

## Modelowanie numeryczne wyrobiska tunelowego wykonywanego metodą konwencjonalną (NATM)

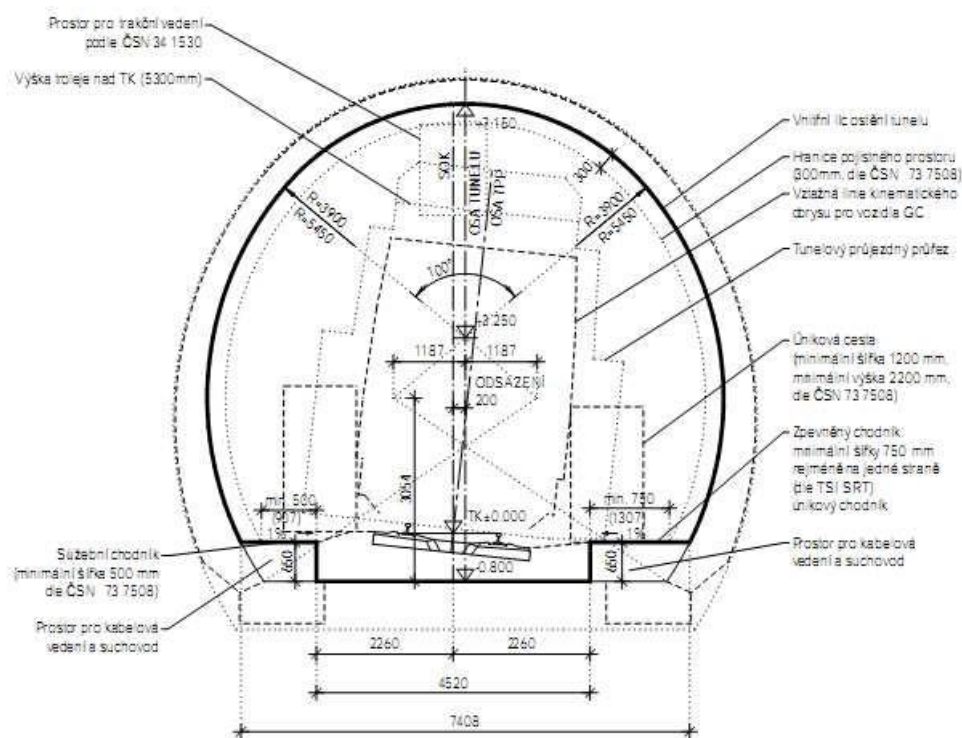
Program: MES - Tunel

Plik powiązany: [Demo manual 26.gmk](#)

Celem przedmiotowego przewodnika jest przedstawienie analizy numerycznej tunelu jednorodowej linii kolejowej z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

### Sformułowanie zadania

Wykonać model i przeprowadzić obliczenia obudowy stałej tunelu jednotorowej linii kolejowej dużych prędkości od 160 do 230 km/h. Przekrój tunelu zaprezentowany na poniższym *rysunku* został zaprojektowany zgodnie z wytycznymi SZDC (Správa železniční dopravní cesty - organ czeskiej administracji kolejowej odpowiednik PKP Polskie Linie Kolejowe).



*Przekrój tunelu jednotorowej linii kolejowej wykonanego zgodnie z wytycznymi SZDC*

Tunel zostanie wykonany metodą klasyczną, konwencjonalną (Nowa Metoda Austriacka) dokonując sekwencyjnego drążenia tunelu z podziałem na dwie warstwy poziome: kalotę oraz spąg. Nadkład gruntu wynosi w przybliżeniu 14 metrów. Grubość obudowy stałej wykonanej z betonu natryskowego klasy C20/25 wynosi 200 mm. Sklepienie tunelu zabezpieczone jest przy pomocy kotew skalnych (typ WIBOLT EXP marki HUIS) rozszerzanych w wyniku działania ciśnienia hydraulicznego wody o nośności 120kN. Można założyć, opierając się na przeprowadzonych badaniach geotechnicznych, że warstwy geologiczne będą równoległe do powierzchni terenu. Profil geologiczny podłoża przedstawiono w poniższej Tabeli 1.

Tabela 1 – Parametry gruntów i skał

Grunt, skała (klasyfikacja*)	Głębokość [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [kPa]	$\nu$ [–]	$E_{def}$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Piasek pylasty (S4)	0 – 3	19,5	29	10	0,3	10	30	22
Żwir pylasty (G4)	3 – 5	19,5	33	8	0,3	70	210	22
Mocno zwietrzały łupek (R5)	5 – 10	24	29	30	0,33	45	135	25
Mocno zwietrzały łupek (R3)	> 10	26	38	250	0,25	350	1050	26
Obszar kotwiony (R5)	–	24	29	63	0,33	45	135	29

\*według klasyfikacji skał i gruntów ISRM

## Rozwiązanie

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

- Topologia: ustawienia oraz modelowanie zagadnienia (elementy kontaktowe, modelowanie obudowy tunelu),
- Definiowanie procedury obliczeniowej: wprowadzanie materiału obudowy tunelu oraz faz budowy tunelu,
- Faza budowy nr 1: obliczanie naprężeń geostatycznych w masywie skalnym,
- Faza budowy nr 2: modelowanie drążenia tunelu w obszarze kaloty, aktywacja wydrążonego tunelu,
- Faza budowy nr 3: zabezpieczenie sklepienia tunelu w obszarze kaloty betonem natryskowym wykonanym in-situ stanowiącym element obudowy stałej,
- Faza budowy nr 4: poprawienie parametrów materiałowych dojrzałego betonu (kalota),
- Faza budowy nr 5: modelowanie drążenia tunelu w obszarze spągu, aktywacja wydrążonego tunelu,
- Faza budowy nr 6: zabezpieczenie sklepienia tunelu w obszarze spągu betonem natryskowym wykonanym in-situ stanowiącym element obudowy stałej,
- Faza budowy nr 7: poprawienie parametrów materiałowych dojrzałego betonu (spąg),

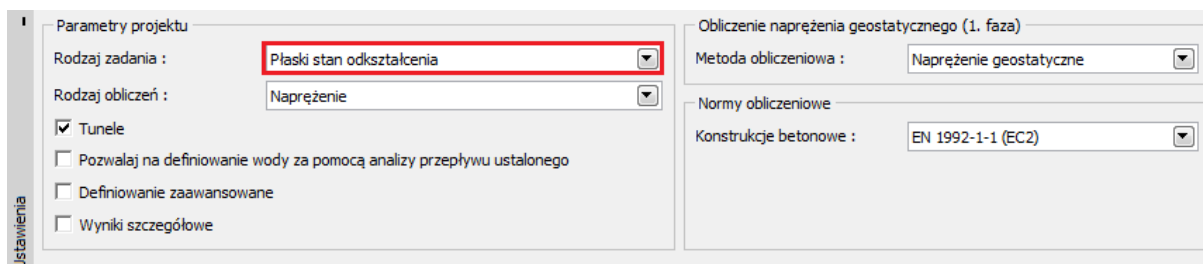
- Analiza wyników, wnioski: niecka osiadania terenu, odkształcenie masywu skalnego, rozkład sił wewnętrznych oraz przemieszczeń w obudowie tunelu, reakcje w kotwach.

*Uwaga: Modelowanie w programie GEO5 MES składa się z dwóch zasadniczych części. Część pierwsza polega na określeniu rozmiaru modelu numerycznego w fazie topologia, zdefiniowaniu wydzielen geotechnicznych – gruntów i skał, wprowadzeniu geometrii tunelu za pomocą punktów oraz linii i przypisanie ich do odpowiednich warstw modelu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

*Część druga polega natomiast na wprowadzaniu poszczególnych faz budowy i przeprowadzeniu obliczeń. Głównym celem w kolejnych fazach obliczeń jest zamodelowanie rzeczywistego zachowania wybranego fragmentu konstrukcji tunelowej poprzez aktywację, dezaktywację lub zmianę parametrów materiałowych wybranych ograniczonych obszarów modelu – poprzez dodawanie lub usuwanie elementów belkowych (np. elementów obudowy tunelu) lub zmianę ich parametrów (materiału lub geometrii). Otrzymamy zatem model numeryczny, którego zachowanie można utożsamić z pracą rzeczywistej konstrukcji, co pozwoli na właściwe zwymiarowanie obudowy tunelu.*

### Topologia (Część 1): definiowanie warstw oraz parametrów gruntów

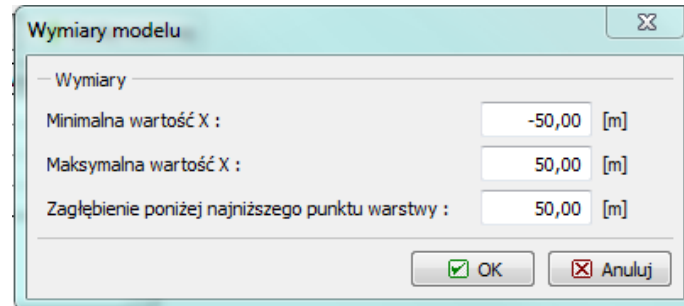
Pierwszym krokiem będzie przejście do ramki “Ustawienia”, gdzie pozostawimy metodę obliczania naprężeń geostatycznych do wykonania obliczeń w fazie budowy nr 1. Jako rodzaj obliczeń należy wybierać opcję “Naprężenie”. Zaznaczymy dodatkowo opcję “Tunele”, która pozwoli na możliwe realistyczne zamodelowanie zachowania obudowy stałej tunelu.



Ramka “Ustawienia”

*Uwaga: W przypadku wybrania trybu “Tunele” istnieje możliwość wykorzystania programu do obliczania wyrobisk podziemnych (modelowanie efektu 3D wyrobiska wykonywanego Nową Metodą Austriacką), analizowania wpływu stopniowego pogarszania stanu elementów belkowych, poddania elementów belkowych i obszarów obciążeniu termicznemu oraz obciążeniu związanemu z pęcznieniem gruntu w wybranych obszarach a także monitorowanie wyników (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

Następnie wprowadzimy wymiary modelu numerycznego rozwiązywanego zadania oraz warstwy terenu. Dla analizowanego zadania przyjmujemy zakres modelu  $\langle -50 \text{ m}; 50 \text{ m} \rangle$  oraz zagłębienie poniżej najniższego punktu warstwy o wartości 50.0 m.



Okno dialogowe "Wymiary modelu"

*Uwaga: Warstwy oraz wymiary modelu analizowanego problemu należy przyjąć wystarczająco duże, aby zadane warunki brzegowe nie miały wpływu na stan naprężenia i odkształcenia w masywie skalnym w obszarze występowania konstrukcji. Zalecane wartości wymiarów modelu w przypadku różnego rodzaju zadań przedstawione zostały i opisane w bardziej szczegółowy sposób w pomocy do programu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

warstwa nr 1		warstwa nr 2		warstwa nr 3		warstwa nr 4	
x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
-50,0	22,0	-50,0	19,0	-50,0	17,0	-50,0	12,0
50,0	22,0	50,0	19,0	50,0	17,0	50,0	12,0

Współrzędne punktów dla poszczególnych warstw gruntów

Przejdziemy następnie do ramki "Grunty", w której wprowadzimy parametry gruntów oraz skał a także parametry skał w obszarze występowania kotew skalnych (patrz *uwaga*). Przyjmujemy model materiałowy Mohra-Coulomba do wykonania obliczeń. Przyjęty model pozwala na uwzględnienie w obliczeniach lokalnych lub globalnych stref gruntu uplastycznionego (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

*Uwaga: Kotwy skalne uwzględniane są w modelu numerycznym przy pomocy metody polegającej na wprowadzeniu w obszarze występowania kotew (obszar kotwionego przesklepienia o miąższości równej długości kotew) skały o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych. W takiej sytuacji przyjmuje się zwykle zwiększoną spójność skały. Spójność wynikowa skały zwiększona ze względu na zastosowanie kotew określana jest z zależności:*

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [kPa]}$$

gdzie:  $c_{h+s}$  spójność wynikowa skały zwiększona ze względu na zastosowanie kotew,  
 $c_h$  spójność skały bez zastosowania kotew,  
 $c_s$  przyrost spójności skały ze względu na zastosowanie kotew.

Przyrost spójności skały ze względu na zastosowanie kotew skalnych obliczona została według następującej zależności:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2.058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1.5} = 33.0 \text{ kPa}$$

gdzie:  $N_u$  nośność jednej kotwy skalnej [kN],  
 $A_k$  obszar wzmacniany przez jedną kotwę skalną [m<sup>2</sup>],  
 $\varphi_{ef}$  kąt tarcia wewnętrznego skały [°],  
 $\gamma_{kc}$  współczynnik bezpieczeństwa nośności kotwy [-].

Do dalszych prac projektowych przyjmujemy **10 kotew skalnych (typ WIBOLT EXP marki HUIS) o nośności 120kN rozstawionych co 3.5m**. Spójność wynikowa skały w obszarze wzmocnionym kotwami odpowiada skale klasy R5 (wg ISRM):

$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ kPa}$$

Moduł sprężystości  $E$  [MPa] nie został określony bezpośrednio z badań geotechnicznych. Przyjęty został pośrednio na podstawie modułu odkształcenia  $E_{def}$  [MPa] korzystając z zależności  $E = 3 \cdot E_{def}$ .

Przyjmujemy do obliczeń kąt dylatacji  $\psi$  [°] równy zero. Przypiszemy następnie grunty i skały do poszczególnych warstw i obszarów (patrz poniższy rysunek).

Dodaj nowy grunt

Identyfikacja
Nazwa :
Heavily weathered slate (R5)

Model materiałowy
Model materiałowy :
Mohr-Coulomb

Dane podstawowe
Ciężar objętościowy :
 $\gamma = 24,00$  [kN/m<sup>3</sup>]
Moduł sprężystości :
 $E = 135,00$  [MPa]
Zmiana sztywności z głębokością:
stała

Współczynnik Poisson'a :
 $\nu = 0,33$  [-]

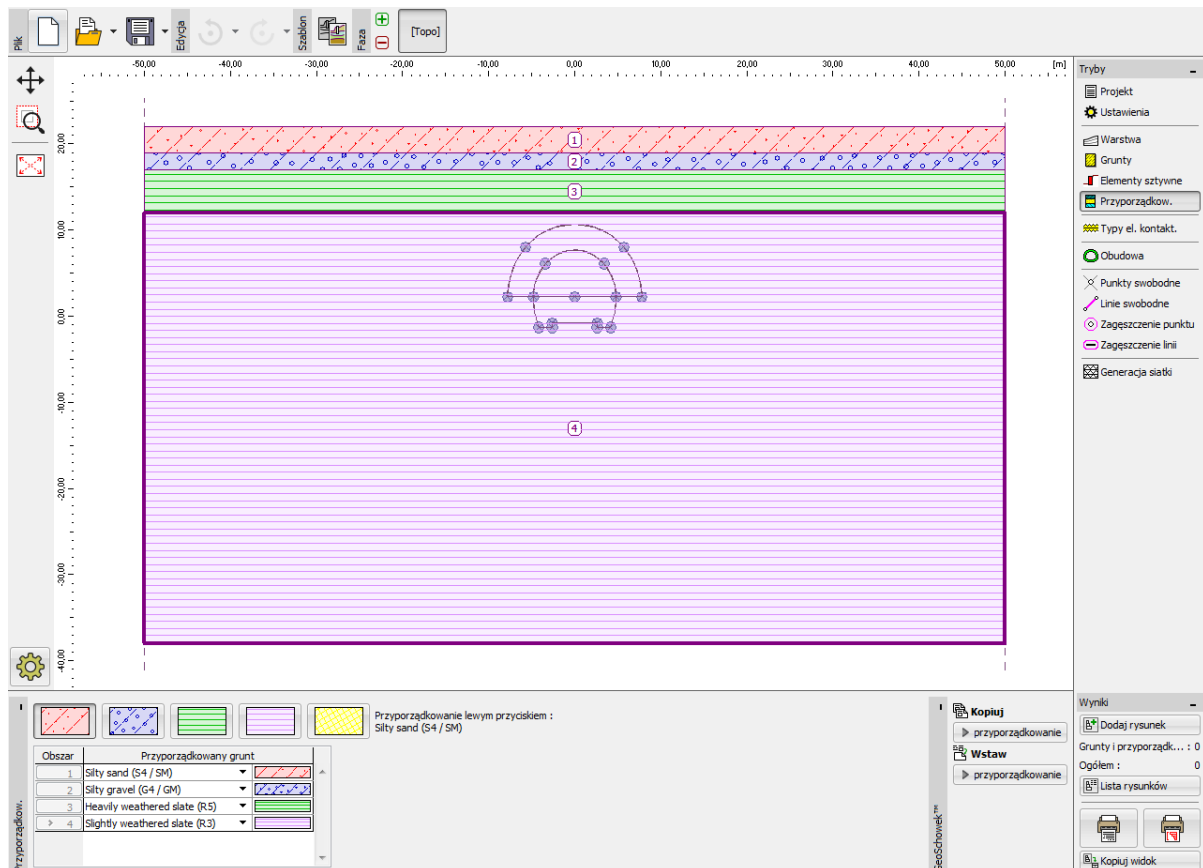
Wypór
Sposób obliczania wyporu :
domyślny
Ciężar gruntu nawodn. :
 $\gamma_{sat} = 25,00$  [kN/m<sup>3</sup>]

Model Mohr-Coulomb
Kąt tarcia wewnętrzznego :
 $\phi_{ef} = 29,00$  [°]
Spójność gruntu :
 $c_{ef} = 30,00$  [kPa]
Kąt dylatacji :
 $\psi = 0,00$  [°]

Pokazuj
Kolor
Kategorie szrafur
GEO
Szrafura
Inna skała

Klasyfikacja
Klasyfikuj
Wyczyść
Dodaj
Anuluj

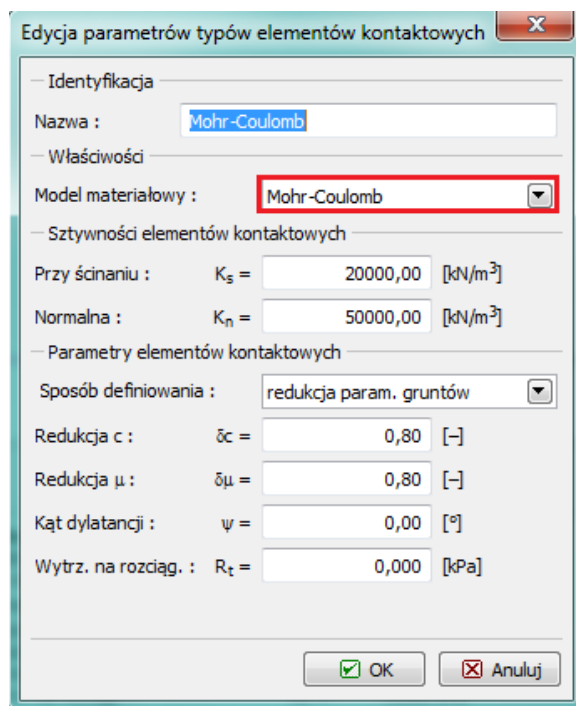
Okno dialogowe "Dodaj nowy grunt"



*Ramka "Przyporządkowanie"*

Następnym krokiem będzie wprowadzenie typów elementów kontaktowych w ramce "Typy elementów kontaktowych", które następnie przypiszemy na granicy między obudową wykopu a gruntem lub skałą. Przyjmujemy następujące wartości parametrów elementów kontaktowych:

- Sztywność przy ścinaniu:  $K_s = 20,000 \text{ kN/m}^3$ ,
- Sztywność normalna:  $K_n = 50,000 \text{ kN/m}^3$ ,
- Współczynnik redukcyjny do parametrów gruntów:  $\delta c = \delta \mu = 0.8$ .



Okno dialogowe "Edycja parametrów typów elementów kontaktowych"

*Uwaga: Elementy kontaktowe pozwalają na uwzględnienie zjawiska wzajemnego oddziaływania dwóch różnych materiałów, jak obudowa i grunt lub dwóch różnych rodzajów gruntów itp. 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).*

*Elementy kontaktowe zostaną wprowadzone na powierzchni styku obudowy tymczasowej tunelu oraz skały tzn. dopuszcza się możliwość przemieszczenia obudowy stałej względem wykonanego wcześniej wyrobiska.*

*Elementy kontaktowe wprowadza się zwykle w gruntach ściśliwych; można je pominąć z pewną ostrożnością dla świeżo wykonanych wyrobisk skalnych (w przypadku tuneli). Problematykę i metody definiowania i wprowadzania elementów kontaktowych przedstawiono bardziej szczegółowo w Przewodniku Inżyniera nr 24 Analiza numeryczna ścianki szczelnej (więcej informacji znajdziesz na stronie <http://www.finesoftware.pl/przewodniki-inzyniera/>). Zalecane wartości sztywności  $K_s$  oraz  $K_n$  zostały przedstawione w pomocy do programu (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

Zakończyliśmy tym samym podstawowy etap modelowania zadania (definiowanie warstw, definiowanie gruntów oraz typów elementów kontaktowych). Przejdziemy następnie do modelowania obudowy tunelu oraz obszaru wzmocnionego kotwami skalnymi.



## Topologia (Część 2): modelowanie obudowy tunelu i obszaru wzmocnionego kotwami skalnymi

Przejdziemy teraz do ramki “Obudowa”, gdzie po wybraniu przycisku “Dodaj” wprowadzimy charakterystyczne punkty obudowy tymczasowej tunelu, geometrię wyrobiska oraz lokalizację analizowanego obszaru. Przyjmujemy grubość obudowy 200 mm biorąc pod uwagę rodzaj obliczanej konstrukcji (obudowa tunelu linii kolejowej).

*Uwaga: Możemy wprowadzić geometrię obudowy tunelu definiując niezależnie pojedyncze punkty oraz linie swobodne lub wykorzystując moduł definiowania kształtu obudowy. Zaletą ostatniego rozwiązania jest możliwość dowolnego przesunięcia (w poziomie lub pionie) obudowy traktowanej jako całość w przypadku zmiany profilu geologicznego podłoża (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

Geometrię wyrobiska zdefiniujemy w module “Obudowa MES” definiując dziesięć punktów swobodnych (patrz *Tabela 2*) połączonych liniami swobodnymi (patrz *Tabela 3*).

*Tabela 2 – Punkty swobodne wyrobiska (obudowa tymczasowa)*

Nr punktu	Położenie $x$ [m]	Położenie $y$ [m]
1	4.81	2.25
2	3.41	6.11
3	-3.41	6.11
4	-2.62	-0.80
5	2.62	-0.80
6	-4.81	2.25
7	2.62	-1.30
8	4.17	-1.30
9	-2.62	-1.30
10	-4.17	-1.30

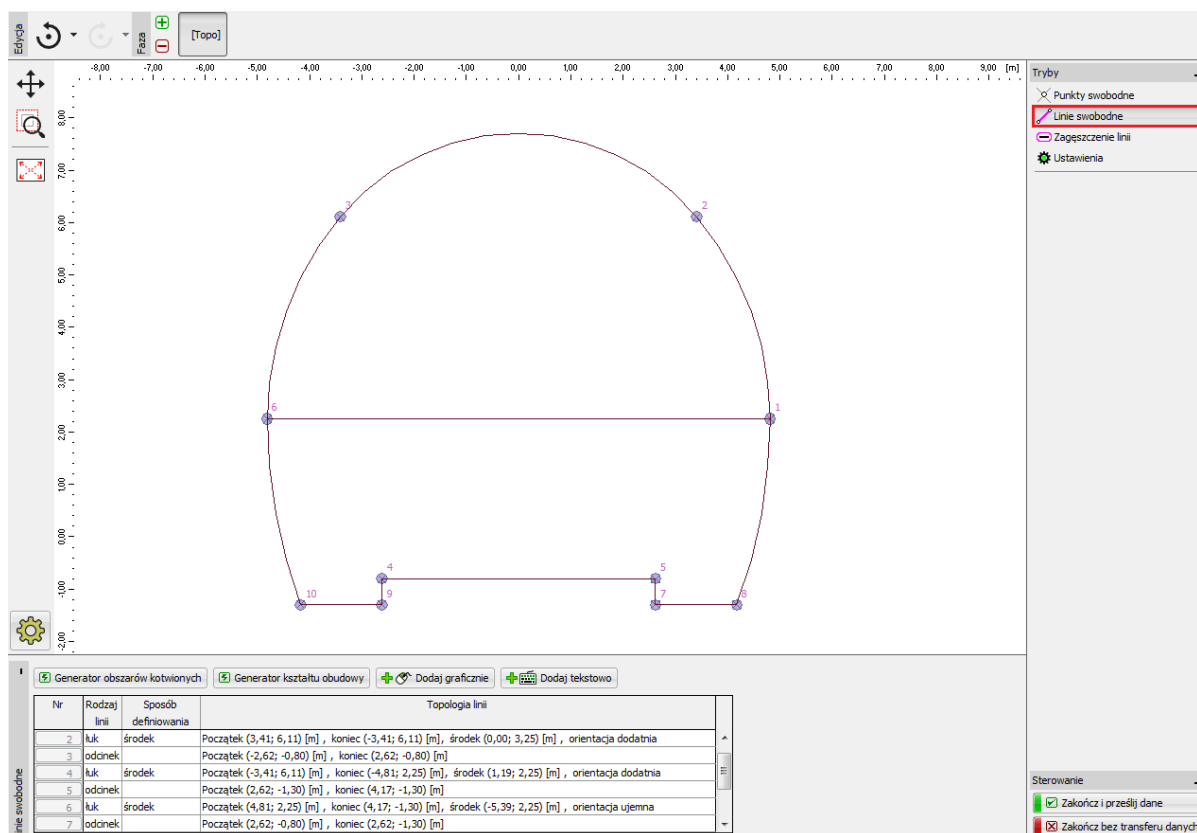
*Uwaga: Generator kształtu obudowy pozwala na automatyczne tworzenie kolejnych elementów nowej obudowy zgodnie z wprowadzonymi wcześniej parametrami. Wygenerowana w ten sposób obudowa składa się z niezależnych elementów (punktów i linii) i nie ma możliwości ich późniejszej modyfikacji przez generator. Jeżeli wprowadzane parametry obudowy są geometrycznie dopuszczalne*

to program na bieżąco kreśli kształt obudowy zgodny z wprowadzanymi parametrami (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).

*Tabela 3 – Linie swobodne wyrobiska (obudowa stała)*

Nr linii	Typ linii	Sposób def.	Topologia linii
1	łuk	środek	Początek – punkt 1, koniec – punkt 2 środek (-1,19; 2,25), orientacja dodatnia
2	łuk	środek	Początek – punkt 2, koniec – punkt 3, środek (0,00; 3,25), orientacja dodatnia
3	odcinek	–	Początek – punkt 4, koniec – punkt 5
4	łuk	środek	Początek – punkt 3, koniec – punkt 6, środek (1,19; 2,25), orientacja dodatnia
5	odcinek	–	Początek – punkt 7, koniec – punkt 8
6	łuk	środek	Początek – punkt 1, koniec – punkt 8, środek (-5,39; 2,25), orientacja ujemna
7	odcinek	–	Początek – punkt 5, koniec – punkt 7
8	odcinek	–	Początek – punkt 9, koniec – punkt 10
9	łuk	środek	Początek – punkt 10, koniec – punkt 6, środek (5,39; 2,25), orientacja ujemna
10	odcinek	–	Początek – punkt 4, koniec – punkt 9
11	odcinek	–	Początek – punkt 6, koniec – punkt 1

Wprowadzone wcześniej punkty swobodne obudowy na tle konturu wyrobiska przedstawione zostały na poniższym rysunku.



#### Moduł "Obudowa MES" – Linie swobodne wyrobiska (drążenie tunelu z podziałem poziomym)

Wzmocnienie sklepienia tunelu przy pomocy kotew skalnych zostanie uwzględnione w obliczeniach konstrukcji tunelu. Takie wzmocnienie modelowane jest zazwyczaj w praktyce inżynierskiej jako warstwa skały lub gruntu o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych występująca w obszarze zastosowania kotew. Należy zatem dodatkowo zdefiniować obszar występowania kotew – przy pomocy punktów swobodnych (patrz *Tabela 4*) oraz linii swobodnych (patrz *Tabela 5*).

*Tabela 4 – Punkty swobodne na konturze obszaru wzmocnionego kotwami skalnymi*

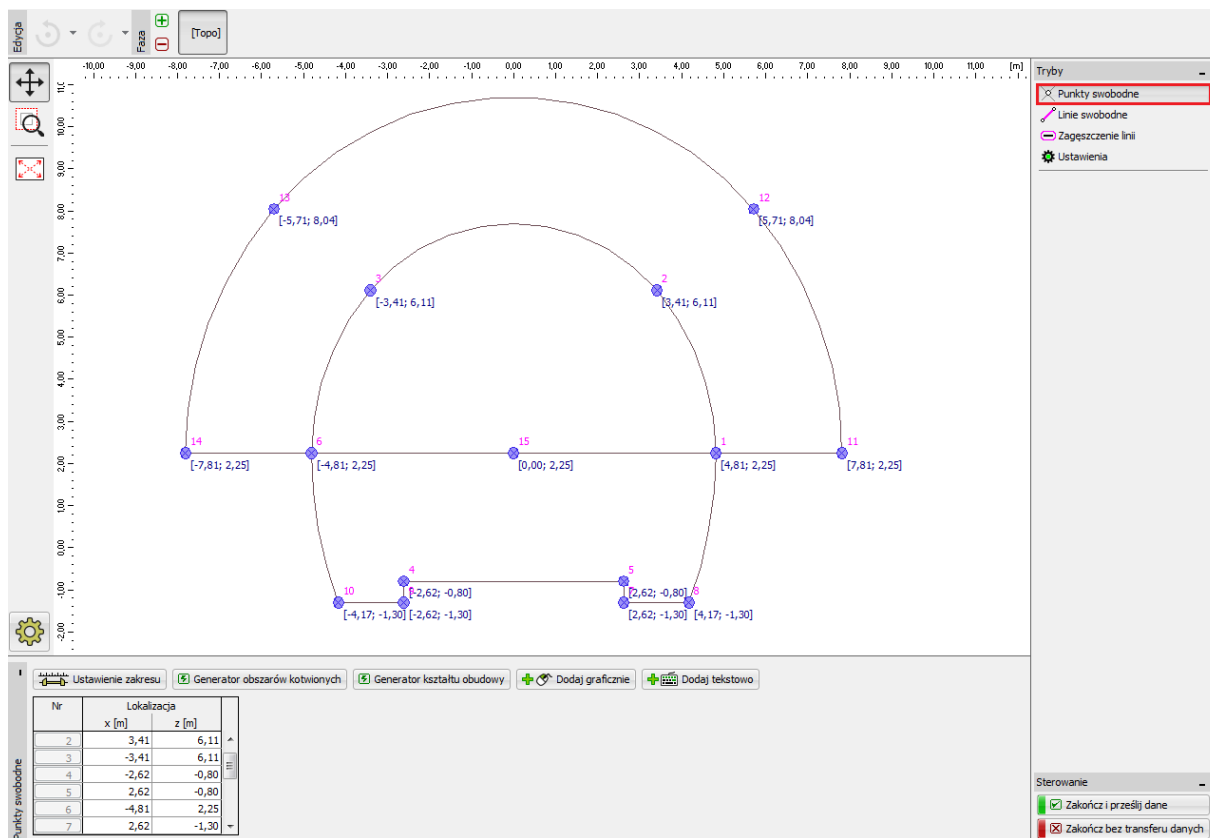
Nr punktu	Położenie	
	$x$ [m]	$y$ [m]
11	7.81	2.25
12	5.71	8.04
13	-5.71	8.04
14	-7.81	2.25

Tabela 5 – Linie swobodne na konturze obszaru wzmocnionego kotwami skalnymi

Nr linii	Typ linii	Sposób def.	Topologia linii
12	łuk	promień	Początek – punkt 14, koniec – punkt 13 Promień – 9,0 m, orientacja – ujemna Kąt – ostry
13	łuk	promień	Początek – punkt 13, koniec – punkt 12 Promień – 7,45 m, orientacja – ujemna Kąt – ostry
14	łuk	promień	Początek – punkt 12, koniec – punkt 11 Promień – 9,0 m, orientacja – ujemna Kąt – ostry
15	odcinek	–	Początek – punkt 14, koniec – punkt 6
16	odcinek	–	Początek – punkt 11, koniec – punkt 1

Wprowadzimy następnie nowy punkt swobodny numer 15 o współrzędnych [0,0; 2,25] w module “Obudowa” i wykonamy zagęszczenie siatki elementów skończonych w okolicy tego punktu (patrz *Topologia – Część 3*).

Przyjrzyjmy się teraz ostatecznej geometrii obudowy stałej modelowanego tunelu razem z obszarem skały wzmocnionej kotwami skalnymi, a następnie osadzimy wprowadzony kształt wyrobiska tunelowego w oknie głównym programu, tj. wybierzemy ramkę “Ustawienia” i wprowadzimy pozycję układu współrzędnych obudowy jako [0,0]. Zatwierdzimy zmiany wprowadzone w oknie “Obudowa MES” wybierając przycisk “Zakończ i prześlij dane”.



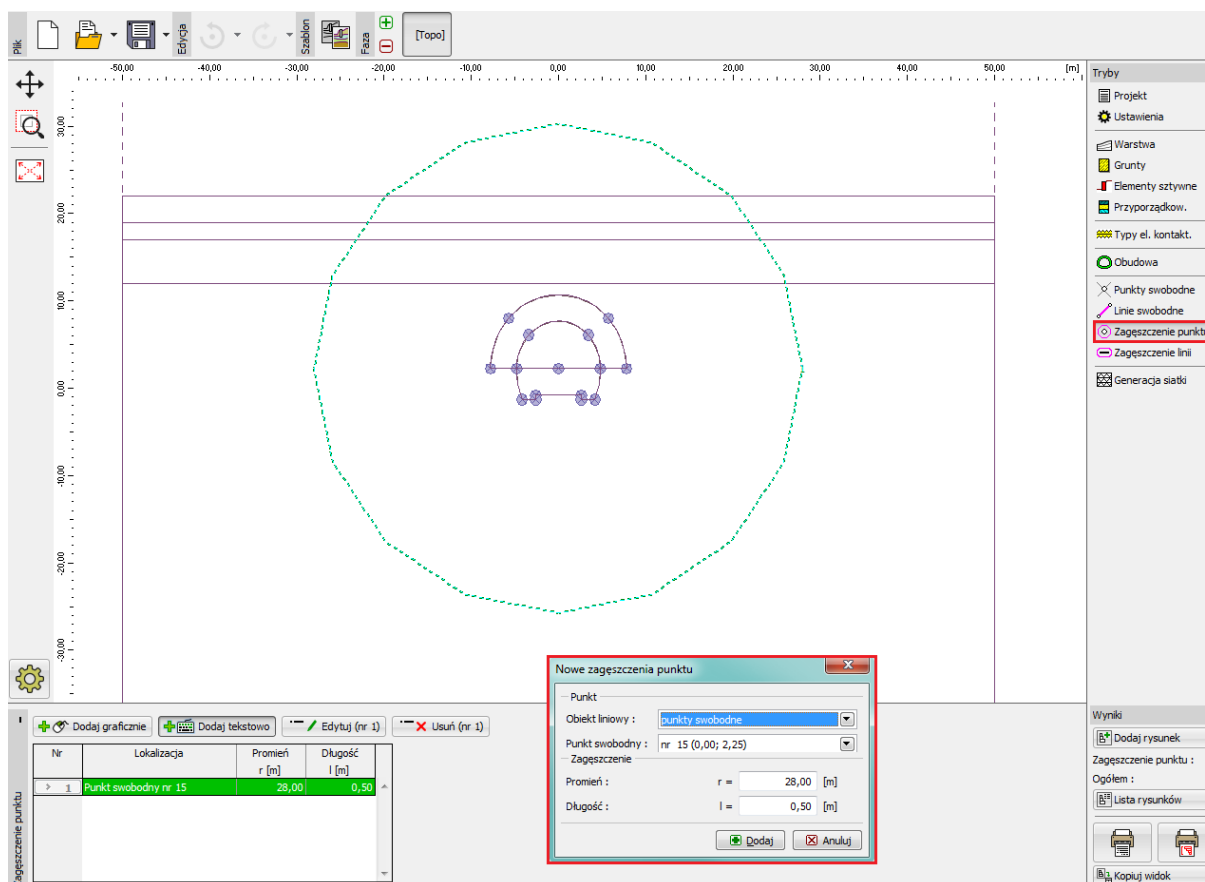
*Tabela 4 – Punkty swobodne na konturze obszaru wzmocnionego kotwami skalnymi i punkty swobodne wyrobiska (obudowa stała)*

Ostatnim etapem definiowania topologii zadania będzie wygenerowanie siatki elementów skończonych oraz jej odpowiednie zagęszczenie.

### Topologia (Część 3): generacja siatki elementów skończonych i jej zagęszczanie

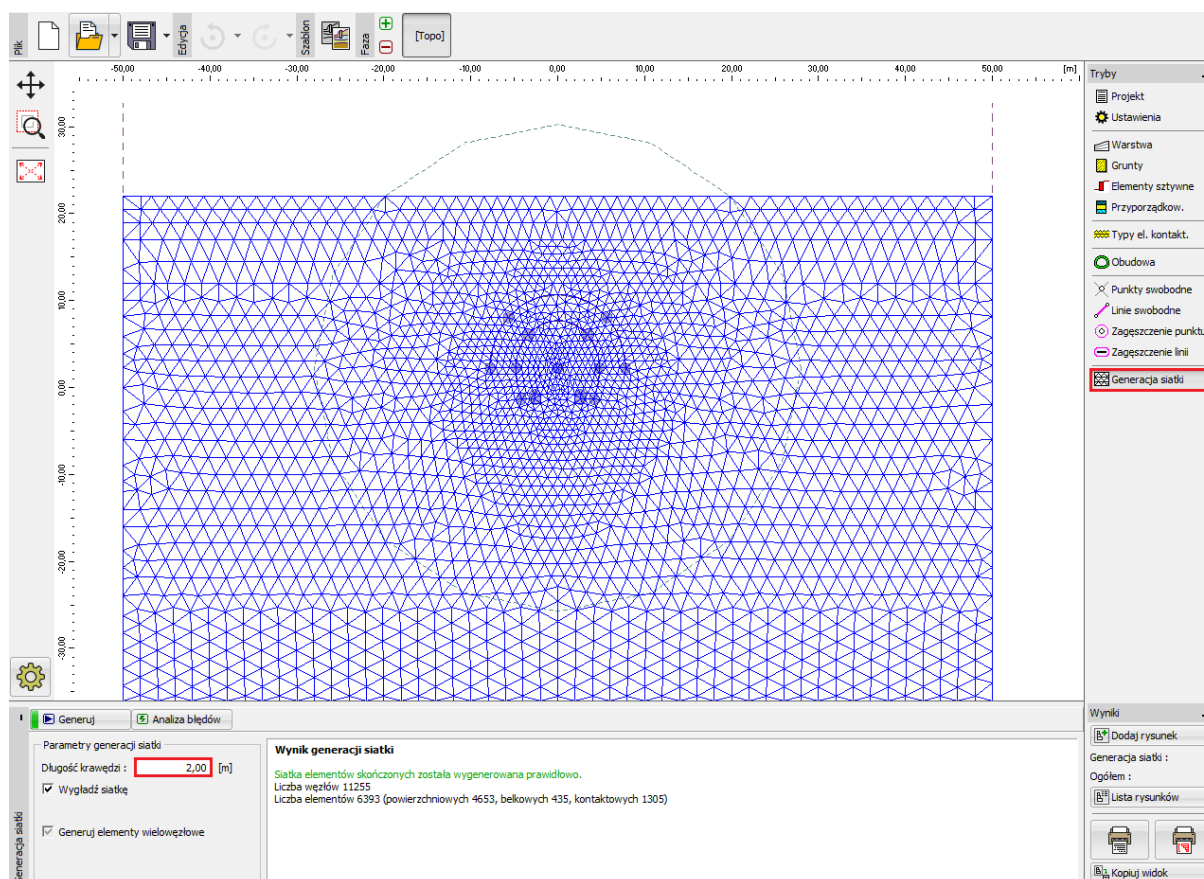
Siatka elementów skończonych ma istotny wpływ na wyniki obliczeń. Przed przejściem do generowania siatki zagęścimy ją w obszarze wyrobiska (w okolicy punktu nr 15) w promieniu  $r = 28$  m wokół punktu przyjmując elementy skończone o długości boku  $l = 0.5$  m.

*Uwaga: Wykonując ten etap definiowania topologii uzyskamy odpowiednio gęstą siatkę elementów skończonych najistotniejszym w projekcie obszarze - wyrobiska. Procedura dogęszczania siatki wokół punktów oraz wzdłuż linii opisana została bardziej szczegółowo w Przewodniku Inżyniera nr 23 Analiza obudowy sztolni (więcej szczegółów pod adresem <http://www.finesoftware.pl/przewodniki-inzyniera/>).*



Okno dialogowe "Nowe zagęszczenia punktu"

Przejdziemy następnie bezpośrednio do etapu generowania siatki ES. W ramce “Generacja siatki” ustawimy długość krawędzi elementów skończonych na 2.0 m oraz zaznaczymy opcję “Wyładź siatkę”.



*Ramka “Generacja siatki” – Zagęszczenie siatki wokół punktu w pobliżu środka wyrobiska (elementy skończone o długości krawędzi 0.5 m)*

### Uwagi dotyczące procesu modelowania:

Poniższa część przewodnika zawiera istotne uwagi dotyczące dalszej procedury modelowania konstrukcji – obudowy tymczasowej oraz fazy drążenia tunelu (podział poziomy w przekroju wyrobiska). Przedstawione poniżej informacje będą przydatne podczas dalszego modelowania numerycznego zadania, gdyż część danych wejściowych będzie potrzebna wielokrotnie na różnych etapach.

*Uwaga: Fazy obliczeniowe muszą uwzględniać technologię wykonywania tunelu. Aby wprowadzić poszczególne fazy budowy musimy znać materiał obudowy stałej, kolejność drążenia tunelu oraz warunki hydrogeologiczne występujące na długości tunelu.*

Zaprojektujemy **obudowę tymczasową** tunelu wykonaną z betonu natryskowego klasy C20/25 o grubości 200 mm. Do modelu wprowadzimy beton natryskowy i jego parametry – wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości w zależności od czasu (patrz Tabela 6).

Tabela 6 – Wartości modułów sprężystości betonu natryskowego (w zależności od czasu)

Dojrzałość betonu	Moduł sprężystości $E_{cm}$ [MPa]	Moduł Kirchhoffa $G$ [MPa]
Świeży beton	2 900	1 134
Dojrzały beton	29 000	11 340

*Uwaga: Wyrobisko tunelowe modelowane jest jako zadanie płaskie (2D), które nie odzwierciedla w pełni zmian zachodzących w przestrzennym stanie naprężenia masywu skalnego spowodowanych prowadzeniem robót na przodku tunelu. Podczas drążenia tymczasowo pozbawione obudowy stałej wyrobisko pozostaje stateczne dzięki pozostawieniu odpowiedniego masywu skalnego od czoła tunelu (wzdłużne oraz poprzeczne przesklepienie skalne) oraz dzięki wcześniej wykonanej i obudowanej części tunelu. Takie zachowanie masywu może zostać opisane jedynie przy pomocy modelu 3D, w przypadku wykonania modelu 2D zachowanie wyrobiska w kierunku drążenia można określić jedynie w sposób przybliżony.*

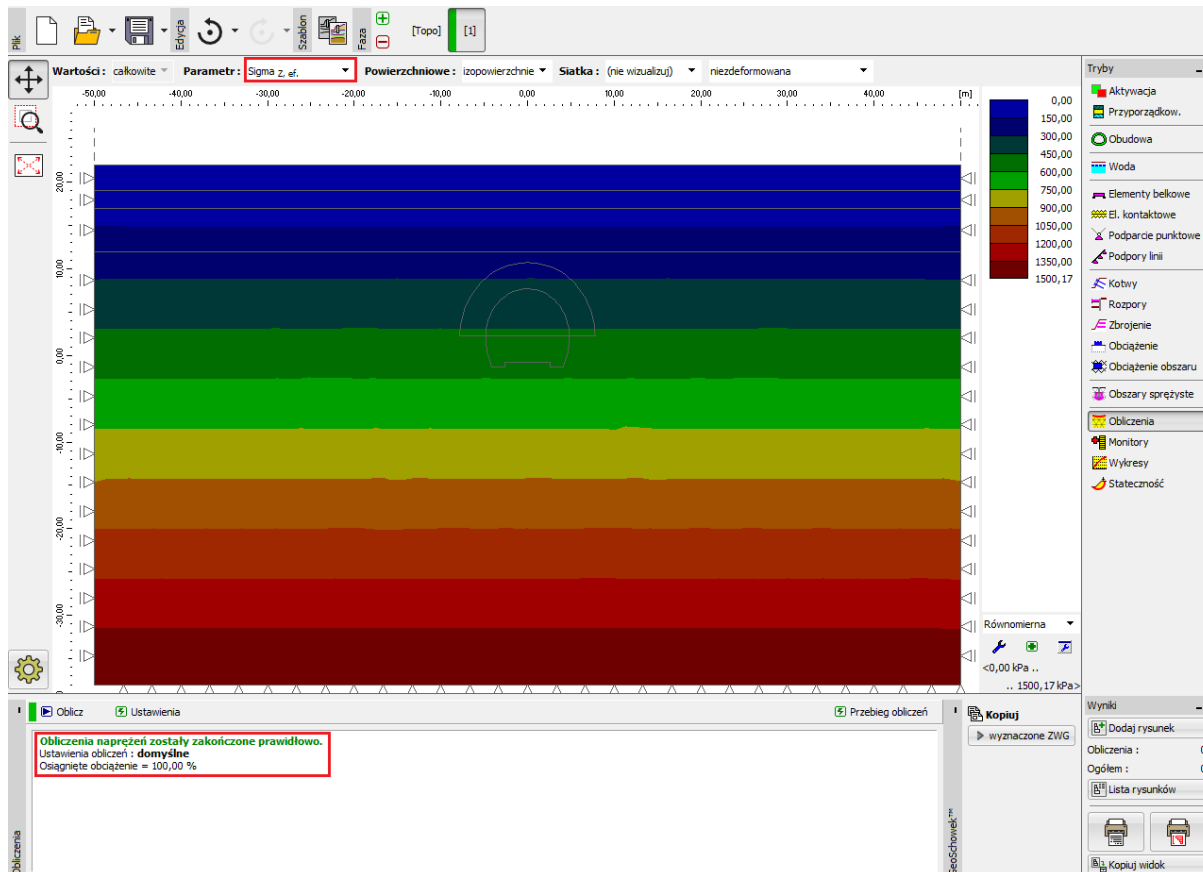
*Metoda, która jest najczęściej stosowana w praktyce inżynierskiej (nazywana zazwyczaj metodą  $\lambda$  lub metodą  $\beta$ ) zakłada, że pierwotny stan naprężenia w masywie, tj. naprężenia pierwotne  $\sigma_0$  działające przed wykonaniem wyrobiska, w obszarze projektowanego tunelu zmieniają się stopniowo w zależności od czasu zgodnie ze związkiem  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  (dla naprężeń pierwotnych  $\beta = 1$ ). Jeżeli zamodelujemy zmianę naprężeń pierwotnych między dwiema kolejnymi fazami obliczeniowymi (fazami budowy) wyrobisko pozbawione obudowy poddane jest obciążeniu o wartości  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  w pierwszej fazie oraz pozostałemu obciążeniu  $\beta \cdot \sigma_0$  w drugiej fazie obliczeń.*

*Drążenie tunelu z podziałem na sekcje poziome wymusza zastosowanie powyższej procedury dla każdego etapu z osobna. Wartość współczynnika  $\beta$  zależy od geologii masywu skalnego, długości zaboru oraz przekroju sekcji; jest on stosunkowo trudny do wyznaczenia. W programie GEO5 MES opisana metoda reprezentowana jest przez tak zwaną opcję Wykop. Oszacowaliśmy wartość współczynnika  $\beta = 0.6$  na potrzeby modelowania numerycznego tunelu jednotorowej linii kolejowej dla głębienia tunelu w obszarze kaloty i spągu.*



## Faza budowy nr 1: obliczanie naprężeń geostatycznych

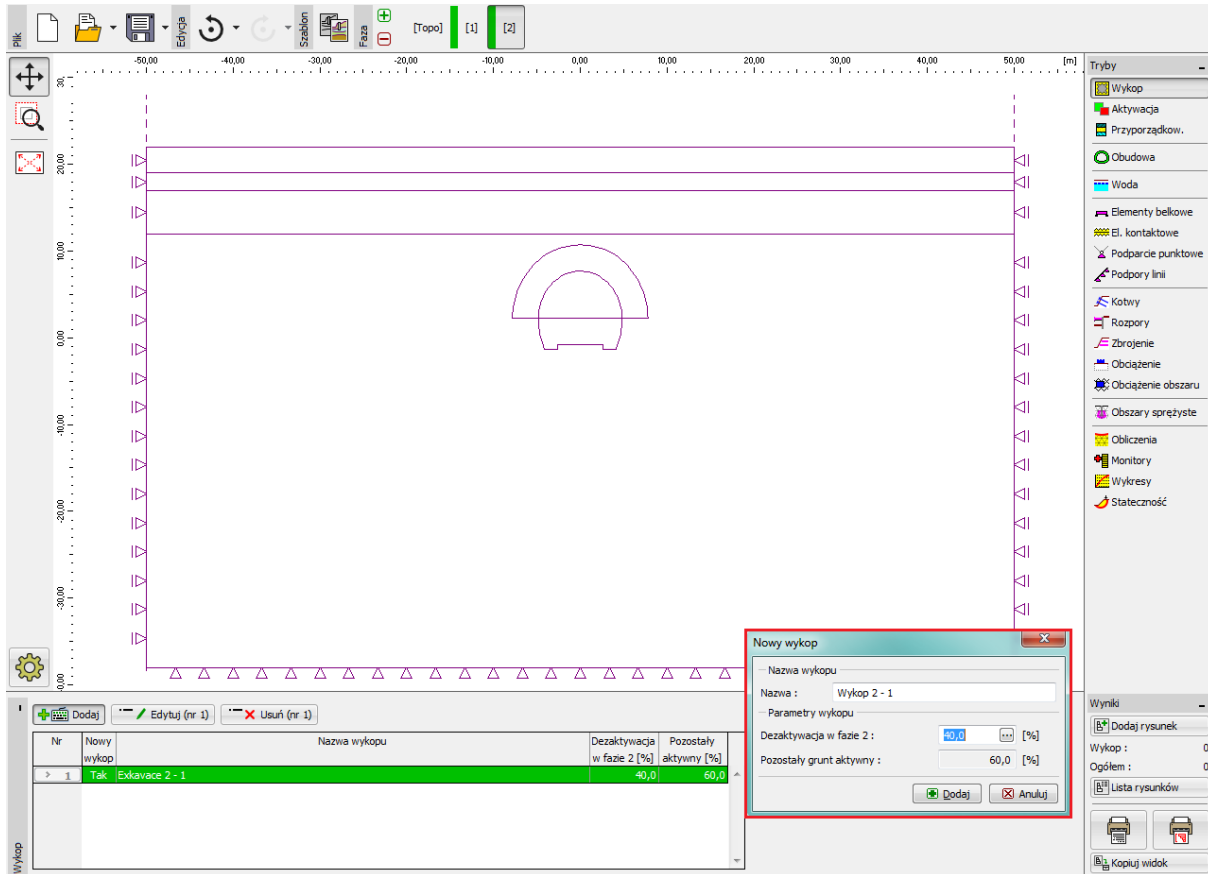
Po wygenerowaniu siatki elementów skończonych przejdziemy do fazy budowy nr 1 i obliczymy naprężenia geostatyczne w masywie skalnym. Dla wszystkich faz obliczeniowych przyjmujemy “Ustawienia domyślne” obliczeń (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).



Ramka “Obliczenia” – faza budowy nr 1 (naprężenia pierwotne  $\sigma_{z,eff}$ )

## Faza budowy nr 2: drążenie tunelu w obszarze kaloty, aktywacja wydrążonego tunelu

Kolejnym krokiem będzie dodanie fazy obliczeniowej nr 2. Zamodelujemy tunel wydrążony w obszarze kaloty definiując nowy wykop w ramce “Wykop” (naciskając przycisk “Dodaj”) zgodnie z poniższym rysunkiem oraz wybierając ten Wykop dla obszaru nr 6 w ramce “Aktywność”.



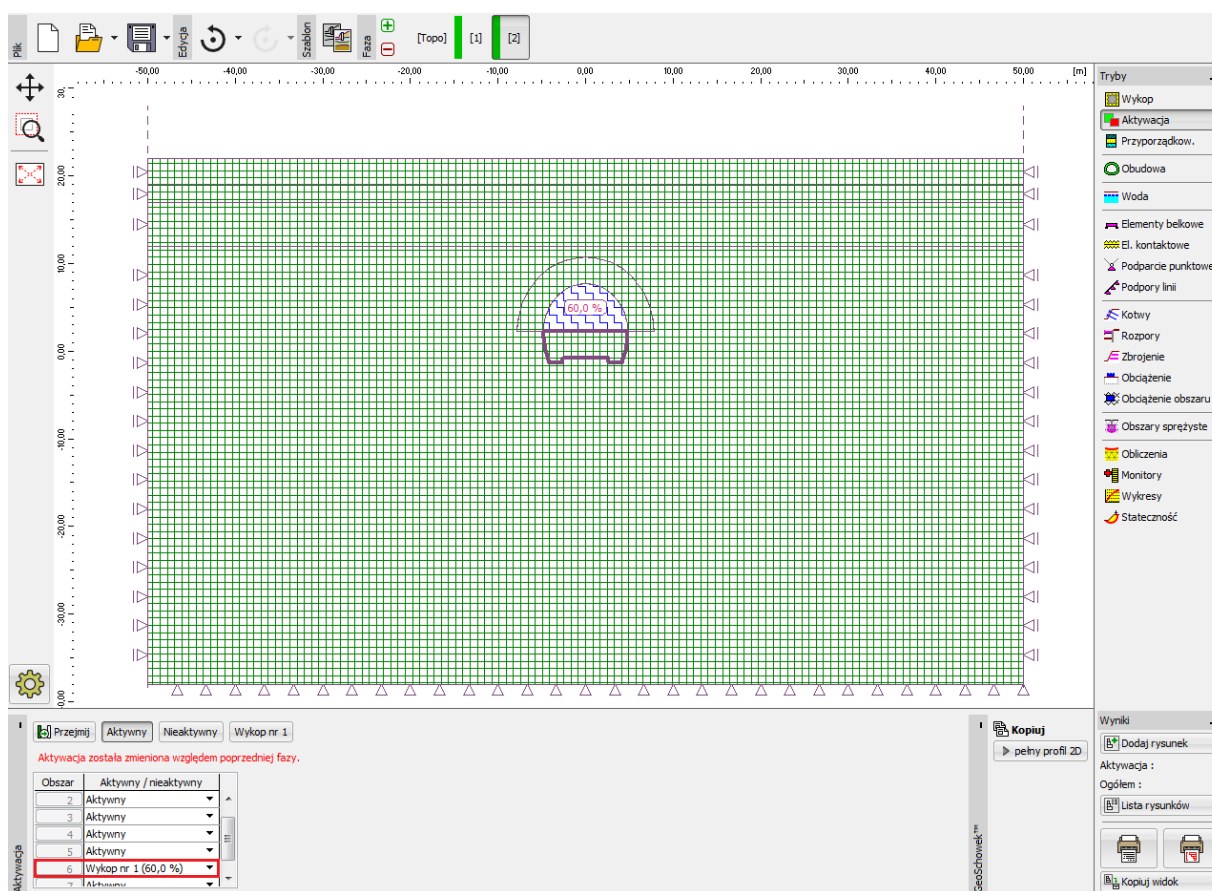
Okno dialogowe “Nowy wykop” – faza budowy nr 2

*Uwaga: W praktyce inżynierskiej kolejność drążenia (poszczególne zabiory) określa się poprzez relację skały nieaktywnej do pozostałego aktywnego masywu. W przedmiotowym przypadku dla kolejnych faz drążenia przyjmujemy następujące stosunki:*

- wydrążenie tunelu w obszarze kaloty, aktywacja wyrobiska bez obudowy: 40 % / 60 %,
- wzmocnienie sklepienia tunelu świeżym betonem natryskowym: 30 % / 30 %,
- poprawa parametrów dojrzewającego betonu natryskowego (kalota): 30 % / 0 %.
- wydrążenie tunelu w obszarze spągu, aktywacja wyrobiska bez obudowy: 40 % / 60 %,
- wzmocnienie ścian bocznych wyrobiska świeżym betonem natryskowym: 30 % / 30 %,
- poprawa parametrów dojrzewającego betonu natryskowego (spąg): 30 % / 0 %.

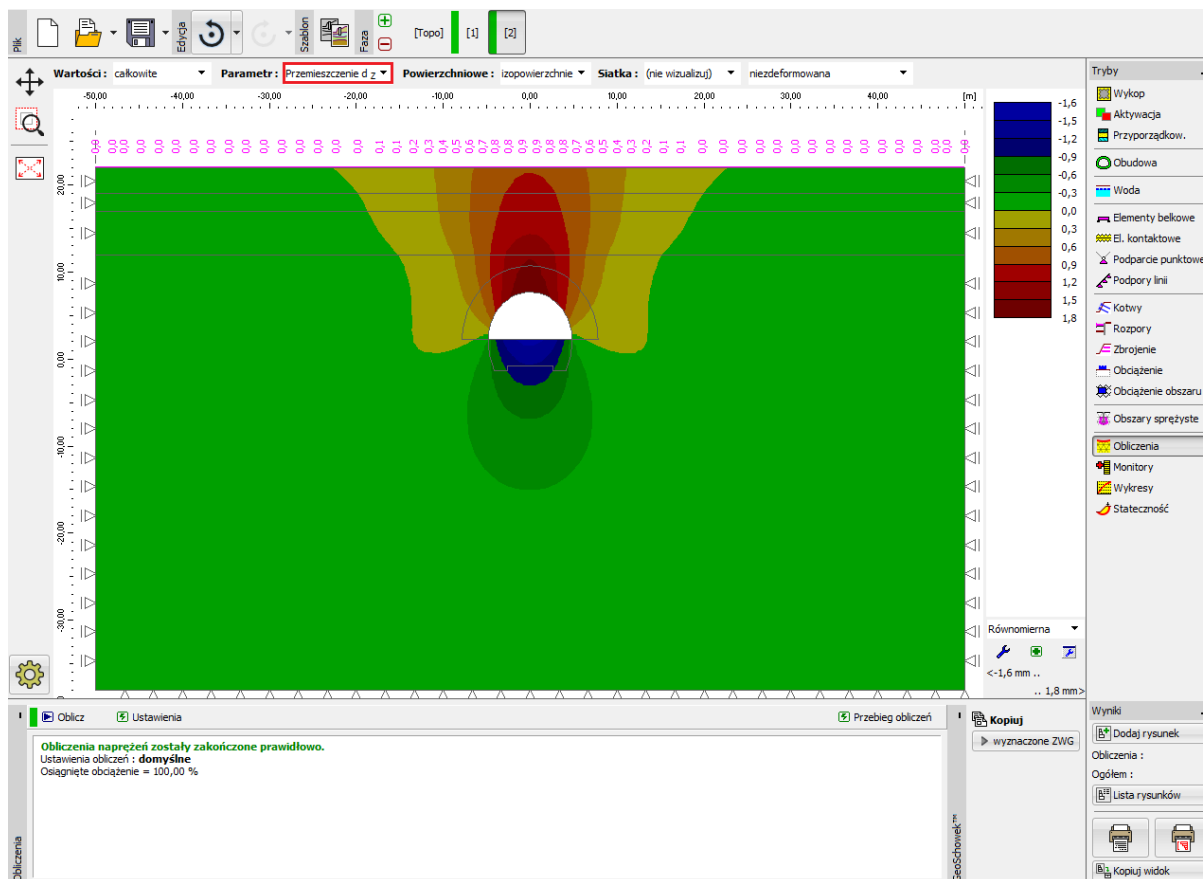
Przedstawione powyżej stosunki procentowe obszaru nieaktywnego do aktywnego przyjęte zostały na podstawie wieloletnich doświadczeń i prowadzą do wiarygodnych wyników obliczeń. Program pozwala na wprowadzenie różnorodnych stosunków procentowych dla wykopów w różnych fazach obliczeniowych (przykładowo 25/75, 30/45, 30/15 oraz 15/0) dla wyrobiska kaloty oraz spągu.

Istotą problemu jest aktywacja odpowiedniej, wyrażonej procentowo, części obciążenia oddziałującego na sklepienie wyrobiska bez obudowy w obszarze kaloty. W tej fazie obliczeń przyjmujemy deaktywację obszaru rzędu 40%.



Ramka "Aktywacja" – faza budowy nr 2 (aktywacja 40% obciążenia działającego na wyrobisko kaloty)

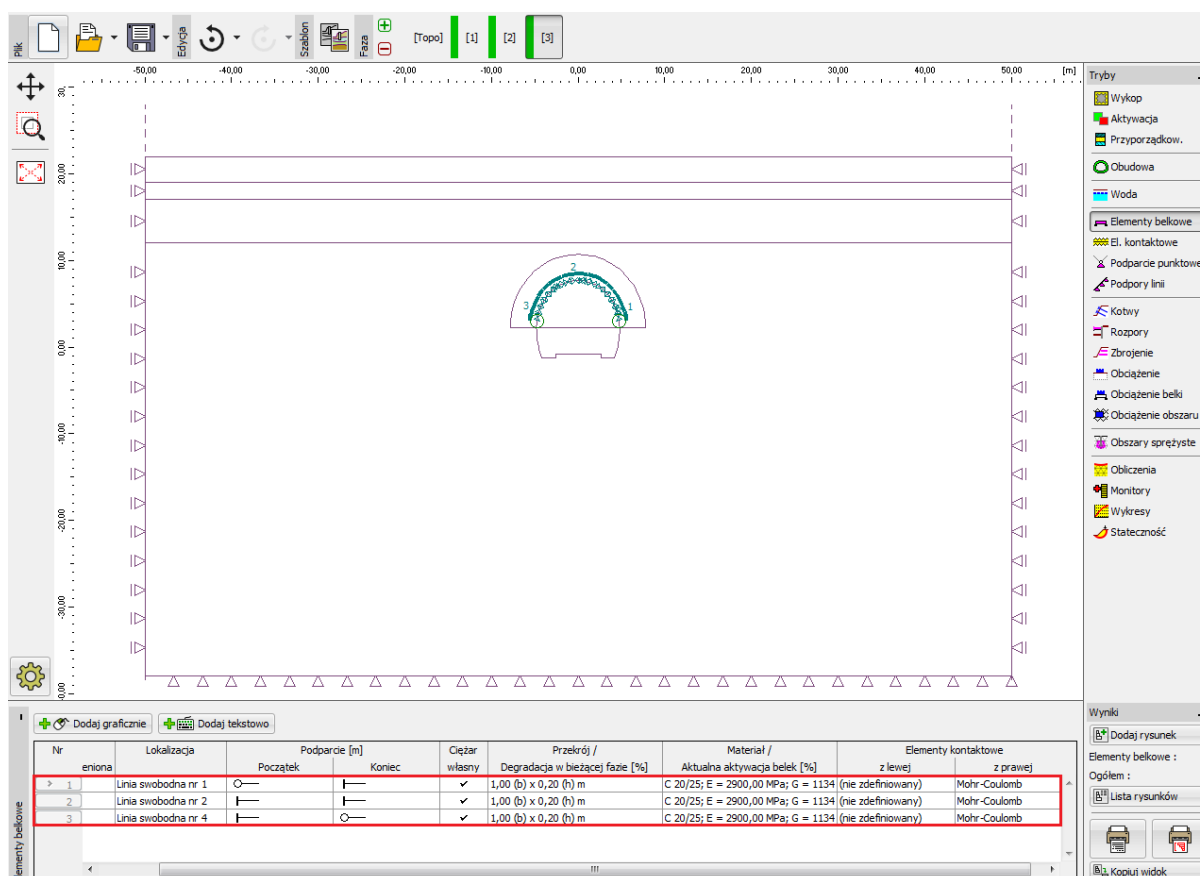
Przeprowadzimy następnie obliczenia w fazie nr 2 i przejdziemy do analizy przemieszczenia pionowego  $d_z$  [mm]. Aby lepiej zrozumieć zachowanie wyrobiska przedstawimy wyniki na tle odkształconej siatki elementów skończonych oraz włączymy wyświetlanie niecki osiadania.



Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 2 (przemieszczenie pionowe  $d_z$  oraz niecka osiadania)

Faza budowy nr 3: zabezpieczenie sklepienia tunelu w obszarze kaloty betonem natryskowym wykonanym in-situ stanowiącym element obudowy stałej

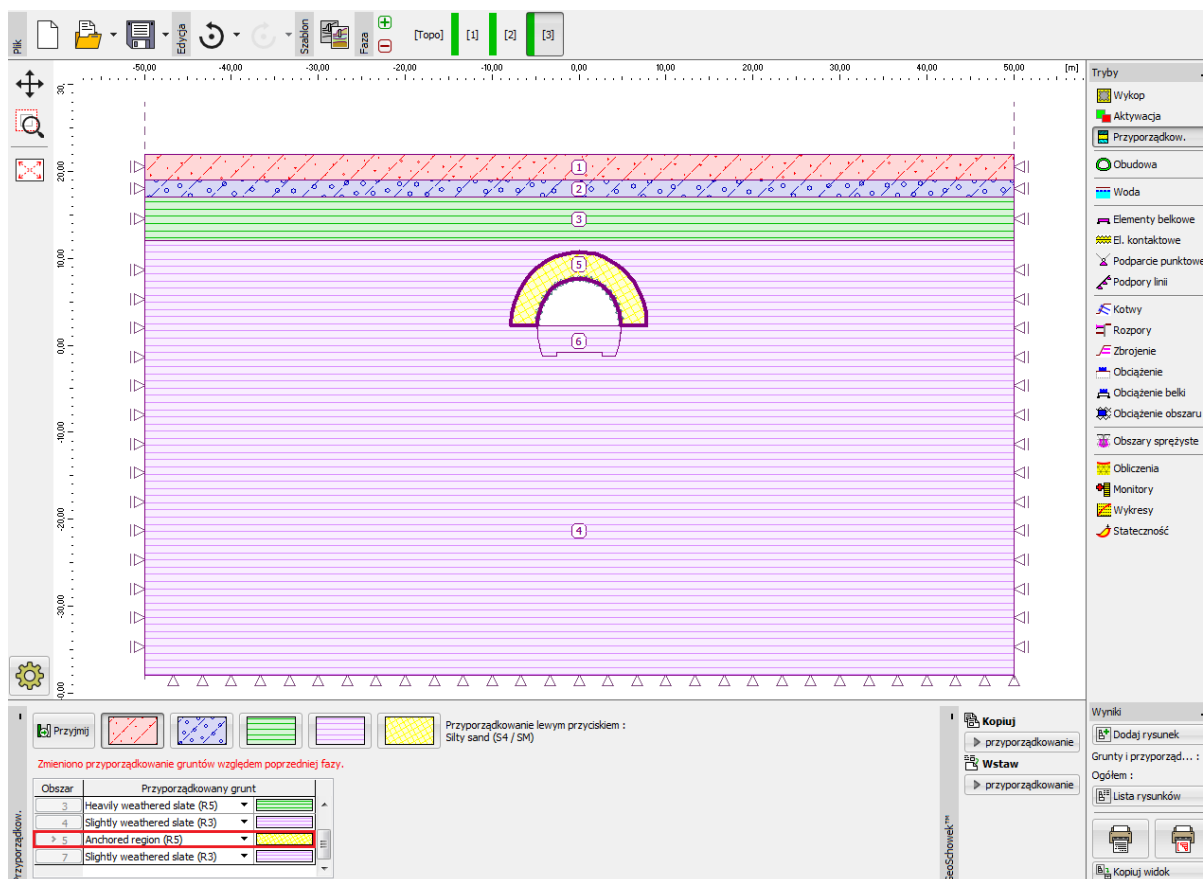
Kolejnym krokiem będzie dodanie fazy obliczeniowej nr 3. W pierwszej kolejności zdefiniujemy wzmocnienie sklepienia tunelu betonem natryskowym wykonanym in-situ, stanowiącym element obudowy tymczasowej tunelu. W ramce "Elementy belkowe" dodamy element belkowy o grubości 200 mm.



*Definiowanie obudowy wyrobiska w obszarze kaloty w postaci elementów belkowych – faza budowy nr 3 (świeży beton)*

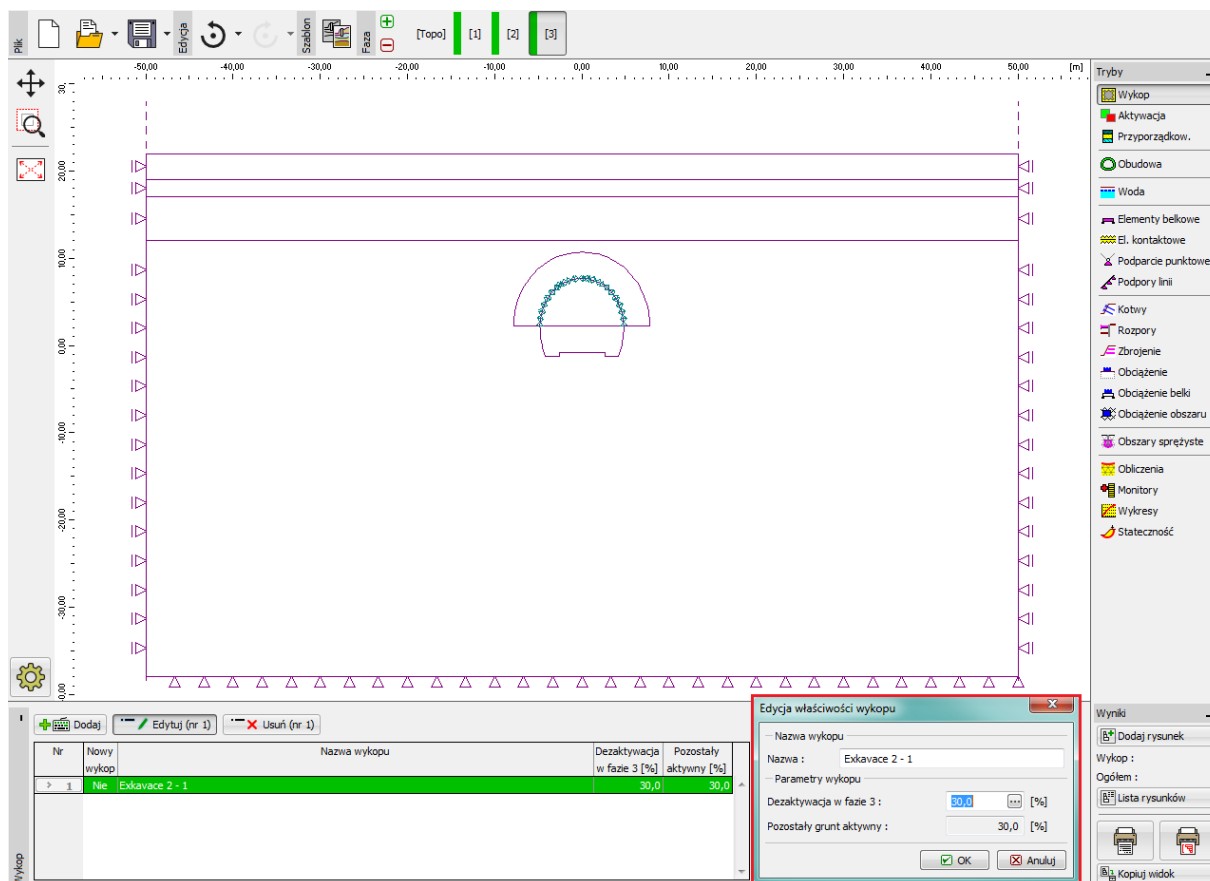
*Uwaga: Zakładamy podparcie przegubowe na końcach belek, co powoduje że momenty zginające na końcach u podstawy wynoszą zero. W niektórych przypadkach podparcie u podstawy elementu belkowego modelowane jest przy pomocy szczególnego rodzaju podparcia tzw. stopy, która zapewnia stabilność i zbieżność prowadzonych obliczeń (więcej informacji w pomocy programu – naciśnij przycisk F1).*

Przejdziemy następnie do ramki “Przyporządkowanie”, w której zmienimy parametry masywu skalnego wybierając w obszarze nr 5 “obszar kotwiony (R5)”, co pozwoli na zamodelowanie kotwienia sklepienia tunelu przy pomocy kotew skalnych (patrz rysunek).



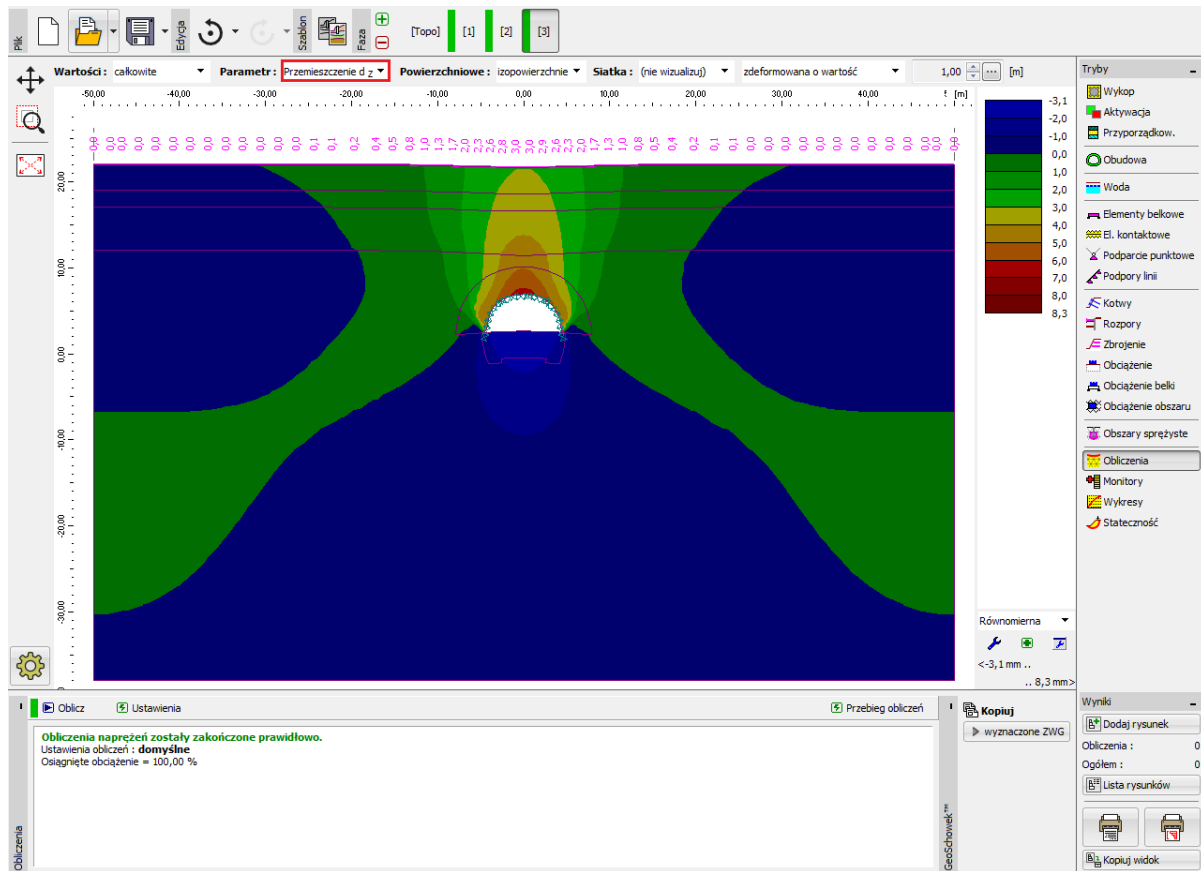
Ramka “Przyporządkowanie” – faza budowy nr 3 (obszar kotwiony przy pomocy kotew skalnych)

Następnym krokiem będzie aktywacja kotew skalnych zlokalizowanych w masywie wzmocnionym kotwami w obszarze sklepienia kaloty oraz aktywacja dodatkowych 30% obciążenia działającego na wyrobisko (wybierając przycisk “Edytuj”).



Okno dialogowe “Edycja właściwości wykopu” – faza budowy nr 3

Przeprowadzimy następnie ponowne obliczenia.

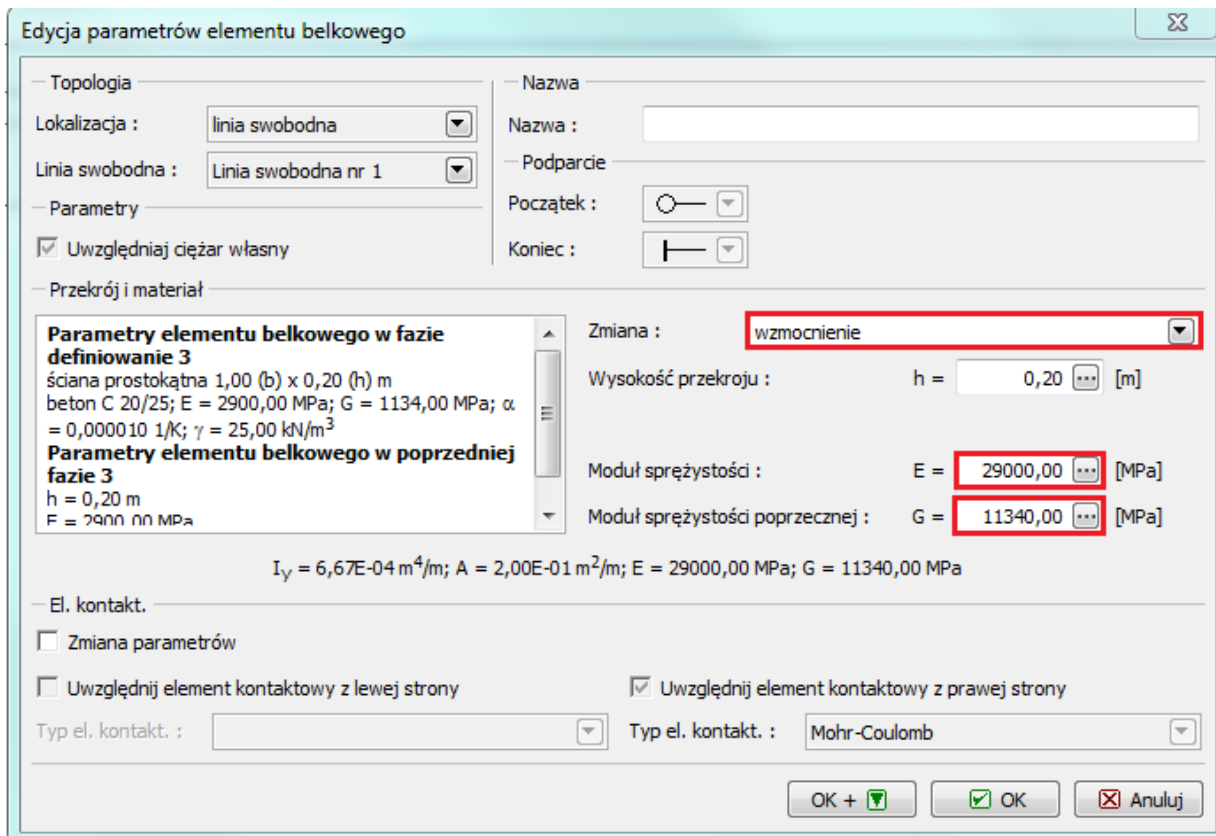


Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 3 (przemieszczenie pionowe  $d_z$  oraz niecka osiadania)



#### Faza budowy nr 4: poprawa parametrów dojrzewającego betonu natryskowego (kalota)

Wprowadzimy następnie fazę budowy nr 4 i poprawimy parametry materiałowe dojrzewającego betonu stanowiącego obudowę tunelu w obszarze kaloty. Otworzymy okno dialogowe "Edycja parametrów elementu belkowego", gdzie wybierzemy opcję "Wzmocnienie" z listy rozwijanej "Zmiana" a następnie zdefiniujemy nowe wartości modułów sprężystości podłużnej i poprzecznej. Pozostałe parametry nie ulegają zmianie.



**Edycja parametrów elementu belkowego**

— Topologia  
Lokalizacja : linia swobodna  
Linia swobodna : Linia swobodna nr 1

— Parametry  
☒ Uwzględnij ciężar własny




— Przekrój i materiał  
**Parametry elementu belkowego w fazie definiowanie 3**  
ściana prostokątna 1,00 (b) x 0,20 (h) m  
beton C 20/25; E = 2900,00 MPa; G = 1134,00 MPa;  $\alpha = 0,000010$  1/K;  $\gamma = 25,00$  kN/m<sup>3</sup>  
**Parametry elementu belkowego w poprzedniej fazie 3**  
h = 0,20 m  
E = 29000,00 MPa

Nazwa :  
Podparcie  
Początek :  
Koniec :

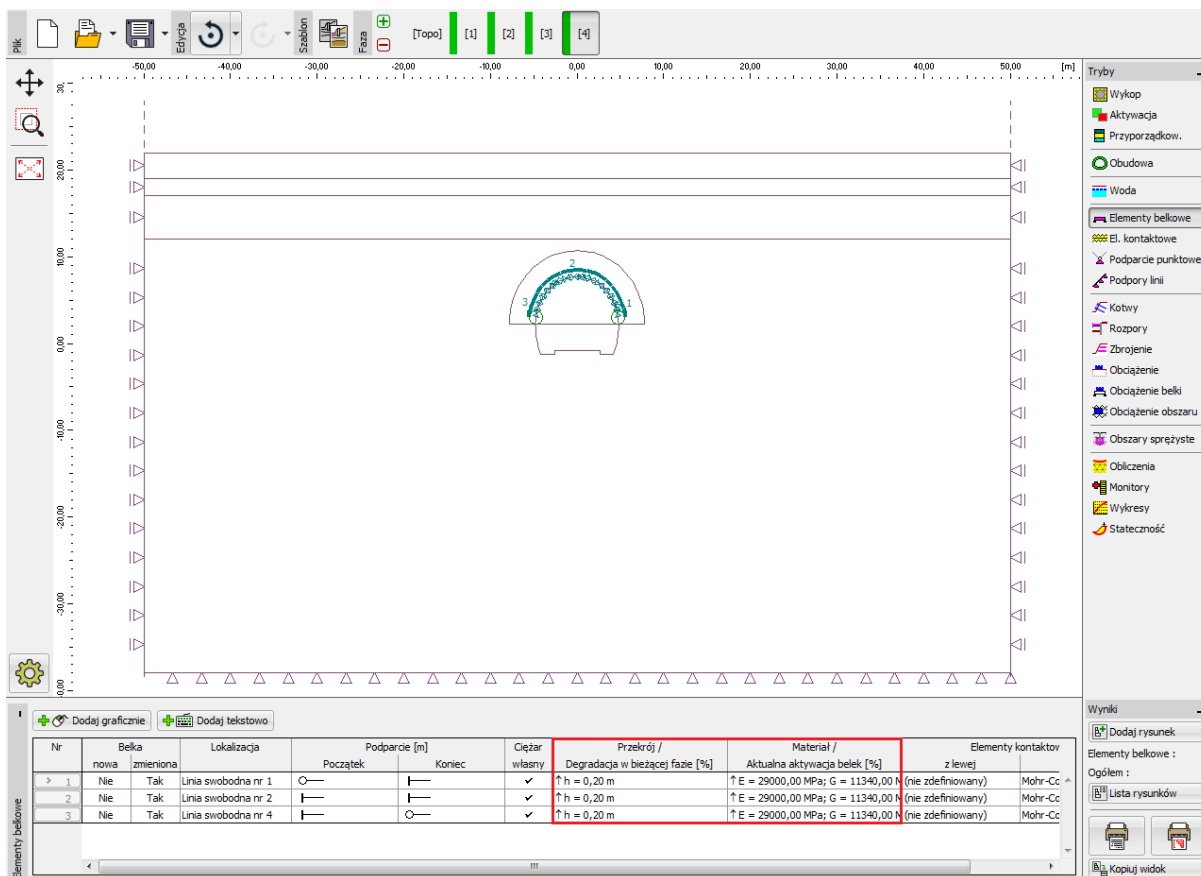
Zmiana : wzmocnienie  
Wysokość przekroju : h = 0,20 [m]  
Moduł sprężystości : E = 29000,00 [MPa]  
Moduł sprężystości poprzecznej : G = 11340,00 [MPa]

$I_y = 6,67E-04$  m<sup>4</sup>/m; A = 2,00E-01 m<sup>2</sup>/m; E = 29000,00 MPa; G = 11340,00 MPa

— El. kontakt.  
☐ Zmiana parametrów  
☐ Uwzględnij element kontaktowy z lewej strony  
☒ Uwzględnij element kontaktowy z prawej strony  
Typ el. kontakt. :  
Typ el. kontakt. : Mohr-Coulomb

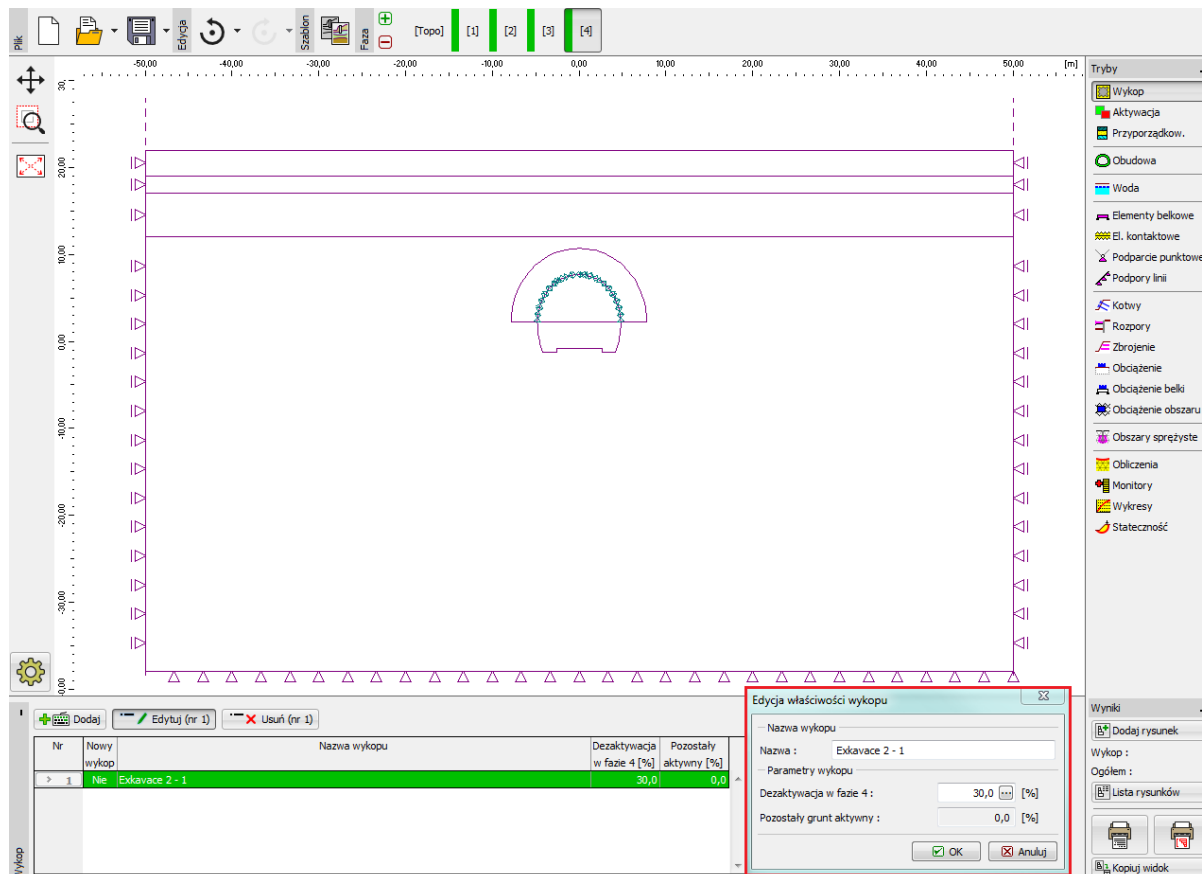
OK +   OK  Anuluj

Okno dialogowe "Edycja parametrów elementu belkowego" – faza budowy nr 4 (belka nr 2)



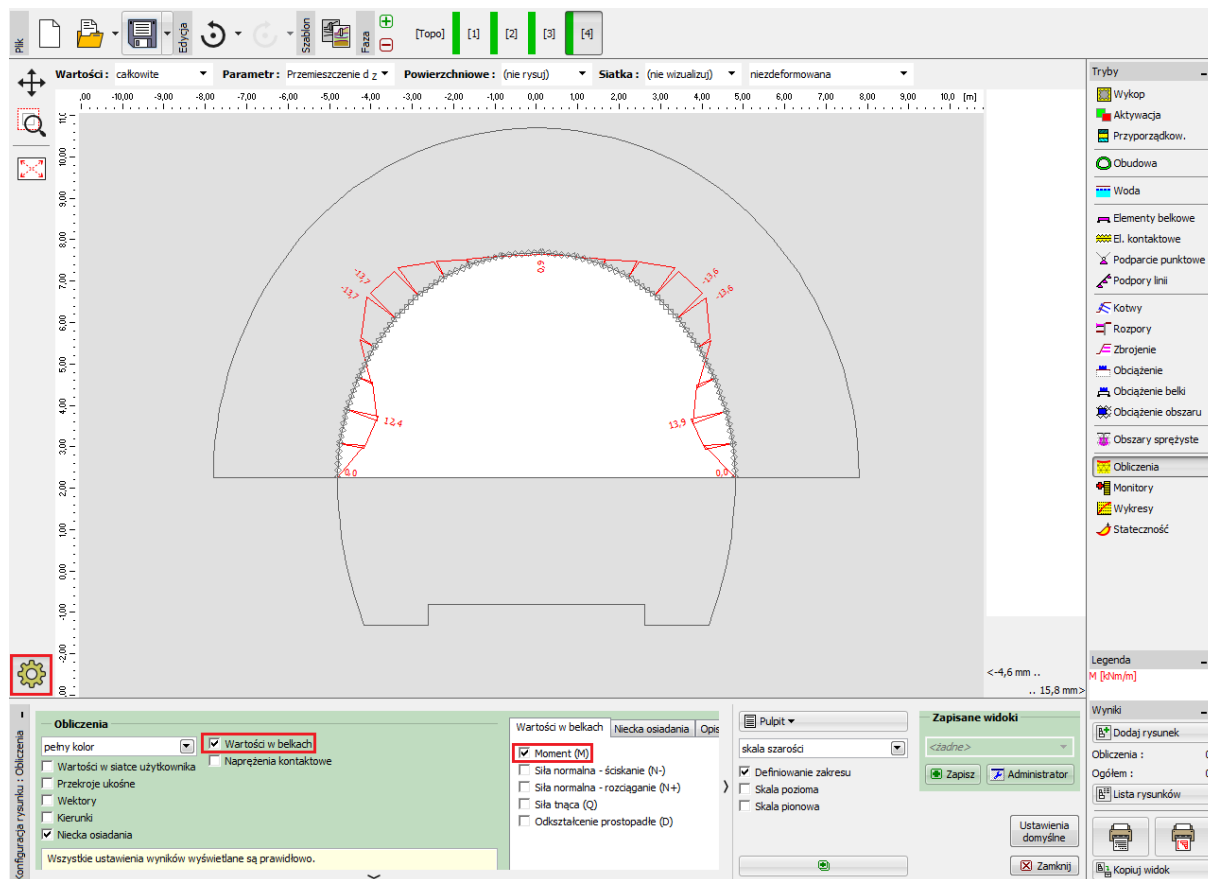
*Modyfikacja parametrów obudowy stałej (kalota) – faza budowy nr 4 (dojrzewanie betonu natryskowego)*

Aktywujemy następnie pozostałe 30% obciążenia oddziałującego na wyrobisko tunelowe. Sposób edycji właściwości wykopu jest analogiczny do zastosowanego w poprzednich fazach budowy.



Okno dialogowe "Edycja właściwości wykopu" – faza budowy nr 4

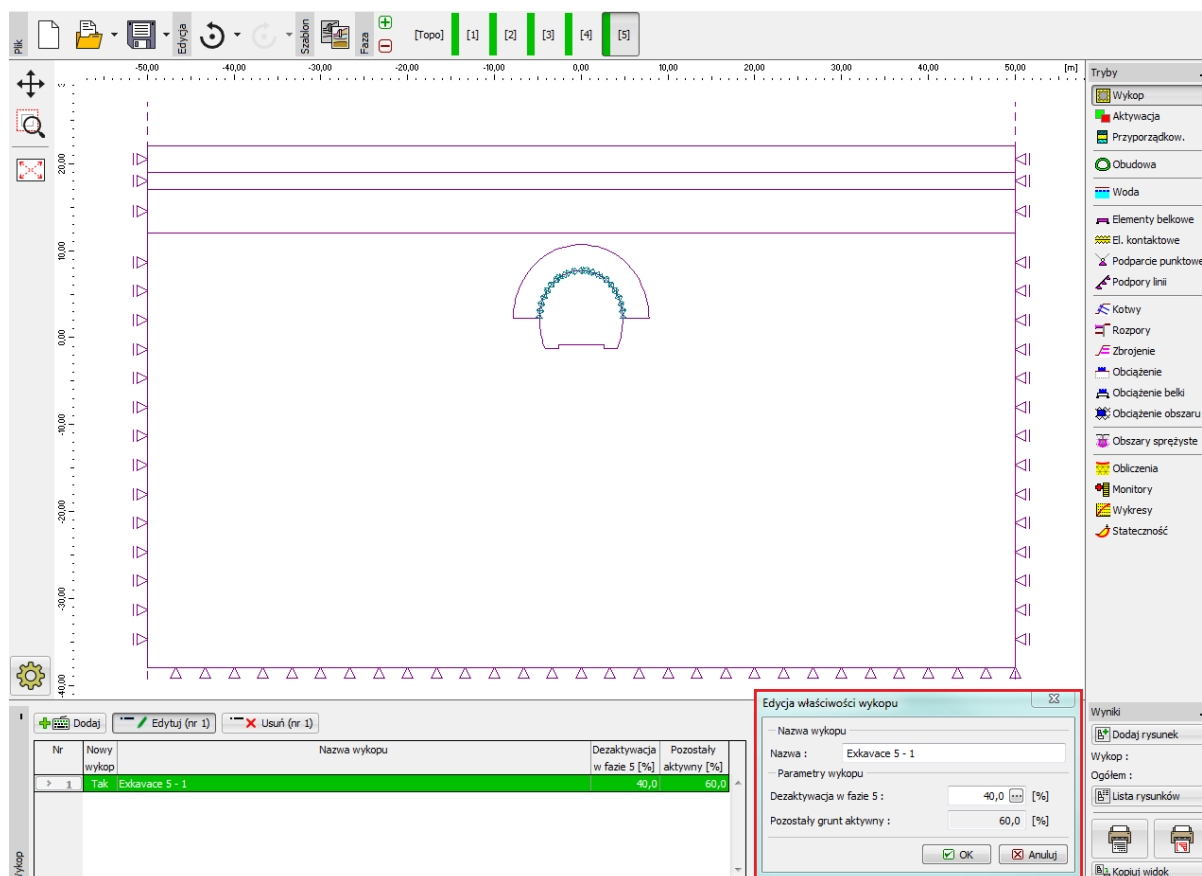
Przeprowadzimy następnie obliczenia i przeanalizujemy przebieg wykresu momentów zginających na konturze obudowy tunelu w obszarze kaloty.



Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 4 (moment zginający  $M$  [kNm/m])

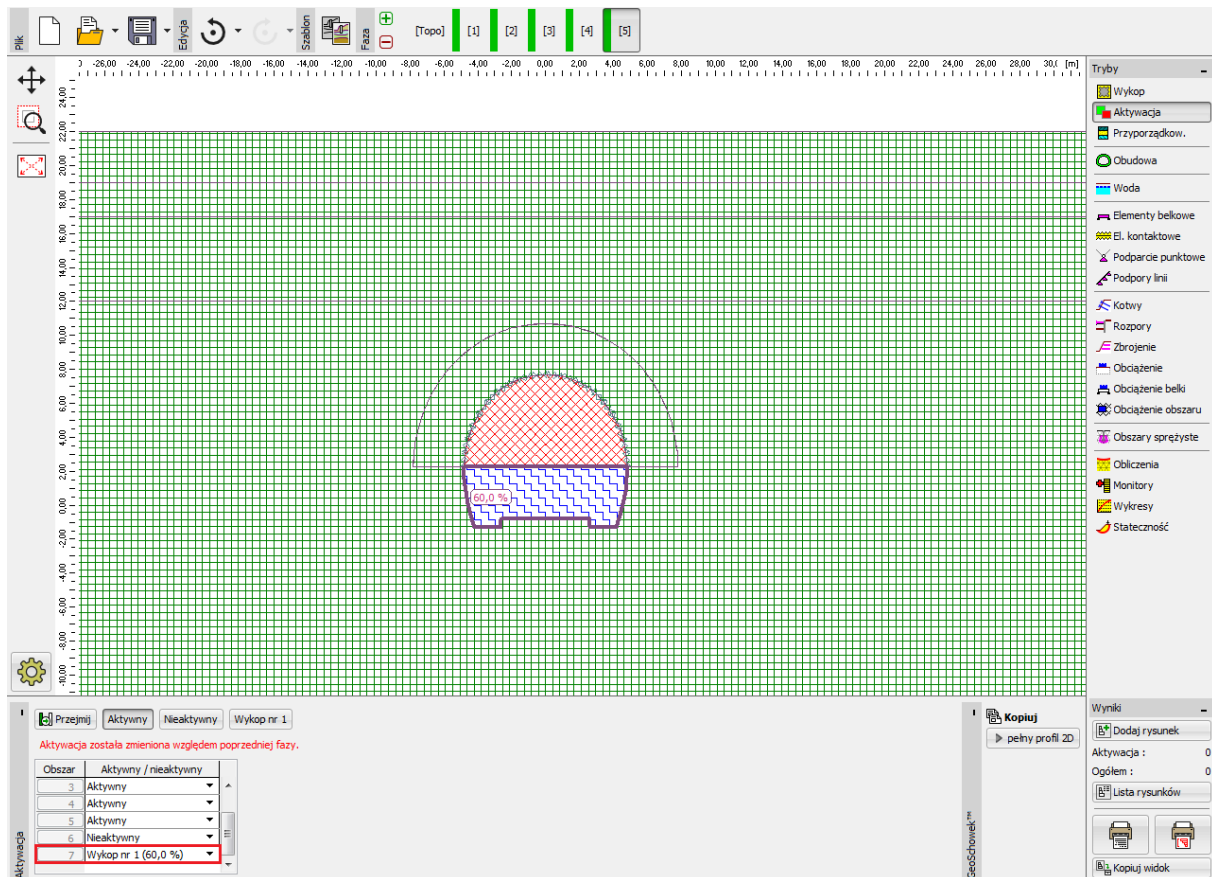
## Faza budowy nr 5: drążenie tunelu w obszarze spągu, aktywacja wydrążonego tunelu

Kolejnym krokiem będzie dodanie fazy budowy nr 5. W tej fazie budowy uwzględnimy 40% obciążenia działającego na wyrobisko tunelowe, co oznacza deaktywację 40% skały w obszarze wyrobiska. Pozostały grunt aktywny, masyw skalny w obszarze spągu, wynosi zatem 60%.



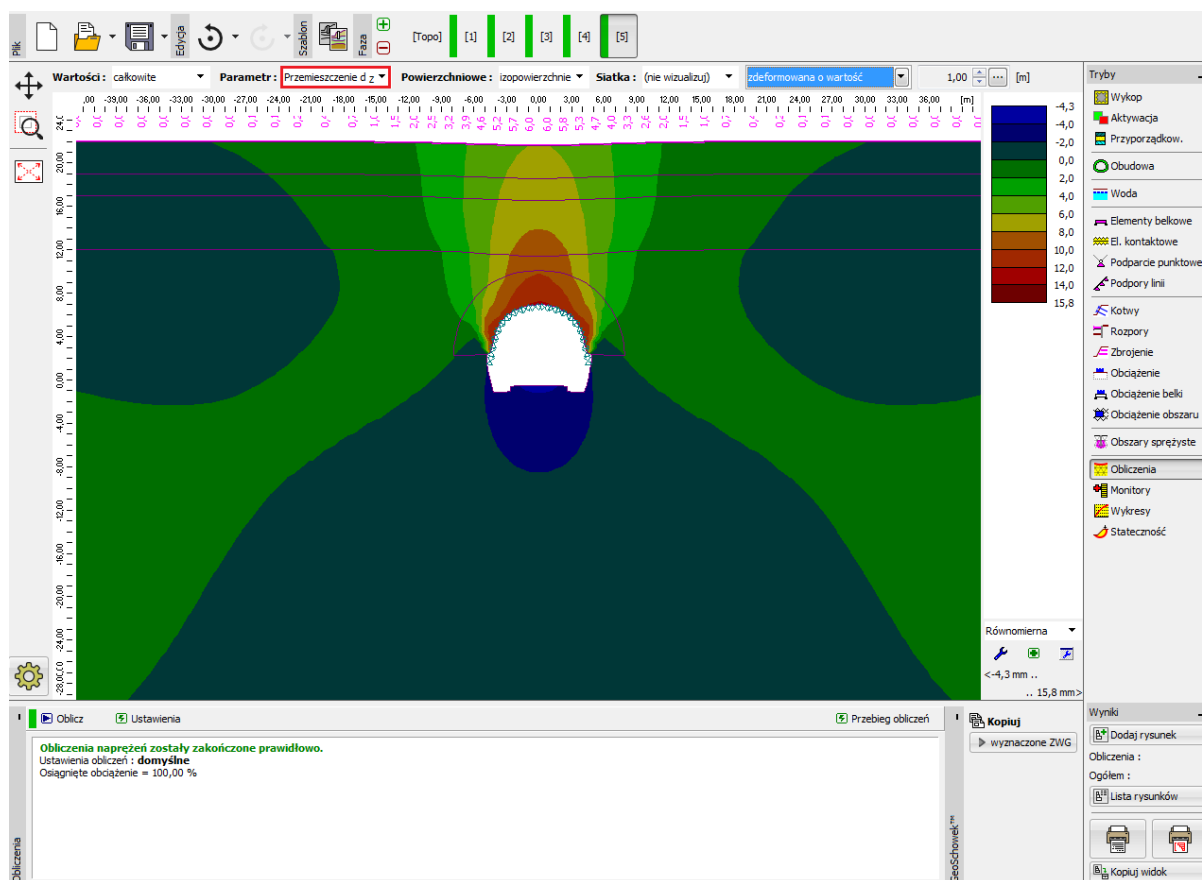
Okno dialogowe "Edycja właściwości wykopu" – faza budowy nr 5

*Uwaga: Procedura modelowania problemu w kolejnych fazach budowy jest analogiczna. Przede wszystkim obudowa stała wyrobiska tunelowego w obszarze spągu wykonana zostanie z betonu natryskowego wykonanego in-situ. Następnie aktywowana zostanie kolejna część obciążenia oddziałującego na obudowę. W kolejnej fazie budowy poprawione zostaną parametry materiałowe dojrzalego betonu oraz aktywowana zostanie pozostała część obciążenia.*



Ramka "Aktywacja" – faza budowy nr 5 (aktywacja 40% obciążenia tunelu w obszarze spągu)

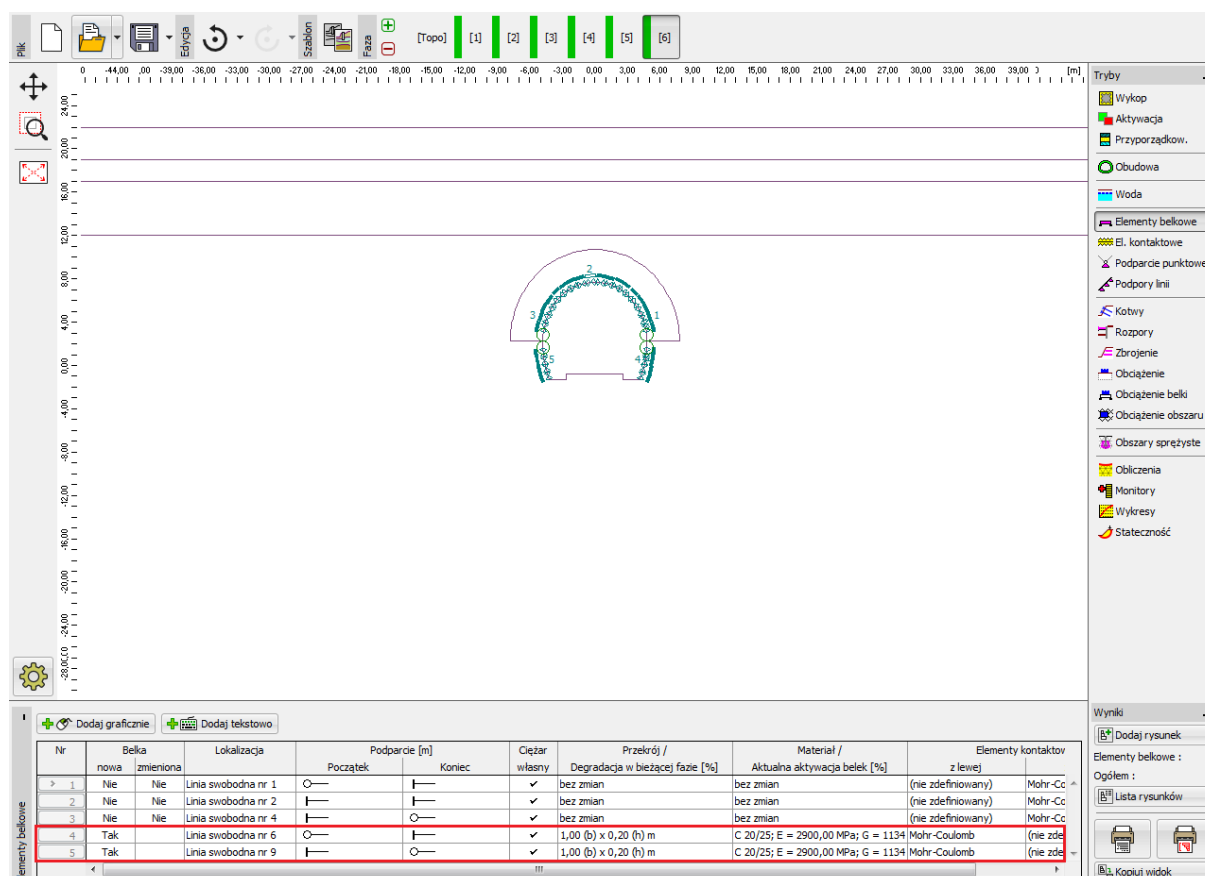
Przeprowadzimy następnie ponowne obliczenia.



Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 5 (przesunięcie pionowe  $d_z$  oraz niecka osiadania)

Faza budowy nr 6: zabezpieczenie sklepienia tunelu w obszarze spągu betonem natryskowym wykonanym in-situ stanowiącym element obudowy stałej

Kolejnym krokiem będzie dodanie fazy obliczeniowej nr 3, w której zamodelujemy wzmocnienie sklepienia tunelu w obszarze spągu betonem natryskowym wykonanym in-situ o grubości 200 mm stanowiącym element obudowy stałej tunelu. Obudowa tunelu w obszarze kaloty nie ulega zmianie w kolejnych fazach budowy.

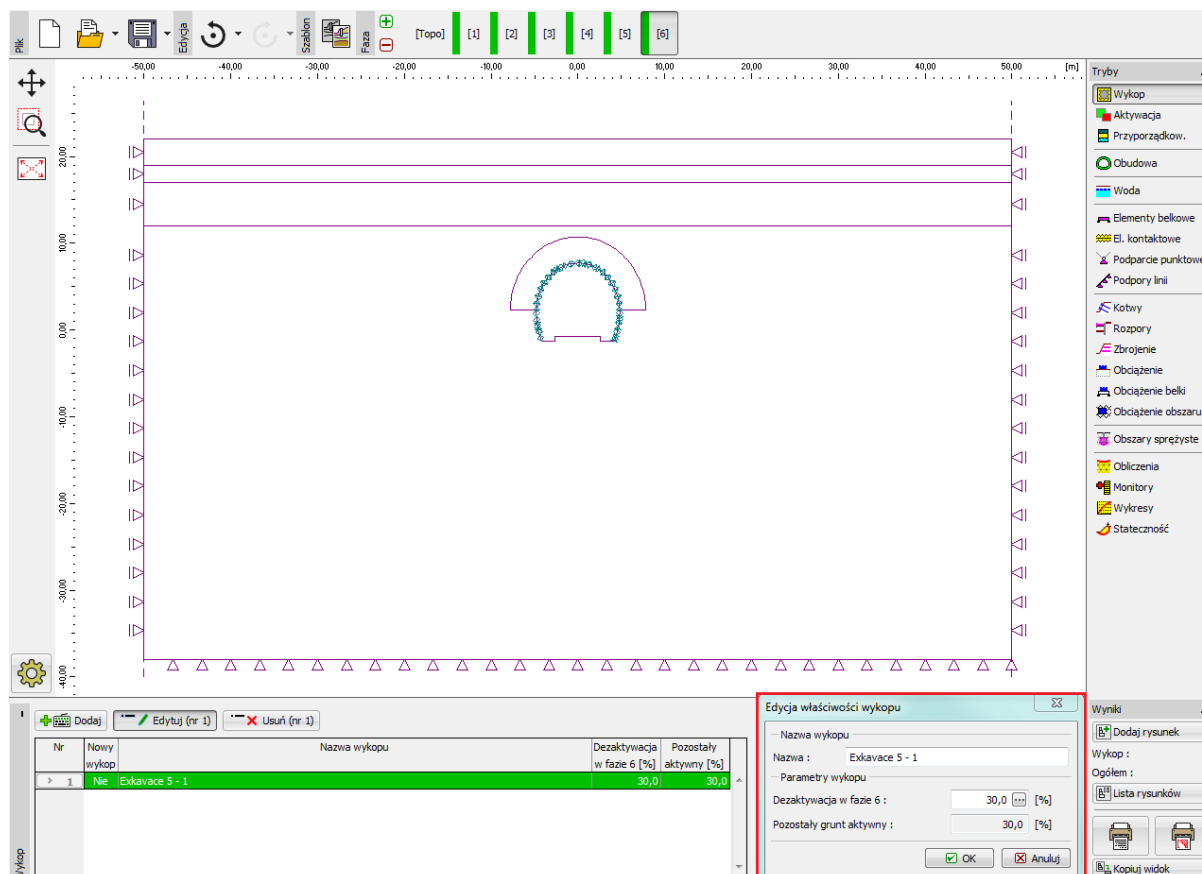


*Wprowadzanie obudowy stałej wyrobiska w obszarze spągu w postaci elementów belkowych – faza budowy nr 6 (świeży beton)*

*Uwaga: Ponownie zakładamy podparcie przegubowe na końcach belek; sposób połączenia obudowy tunelu w obszarze kaloty i spągu nie pozwala na przekazanie obciążenia pod postacią momentu zginającego (konstrukcja nie jest uciążłona). Wymiary przekroju obudowy w obszarze spągu są dokładnie takie same jak obudowy zastosowanej dla wyrobiska kaloty tj.  $b = 1.0$  m oraz  $h = 0.2$  m Należy ponadto zdefiniować elementy kontaktowe w odwrotny sposób niż uprzednio, gdyż orientacja belek (ścian bocznych tunelu) jest ujemna.*

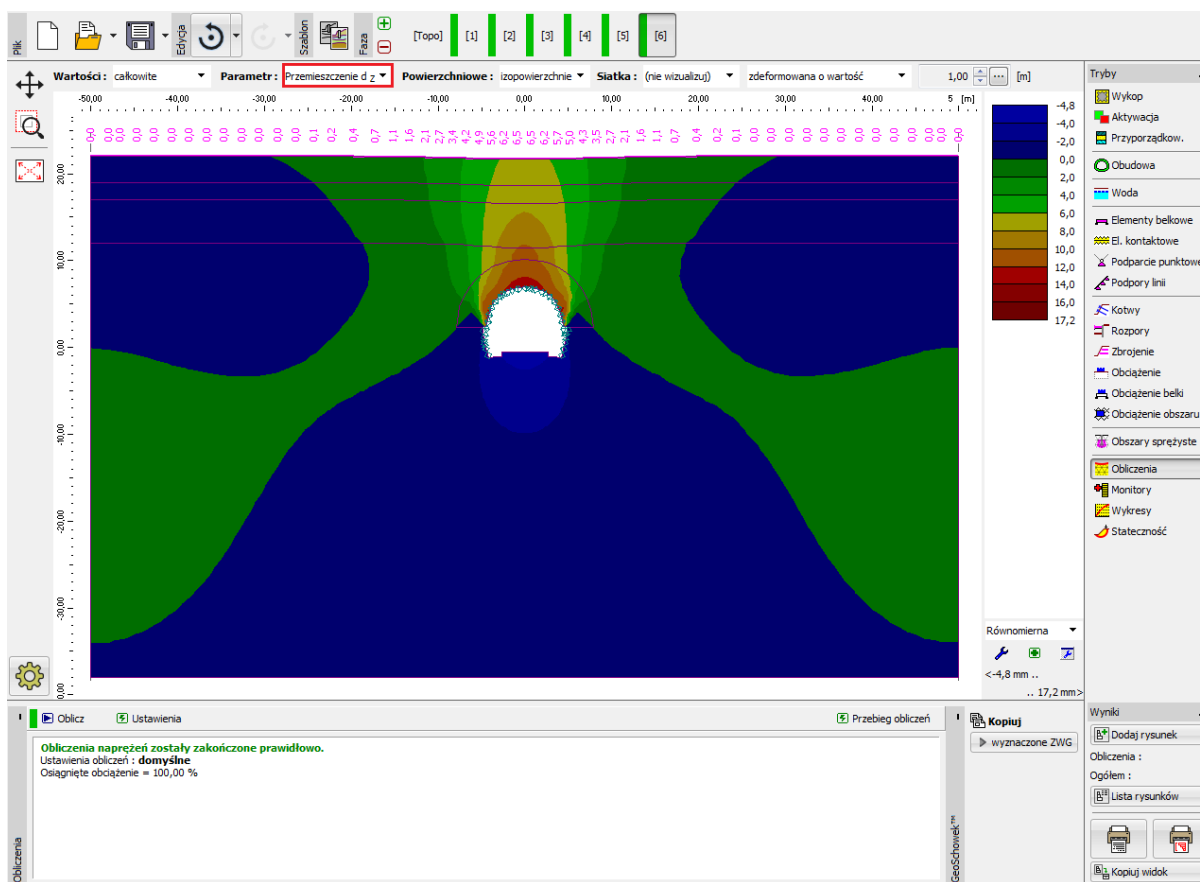


Na tym etapie obliczeń uwzględnimy także dodatkowe 30% obciążenia spowodowanego przez masyw skalny a działającego na wyrobisko tunelowe.



Okno dialogowe "Edycja właściwości wykopu" – faza budowy nr 6

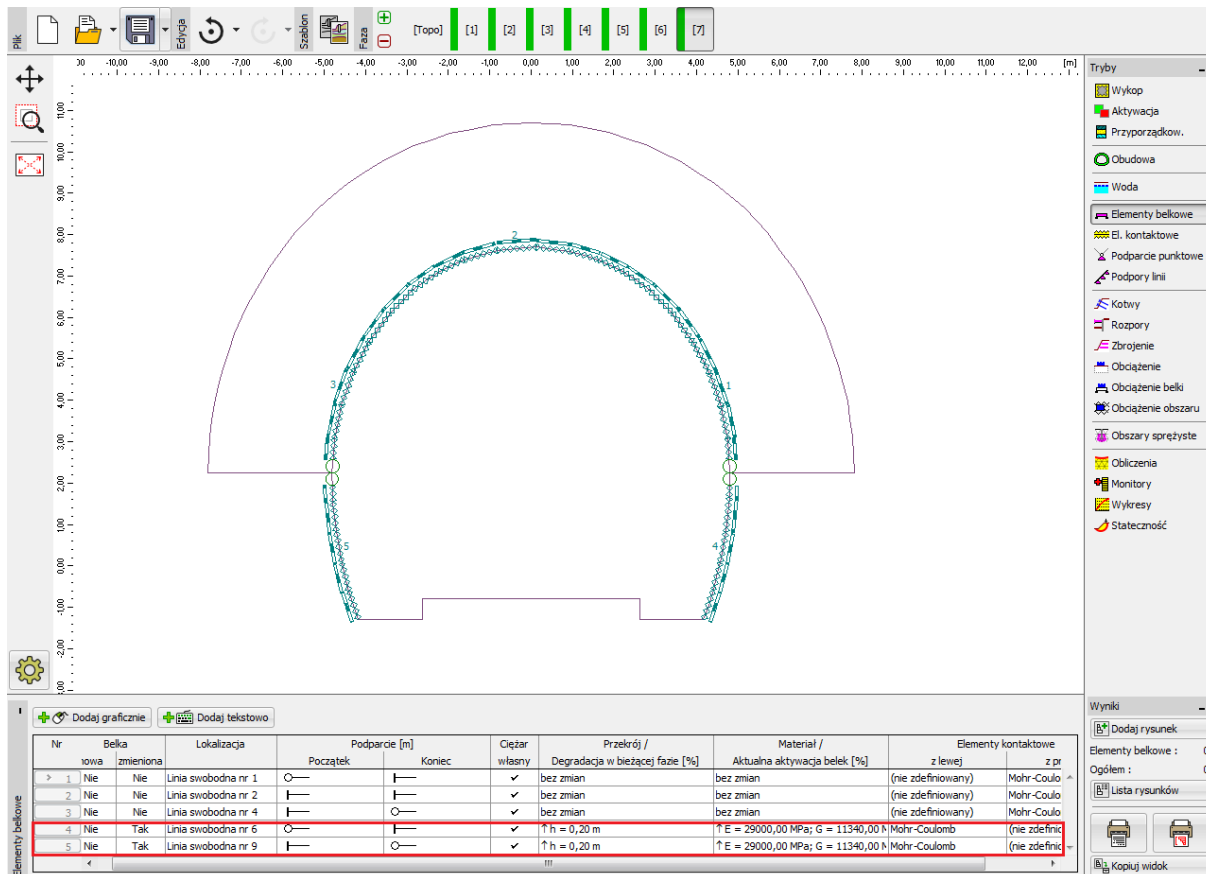
Ostatnim etapem w tej fazie będzie ponowne przeprowadzenie obliczeń.



Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 6 (przemieszczenie pionowe  $d_z$  oraz niecka osiadania)

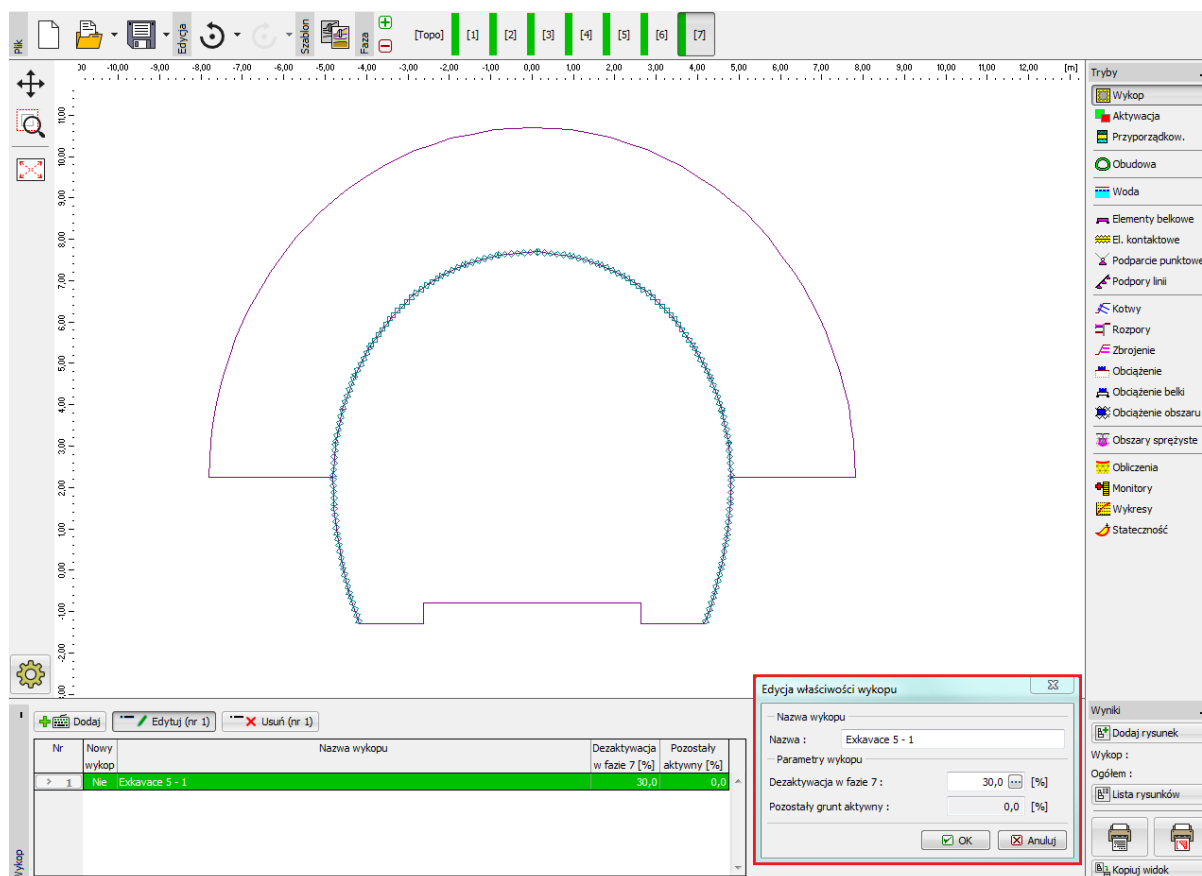
## Faza budowy nr 7: poprawa parametrów betonu natryskowego (spąg)

Wprowadzimy następną fazę budowy i poprawimy parametry materiałowe betonu stanowiącego obudowę wyrobiska tunelowego w obszarze spągu.



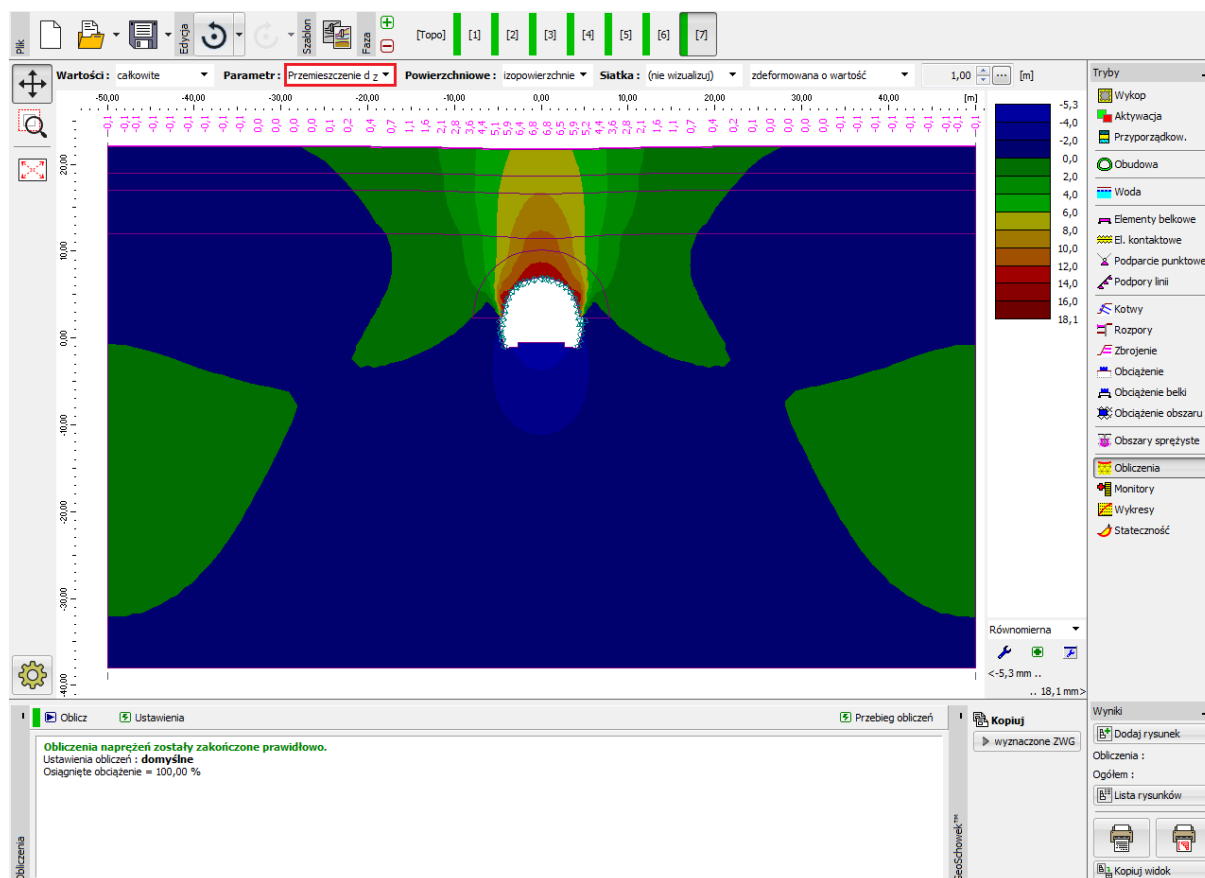
*Modyfikacja parametrów obudowy tymczasowej (spąg) – faza budowy nr 7 (dojrzewanie betonu natryskowego)*

Procedura zwiększania nośności obudowy jest analogiczna do zastosowanej w fazie obliczeń nr 4. Aktywujemy następnie pozostałe 30% obciążenia oddziałującego na wyrobisko tunelowe wywołanego przez maszyn skalny. Wykonując ten krok usuniemy całość urobku z przekroju tunelu, co oznacza, że obciążenie w całości oddziałuje na obudowę tunelu (składającą się z obudowy sklepienia kaloty oraz ścian bocznych spągu). Przeprowadzimy następnie obliczenia w ostatniej fazie budowy.



Okno dialogowe "Edycja właściwości wykopaliska" – faza budowy nr 7

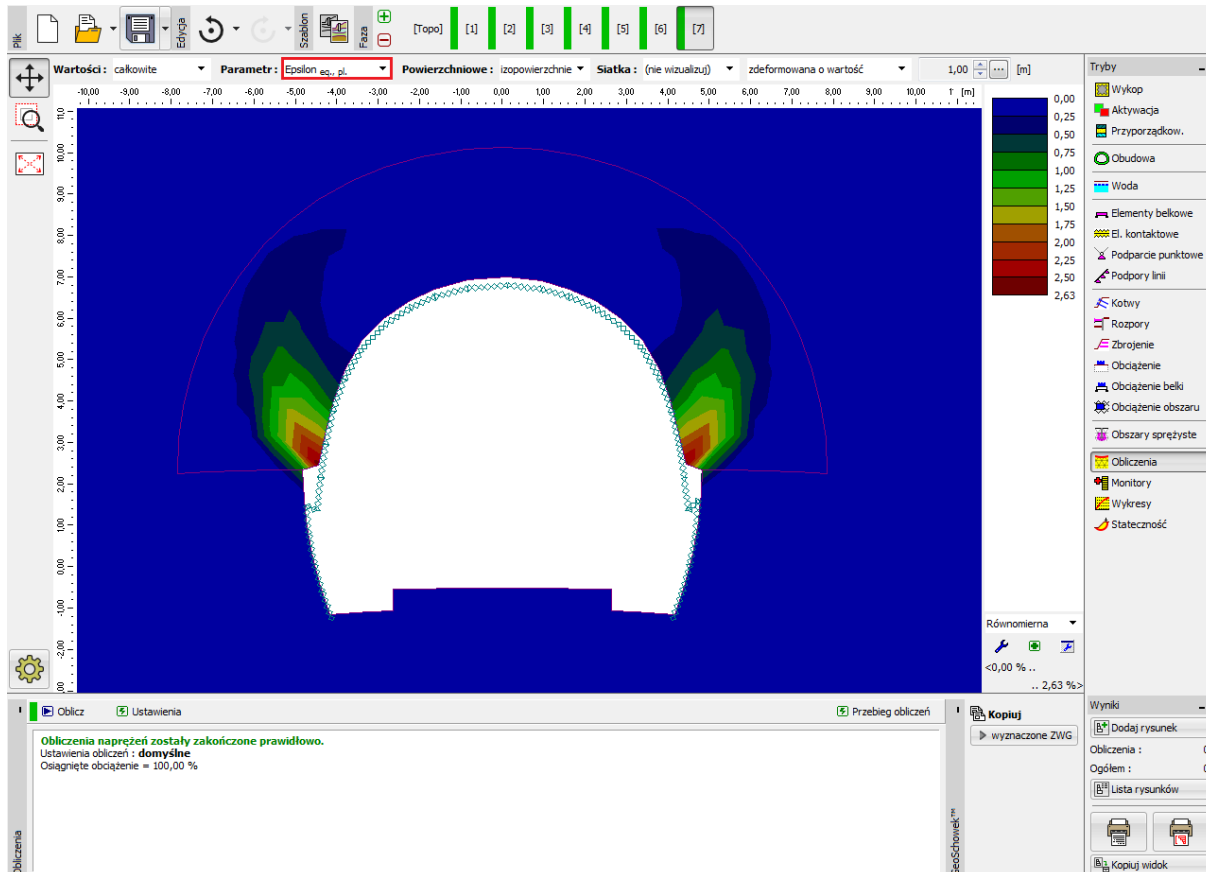
Przeprowadzimy teraz obliczenia w ostatniej fazie budowy.



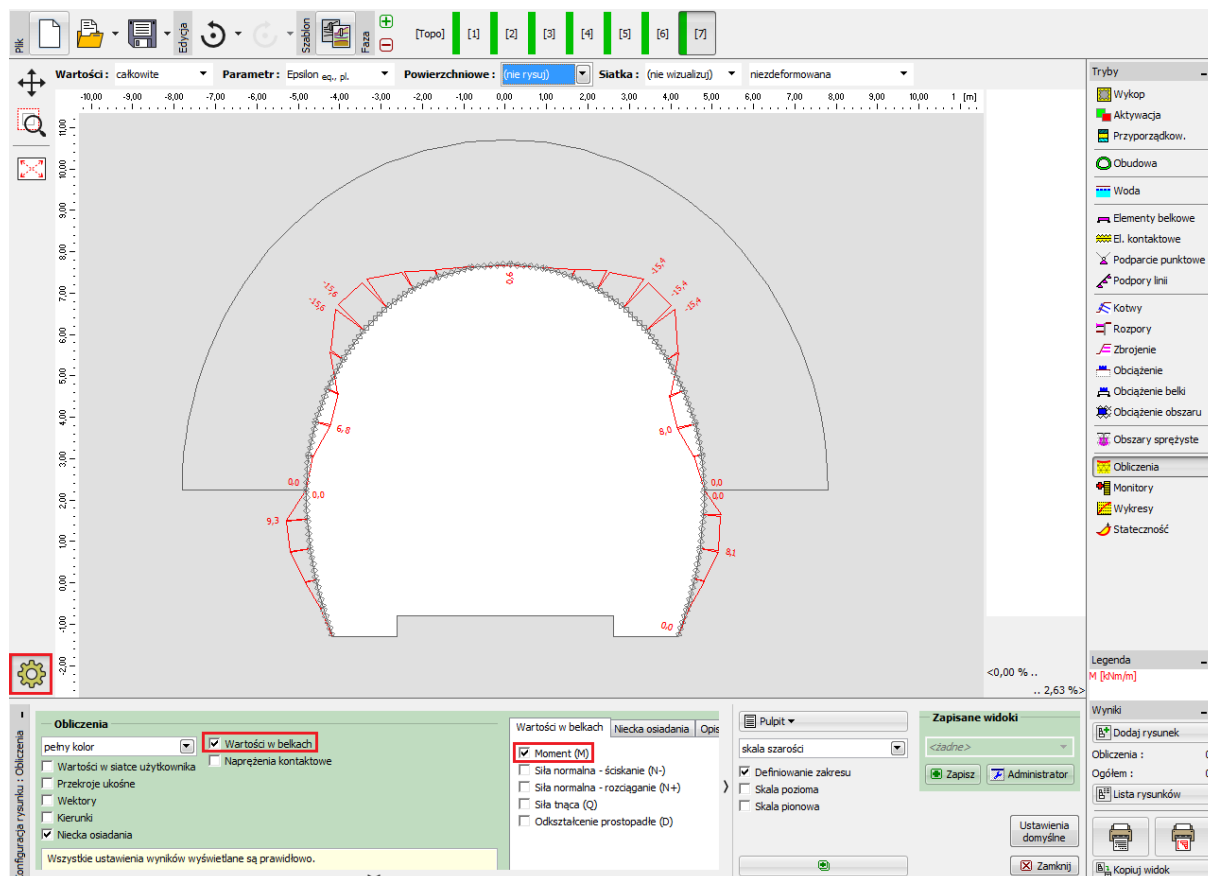
Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 7 (przesunięcie pionowe  $d_z$  oraz niecka osiadania)

Przedstawimy następnie w tej fazie obliczeniowej ekwiwalentne odkształcenie plastyczne  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  oraz siły wewnętrzne (momenty zginające i siły normalne) w obudowie (zaznaczenie odpowiedniej opcji w zakładce “Wartości w belkach”)

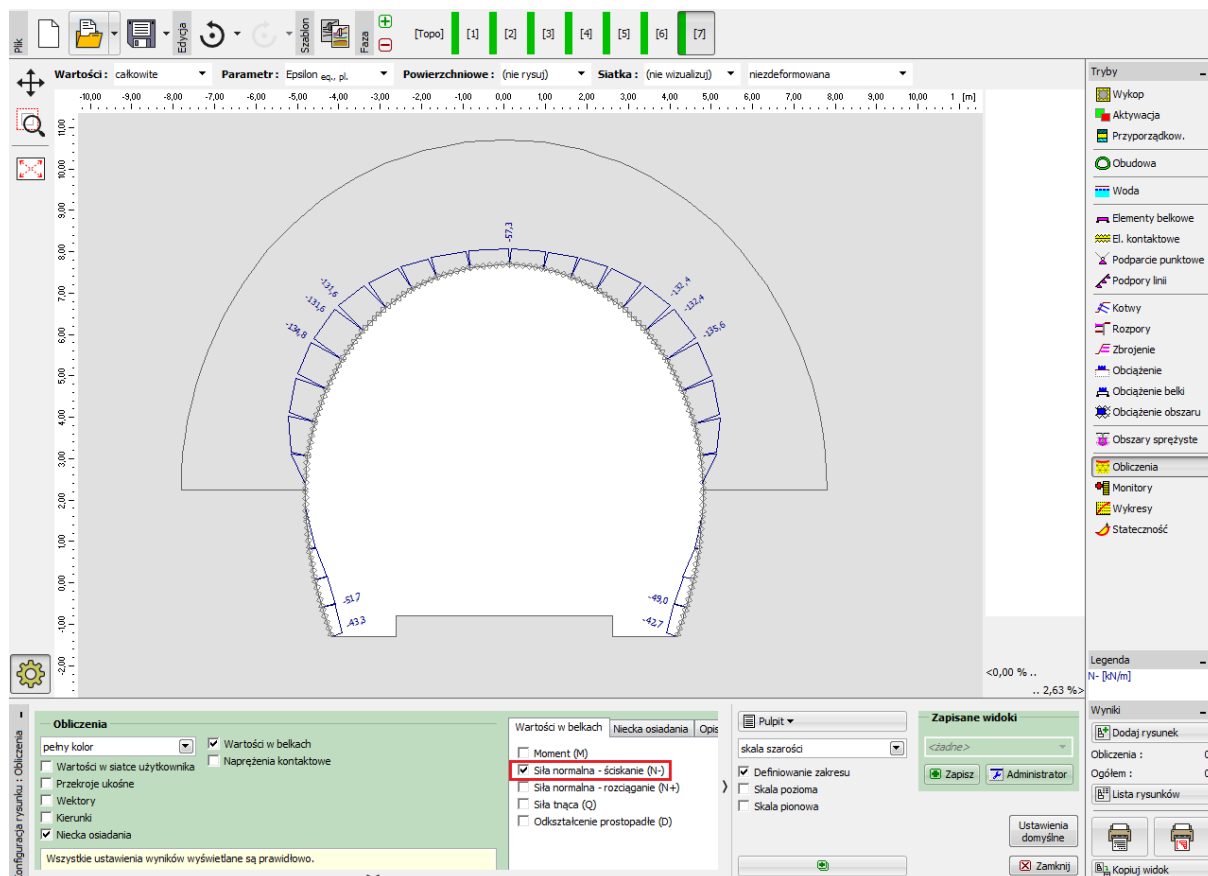
Jak wynika z rysunku ekwiwalentne odkształcenia plastyczne  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  są różne od zera, co odpowiada zachowaniu gruntu zgodnie z nieliniowym modelem materiałowym (Mohra – Coulomba).



Ramka “Obliczenia” – faza nr 7 (ekwiwalentne odkształcenie plastyczne  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  zgodnie z modelem gruntu Mohra-Coulomba)

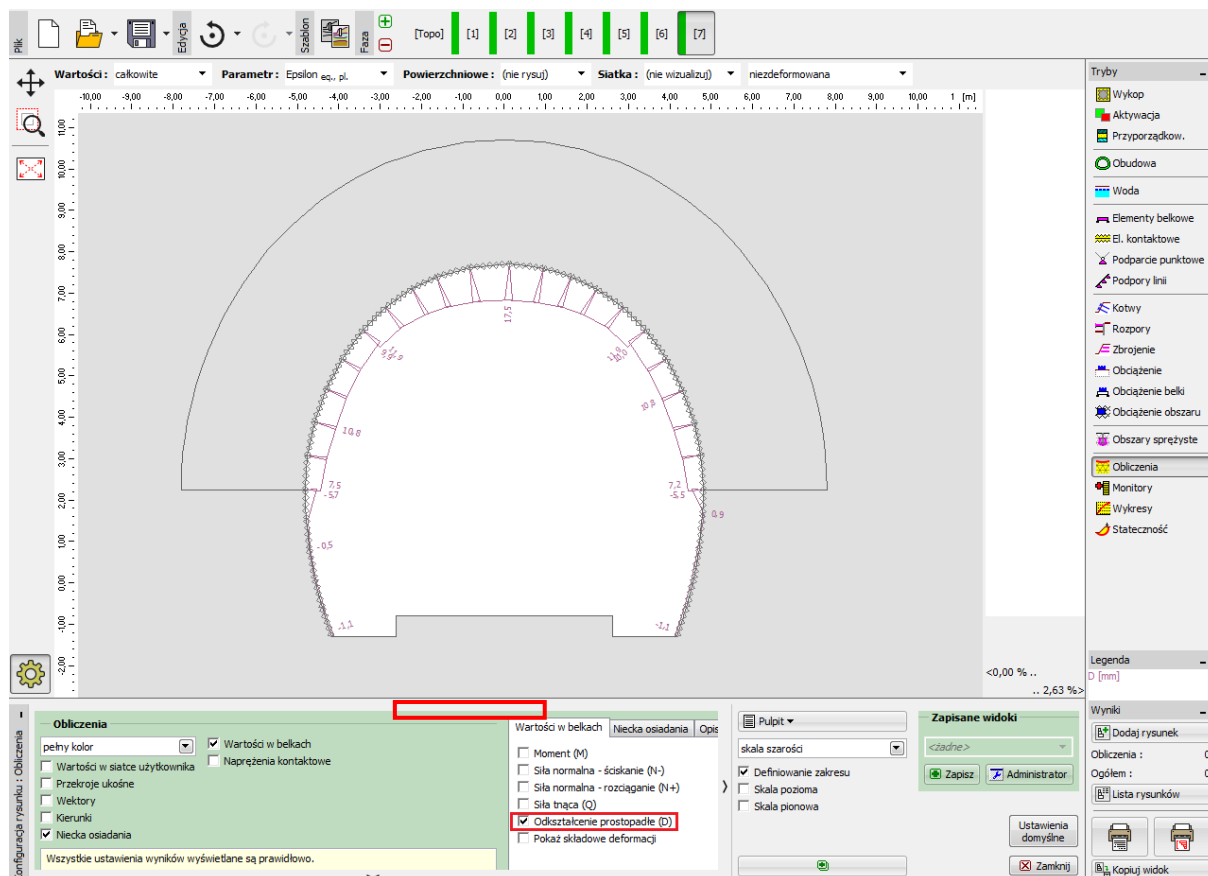


Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 7 (moment zginający  $M$  [kNm/m])



Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 7 (siła normalna – ściskanie  $N^-$  [kN/m])





Ramka "Obliczenia" – faza budowy nr 7 (przemieszczenie prostopadłe)

### Analiza wyników:

Przedstawiona poniżej tabela zawiera wartości ekstremalnych sił wewnętrznych (momentów zginających, sił normalnych oraz sił tnących) działających w belkach (obudowie tymczasowej tunelu) w ostatniej fazie obliczeniowej nr 7. Obliczenia przeprowadzone zostały przy zastosowaniu modelu materiałowego gruntu Mohra-Coulomba oraz lokalnie dogęszczonej siatce trójkątnych elementów skończonych.

Model materiałowy	Faza budowy nr 7 – Siły wewnętrzne		
	$N$ [kN/m]	$M$ [kNm/m]	$Q$ [kN/m]
Mohra – Coulomba	– 135.6	– 15.6	– 14.1
	+ 14.0	+ 9.3	+ 14.9

*Ekstremalne siły wewnętrzne w obudowie stałej – faza budowy nr 7*

Przedstawiona poniżej tabela zawiera wartości całkowitych przemieszczeń pionowych i poziomych  $d_z, d_x$  [mm] obudowy stałej tunelu w kolejnych fazach obliczeniowych.

Faza budowy	Wartość przemieszczenia całkowitego $d_z, d_x$ [mm]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
1	–	–	–	–
2	– 1.6	+ 1.8	– 0.46	+ 0.46
3	– 3.1	+ 8.3	– 2.8	+ 2.8
4	– 4.6	+ 15.8	– 5.1	+ 5.0
5	– 4.3	+ 15.8	– 5.4	+ 5.3
6	– 4.8	+ 17.2	– 6.3	+ 6.2
7	– 5.3	+ 18.1	– 7.0	+ 6.9

*Wartości przemieszczeń  $d_z, d_x$  obudowy tymczasowej (ekstremalne) – wszystkie fazy*

## Wnioski:

Przedmiotowy Przewodnik stanowi przykład modelowania rzeczywistej obudowy tymczasowej wyrobiska tunelowego z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Tunel został wykonany Nową Metodą Austriacką (NATM). Przekrój tunelu dzielony jest na kilka sekcji. Podczas usuwania urobku masyw skalny ulega odprężeniu prowadząc do odkształcenia otaczającego gruntu lub skały w kierunku wyrobiska (zjawisko konwergencji).

**Obudowa tymczasowa tunelu** zbrojona jest także siatką zgrzewaną (zgrzewane pręty o średnicy 8 mm ze stali zbrojeniowej, siatka o wymiarach 150 x 150 mm) oraz przestrzennymi dźwigarami kratowymi o przekroju trójkątnym (o trzech głównych prętach nośnych). Wprowadzanie siatek zgrzewanych do modelu MES (homogenizacja betonu i zbrojenia) jest dyskusyjne; zwykle uwzględnia się je dopiero podczas wymiarowania obudowy.

Obudowa stała tunelu powinna zostać następnie zwymiarowana z uwagi na otrzymane ekstremalne wartości sił wewnętrznych z wykorzystaniem odpowiedniego programu do wymiarowania (np. FIN EC – CONCRETE 2D). Przekrój powinien zostać zwymiarowany ze względu na jednoczesne działanie momentu zginającego i siły podłużnej przy uwzględnieniu współczynników interakcji.

*Uwaga: Analiza budowli podziemnej bez zastosowania elementów belkowych oraz kontaktowych przy założeniu liniowego modelu materiałowego gruntu (model sprężysty) przedstawiona została w Przewodniku Inżyniera nr 23 Analiza obudowy sztolni (patrz <http://www.finesoftware.pl/przewodniki-inzyniera/>).*