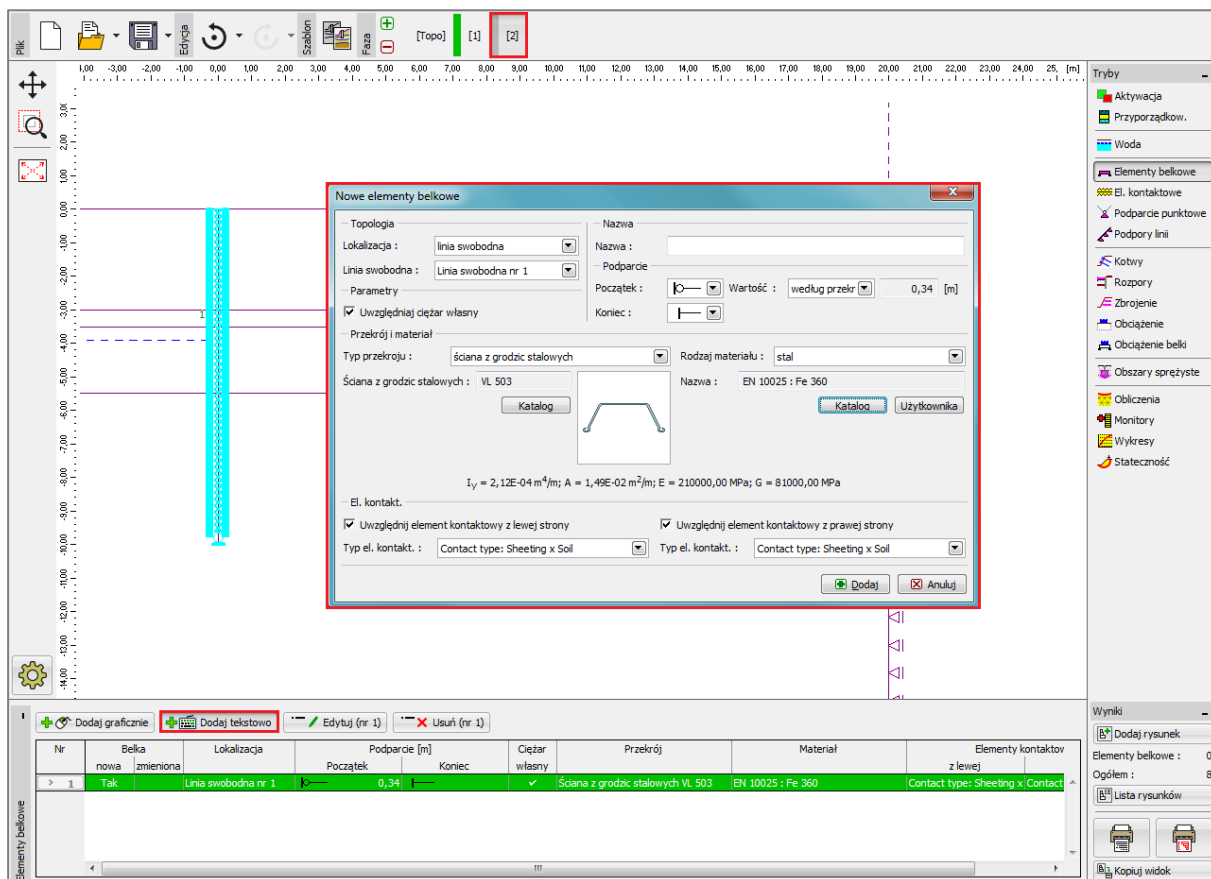


Ramka “Monitory” – faza nr 1 (monitory punktowe)

*Uwaga: Możemy dokonać selekcji wielkości, których wartości chcemy przedstawić na danym widoku wybierając przycisk “Ustawienia” (na dole ekranu). Podczas analizowania ścianki szczelnej interesujące są przede wszystkim zmiana naprężeń geostatycznych oraz wartości przemieszczenia pionowego i poziomego.*

## Faza nr 2: modelowanie elementów belkowych

Przejdziemy teraz do ramki “Elementy belkowe” i zamodelujemy ściankę szczelną. Wprowadzimy następujące parametry – lokalizację belki, materiał i gatunek stali, typ przekroju poprzecznego (VL 503) oraz sposób podparcia na końcach belki (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

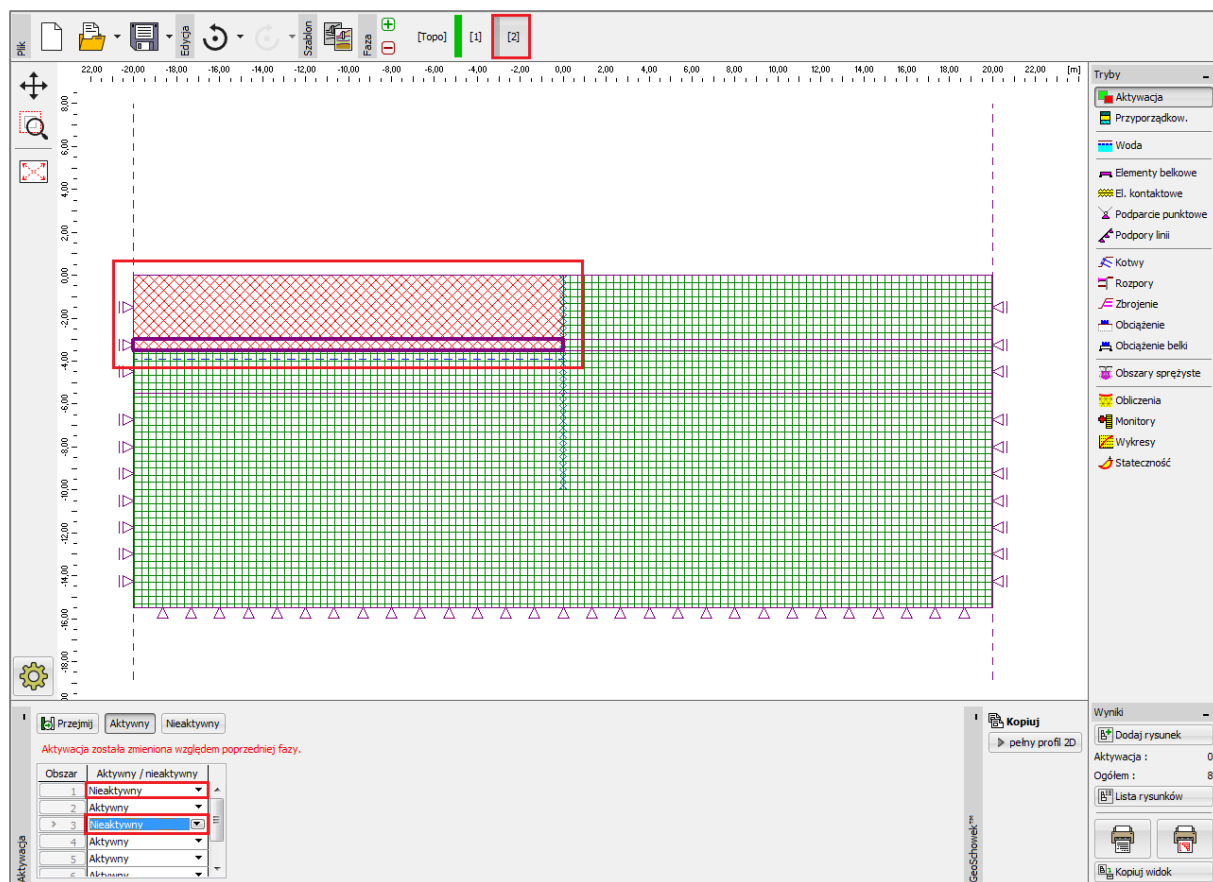


Okno dialogowe “Nowe elementy belkowe” – faza nr 2

*Uwaga: Zakładamy przegubowe podparcie ścianki szczelnej u jej podstawy (stopa). Przyjęty warunek brzegowy powoduje, że moment zginający w podstawie ścianki będzie wynosił zero (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*



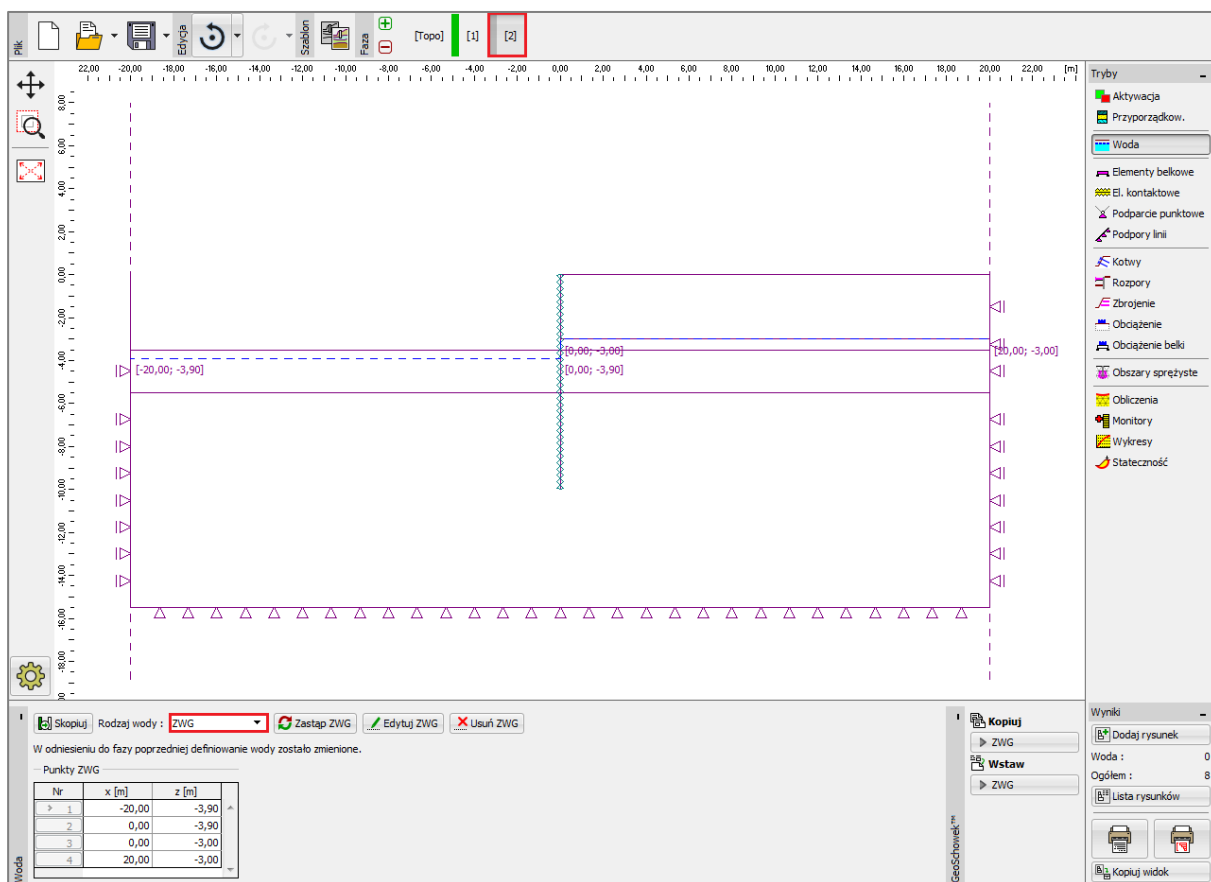
Przejdziemy następnie do ramki “Aktywacja” i zamodelujemy wykop odpowiadający pierwszemu etapowi głębienia – tzn. ustawimy odpowiednie obszary jako nieaktywne (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Aktywacja” – faza nr 2

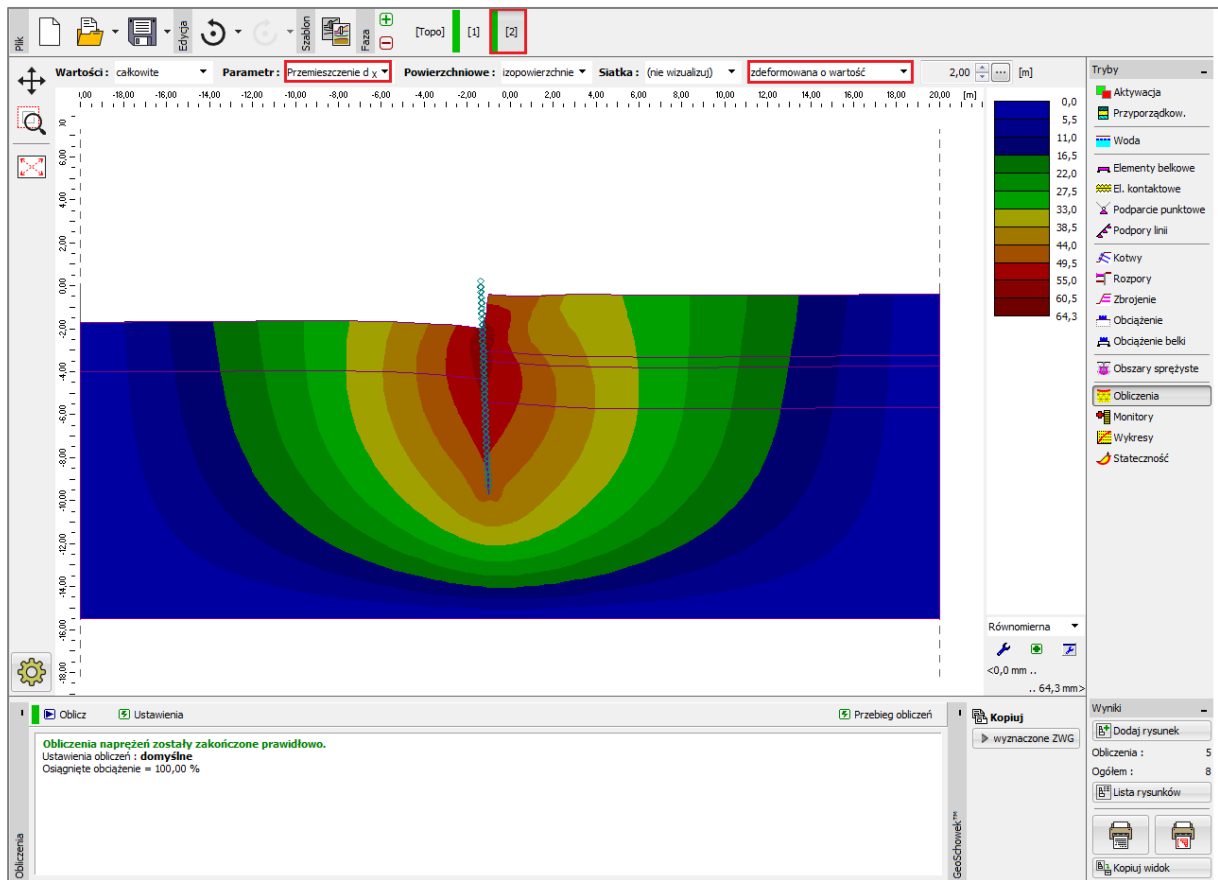
*Uwaga: Oczywistym jest, patrząc na powyższy rysunek, że wbudowany w program korektor modelu geometrycznego automatycznie podzielił warstwy gruntu przecięte ścianką szczelną na pojedyncze ograniczone warstwami i ścianką obszary (więcej informacji w pomocy – naciśnij przycisk F1).*

Następnie przejdziemy do ramki “Woda”, w której wprowadzimy zmiany w poziomie zwierciadła wody gruntowej zgodnie z poniższym rysunkiem. Pozostałe parametry pozostają bez zmian.

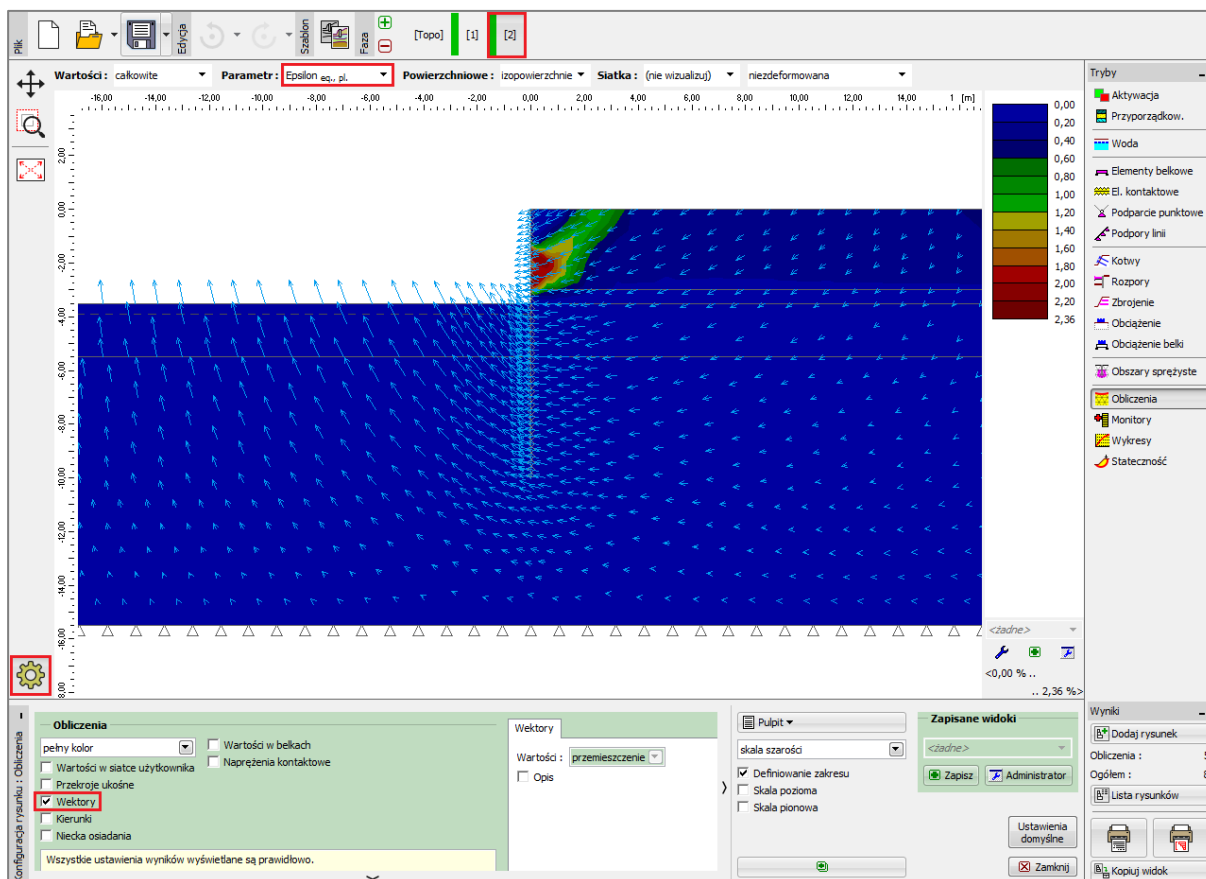


*Ramka “Woda” – faza nr 2 (zmiana poziomu ZWG)*

Następnie przeprowadzimy obliczenia w fazie nr 2 i przejdziemy do analizy wykresów sił wewnętrznych wzdłuż belki, ekwiwalentnych odkształceń plastycznych oraz deformacji konstrukcji.



Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (przemieszczenie poziome  $d_x$  – siatka odkształcona)

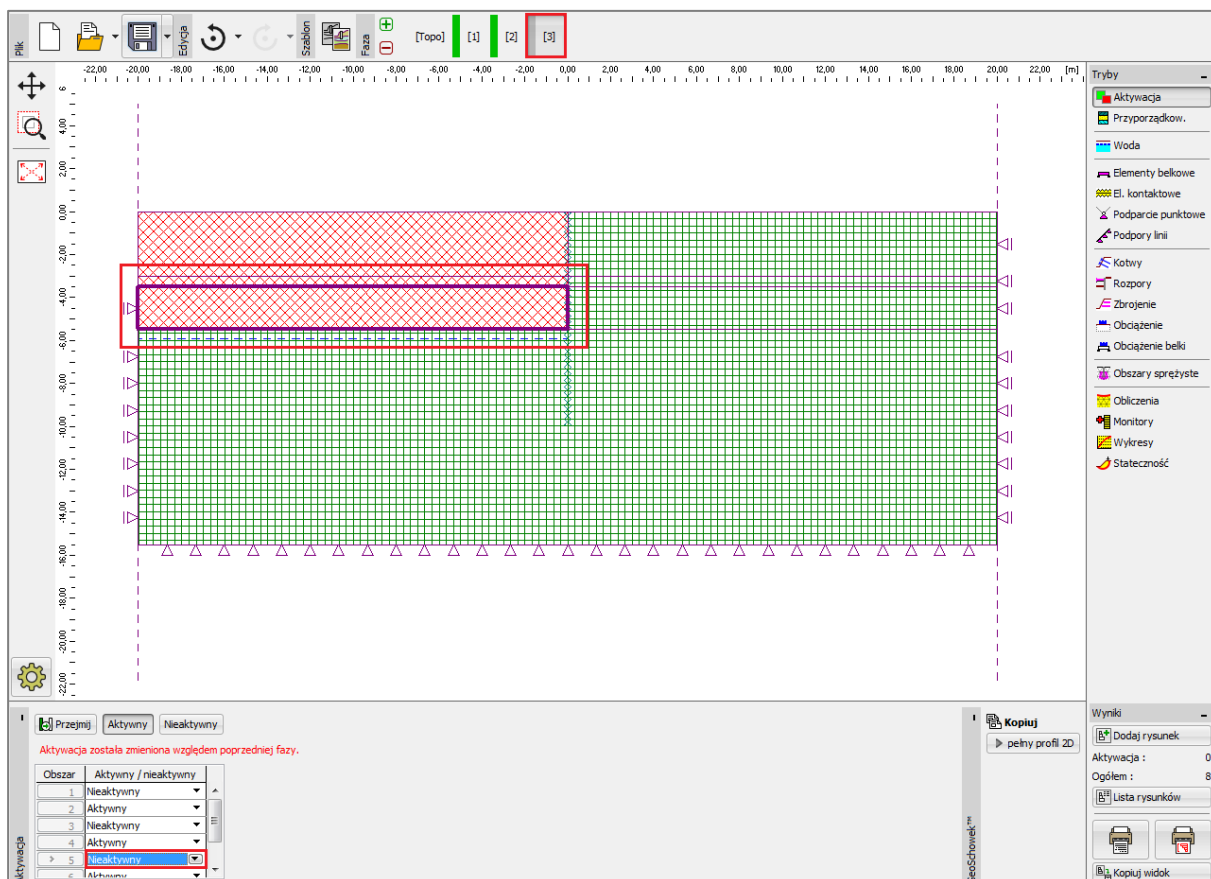


Ramka "Obliczenia" – faza nr 2 (ekwiwalentne odkształcenia plastyczne  $\epsilon_{eq.,pl.}$  oraz wektory przemieszczenia)

21

### Faza nr 3: definiowanie kotew

Dodamy fazę obliczeń nr 3, a następnie usuniemy pozostały grunt uzyskując docelową głębokość wykopu. Wybierzemy właściwy obszar kursorem myszy i wybierzemy z listy “Nieaktywny”.



Ramka “Aktywacja” – faza nr 3

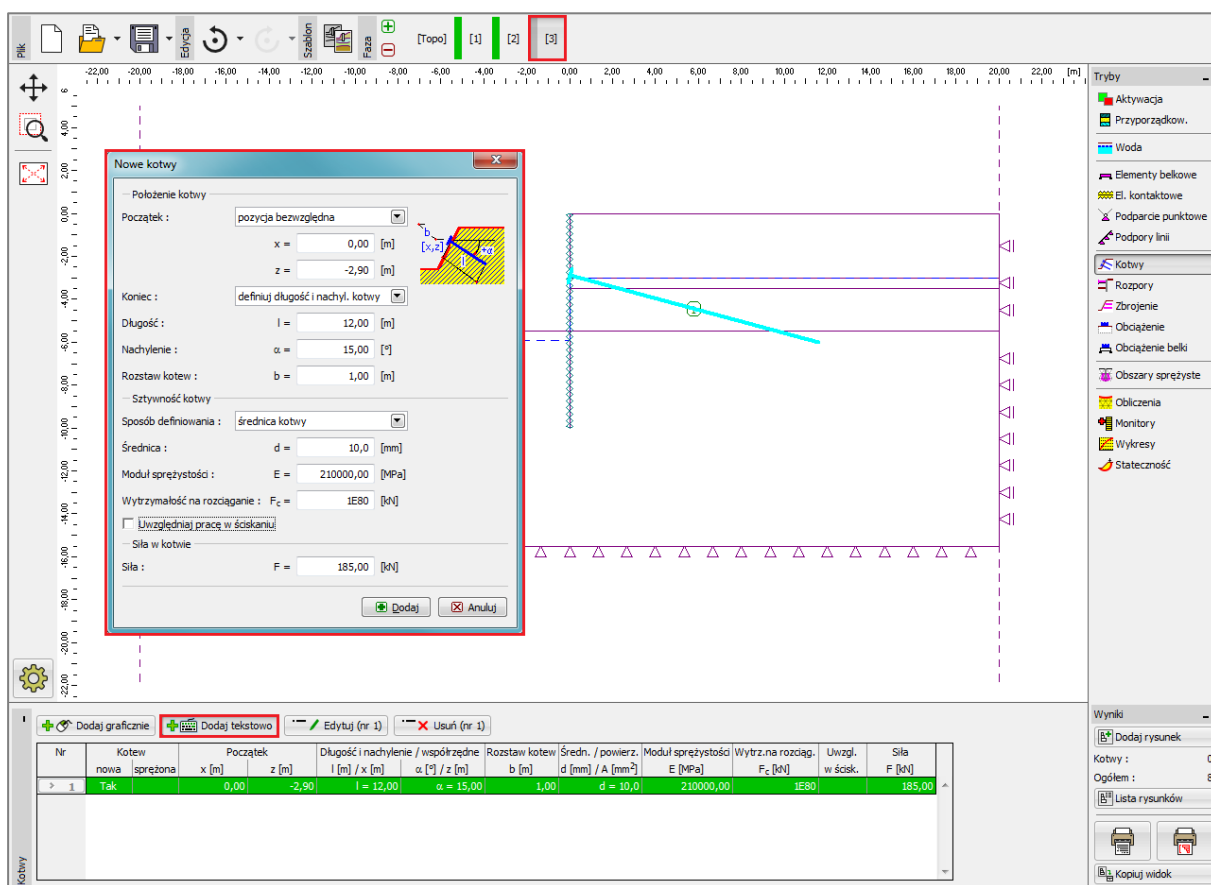
Następnie wybierając przycisk “Dodaj tekstowo” w ramce “Kotwy” zdefiniujemy w oknie dialogowym “Nowe kotwy” kotwy o sile sprężającej  $F = 185 \text{ kN}$ . Przyjmiemy kotwy znajdujące się na głębokości 2.9 m poniżej powierzchni terenu – wprowadzimy głowicę kotwy o współrzędnych [0.0; -2.9].

*Uwaga: Kotwy modelowane są w programie jako sprężysty element prętowy o stałej sztywności normalnej. Nośność graniczna kotwy definiowana jest poprzez określenie maksymalnej dopuszczalnej siły występującej w kotwie (wytrzymałości na rozciąganie). Kotew umocowana jest w gruncie jedynie w dwóch punktach – na początku i na końcu. Program nie uwzględnia współpracy między gruntem i kotwą na długości kotwy (więcej informacji w pomocy – naciśnij przycisk F1).*

W analizowanym zadaniu, przyjmujemy następujące parametry kotew:

- Długość kotwy:  $l = 12 \text{ m}$ ,
- Kąt nachylenia:  $\alpha = 15^\circ$ ,
- Średnica kotwy:  $d = 10 \text{ mm}$ ,
- Rozstaw kotew:  $b = 1 \text{ m}$ .

*Uwaga: Sztywność kotew modelowana jest w programie poprzez moduł sprężystości, pole przekroju poprzecznego oraz rozstaw kotew. Należy mieć na uwadze, że analizując problem w płaskim stanie odkształcenia punktowy rozstaw kotew modelowany jest membraną o szerokości 1 m. Innym istotnym parametrem kotew jest wartość siły sprężającej i wytrzymałość na rozciąganie. W analizowanym przypadku nie dopuszczamy możliwości zniszczenia cięgien sprężających, przyjmujemy zatem dowolnie wysoką wartość wytrzymałości na rozciąganie  $F_c$  (więcej informacji w pomocy – naciśnij przycisk F1).*

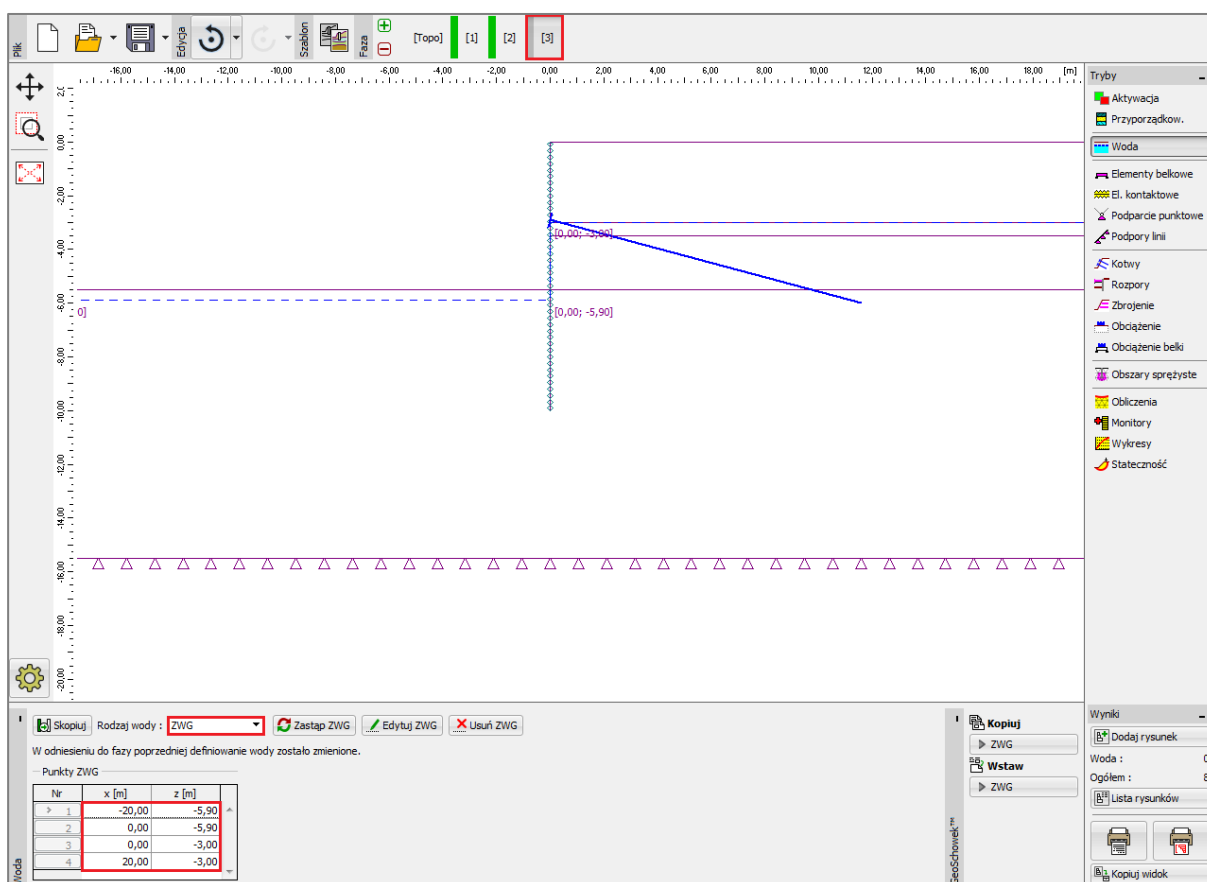


Okno dialogowe "Nowe kotwy" – faza nr 3

*Uwaga: Kotwy ulegają odkształceniu w wyniku pracy konstrukcji. Efektem odkształcenia kotwy oraz otaczającego ją masywu gruntowego może być spadek siły sprężającej w kotwie. Jeżeli chcemy osiągnąć konkretną wartość siły sprężającej w kotwie konieczne jest jej doprężenie w kolejnych fazach pracy lub zadanie odpowiednio większej początkowej siły sprężającej (uzyskana siła w kotwie po zakończeniu danej fazy obliczeniowej wyświetlana jest na wykresie przy głowicy kotwy poniżej zdefiniowanej siły sprężającej). Nie ma możliwości zmiany parametrów kotwy w kolejnych fazach obliczeniowych, można jedynie doprężyć kotew w celu osiągnięcia zakładanej wartości siły w kotwie lub usunąć element z konstrukcji.*

*Kotew powinna być osadzona w masywie gruntowym wystarczająco solidnie (utwierdzona do elementu) aby nie uległa teoretycznemu wyciągnięciu z gruntu (utrata nośności) w przypadku powstania znacznych odkształceń plastycznych w okolicy buławy (utwierdzenie w węźle, zbyt szybki przyrost gęstości w okolicy buławy) prowadząc do mało wiarygodnego spadku siły sprężającej.*

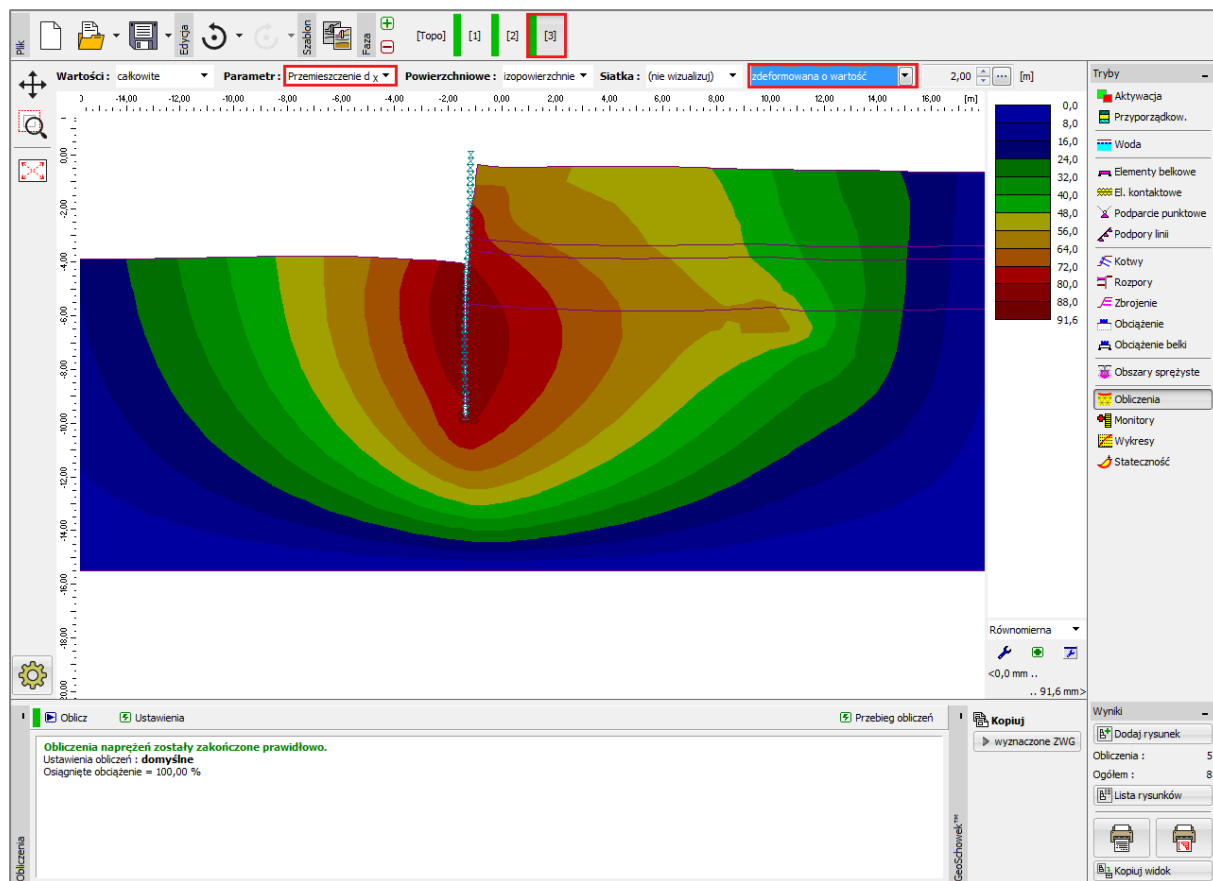
Ostatnim krokiem obliczeń w fazie nr 3 będzie zmiana poziomu zwierciadła wody gruntowej zgodnie z poniższym rysunkiem. Pozostałe parametry pozostają bez zmian.



Ramka "Woda" – faza nr 3 (zmiana poziomu ZWG)

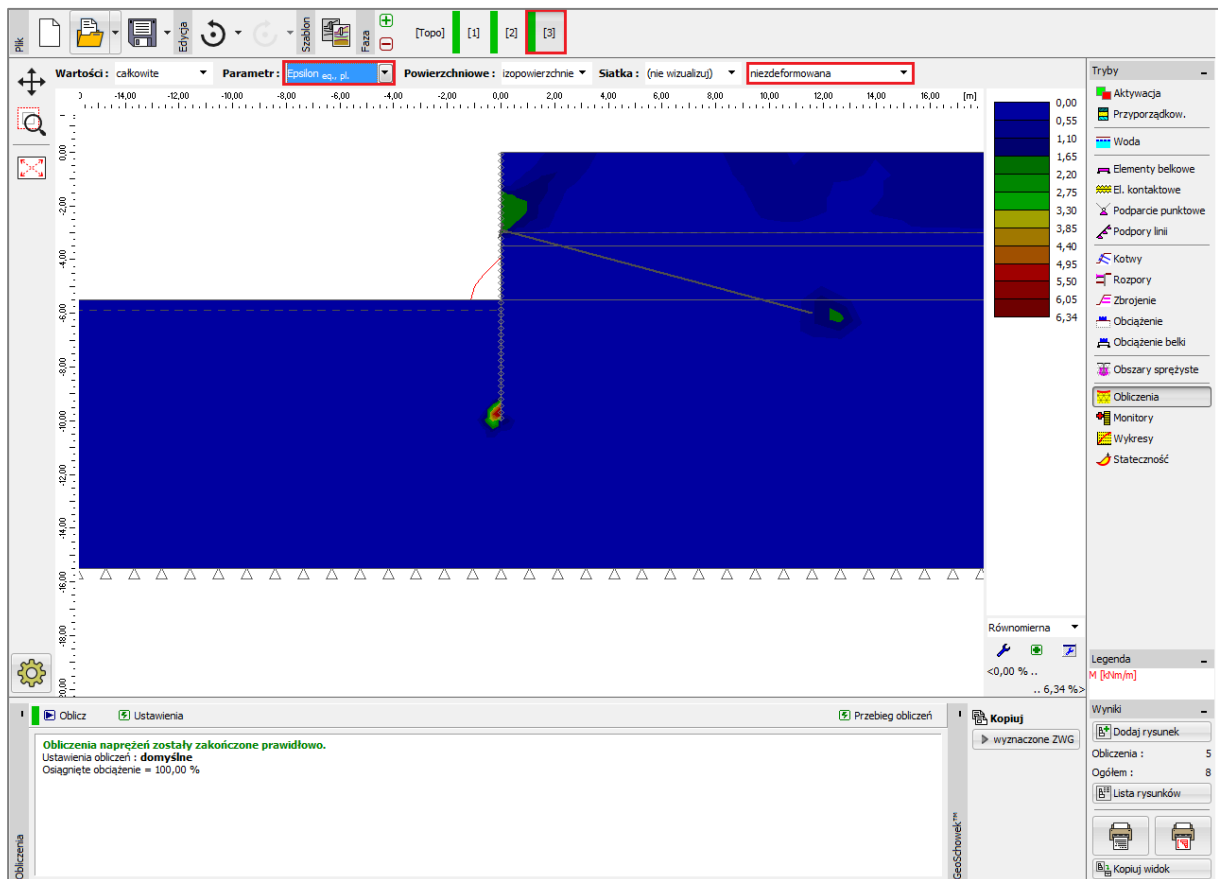


Następnie przeprowadzimy obliczenia w fazie nr 3 i przejdziemy do ponownej analizy wyników obliczeń (podobnie jak w przypadku poprzedniego etapu).



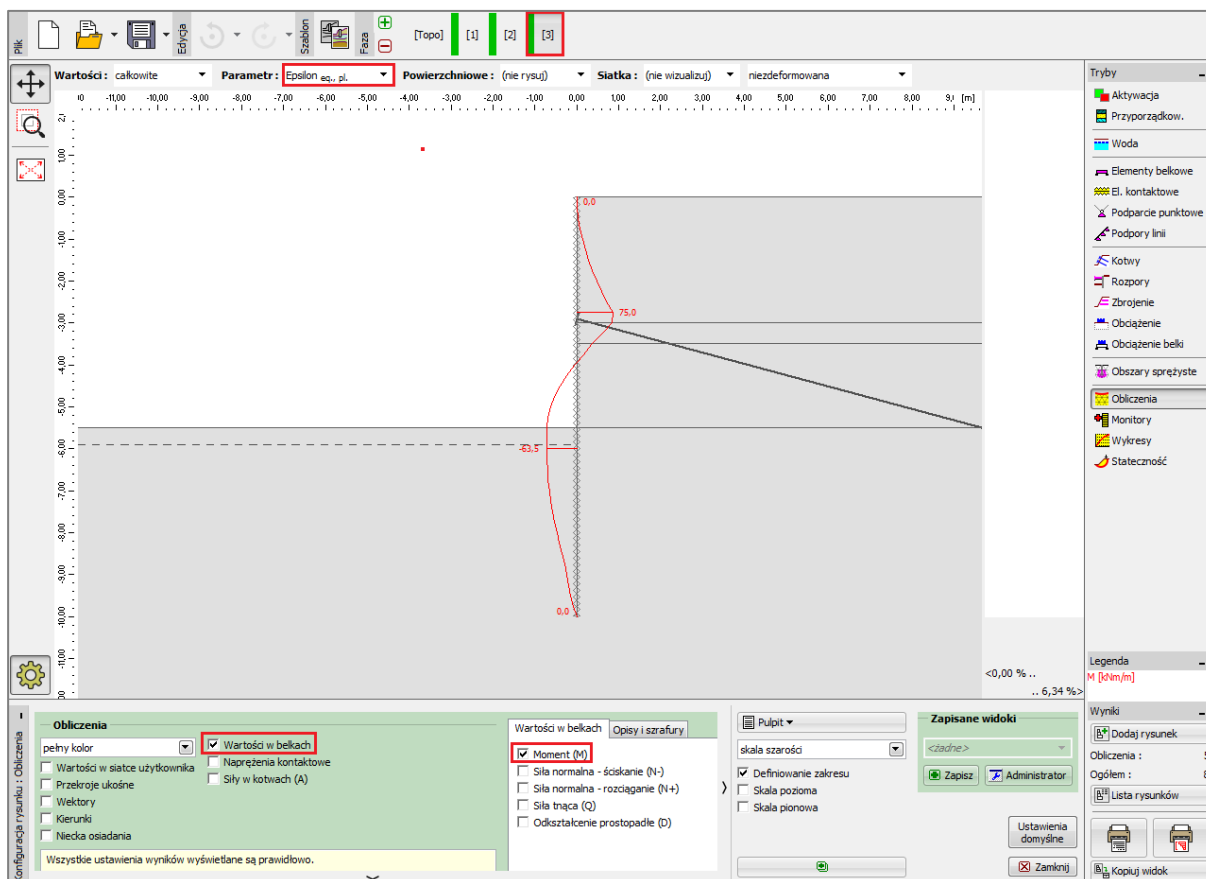
Ramka "Obliczenia" – faza nr 3 (przesunięcie poziome  $d_x$  – siatka odkształcona)

Przedstawiony powyżej rysunek pozwala na odczytanie maksymalnego przesunięcia poziomego w pobliżu ścianki szczelnej zbudowanej z profili stalowych, które wynosi  $d_x = 91.6 \text{ mm}$ .



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

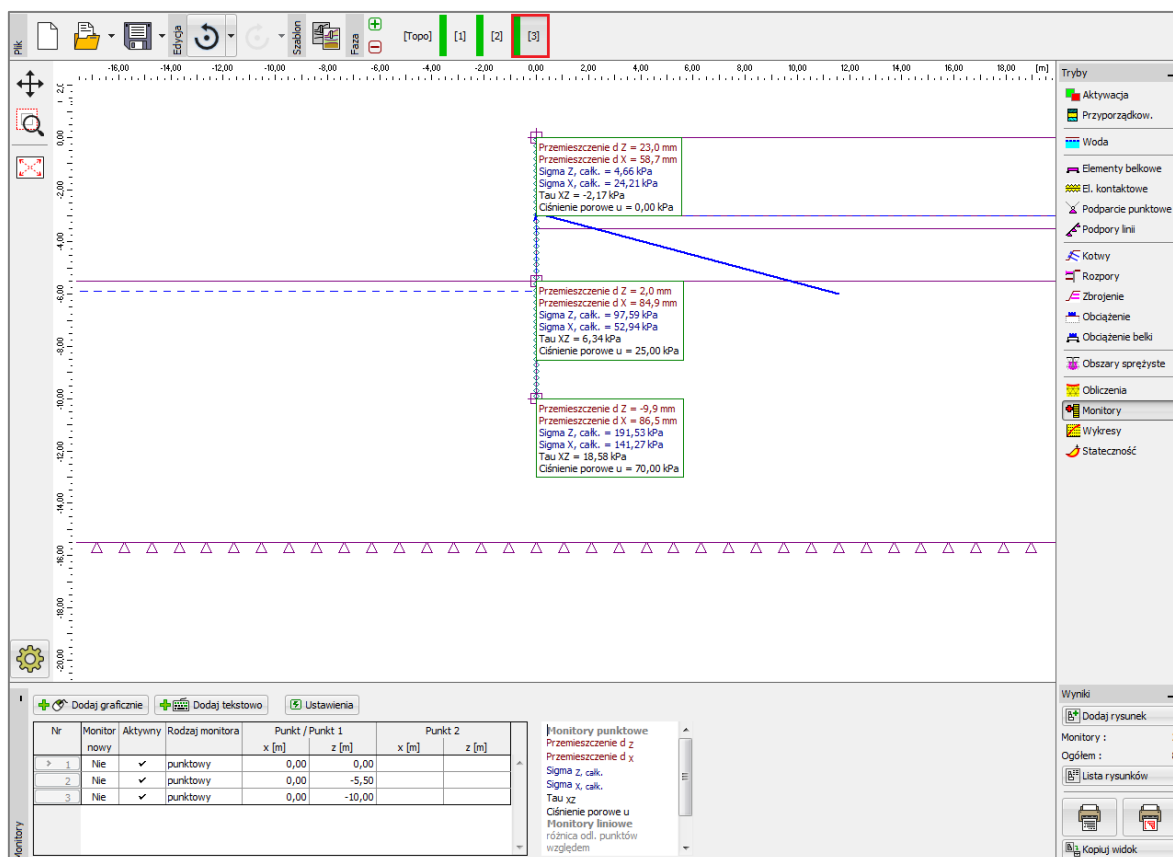
Przedstawiona powyżej mapa równoważnych odkształceń plastycznych prowadzi do oczywistego wniosku, że największe odkształcenia plastyczne powstały w okolicy podstawy ścianki szczelnej. Obszar gruntu uplastycznionego w poprzedniej fazie obliczeń znajdował się w pobliżu głowicy kotwy (więcej informacji w pomocy – naciśnij przycisk F1).



Ramka "Obliczenia" – faza nr 3 (wykres momentu zginającego  $M$ )

Następnym krokiem będzie odnalezienie lokalnych ekstremów na wykresie momentów zginających na wysokości ścianki i zebranie ich dodatkowo w tabeli podsumowującej obliczenia znajdującej się w ostatniej części tego przewodnika.

Przejdziemy teraz do analizy wyników w zdefiniowanych wcześniej monitorach i określimy przemieszczenie korony ścianki szczelnej.



Ramka "Monitory" – faza obliczeń nr 3 (monitory punktowe)

### Analiza wyników:

Prezentowana poniżej tabela zawiera wyniki ekstremalnych sił wewnętrznych działających na wysokości ścianki szczelnej w fazie obliczeniowej nr 2 oraz 3. Tabela zawiera wartości momentów zginających. Obliczenia przeprowadzone zostały przy zastosowaniu modelu materiałowego gruntu Mohra-Coulomba Modyfikowanego oraz przy lokalnie dogęszczonej siatce elementów skończonych (zagęszczenie linii). Otrzymane wyniki zostały następnie porównane z obliczeniami wykonanymi w programie pakietu GEO5 – Ściana Analiza.

Model materiałowy / program	Faza 2 $M [kNm/m]$	Faza 3 – ścianka $M [kNm/m]$	Faza 3 – kotew $M [kNm/m]$
Modyfikowany Mohra–Coulomba	-12.3	-63.5	75
Ściana analiza * (rozwiązanie analityczne)	29.16	- 28.91	110.57

Podsumowanie wyników – momenty zginające na wysokości ścianki szczelnej

