

# Численное моделирование проходки тоннеля Ново-Австрийским методом

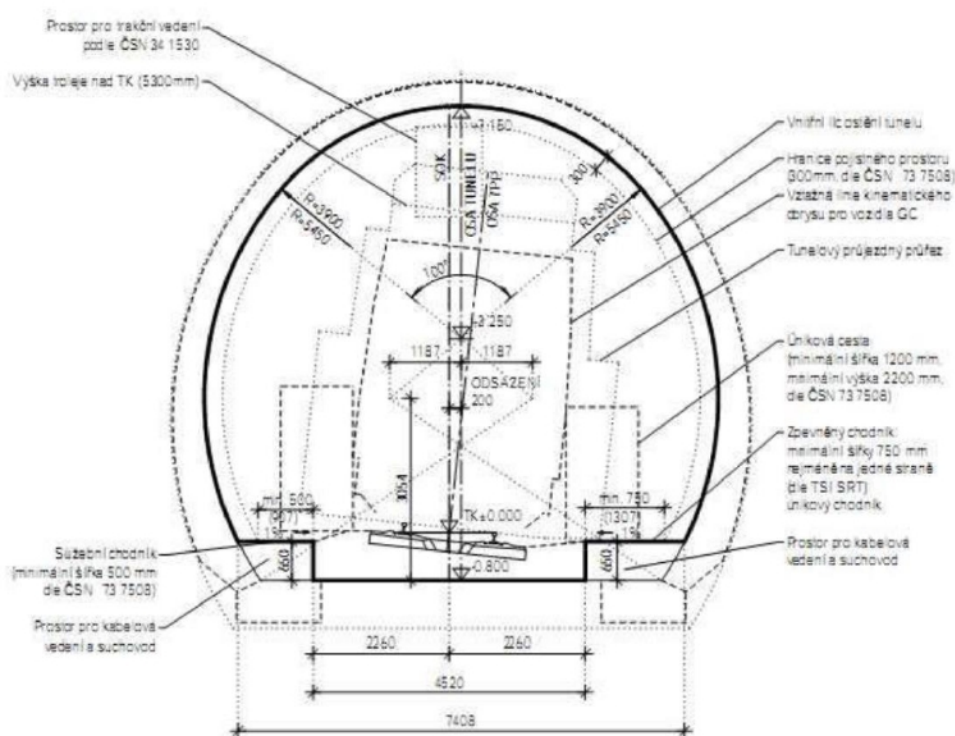
Программа: МКЭ

Файл: Demo manual 26.gmk

Целью данного руководства является описание численного моделирования однопутного железнодорожного тоннеля с использованием метода конечных элементов.

## Описание задачи

Необходимо разработать модель и рассчитать обделку однопутного железнодорожного тоннеля для скоростей от 160 до 230 км/ч. Поперечное сечение тоннеля разработано на основании типовой схемы SZDC (Управление железнодорожной инфраструктуры, государственная организация) и представлено на рисунке.



Сечение однопутного железнодорожного тоннеля в соответствии с типовой схемой  
SZDC

Тоннель предполагается проходить обычным методом (Ново-Австрийский метод проходки, метод последовательной экскавации) в следующем порядке: верхняя часть забоя, уступ и лоток (*разработка с уступом*, так называемая горизонтальная последовательность). Толща вскрышной породы составляет 14 м. Первичная обделка выполнена из торкрет-бетона класса С 20/25 толщиной 200 мм. Кровля выработки

поддерживается гидрораспорными трубчатыми анкерами (марка WIBOLT EXP) с несущей способностью 120 кН. На основании материалов изысканий предполагается, что все элементы геологического разреза залегают горизонтально. Состав геологического разреза представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры дисперсных и скальных грунтов

Разновидность грунта	Мощность слоя [м]	$\gamma$ [кН/м <sup>3</sup> ]	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [кПа]	$\nu$ [-]	$E_{def}$ [МПа]	$E$ [МПа]	$\gamma_{sat}$ [кН/м <sup>3</sup> ]
Пылеватый песок (S4/SM)	0 – 3	19,5	29	10	0,3	10	30	22
Гравелистый песок (G4/GM)	3 – 5	19,5	33	8	0,3	70	210	22
Сланец сильновыветрелый (R5)	5 – 10	24	29	39	0,33	45	135	25
Сланец слабовыветрелый (R3)	Более 10	26	38	250	0,25	350	1050	26
Зона закрепленная анкерами (R5)	-	24	29	63	0,33	45	135	29

## Решение

Для расчета данной задачи будет использоваться программа GEO 5 - МКЭ. Пошаговое решение этой задачи будет описано ниже:

- Топология: ввод исходных данных и моделирование задачи (контактные элементы, моделирование обделки);
- Моделирование процесса возведения: материал первичной обделки, этапы проходки;
- Этап проектирования 1: исходное геостатическое давление в скальном массиве;
- Этап проектирования 2: моделирование проходки верхней части забоя, активация незакрепленного вскрытого проема;
- Этап проектирования 3: закрепление кровли невыдержанным торкрет-бетоном;
- Этап проектирования 4: улучшение параметров материала для выдержанного бетона (кровля);
- Этап проектирования 5: моделирование проходки лотка, активация незакрепленного вскрытого проема;
- Этап проектирования 6: закрепление стенок лотка невыдержанным торкрет-бетоном;
- Этап проектирования 7: улучшение параметров материала для выдержанного бетона (лоток);
- Анализ результатов, выводы: мульда оседания поверхности, деформации скального массива, распределение внутренних усилий и перемещения первичной обделки, усилия в анкерах.

*Примечание: моделирование в программе GEO 5 – FEM состоит из двух этапов.*

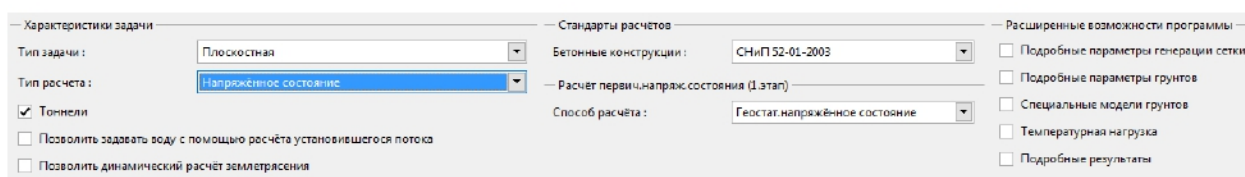
*На первом этапе следует определить размеры численной модели в режиме «Топология»,*

*определить границы между скальными и дисперсными элементами, определить геометрию конструкции тоннеля с использованием точек и линий и присвоить их соответствующим границам модели (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

*На втором этапе определяются отдельные этапы проектирования и проводятся расчеты. Целью отдельных этапов проектирования является моделирование фактической последовательности возведения данного подземного сооружения путем активации, деактивации и изменения материалов выбранных областей модели; добавления и удаления балочных элементов, моделирующих конструкции (например, обделку тоннеля), а также изменения их параметров (материала, размеров). В результате будет получена численная модель, поведение которой, предположительно, полностью соответствует поведению реального сооружения. С ее помощью возможно оценить размеры конструкций тоннеля.*

## Топология (Часть 1): ввод границ элементов и параметров грунта

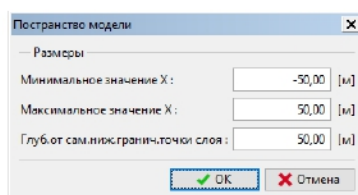
Во вкладке "Характеристики задачи" для этапа проектирования 1 расчет остается в режиме «Геостатическое напряжение». Используется тип расчета «Напряженное состояние». Дополнительно необходимо отметить режим «Тоннели», который позволяет реалистично моделировать первичную обделку тоннеля.



### Вкладка «Характеристики задачи»

*Примечание: в случае, если выбран режим «Тоннели», программу можно использовать для моделирования выработок (моделирование пространственного влияния забоя при проходке Ново-Австрийским методом), вводить и рассчитывать деградацию свойств балок, температурные нагрузки, действующие на балки и области, нагрузки в результате набухания, и сопоставлять результаты с данными мониторинга (более подробная информация представлена в Справке - F1).*

Далее следует задать размеры пространства модели и поверхность грунта. Для данной задачи указываются размеры (-50 м; 50 м); величина глубины исследуемой области от нижней точки поверхности 50 м.



### Диалоговое окно «Пространство модели»

*Примечание: границы рассматриваемой задачи или размеры пространства модели должны быть достаточно большими, чтобы на напряженное состояние и деформации скального массива в зоне расположения сооружения (или в других интересующих пользователя областях) не оказывали влияния граничные условия модели. Рекомендуемые значения размеров границ модели представлены для отдельных задач и подробно описаны в Справке к программе (более подробная информация – F1).*

Граница 1		Граница 2		Граница 3		Граница 4	
x [М]	z [М]	x [М]	z [М]	x [М]	z [М]	x [М]	z [М]
-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

#### Список точек границ между скальными и дисперсными элементами

Во вкладке «Грунты» следует ввести параметры скальных и дисперсных грунтовых элементов, а так же параметры закрепленной анкерами зоны (см. Примечание). Для моделирования задачи используется модель Mohr-Coulomb. Она позволяет рассматривать области местного или полного разрушения (более подробная информация представлена в Справке – F1).

*Примечание: скальные анкеры вводятся в численную модель с помощью метода, в котором область скального массива, закрепленная на длину анкера вблизи выработки, заменяется скальным грунтом с лучшими параметрами материала. В таких случаях обычно принимается увеличение сцепления для скального грунта. Общее сцепление в скальном грунте с учетом работы анкеров вычисляется как:*

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [кПа]}$$

где:  $c_{h+s}$  общее сцепление скального грунта, увеличенное с помощью анкеров;  
 $c_h$  исходное сцепление скального грунта;  
 $c_s$  увеличение сцепления за счет работы анкеров.

Увеличение сцепления за счет работы анкеров рассчитывается по следующей зависимости:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2,058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1,5} = 33,0 \text{ кПа}$$

где:  $N_u$  несущая способность анкера [кН];  
 $A_k$  область, включенная в работу одним анкером [м<sup>2</sup>];  
 $\varphi_{ef}$  угол внутреннего трения скального грунта [°];  
 $\gamma_{kc}$  коэффициент надежности анкера [-]

**В данной задаче рассматривается использование 10 гидрораспорных трубчатых анкеров с несущей способностью 120 кН и шагом 3,5 м. Результирующее сопротивление**

*сдвигу, или сцепление, в закреплённой анкерами области соответствует типу скального грунта R5:*

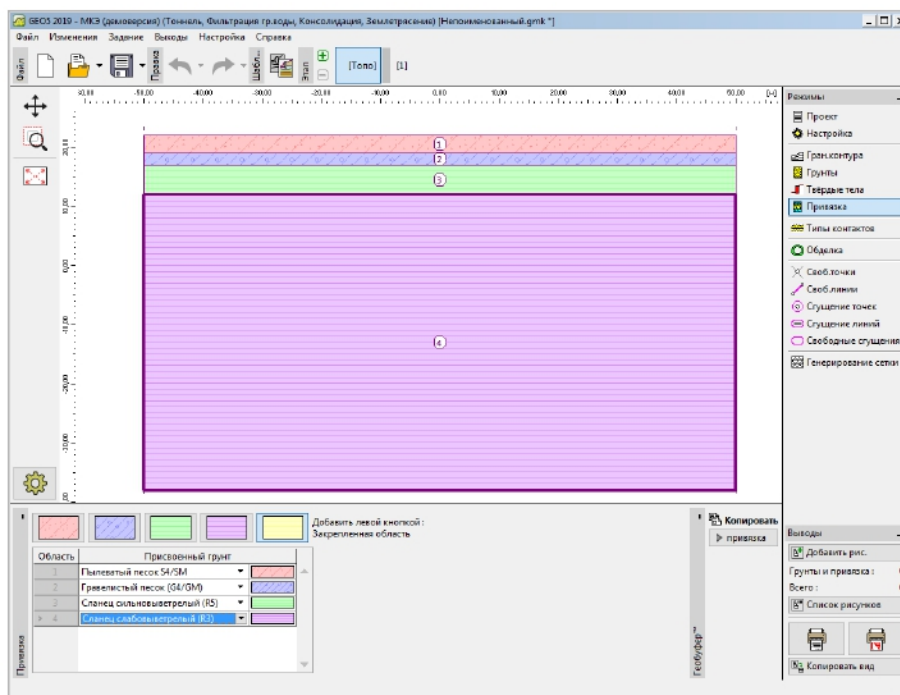
$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ [кПа]}.$$

Модуль упругости  $E$  [МПа] не определялся непосредственно в ходе геологических изысканий. В связи с этим его величина определена на основании модуля деформации  $E_{def}$  [МПа] с использованием общей зависимости  $E = 3 \times E_{def}$ .

В расчёте принимается нулевое значение угла дилатансии  $[\psi]$  для всех дисперсных и скальных элементов.

Далее следует присвоить виды грунтов отдельным областям (см. рисунок ниже).

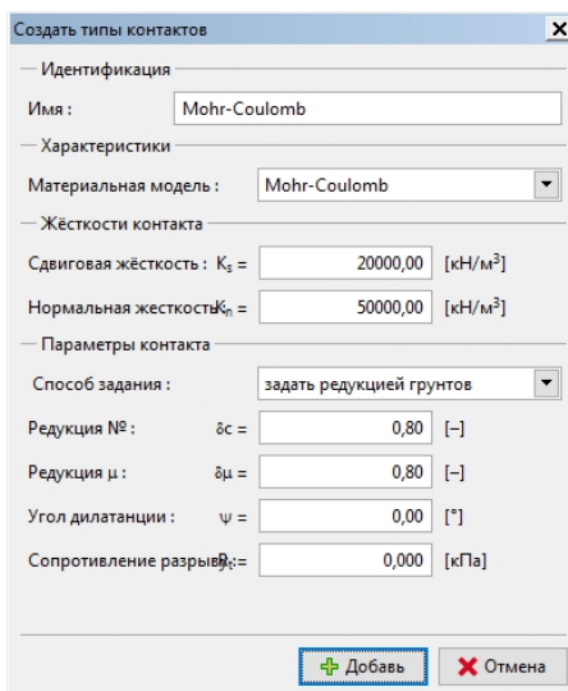
*Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"*



*Вкладка "Привязка"*

Следующим шагом является определение типа контактных элементов, которые будут расположены между обделкой и грунтом или скальным грунтом во вкладке «Типы контактов». Параметры контакта предполагаются следующими:

- жесткость при сдвиге:  $K_s = 20\,000 \text{ кН/м}^3$
- жесткость при нормальном сжатии:  $K_n = 50\,000 \text{ кН/м}^3$
- снижение параметров грунта:  $\delta_c = \delta_\mu = 0,8$ .



*Диалоговое окно «Создать типы контактов»*

*Примечание: контактные элементы позволяют прогнозировать взаимодействие между материалами на границе грунта и сооружения, либо между видами грунта. Толщина контактного элемента равняется нулю. Элемент отражает отношение между контактными напряжениями и соответствующими перемещениями на контакте (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

*В данном случае рассматриваются контактные элементы на границе первичной обделки и скального грунта, то есть предполагается возможное смещение обделки относительно поверхности выработки.*

*Контактные элементы обычно используются в менее прочных грунтах; ими можно пренебречь, с определенной осторожностью, в невыветрелых ненарушенных скальных массивах (в случае тоннельных сооружений). Задачи и методы использования контактных элементов более подробно рассмотрены в Главе 24 «Численный расчет шпунтового ограждения» (более подробную информацию см.*

*<http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>). Рекомендуемые значения жесткости  $K_s$  и  $K_n$  [кН/м<sup>3</sup>] представлены в Справке (более подробная информация – F1).*

На этом завершается начальное определение задачи (моделирование границ, ввод параметров грунтов и типов контактов). Можно перейти к моделированию обделки тоннельной выработки и, далее, к определению области, закрепленной анкерами.

**Топология (часть 2): моделирование обделки и области, закрепленной анкерами**

Следует переключиться на вкладку «Обделка» и нажатием кнопки «Добавь» задать точки тоннельной выработки, геометрию выработки и ее положение в расчетной области. Толщина обделки предполагается равной 200 мм, с учетом конкретного типа сооружения (моделируется обделка железнодорожного тоннеля).

*Примечание: обделка может быть смоделирована в программе с помощью отдельных точек и линий либо с помощью так называемого макро-элемента. Преимущество второго способа заключается в том, что при изменении профиля геологического разреза, обделка может переноситься целиком в выбранном направлении (горизонтальном или вертикальном). Более подробная информация представлена в Справке – F1.*

Геометрия сечения тоннельной выработки определяется в модуле «Обделка – FEM» с помощью десяти свободных точек (см. табл. 2), соединенных свободными линиями (см. табл. 3).

*Таблица 2 – Свободные точки выработки (первичная обделка)*

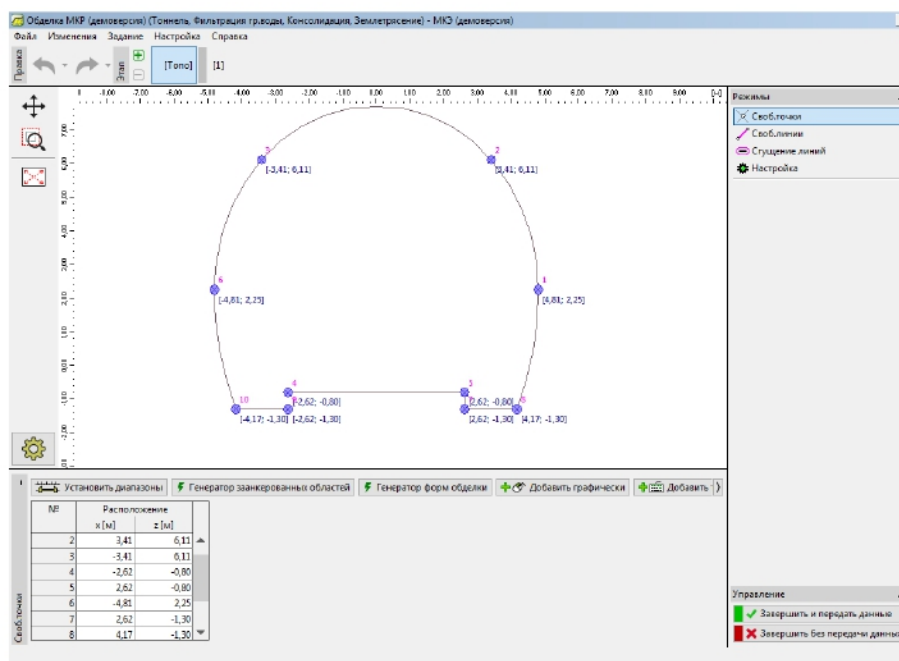
Номер точки	Положение $x$ [м]	Положение $y$ [м]
1	4,81	2,25
2	3,41	6,11
3	-3,41	6,11
4	-2,62	-0,80
5	2,62	-0,80
6	-4,81	2,25
7	2,62	-1,30
8	4,17	-1,30
9	-2,62	-1,30
10	-4,17	-1,30

*Примечание: генератор геометрии обделки создает элементы в соответствии с параметрами. Далее элементы обрабатываются независимо, без возможности последующего изменения их параметров. Если параметры верны, текущая графическая форма созданных элементов будет отображаться при изменении параметров (более подробная информация представлена в справке – F1).*

Таблица 3 – Свободные линии выработки (первичная обделка)

Номер линии	Тип линии	Способ ввода	Топология линии
1	дуга	центр	Начало – точка 1, конец – точка 2, центр (–1,19; 2,25), ориентация положительная
2	дуга	центр	Начало – точка 2, конец – точка 3, центр (0,00; 3,25), ориентация положительная
3	отрезок	-	Начало – точка 4, конец – точка 5
4	дуга	центр	Начало – точка 3, конец – точка 6, центр (1,19; 2,25), ориентация положительная
5	отрезок	-	Начало – точка 7, конец – точка 8
6	дуга	центр	Начало – точка 1, конец – точка 8, центр (–5,39; 2,25), ориентация отрицательная
7	отрезок	-	Начало – точка 5, конец – точка 7
8	отрезок	-	Начало – точка 9, конец – точка 10
9	дуга	центр	Начало – точка 10, конец – точка 6, центр (5,39; 2,25), ориентация отрицательная
10	отрезок	-	Начало – точка 4, конец – точка 9
11	отрезок	-	Начало – точка 6, конец – точка 1

Свободные точки на контуре тоннельной выработки и первичной обделки показаны на рисунке ниже



*Модуль «Обделка – FEM» - Свободные линии выработки (в горизонтальной последовательности)*

Поддержка свода тоннеля с использованием анкеров учитывается в процессе расчета подземного сооружения. В инженерной практике эта поддержка обычно моделируется как увеличение параметров скального грунта в данной области. В связи с этим необходимо так же выделить область закрепления – с помощью свободных точек (см. табл. 4) и свободных линий (см. табл. 5).

*Таблица 4 – Свободные точки вокруг области, закрепленной гидрораспорными трубчатыми анкерами*

Номер точки	Положение x [м]	Положение y [м]
11	7,81	2,25
12	5,71	8,04
13	-5,71	8,04
14	-7,81	2,25

*Таблица 5 – Свободные линии вокруг области, закрепленной гидрораспорными трубчатыми анкерами*

Номер линии	Тип линии	Способ ввода	Топология линии
12	дуга	радиус	Начало – точка 14, конец – точка 13, радиус – 9,0 м, ориентация отрицательная, угол – острый
13	дуга	радиус	Начало – точка 13, конец – точка 12, радиус – 7,45 м, ориентация отрицательная, угол – острый

Далее следует добавить новую свободную точку № 15 с координатами  $[0,0; 2,25]$  в модуле «Обделка», чтобы затем увеличить плотность сетки вокруг нее (см. Топология – часть 3).

Обделка МКР (демонстрация) (Тоннель, Филтрация гру воды, Консолидация, Землетрясение) - МКЗ (демонстрация)

Файл Изменения Задание Настройка Справка

Правка

Шаг [Тонн] [1]

Режимы

- Свободочки
- Свободии
- Сгущение линий
- Настройка

Управление

- Завершить и передать данные
- Завершить без передачи данных

Координаты точек (X [м], Z [м]):

№	Расположение	X [м]	Z [м]
10		-4,17	-1,30
11		7,81	2,25
12		5,71	8,04
13		-5,71	8,04
14		-7,81	2,25
15		0,00	2,25

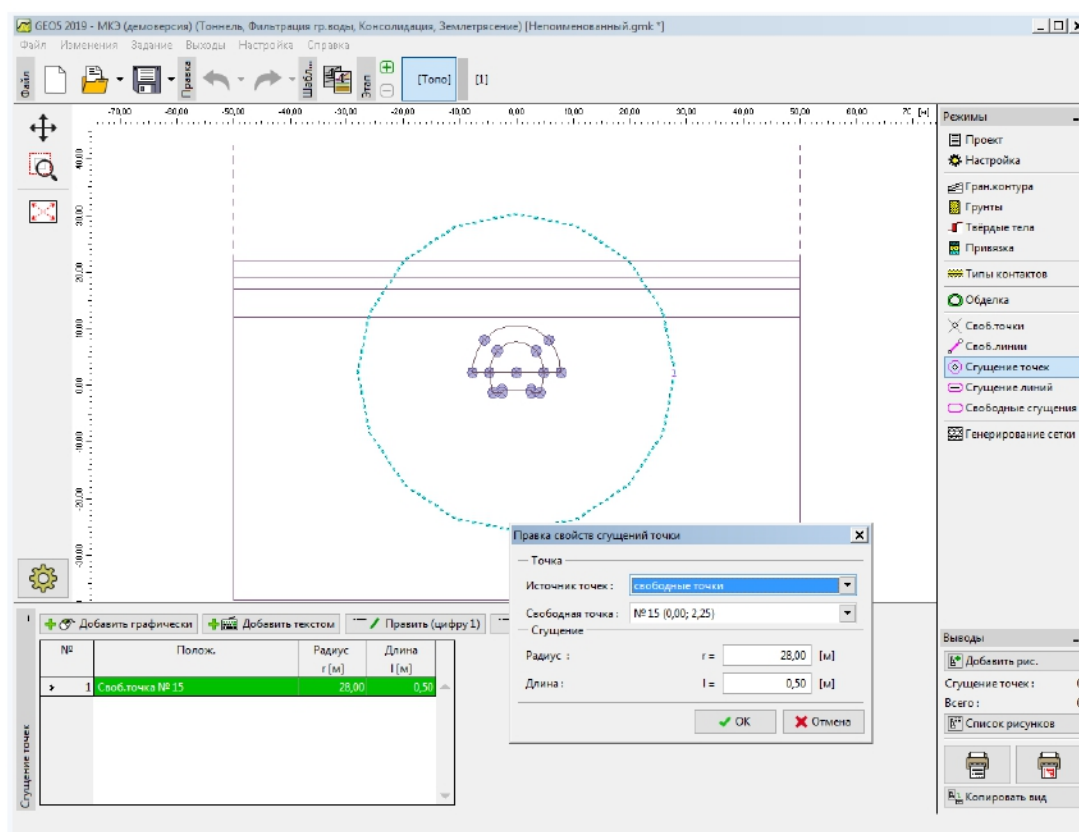
*Свободные точки вокруг закрепленной области и первичной обделки*

В последней части определения топологии сооружения будет создана сетка КЭ и проведено увеличение ее плотности.

### Топология (часть 3): создание сетки КЭ и увеличение ее плотности

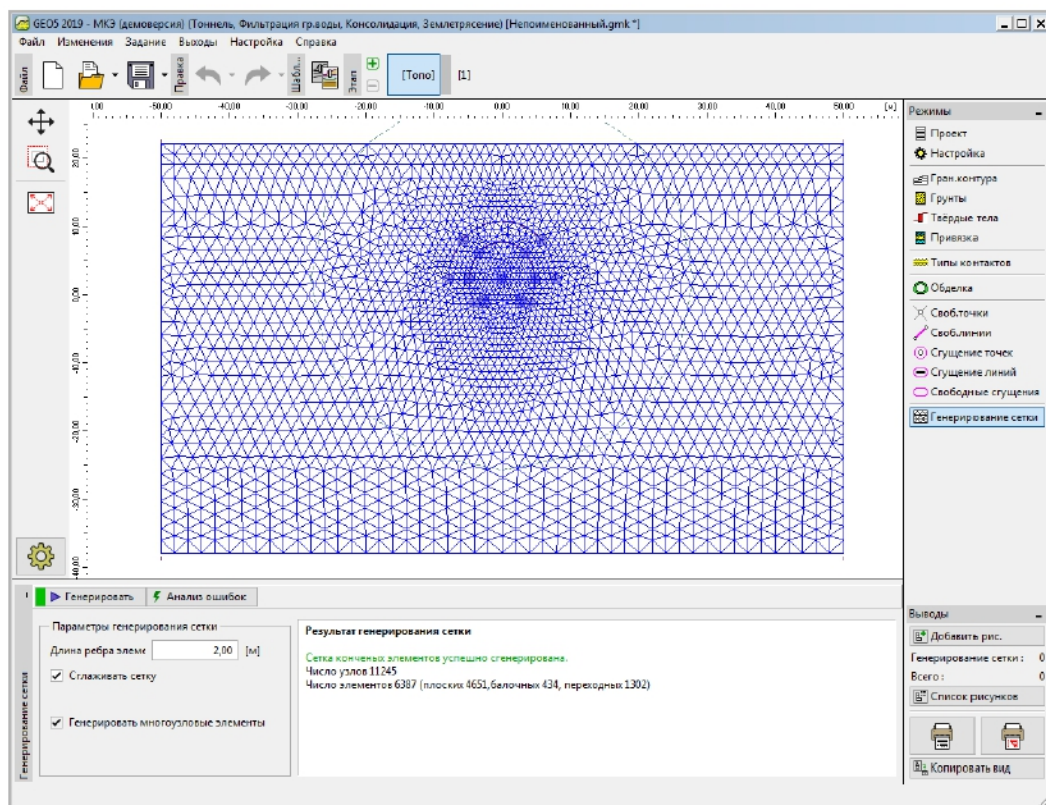
Сетка КЭ в значительной степени влияет на значения, полученные в результате расчета. Перед непосредственным созданием сетки следует увеличить плотность в области выработки (вокруг точки № 15) с длиной стороны элемента  $l = 0,5$  м и радиусом  $r = 28$  м.

*Примечание: на данном этапе создается достаточно плотная сетка в области, представляющей наибольший интерес (выработка). Процесс увеличения плотности вокруг свободных точек и линий подробно описан в Главе 23. Расчет обделки коллектора (более подробная информация - <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).*



Диалоговое окно «Правка свойств свободной точки»

Далее можно перейти непосредственно к созданию сетки КЭ. Во вкладке «Генерирование сетки» следует установить размер стороны элемента 2,0 м и отметить опцию «Сглаживание сетки».



*Вкладка «Генерирование сетки» - Измельчение вокруг точек вблизи выработки (длина стороны 0,5 м)*

## Примечания к моделированию процесса проектирования

В данной части руководства для удобства представлена информация, относящаяся к процессу проектирования – материал первичной обделки тоннеля, последовательность разработки (отдельные выработки). Данная информация полезна для численного моделирования представленного примера, так как некоторые входные данные повторяются (например, выработки).

*Примечание: этапы проектирования учитывают процесс проходки тоннеля. Для возможности совмещения отдельных этапов проектирования необходима информация о материалах первичной обделки тоннеля, последовательности разработки и гидрогеологических условиях в процессе проходки.*

*Первичная обделка проектируется из торкрет-бетона класса С 20/25 толщиной 200 мм. В численную модель вводится только торкрет-бетон и рост во времени прочности или модуля упругости (см. табл. 6).*

Таблица 6 – Значения модуля упругости для торкрет-бетона (развитие во времени)

Выдержка торкрет-бетона	Модуль упругости $E_{ст}$ [МПа]	Модуль сдвига $G$ [МПа]
Невыдержанный бетон	2 900	1 134
Выдержанный бетон	29 000	11 340

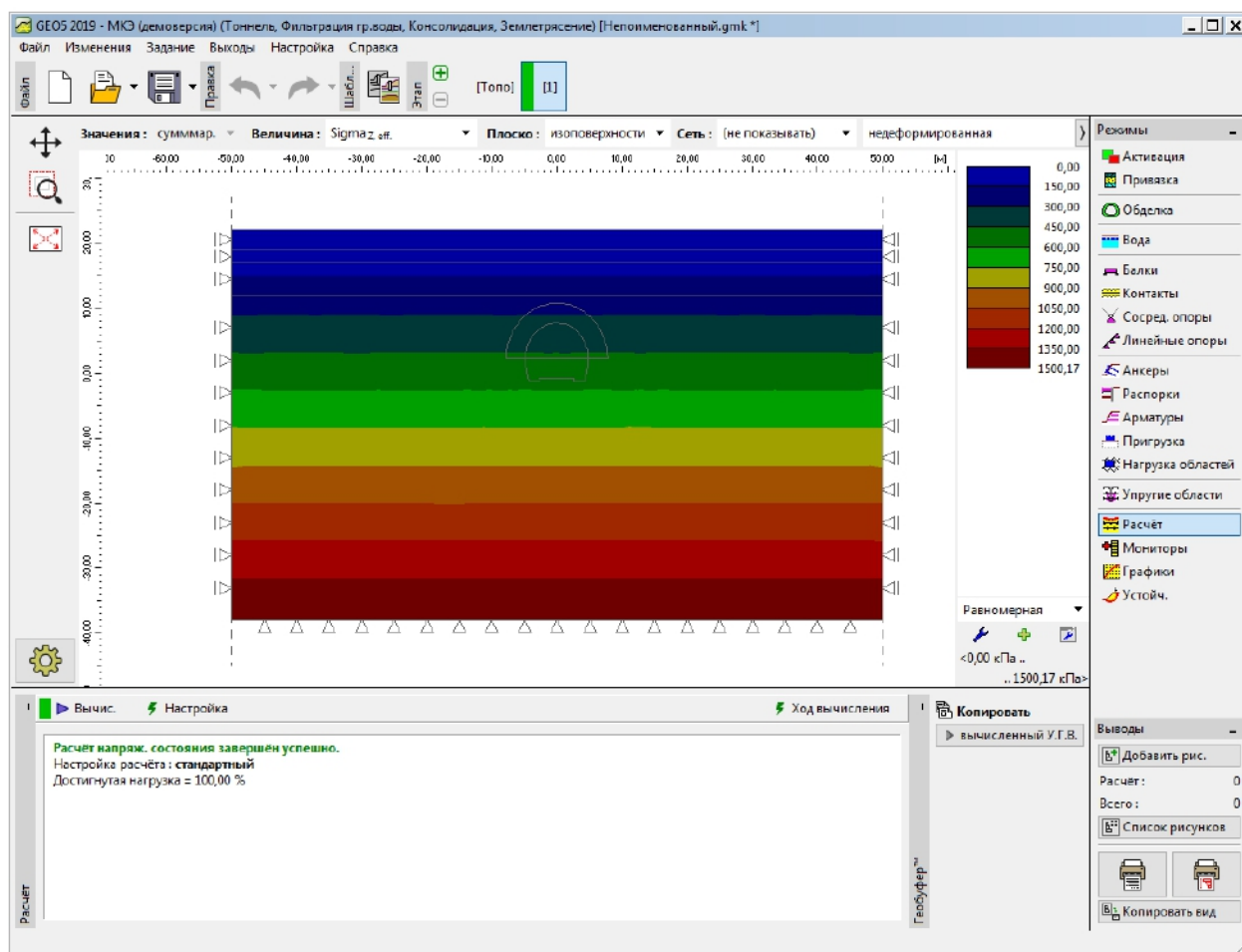
*Примечание: проходка тоннеля моделируется в плоской постановке, что не полностью отражает пространственные изменения напряженного состояния в скальном массиве, которые имеют место в ходе проходки в области забоя. В процессе разработки грунта временно незакрепленная выработка поддерживается ядром забоя (продольная и поперечная скальная арка), а так же частью вскрытой выработки, закрепленной ранее. Это поведение может быть описано трехмерной моделью; поведение модели в плоской постановке в направлении проходки описывает процесс достаточно приблизительно.*

*Метод, который часто используется в инженерной практике (часто называемый метод  $\lambda$ , или метод  $\beta$ ), предполагает, что природное напряжение в массиве, например бытовое давление  $\sigma_0$ , действующее в области будущей выработки до ее проходки, плавно меняется во времени в соответствии с зависимостью  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  (для начального напряженного состояния  $\beta = 1$ ). Если моделируется изменение начального напряженного состояния на двух этапах расчета (этапах проектирования), незакрепленная выработка нагружается величиной  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  на начальном этапе, а оставшаяся часть нагрузки  $\beta \cdot \sigma_0$  учитывается во втором этапе.*

*В случае последовательной выработки, этот процесс будет применяться последовательно к каждому отдельному этапу. Величина коэффициента  $\beta$  зависит от геологии скального массива, продвижения за цикл проходки и размера выработки; определить ее достаточно сложно. В GEO 5 – FEM, этот метод представлен так называемой «Экскавацией». Для целей численного моделирования величина коэффициента  $\beta$  определяется как 0,6 для однопутного сечения для верхней части забоя и для лотка.*

## Этап проектирования 1: исходное геостатическое напряженное состояние

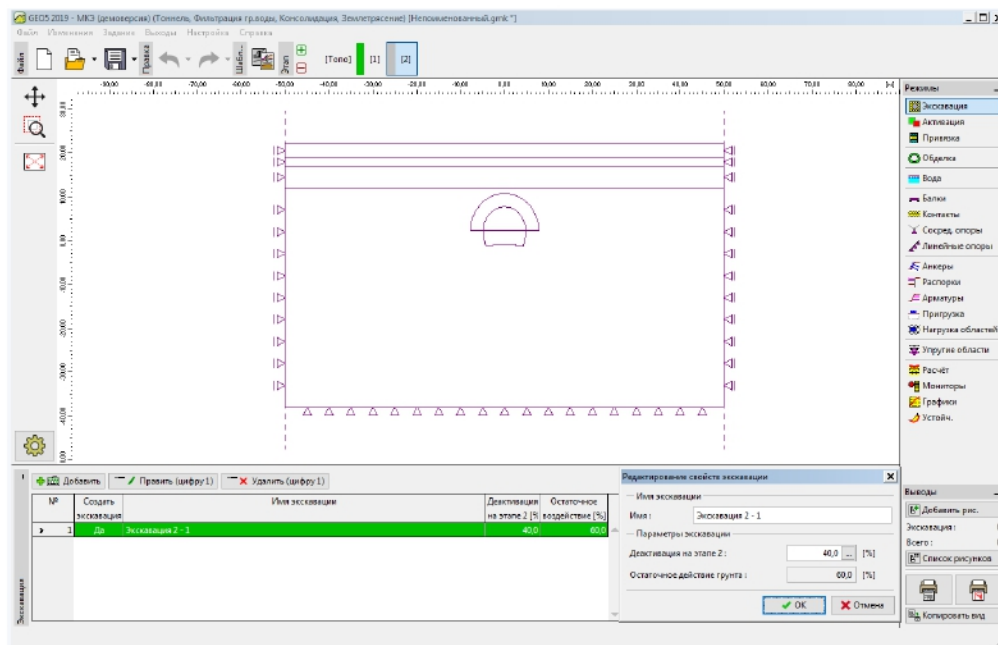
После создания сетки КЭ можно перейти к этапу проектирования 1 и провести расчет геостатического давления в массиве. Для всех этапов проектирования параметры расчета остаются стандартными (более подробная информация представлена в Справке – F1).



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 1 (начальное геостатическое напряжение  $\sigma_{z,ef}$ )*

## Этап проектирования 2: разработка верхней части забоя, активация незакрепленной выработки

На следующем этапе добавляется этап проектирования 2. Теперь можно смоделировать разработку верхней части забоя во вкладке «Активация» и выполнить *Экскавацию* для области № 6 (используя кнопку «Добавь»).



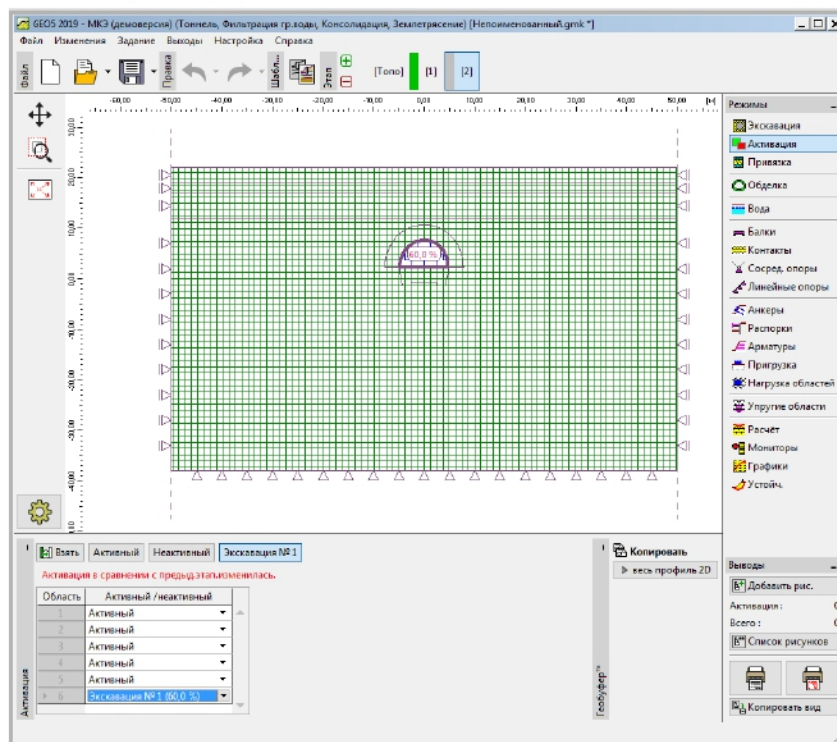
Диалоговое окно «Новая экскавация» - Этап проектирования 2

*Примечание: в инженерной практике последовательность разработки (отдельные экскавации) задается путем деактивации действия скального массива в процентах относительно остающегося действия. В данном примере для отдельных этапов проектирования тоннеля приняты следующие пропорции:*

- разработка верхней части забоя, активация незакрепленной выработки: 40%/60%;
- поддержка кровли забоя невыдержанным бетоном: 30%/30%;
- улучшение свойств материала поддержки кровли забоя: 30%/0%;
- моделирование разработки лотка, активация незакрепленной выработки: 40%/60%;
- поддержка стенок забоя невыдержанным бетоном: 30%/30%;
- улучшение свойств материала поддержки стенок забоя: 30%/0%.

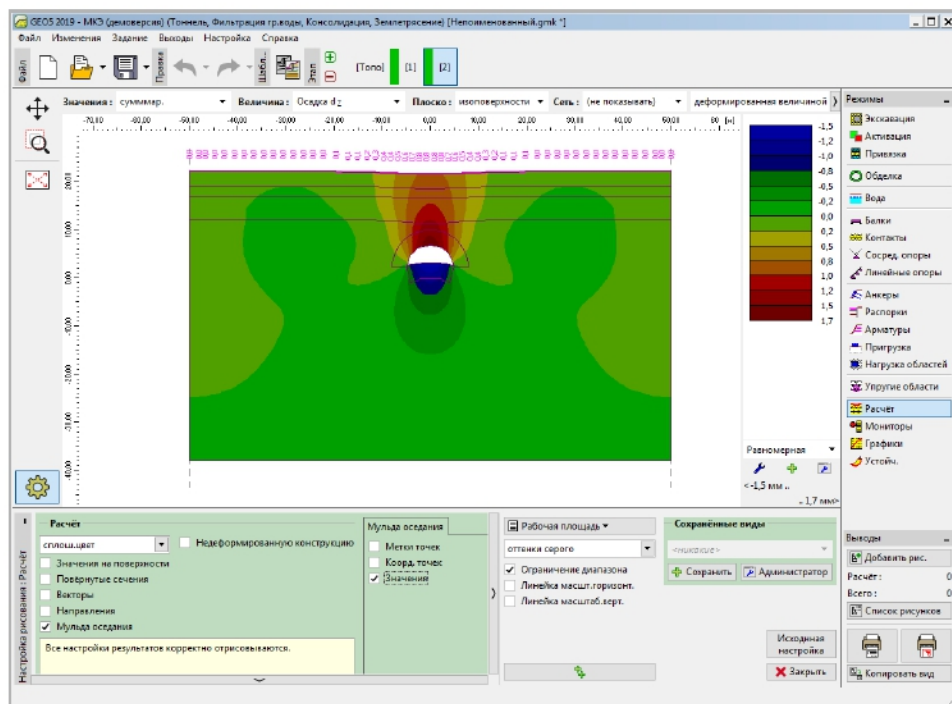
*Приведенные выше пропорции основаны на многолетнем опыте и обеспечивают достаточно надежные результаты. В программе есть возможность задать различные процентные соотношения Экскавация для отдельных этапов проектирования (например, 25/75, 30/45, 30/15, 15/0) для кровли и лотка.*

В общем случае, это активация частичного ( в процентном соотношении) нагружения, действующего на незакрепленную кровлю. На этом этапе принимается 40% деактивация грунта (см. рисунок).



*Диалоговое окно «Активация» - Этап проектирования 2 (действие 40% нагрузки на разработанную кровлю).*

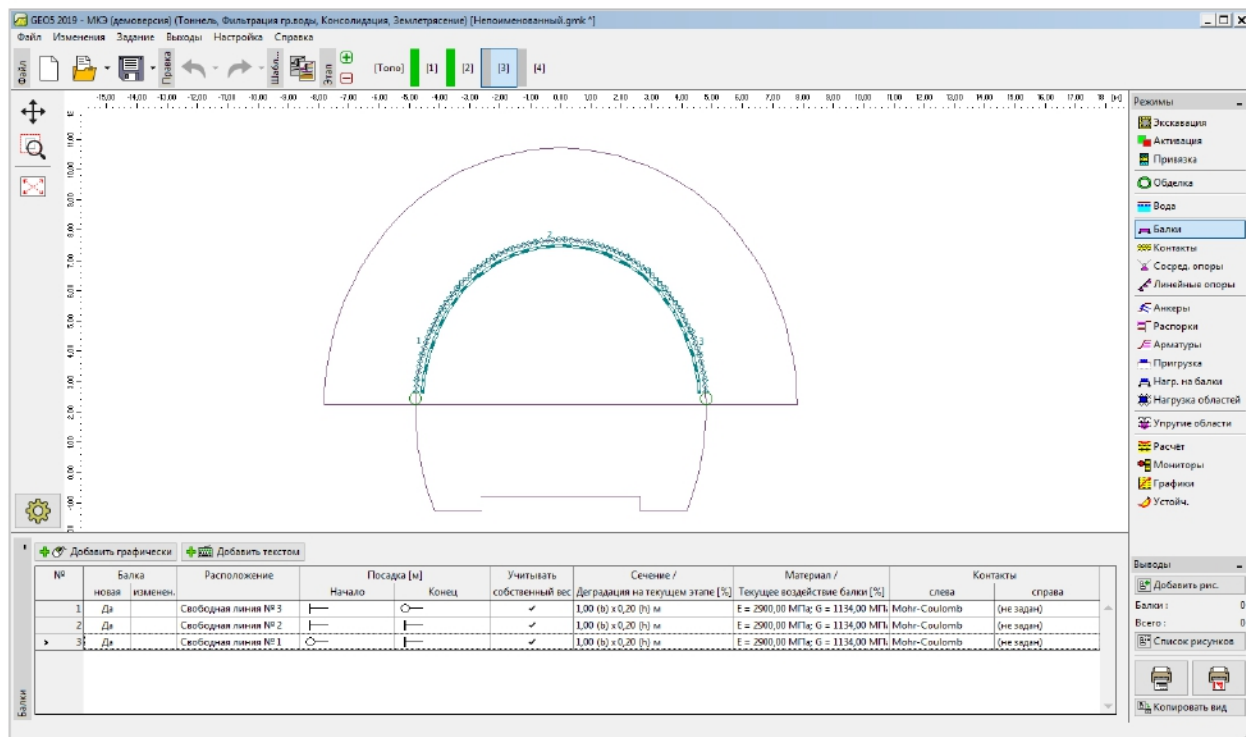
Далее можно провести расчет и просмотреть результаты для вертикальных перемещений  $d_z$  [мм]. Для лучшего понимания работы выработки можно просмотреть деформированную сетку и муьду оседания.



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 2 (вертикальные перемещения  $d_z$  и муьда оседания)*

## Этап проектирования 3: крепление кровли выработки невыдержанным бетоном первичной обделки

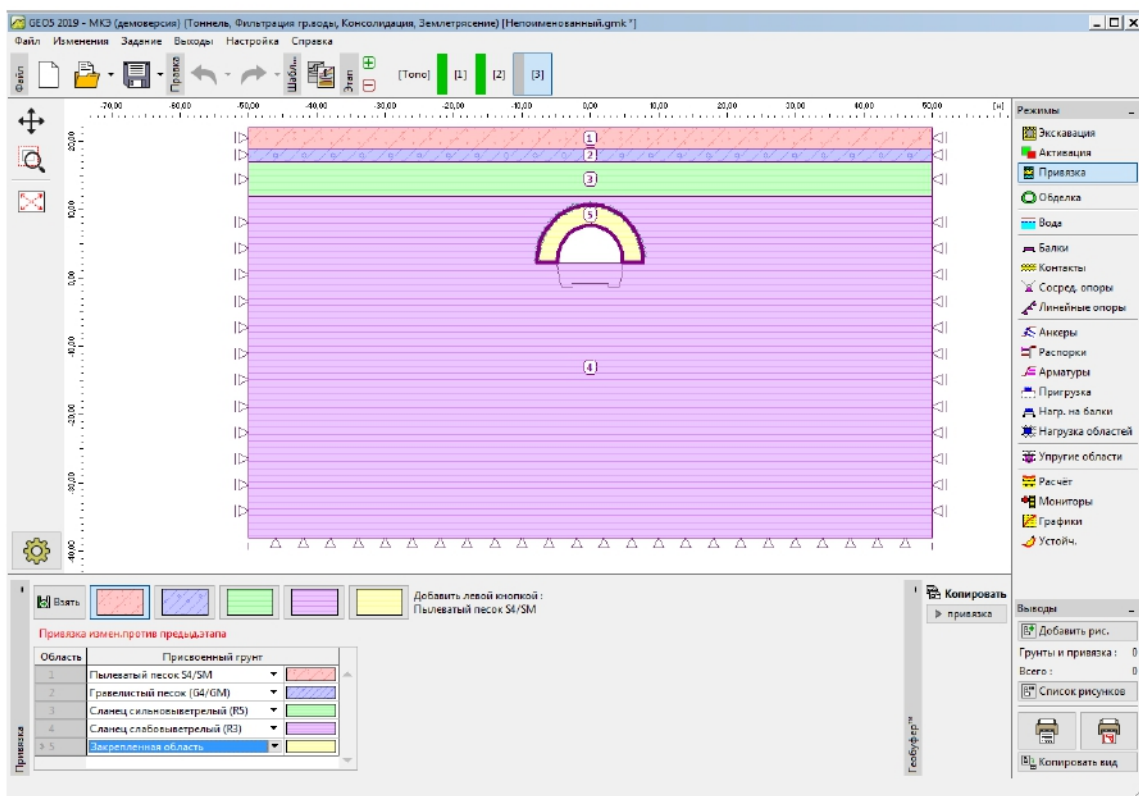
На следующем этапе добавляется этап проектирования 3. Вначале следует смоделировать поддержку кровли в виде первичной обделки из невыдержанного бетона толщиной 200 мм во вкладке «Балки».



### Ввод первичной обделки кровли с помощью новых балок – Этап проектирования 3 (невыдержанный бетон)

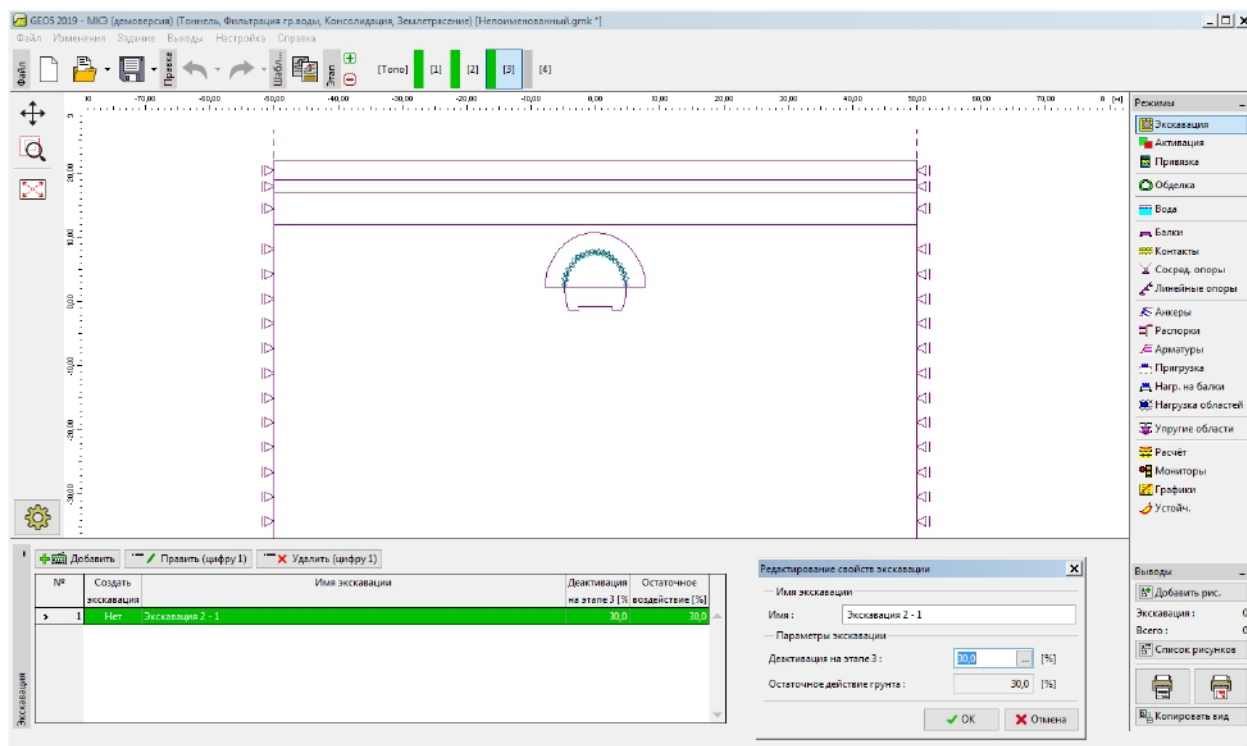
*Примечание: предполагается, что балки имеют шарнирное опирание на концах, что означает, что изгибающие моменты на нижних концах равны нулю. В некоторых случаях заделка концов балок моделируется специальным типом, называемым «опора», который обеспечивает устойчивость и сходимости расчета (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

Во вкладке «Привязка» следует изменить скальный грунт в области № 5 (на «закрепленный грунт R5»), что позволит учесть закрепление гидрораспорными трубчатыми стальными анкерами (см. рисунок).



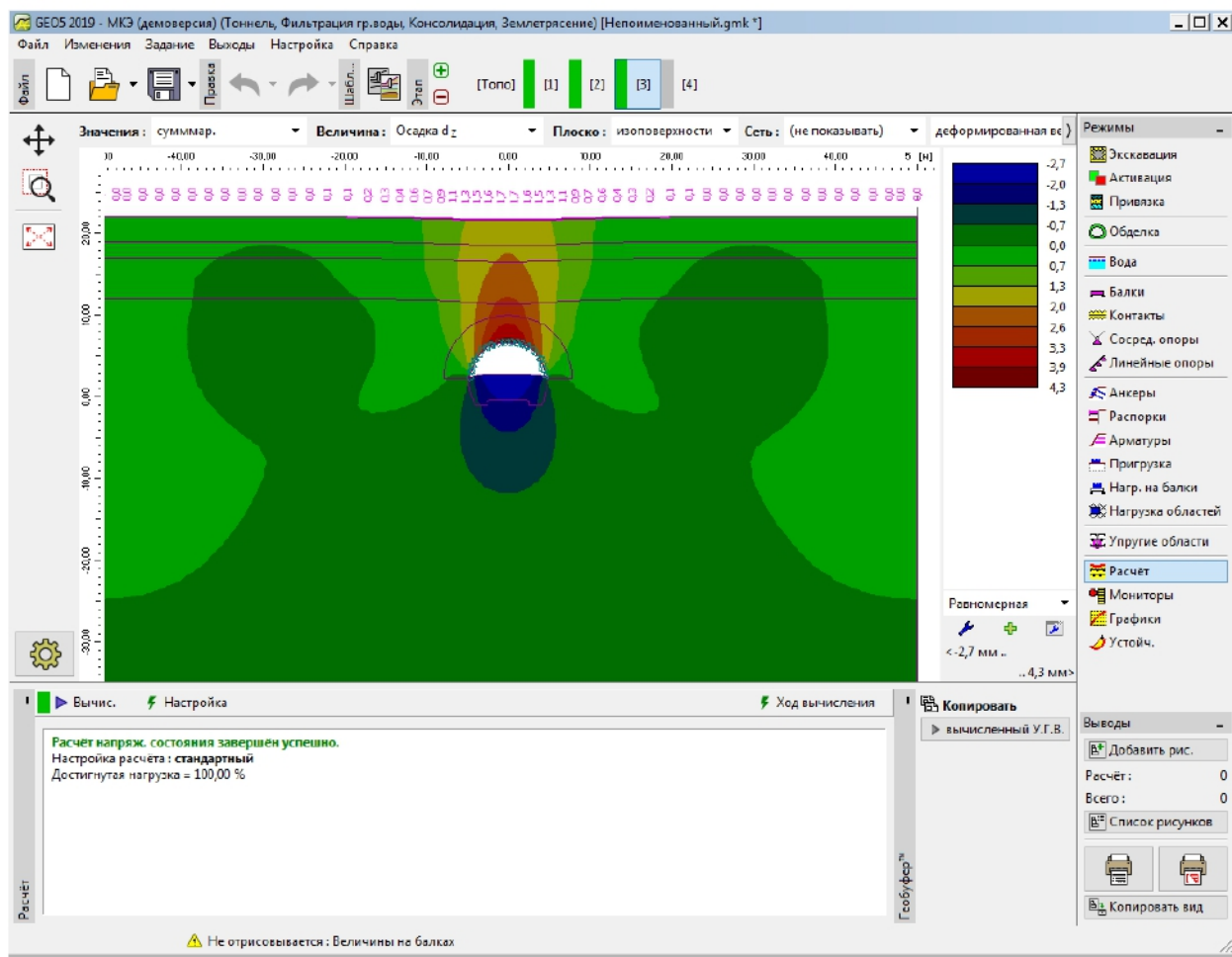
*Вкладка «Привязка» - Этап проектирования 3 (область, закрепленная гидрораспорными анкерами)*

Далее следует активировать анкеры в закрепленном массиве в кровле выработки и изменить свойства экскавации, добавив 30% нагрузки (используя кнопку «Править»).



*Диалоговое окно «Редактирование свойств экскавации» - Этап проектирования 3*

Далее расчет выполняется еще раз.



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 3 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мутьда оседания)*

## Этап проектирования 4: улучшение свойств материала выдержанного бетона (кровля)

На этапе проектирования 4 улучшаются свойства материала выдержанного бетона, поддерживающего кровлю. В диалоговом окне «Редактирование свойств балки» следует выбрать опцию «Усиление» и ввести соответствующие значения модулей упругости. Остальные параметры остаются без изменений.

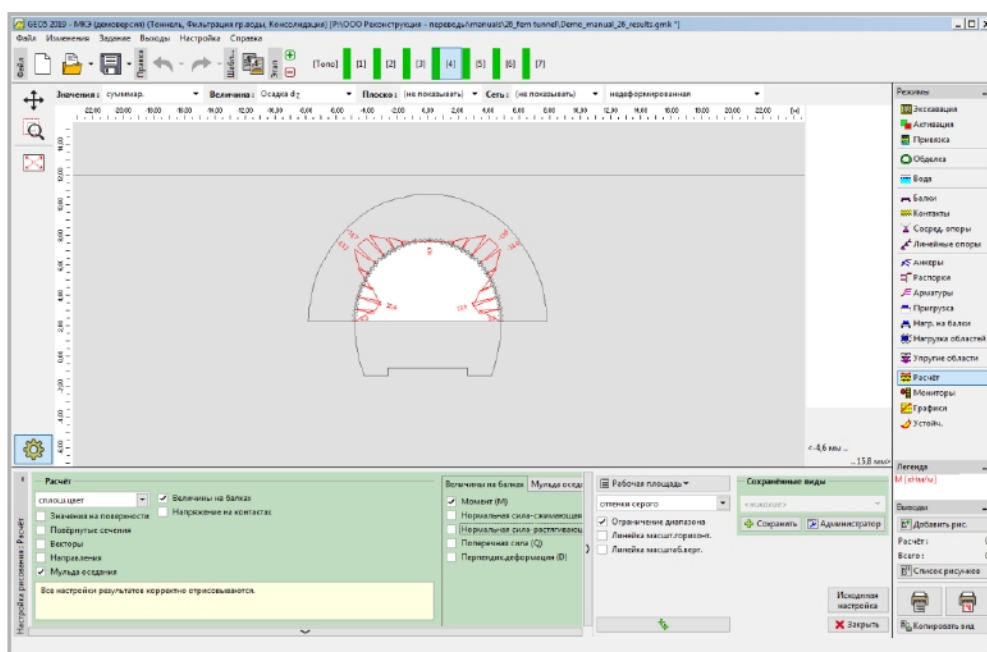
Диалоговое окно «Редактирование свойств балки» - Этап проектирования 3 (балка № 2)

№	Имя	Изменить	Расположение	Посадка (м)		Учитывать собственный вес	Дegradация на предыдущем этапе [%]	Сечение / Текущие свойства балки [%]	Материал / Текущие свойства балки [%]	Контакты	
				Начало	Конец					слева	справа
1	Нер	Да	Свободная линия №3	—	—	✓	↑ h = 0.20 м	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	Mohr-Coulomb	(не задан)
2	Нер	Да	Свободная линия №2	—	—	✓	↑ h = 0.20 м	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	Mohr-Coulomb	(не задан)
3	Нер	Да	Свободная линия №1	—	—	✓	↑ h = 0.20 м	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	↑ E = 29000.00 МПа; G = 11340.00	Mohr-Coulomb	(не задан)

Изменение свойств первичной обделки (кровля) – Этап проектирования 4 (выдержанный торкрет-бетон)

[illegible]

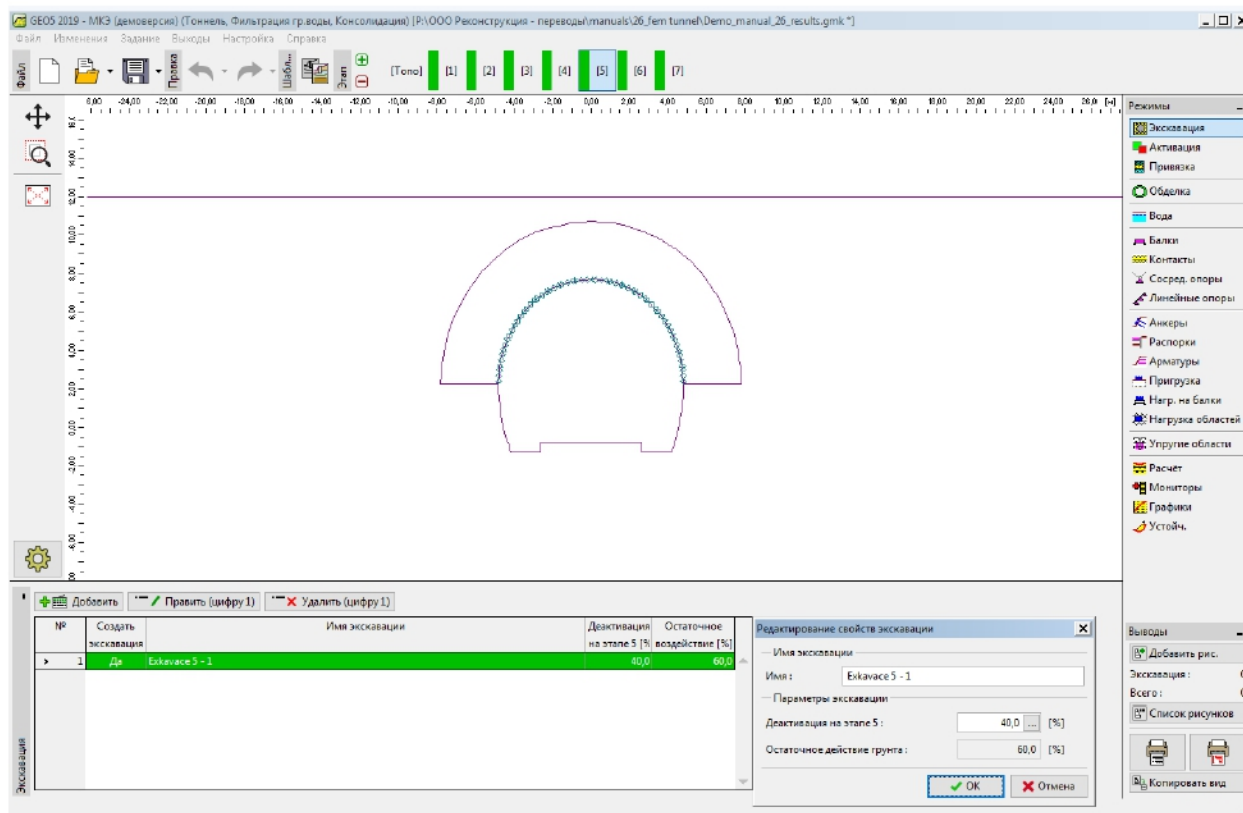
Далее можно выполнить расчет и построить эпюру изгибающих моментов по верхней части обделки.



www.finesoftware.ru • www.re-con.ru • geo5@re-con.ru • +7 (495) 664-26-90

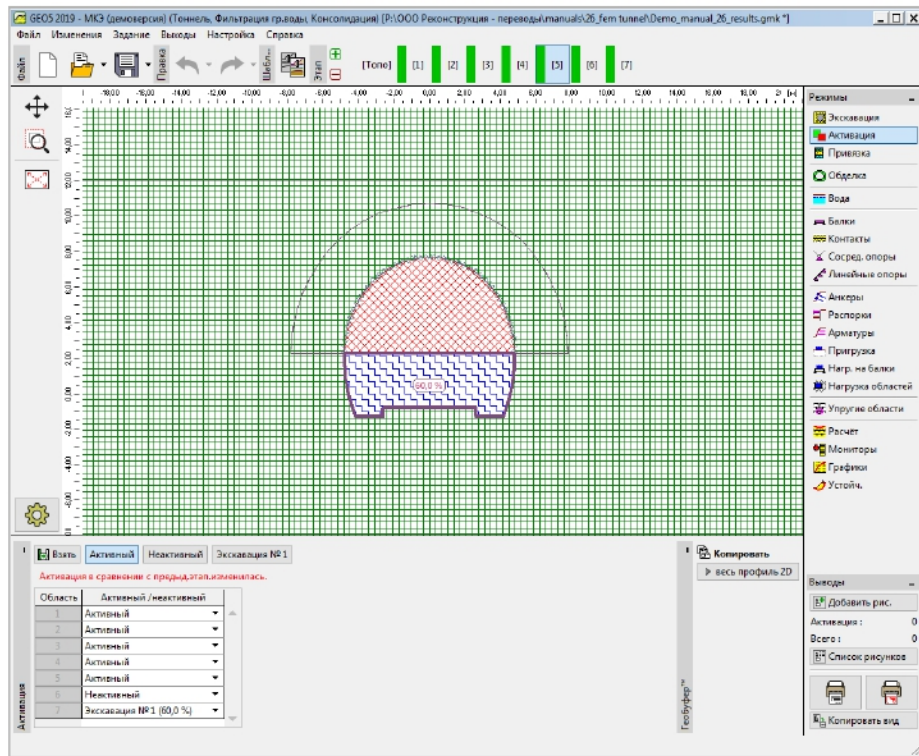
## Этап проектирования 5: моделирование разработки лотка тоннеля, активация незакрепленных стенок

Следующим шагом добавляется этап проектирования 5. На этом этапе рассматривается деактивация грунта, или активация 40% нагрузки, принимаемой к рассмотрению. Оставшаяся нагрузка в массиве вблизи разработки лотка тоннеля, составляет таким образом 60%.



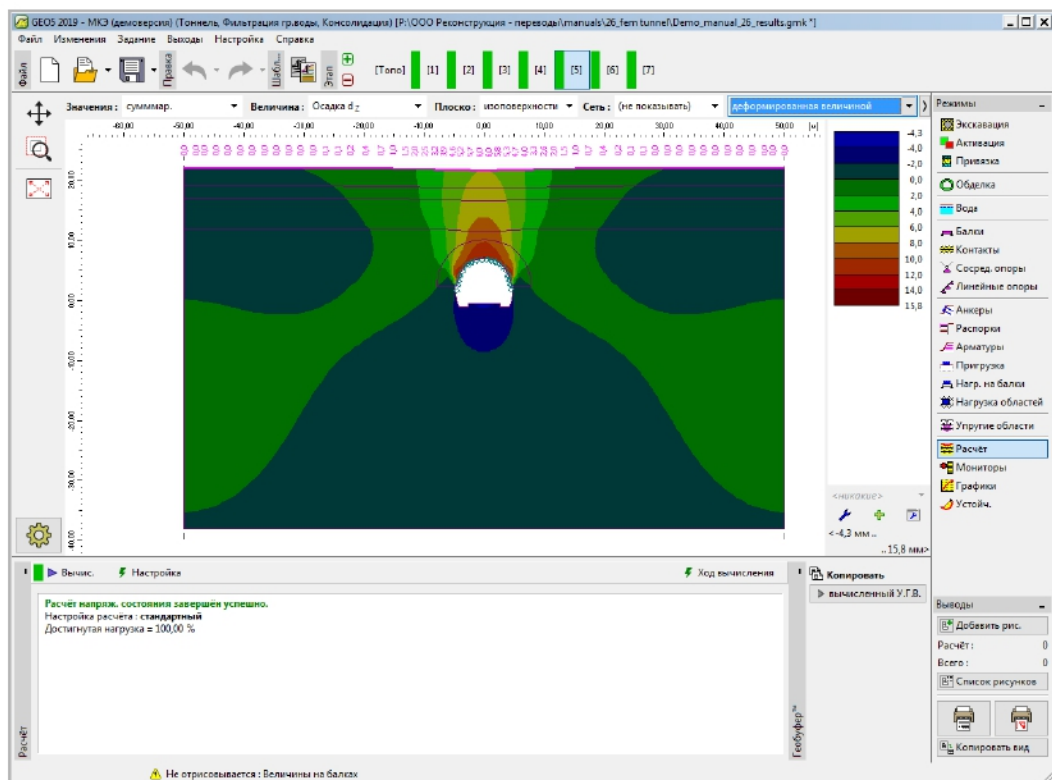
Диалоговое окно «Новая экскавация» - Этап проектирования 5

*Примечание: моделирование этой задачи с последовательными этапами проектирования аналогично. Вначале рассматривается первичная обделка стенок тоннеля из невыдержанного торкрет-бетона. Далее активируется следующая часть нагрузки. На последующем этапе улучшаются характеристики уже выдержанного бетона и прикладывается оставшаяся нагрузка.*



*Вкладка «Активация» - Этап конструирования 5 (активация 40% нагрузки на лоток тоннеля)*

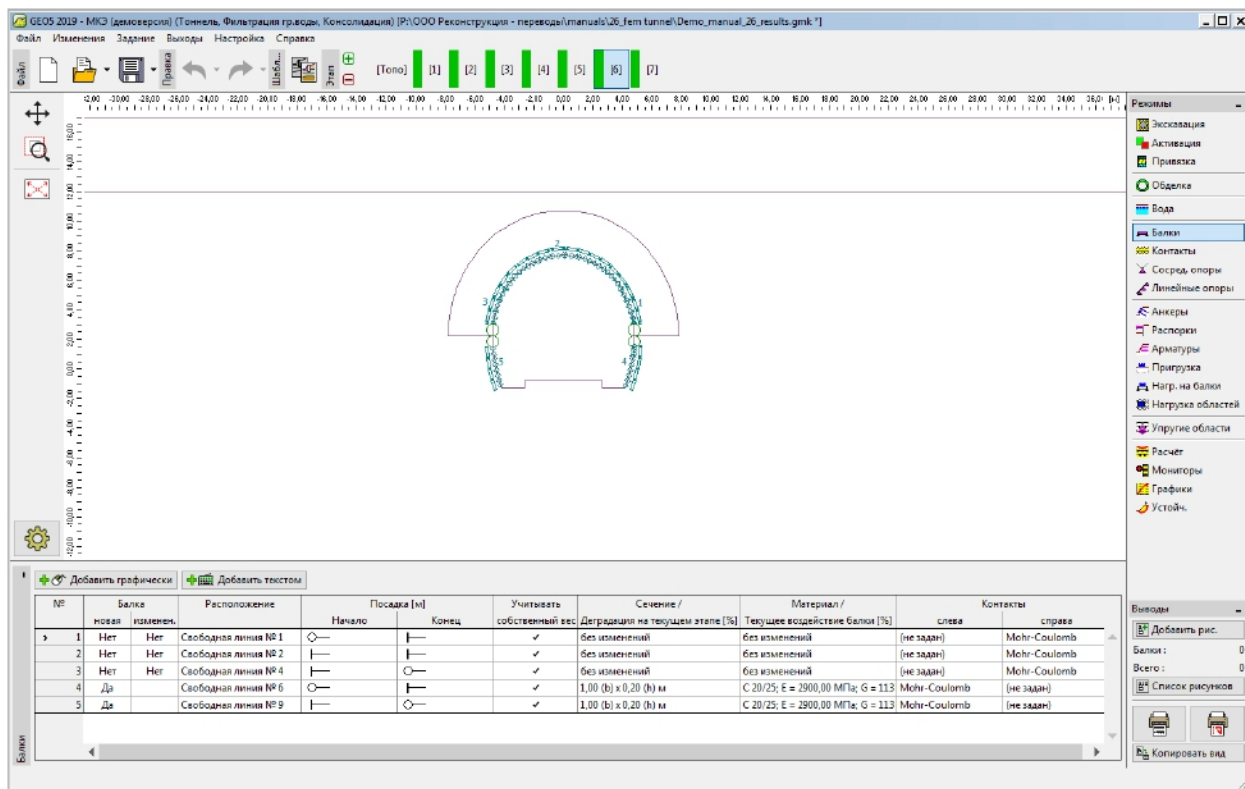
Далее выполняется расчет.



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 5 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мюльда оседания)*

## Этап проектирования б: закрепление стенок лотка первичной обделкой из невыдержанного бетона

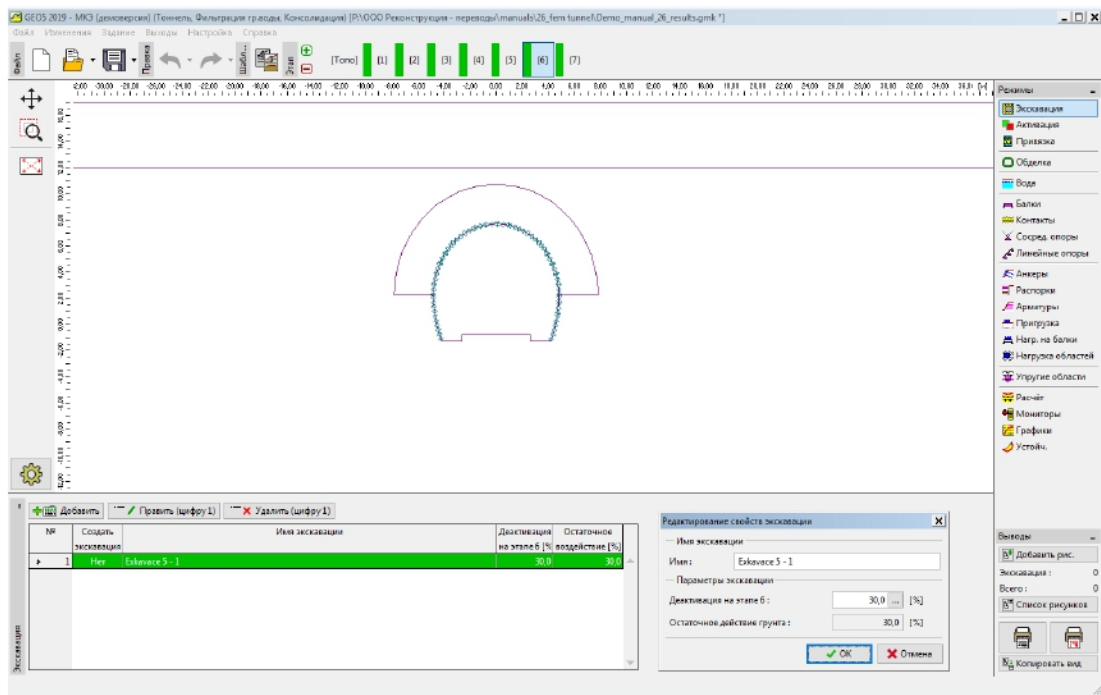
На этапе проектирования б задается закрепление стенок лотка первичной обделкой из невыдержанного торкрет-бетона толщиной 200мм. Обделка кровли остается без изменений на всех последующих этапах.



### Ввод первичной обделки лотка тоннеля с помощью новых балок – Этап проектирования б (невыдержанный бетон)

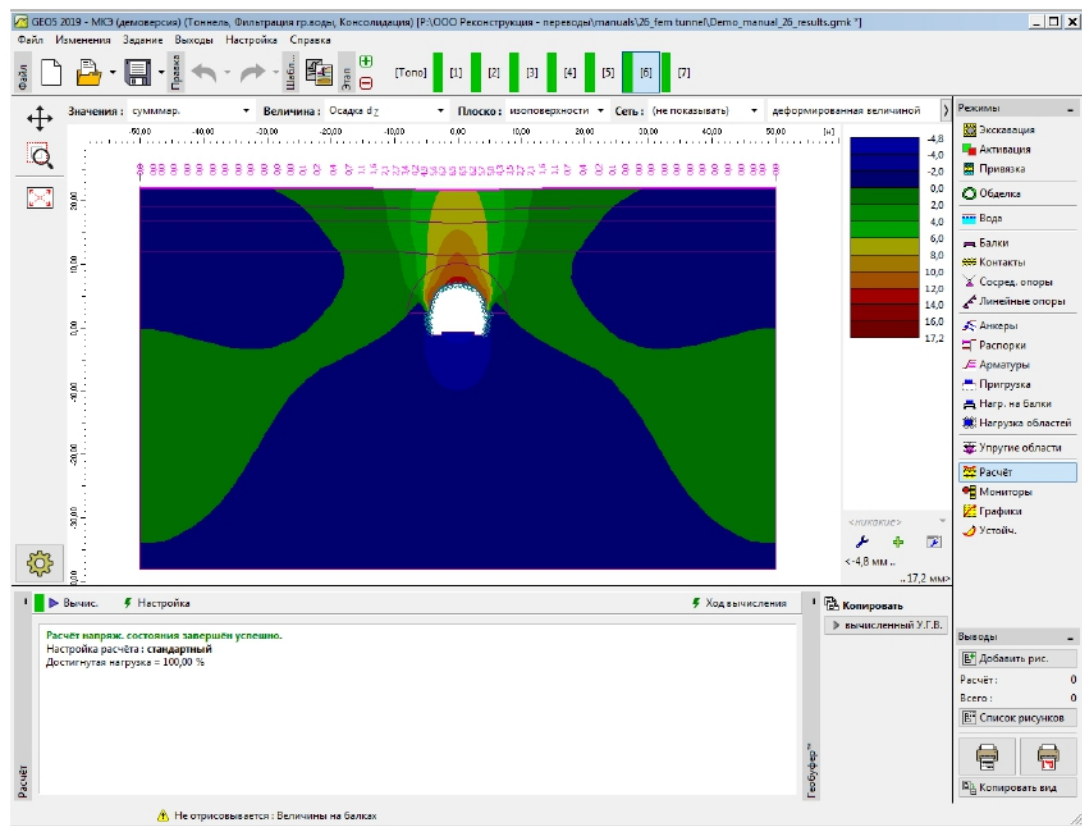
*Примечание: балки снова рассматриваются шарнирно закрепленными на обоих концах; контакт между обделкой кровли и лотка не может передавать изгибающие моменты (так как это не случай непрерывных стыков). Размеры поперечного сечения лотка идентичны размерам кровли, то есть  $b = 1,0$  м,  $h = 0,2$  м. Однако контакты на новых балках задаются с противоположной стороны (более подробная информация представлена на рисунке), так как ориентация балок (стенок лотка) отрицательная.*

На этом этапе активируются дополнительные 30% нагрузки от скального массива.



Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 6

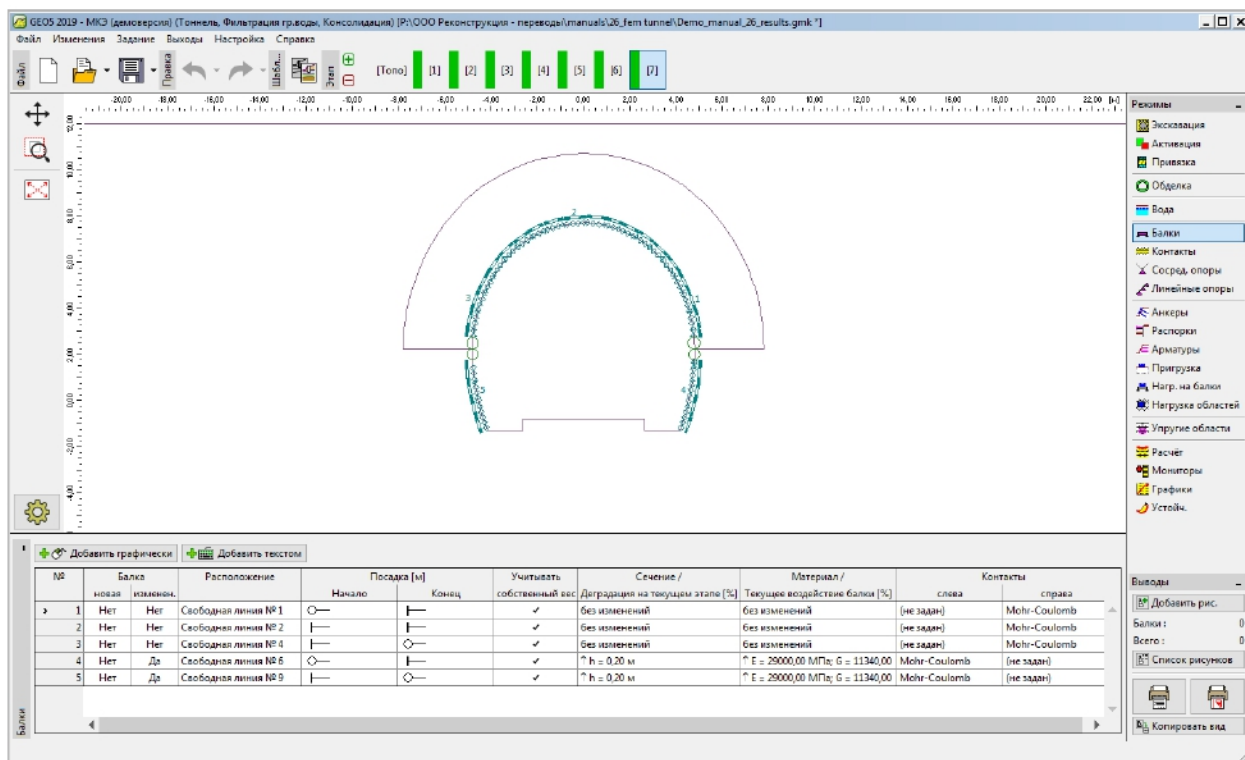
В конце данного этапа проектирования выполняется расчет.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 6 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мутьда оседания)

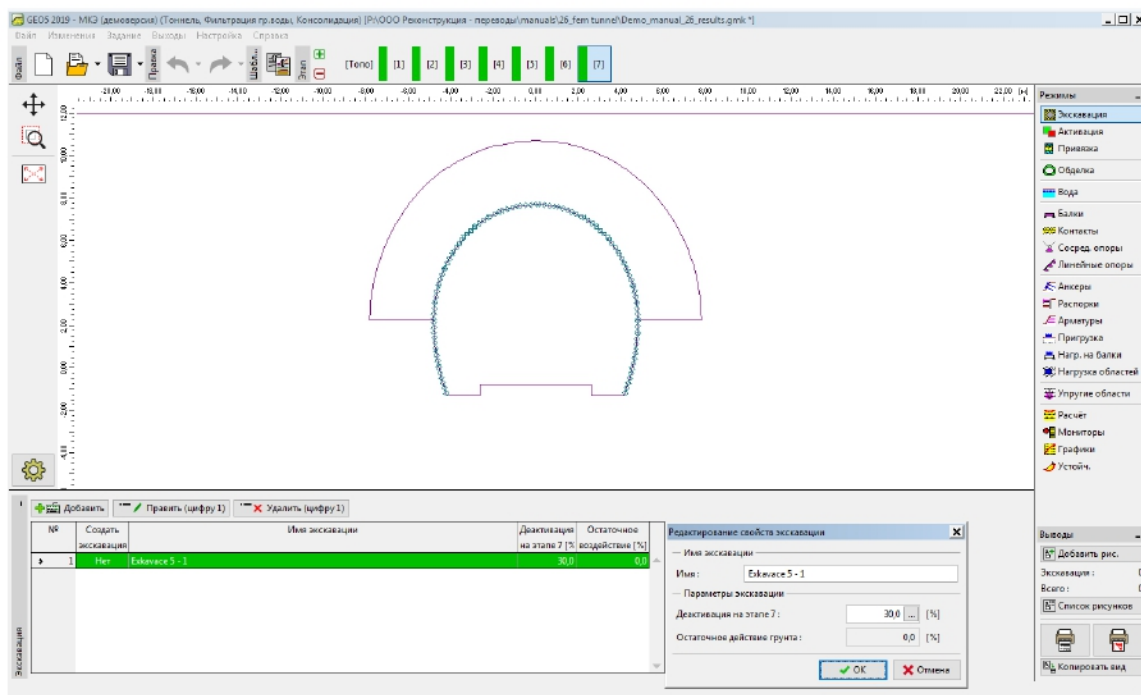
## Этап проектирования 7: улучшение свойств материала выдержанного бетона (лоток)

На последнем этапе проектирования улучшаются свойства материала уже выдержанного бетона, поддерживающего стенки выработки.

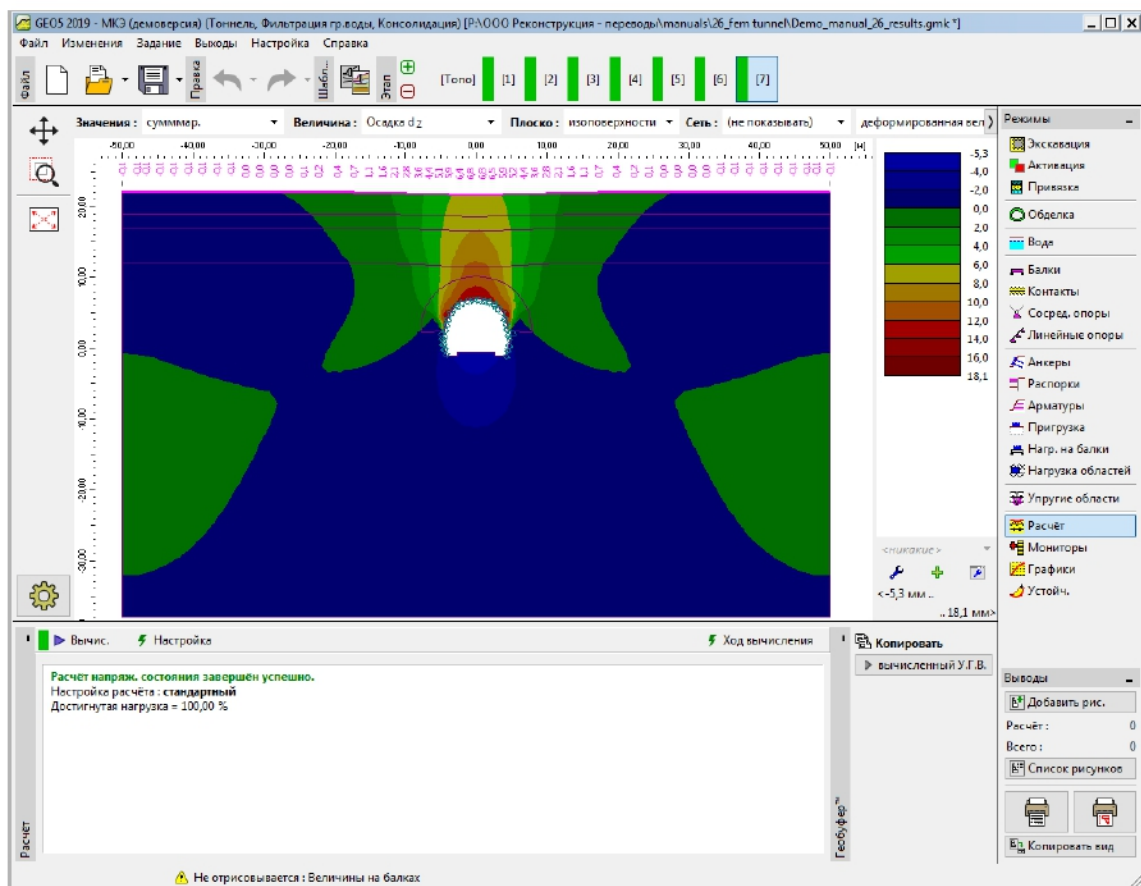


### *Изменение свойств первичной обделки (лоток тоннеля) – Этап проектирования 7 (выдержанный торкрет-бетон)*

Порядок увеличения несущей способности балок та же, что на этапе проектирования 4. Следует активировать оставшиеся 30% нагрузки от скального массива. На этом этапе мы удаляем все грунты из выработки, и вся нагрузка действует на первичную обделку (включая кровлю и стенки лотка) на 100%. Затем выполняется расчет последнего этапа проектирования.



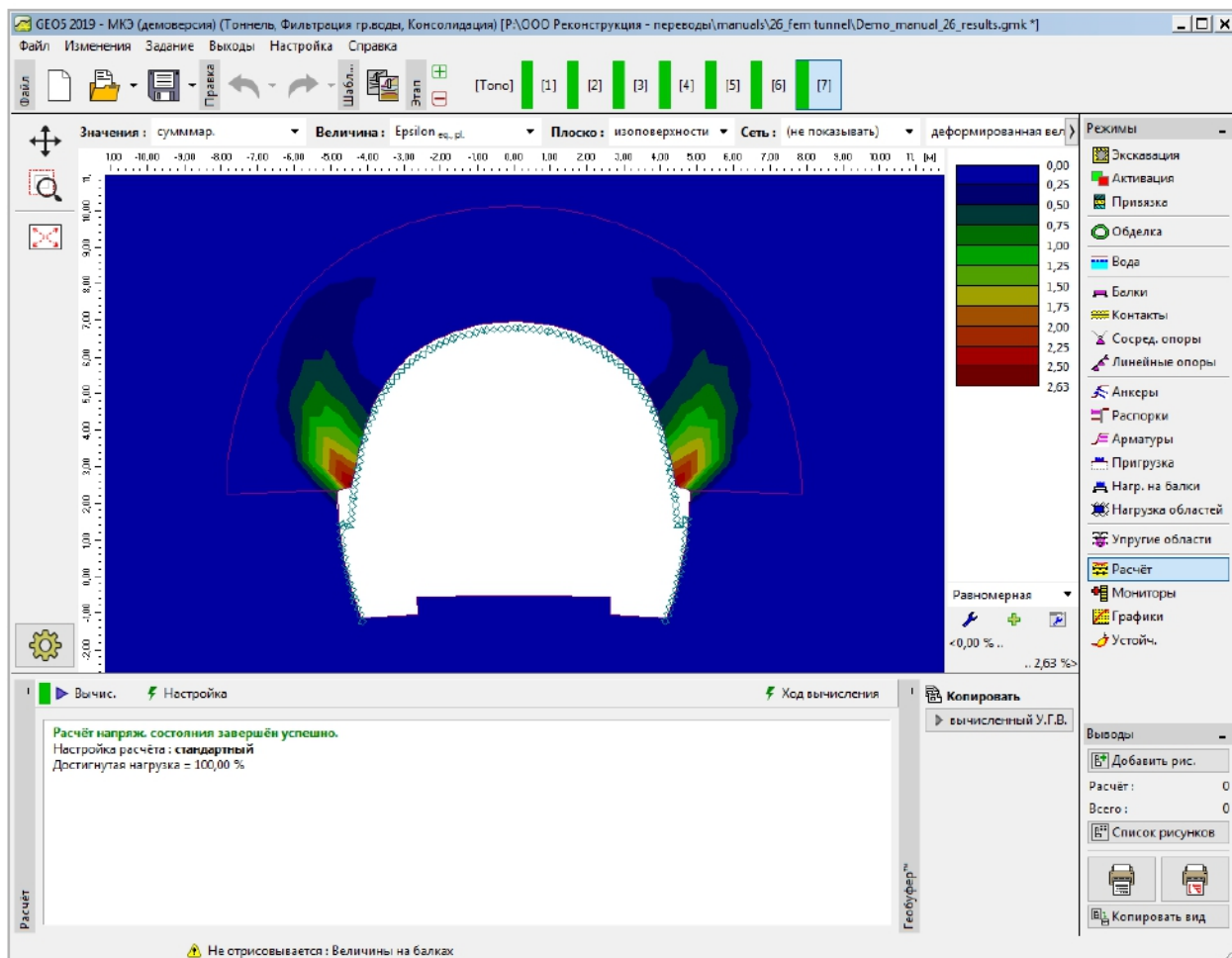
Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 7



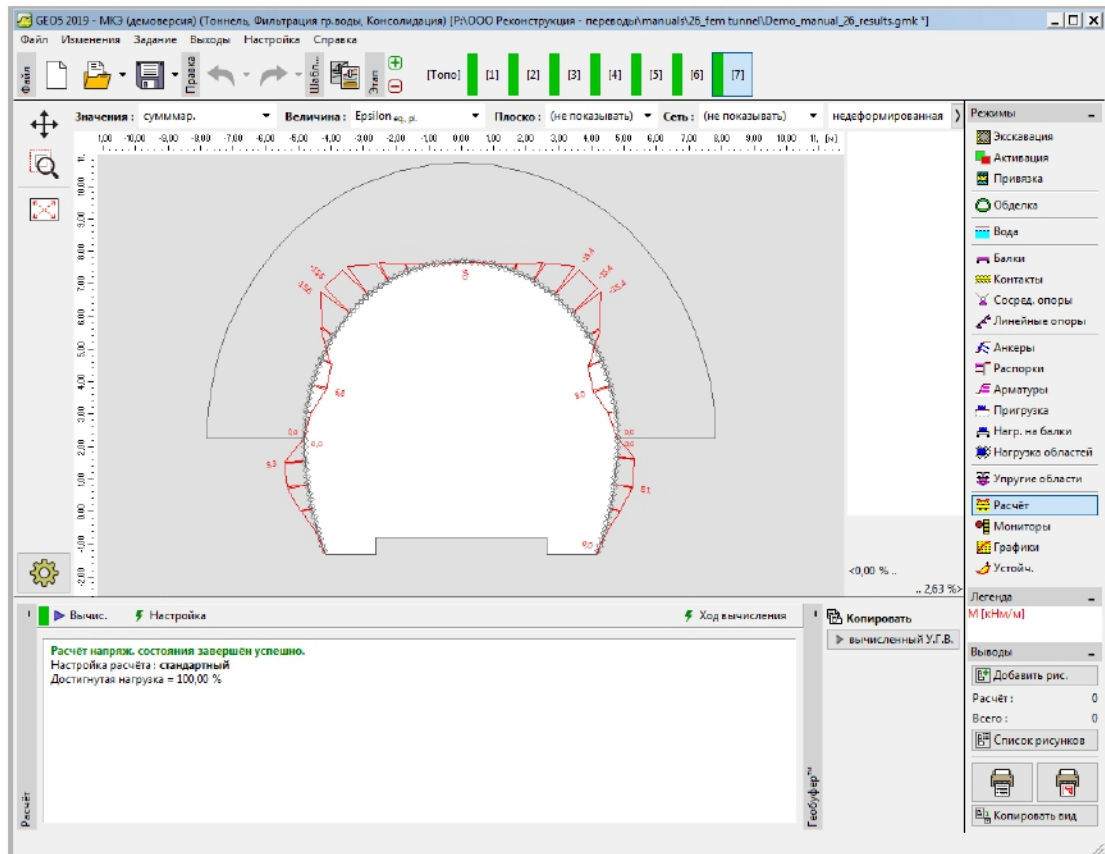
Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мутьда оседания)

Далее на следующем этапе можно просмотреть эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  и распределение внутренних усилий – изгибающих моментов и нормальных сил (кнопка «Показать», вкладка «Распределение»). Результаты вносятся в сводную таблицу.

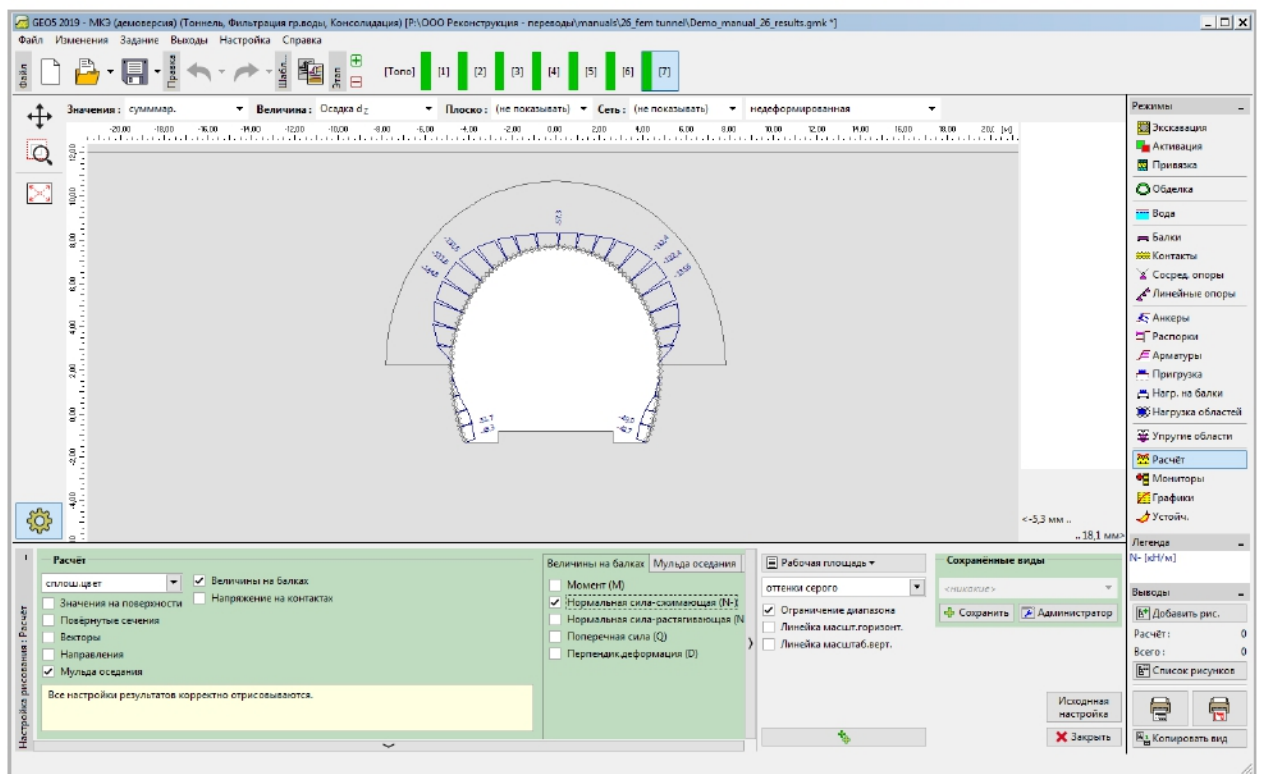
Из представленного рисунка следует, что эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  не равны нулю, что соответствует работе сооружения по нелинейной модели материала (Mohr-Coulomb).



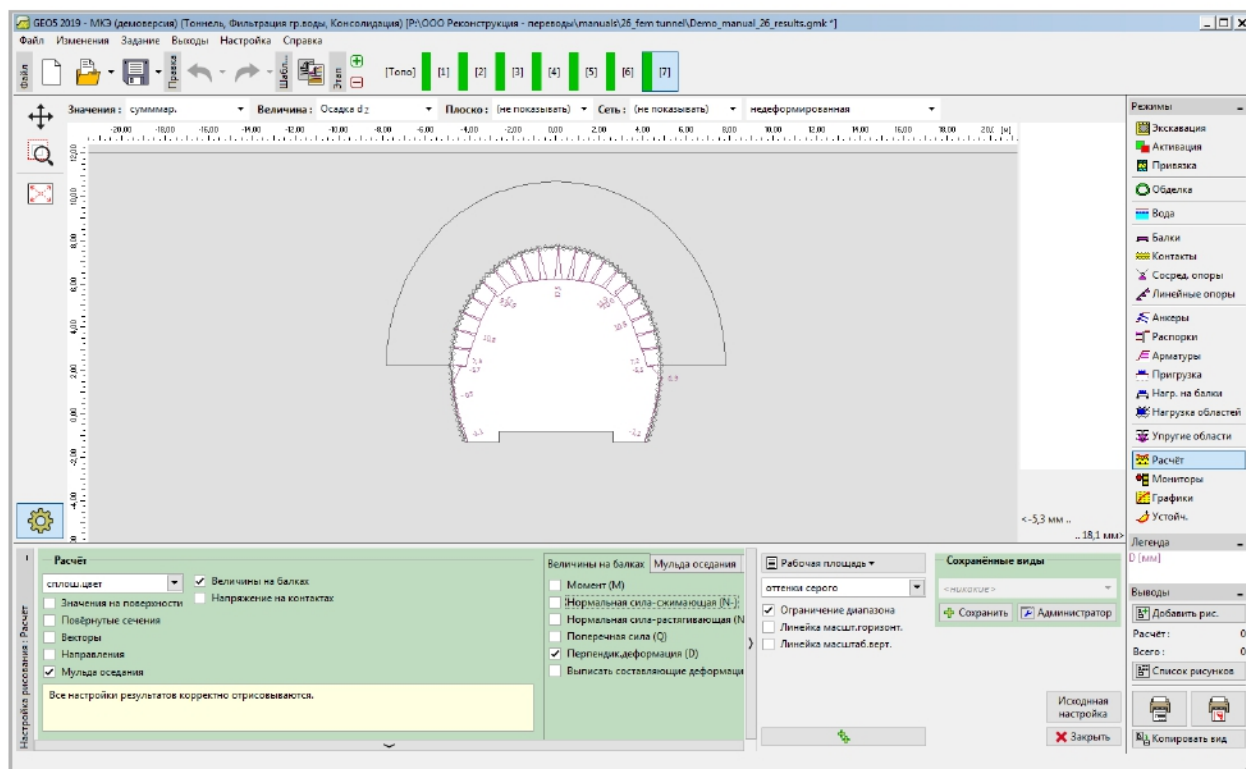
*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  в соответствии с моделью Mohr-Coulomb)*



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (изгибающий момент  $M$  [кНм/м])



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (нормальная сжимающая сила  $N$  [кНм/м])



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (поперечная деформация)*

## Анализ результатов

В следующей таблице представлены максимальные значения внутренних усилий (изгибающих моментов, поперечных и продольный сил), действующих в балках (первичной обделке тоннеля) на этапе проектирования 7. Расчет выполнялся с использованием пластической модели материала Mohr-Coulomb с местным увеличением плотности треугольных элементов.

Модель материала	Этап проектирования 7 - внутренние усилия		
	$N$ [кН/м]	$M$ [кНм/м]	$Q$ [кН/м]
Mohr-Coulomb	-135,6	-15,6	-14,1
	+14,0	+9,3	+14,9

*Максимальные значения внутренних усилий в первичной обделке - Этап проектирования 7*

В следующей таблице представлены значения вертикальных и горизонтальных перемещений  $d_z$ ,  $d_x$  [мм] первичной обделки тоннеля на каждом этапе проектирования.

Этап проектирования	Величина абсолютных перемещений $d_z$ , $d_x$ [мм]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
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

*Величины перемещений  $d_z$ ,  $d_x$  первичной обделки (максимумы) - Все этапы проектирования*

## Заключение

В данной задаче было представлено моделирование первичной обделки реального тоннеля с использованием метода конечных элементов. Тоннель выполнен Ново-Австрийским методом. Проходка тоннеля разделена на отдельные этапы. При разработке скального грунта, массив теряет опору и деформируется, при этом перемещения направлены внутрь выработки.

Первичная обделка армирована сеткой KARI (армирующей сеткой, сваренной из стальных стержней диаметром 8 мм с размером ячейки 150x150 мм) и стальными решетчатыми прогонами из 3 несущих стержней. Учет сетки KARI в численной модели МКЭ (гомогенизация бетона и армирования) является спорным вопросом; чаще всего сетка учитывается только после отдельного расчета обделки.

Первичная обделка тоннеля будет далее рассчитываться с использованием программного обеспечения для расчетов конструкций (например, FIN EC - CONCRETE 2D) на основании полученных максимальных значений внутренних усилий, возникающих вследствие совместного воздействия изгибающего момента и продольной силы (в соответствии с эпюрой).

*Примечание: расчет подземного сооружения без использования балочных и контактных элементов с использованием линейной модели материала (с упругим поведением) был описан в Главе 23. Расчет обделки коллектора (см. <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).*