

Proračun obloge kolektora

Program: MKE

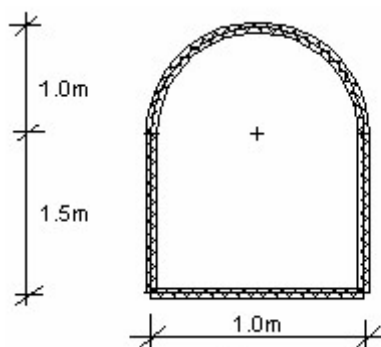
Datoteka: Demo_manual_23.gmk

Cilj ovog inženjerskog priručnika je provesti proračun rudarski izvedenog kolektora s naglaskom na ponašanje njegove obloge primjenom metode konačnih elemenata.

Opis zadatka

Odredite ponašanje obloge rudarski izvedenog kolektora; njegove dimenzije prikazane su na sljedećoj shemi. Potrebno je odrediti unutarnje sile koje djeluju na oblogu kolektora. Oblogu kolektora (debljine 0,1 m) čini armirani beton klase C 20/25, a dno kolektora nalazi se na dubini od 12,0 m. Geološki profil je homogen; parametri tla su sljedeći:

- Jedinična težina tla: $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$
- Modul elastičnosti: $E = 12.0 \text{ MPa}$
- Poissonov koeficijent: $\nu = 0.40$
- Efektivna kohezija tla: $c_{ef} = 12.0 \text{ kPa}$
- Efektivni kut unutarnjeg trenja: $\phi_{ef} = 21.0^\circ$
- Jedinična težina saturiranog tla: $\gamma_{sat} = 22.0 \text{ kN/m}^3$



Shema zadatka – rudarski izvedeni kolektor

Odredit ćemo vrijednosti pomaka i unutarnjih sila samo za elastični model, jer se ne očekuje razvoj plastičnih deformacija. Naknadno ćemo primijeniti Mohr-Coulombov model materijala za provjeru uvjeta popuštanja.

Rješenje

Za proračun ovog zadatka koristit ćemo program GEO 5 – MKE. Sljedeći odlomci daju korak-po-korak opis rješenja:

- Topologija: postavljanje i modeliranje problema (granice tla, slobodne točke i linije – podešavanje gustoće mreže)
- Faza gradnje 1: primarno geostatsko naprezanje,
- Faza gradnje 2: modeliranje grednih elemenata, proračun pomaka i unutarnjih sila
- Procjena rezultata: usporedba i zaključak

Topologija: postavke problema

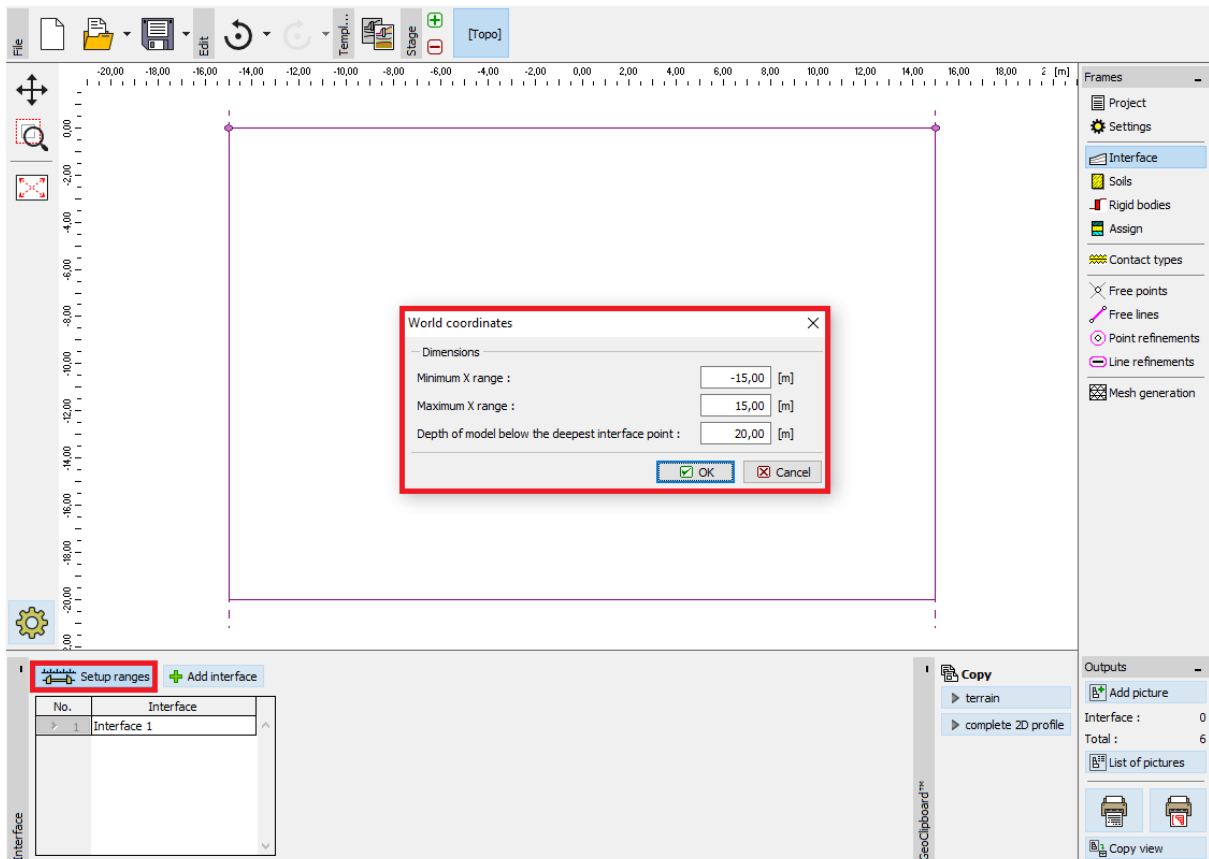
U kartici “Settings” odabrat ćemo opciju “geostatic stress” kako bismo proveli proračun faze gradnje 1. Problem ćemo uzeti u obzir kao “*plane strain*”.

Project parameters	Design standards	Advanced program options
Task geometry : Plane strain	Concrete structures : EN 1992-1-1 (EC2)	☐ Advanced mesh generating parameters
Analysis type : Stress	Calculation of geostatic stress (1st stage)	☐ Advanced soil parameters
☐ Tunnels	Analysis method : Geostatic stress	☐ Advanced soil models
☐ Allow to input water as the result of steady state water flow analysis		☐ Detailed results

Kartica “Settings”

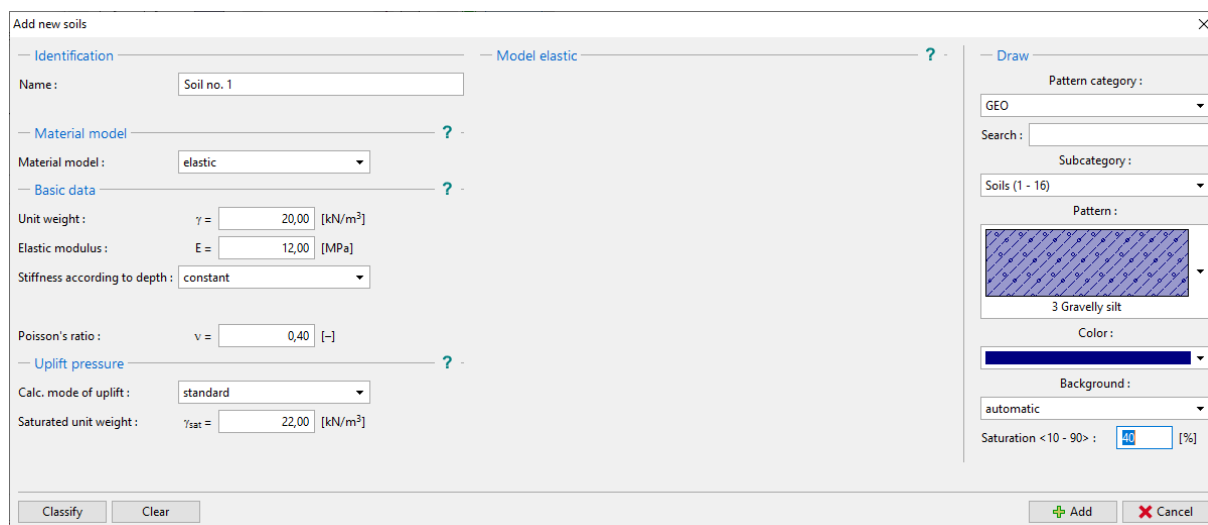
Nadalje ćemo postaviti globalne koordinate i granice tla. Odabrat ćemo dovoljno velike dimenzije kako rezultati ne bi bili pogođeni uvjetima na rubu. Za naš konkretni problem odabrat ćemo dimenzije modela $\{-15 \text{ m}; 15 \text{ m}\}$; dubinu sloja koji će se proračunavati postaviti ćemo na $20,0 \text{ m}$.

Zatim dodajemo granicu na razini terena – koordinate točaka (x, z) : $[-15, 0]; [15, 0] \text{ [m]}$



Kartica "Interface" + "World coordinates" dijaloški prozor

Sad ćemo odrediti parametre tla uključujući model materijala i naknadno dodijeliti tlo definiranom području (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



Add new soils

Identification

Name:

Material model

Material model:

Basic data

Unit weight: $\gamma =$ [kN/m³]

Elastic modulus: $E =$ [MPa]

Stiffness according to depth:

Poisson's ratio: $\nu =$ [-]

Uplift pressure

Calc. mode of uplift:

Saturated unit weight: $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

Model elastic

Draw

Pattern category:

Search:

Subcategory:

Pattern:

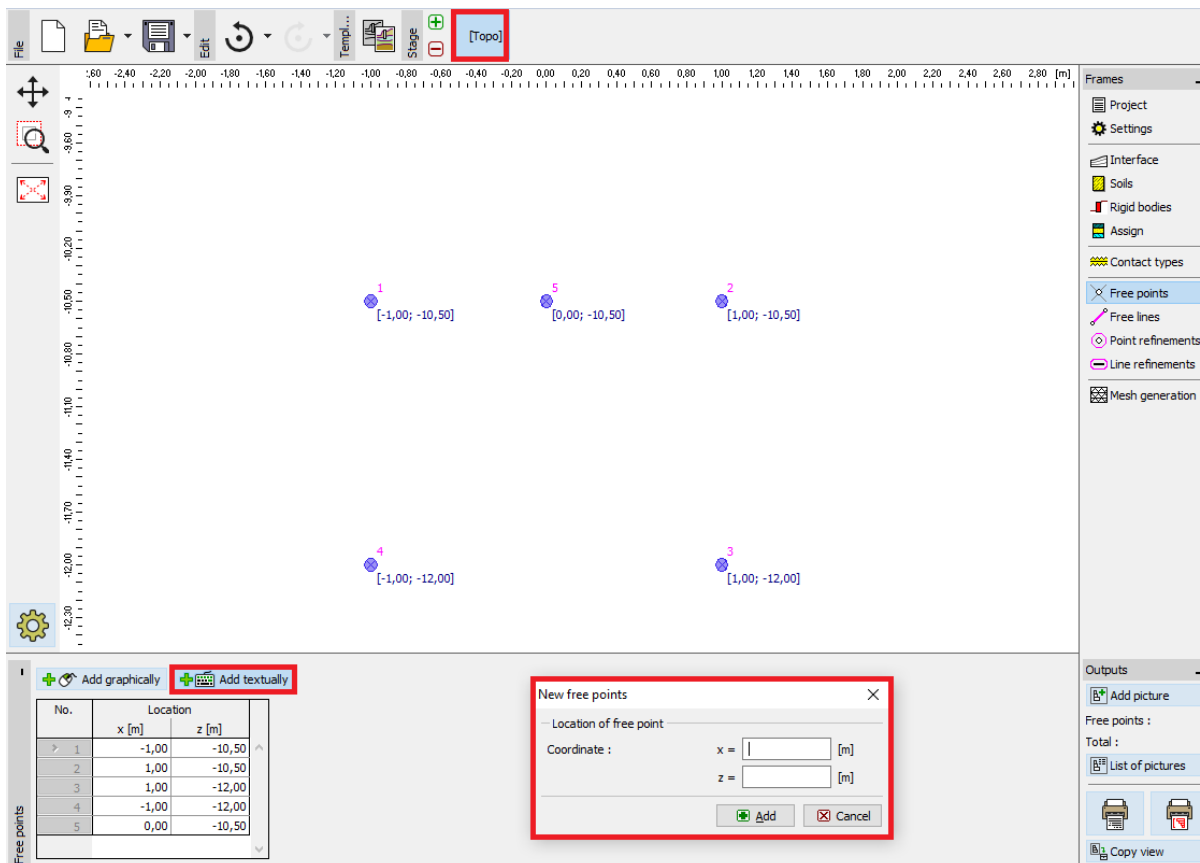
Color:

Background:

Saturation <10 - 90>: [%]

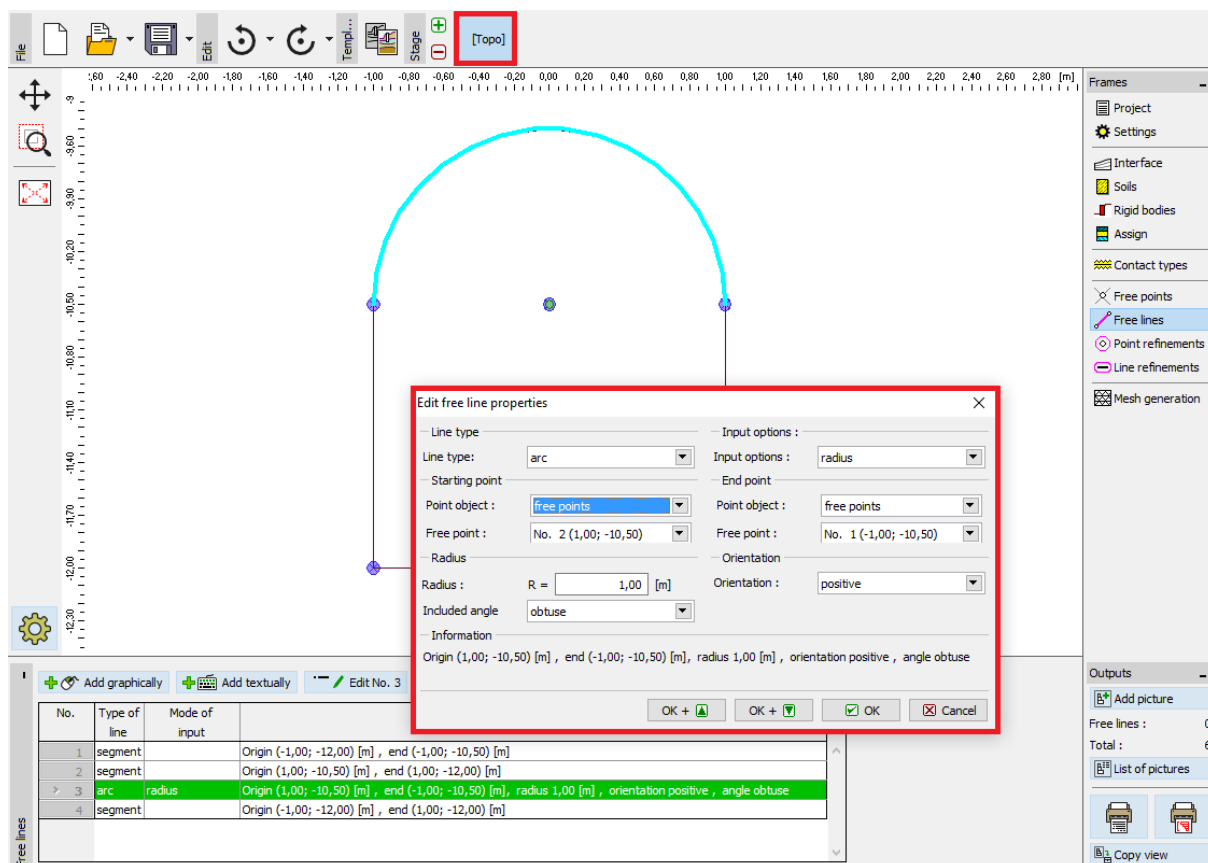
“Add new soils” dijaloški prozor

Sljedeći korak je postaviti geometriju konstrukcije. Najprije ćemo definirati koordinate slobodnih točaka (tipka “Add”), koje formiraju uglove kolektora (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



Kartica “Free points” + “New free points” dijalogki prozor

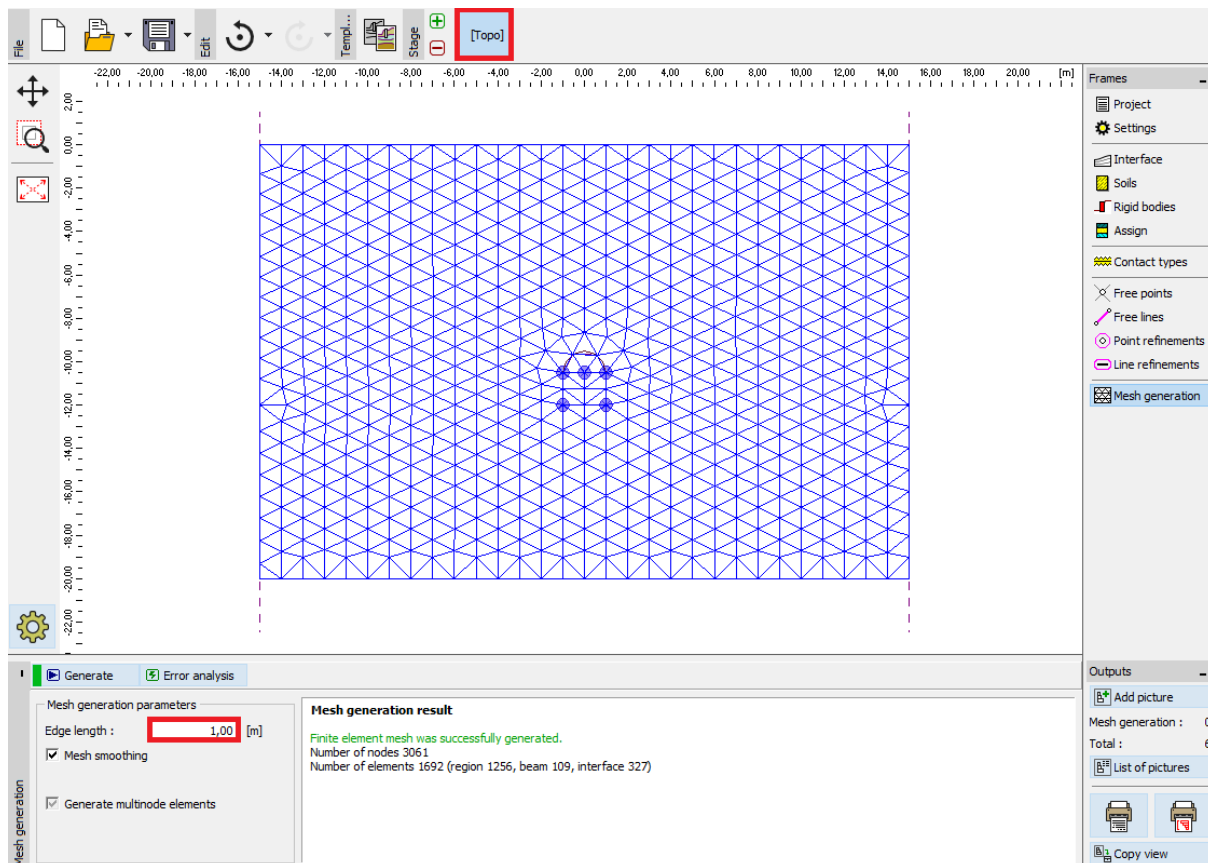
Nakon toga kliknut ćemo na gumb „Add“ u okviru „Free lines“ i povezati zadane točke na ekranu odgovarajućim linijama pomoću kursora (za više detalja pogledajte Pomoć – F1). Da bismo postavili luk s radijusom $R = 1,0$ m, moramo promijeniti tip linije (koristeći gumb „Edit“).



“Modify free line properties” dijaloški prozor

Pregledat ćemo konačni oblik konstrukcije. Ovim korakom postavljanje geometrije kolektora bit će završeno, nakon čega ćemo prijeći na generiranje MKE mreže (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Za parametre generiranja mreže, odabrat ćemo element duljine ruba 1.0 m i pritisnemo tipku **“Generate”**. Program će automatski generirati i ugladiti mrežu konačnih elemenata.



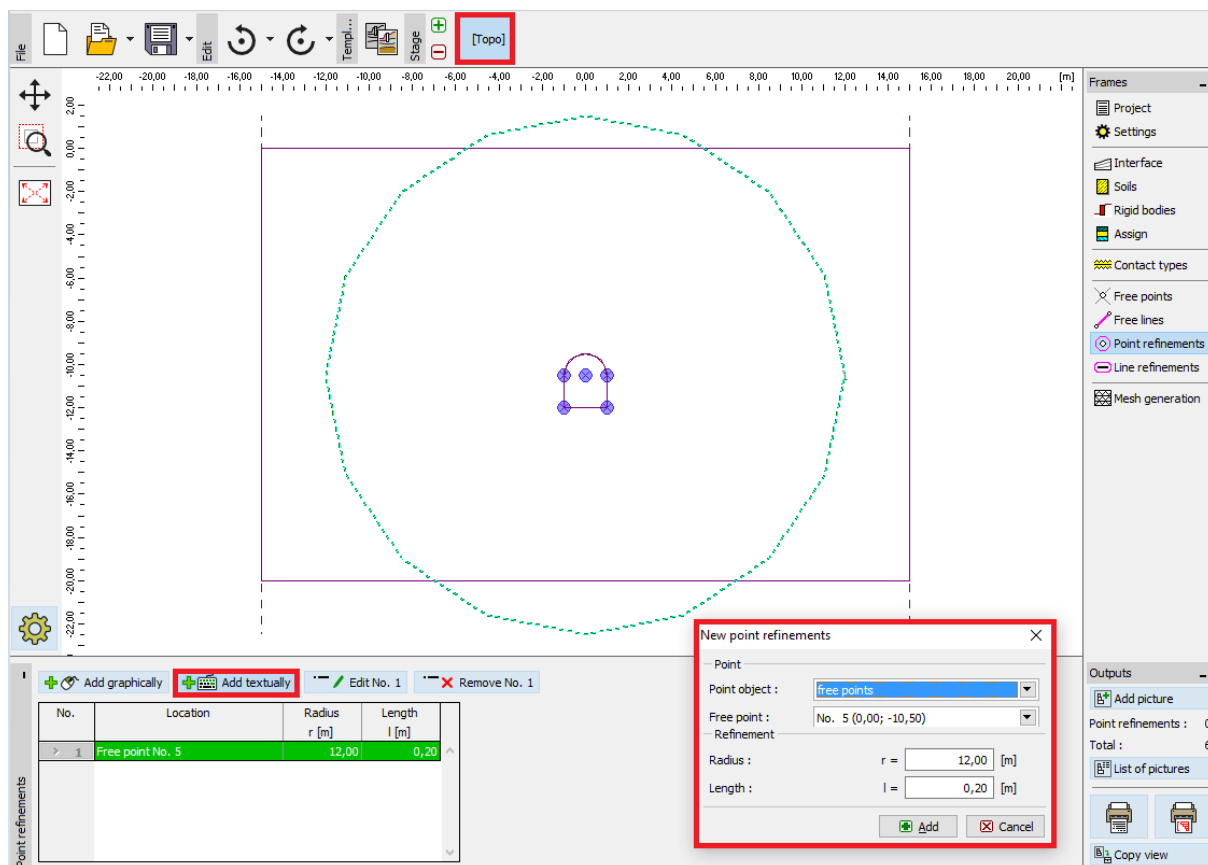
Kartica “Mesh generation” – element duljine ruba 1.0 m (bez lokalnih zaglađenja)

Već na prvi pogled vidljivo je da je generirana mreža u okolini kolektora vrlo gruba. Stoga ćemo povećati njezinu gustoću. Gustoću mreže možemo poboljšati ili oko linija ili oko slobodnih točaka. Sljedeći postupak prikladan je za povećanje gustoće oko obloge kolektora (općenito iskopa):

- definirat ćemo slobodnu točku u blizini središta iskopa
- povećat ćemo gustoću mreže oko te točke.

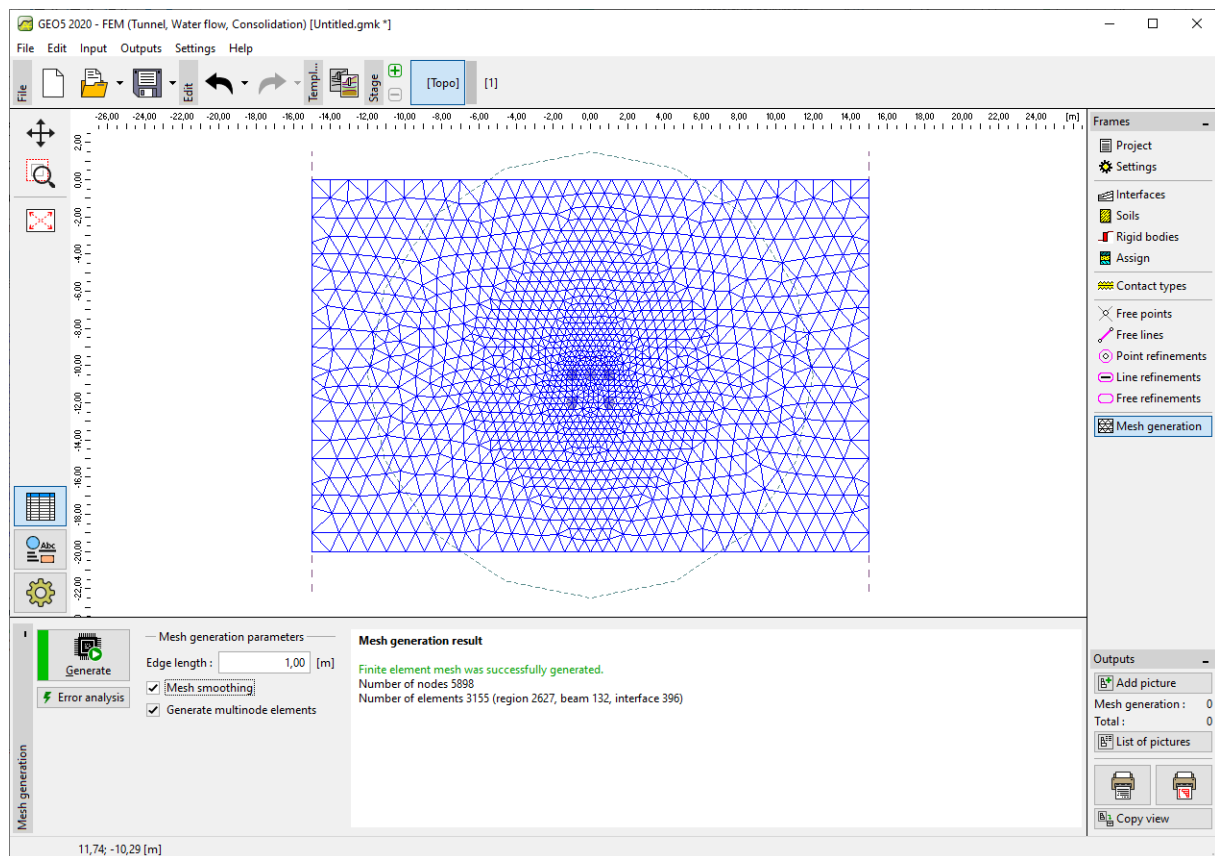
Napomena: Unutarnje sile u gredama proračunavaju se u pojedinim točkama mreže, stoga je potrebno dovoljno zgusnuti slobodne linije i točke MKE (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Za poboljšanje gustoće mreže konačnih elemenata definirat ćemo odgovarajući radijus $r = 12,0$ m i duljinu ruba elementa $l = 0,2$ m. Nakon toga vratit ćemo se u okvir „Mesh generation“ i ponovno generirati mrežu konačnih elemenata.



“New point refinements” dijaloški prozor

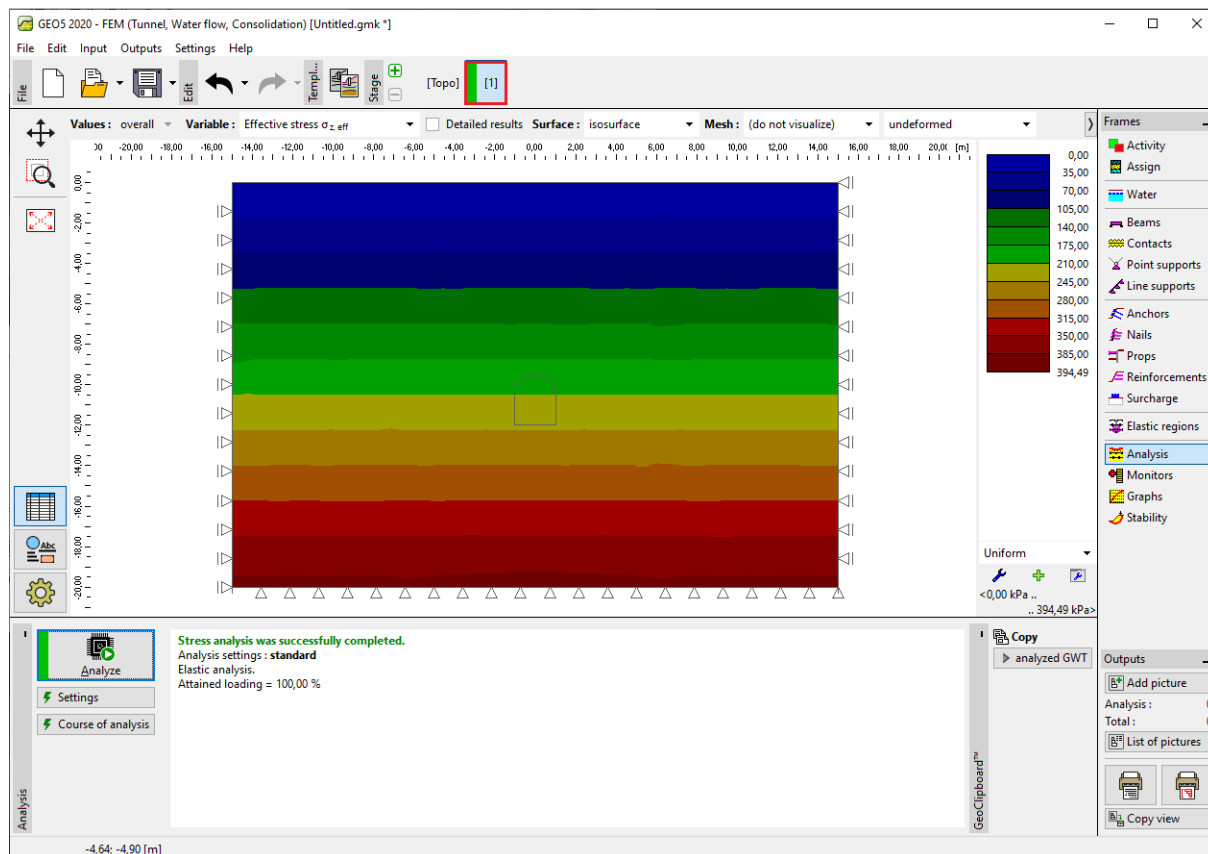
Napomena: Mreža elemenata mora biti dovoljno gusta, osobito u područjima u kojima se mogu očekivati veliki gradijenti naprezanja (točkasti oslonci, oštri kutovi, podzemni iskopi itd.). Potrebno je da radijus zgušnjavanja mreže bude najmanje 3 do 5 puta veći od gustoće u središtu zgušnjavanja, pri čemu obje vrijednosti (gustoća i radijus) moraju biti u razumnom odnosu s gustoćom mreže propisanom za okolno područje. Na taj se način osigurava gladak prijelaz između područja različite gustoće mreže (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).



Kartica "Mesh generation" – Konačni elementi duljine ruba 1.0 m (s lokalno povećanom gustoćom mreže u okolini kolektora)

Faza gradnje 1: primarno geostatičko naprezanje

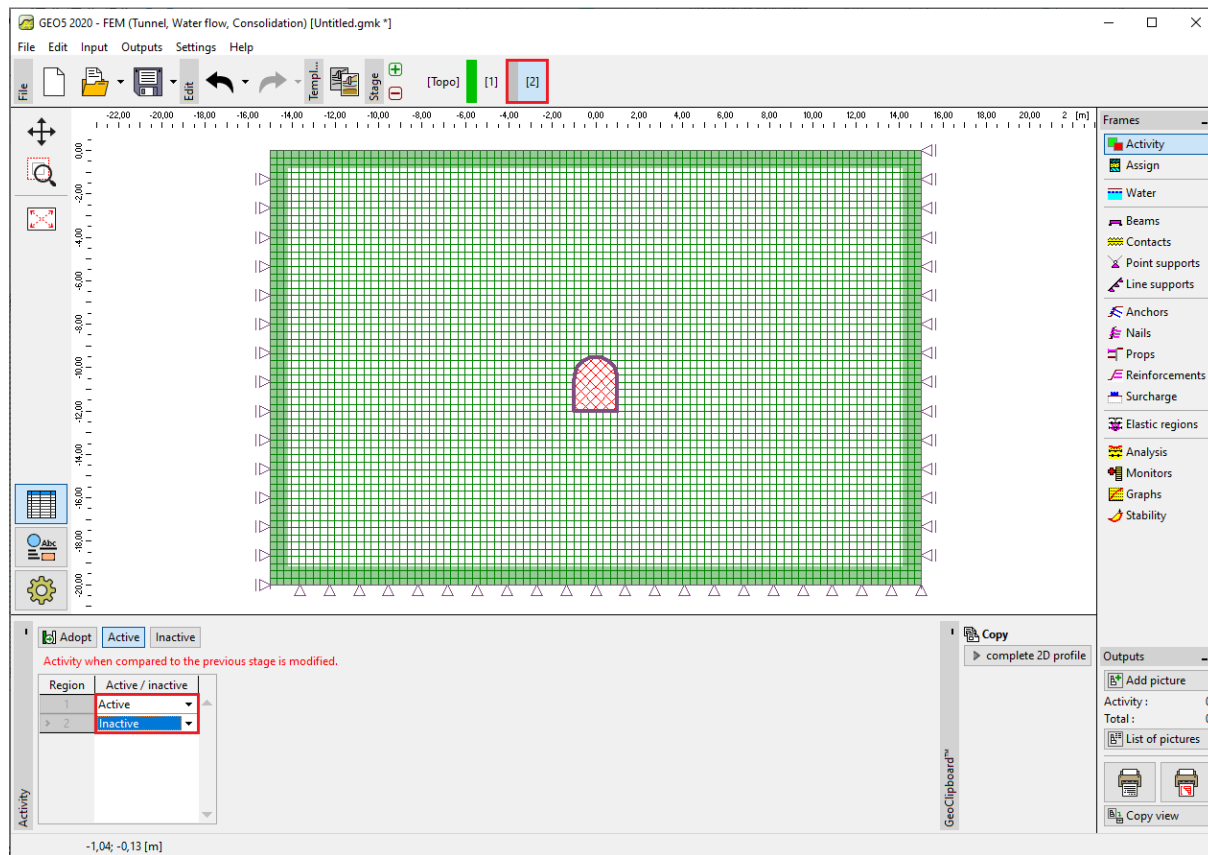
Nakon generiranja, mreža u blizini kolektora izgleda značajno bolje. Sad idemo na fazu gradnje 1 i provodimo proračun primarnih geostatičkih naprezanja. Zadržat ćemo standardne postavke proračuna (za više detalja posjetite Pomoć).



Kartica "Analysis" – Faza gradnje 1

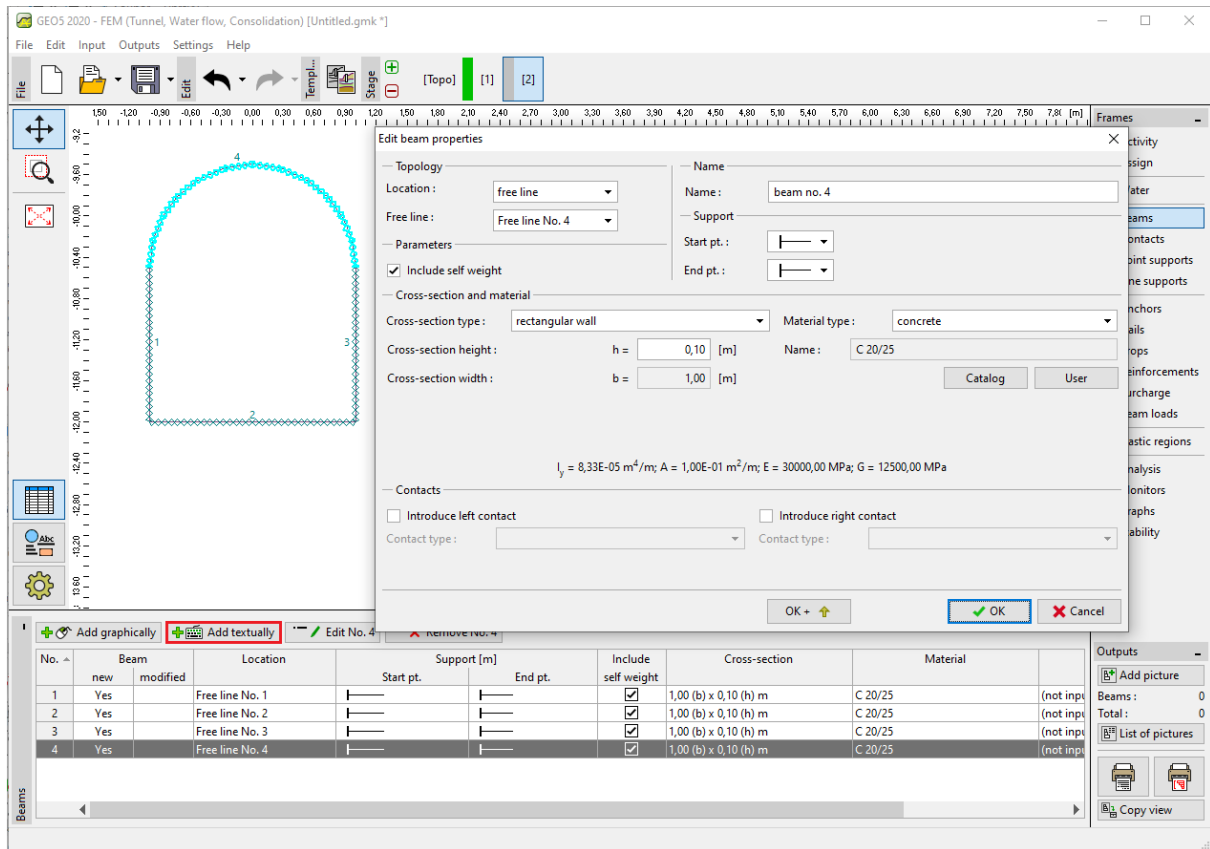
Faza gradnje 2: modeliranje grednih elemenata

U kartici “Activity”, prvo modeliramo iskop tla iz poprečnog presjeka kolektora – regiju unutar kolektora ćemo postaviti kao neaktivnu (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



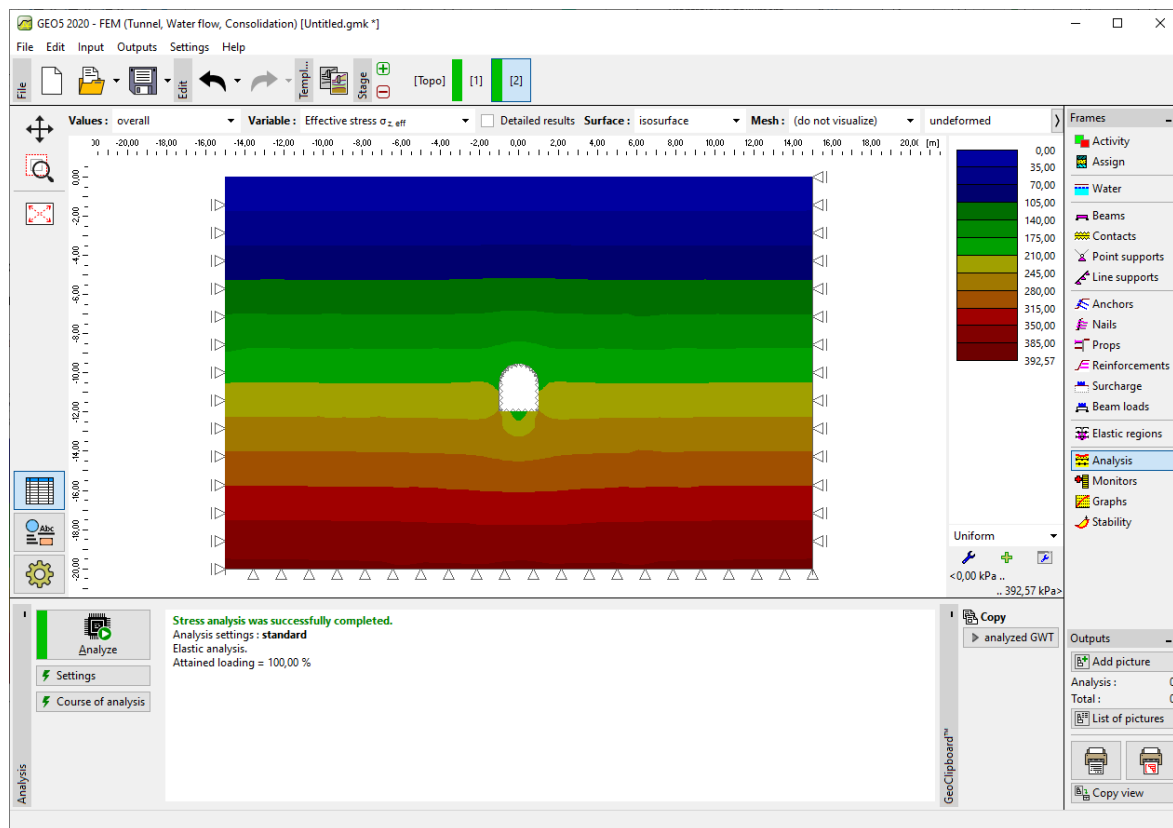
Kartica “Activity” – Faza gradnje 2

Zatim idemo u karticu “Beams” i modeliramo oblogu kolektora. Definirat ćemo sljedeće parametre – lokaciju grede (uzet ćemo u obzir sve slobodne linije), materijal i klasu betona, visinu poprečnog presjeka (0.1 m) i ležajeve krajeva greda (za više informacija posjetite Pomoć – F1).



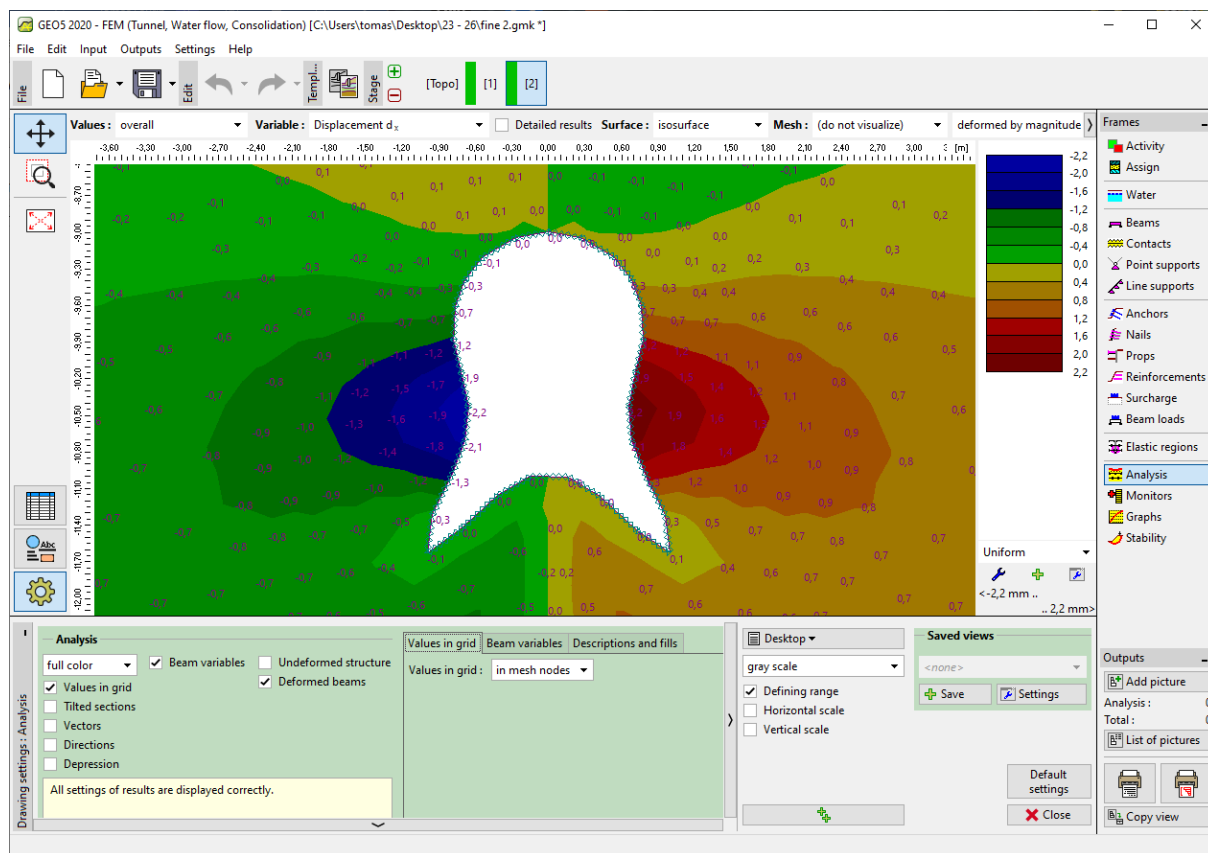
“New beams” dijaloški prozor – Faza gradnje 2

Sad ćemo provesti proračun i vizualizirati rezultate za vertikalno geostatičko naprezanje $\sigma_{z,ef}$ [kPa], bočni pomak d_x [mm] i unutarnje sile obloge kolektora.



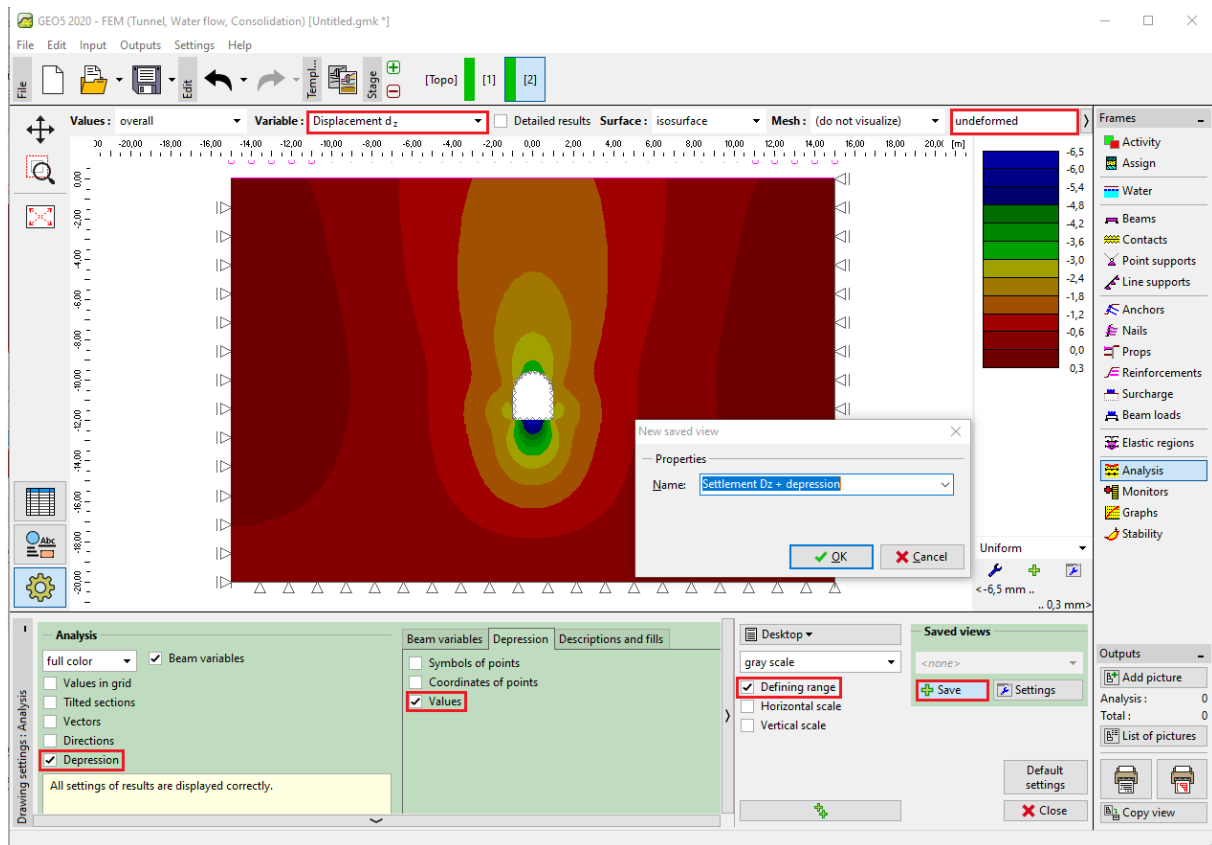
Kartica "Analysis" – Faza gradnje 2 (vertikalno geostatičko naprezanje $\sigma_{z,ef}$)

Iz slike vidimo da je maksimalni horizontalni pomak 2.2 mm (kolektor se ponaša kao kruto tijelo). Kako bismo bolje razumjeli ponašanje konstrukcije, vizualizirat ćemo deformiranu mrežu (tipka u gornjem dijelu zaslona).



Kartica “Analysis” – Faza gradnje 2 (horizontalni pomak d_x nakon iskopa tla)

Napomena: Pojedinačni trenutačni prikazi prikazani na zaslonu mogu se preuzeti kao zasebni objekti. Njima se također može naknadno upravljati. Na taj se način znatno ubrzava vizualizacija rezultata (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

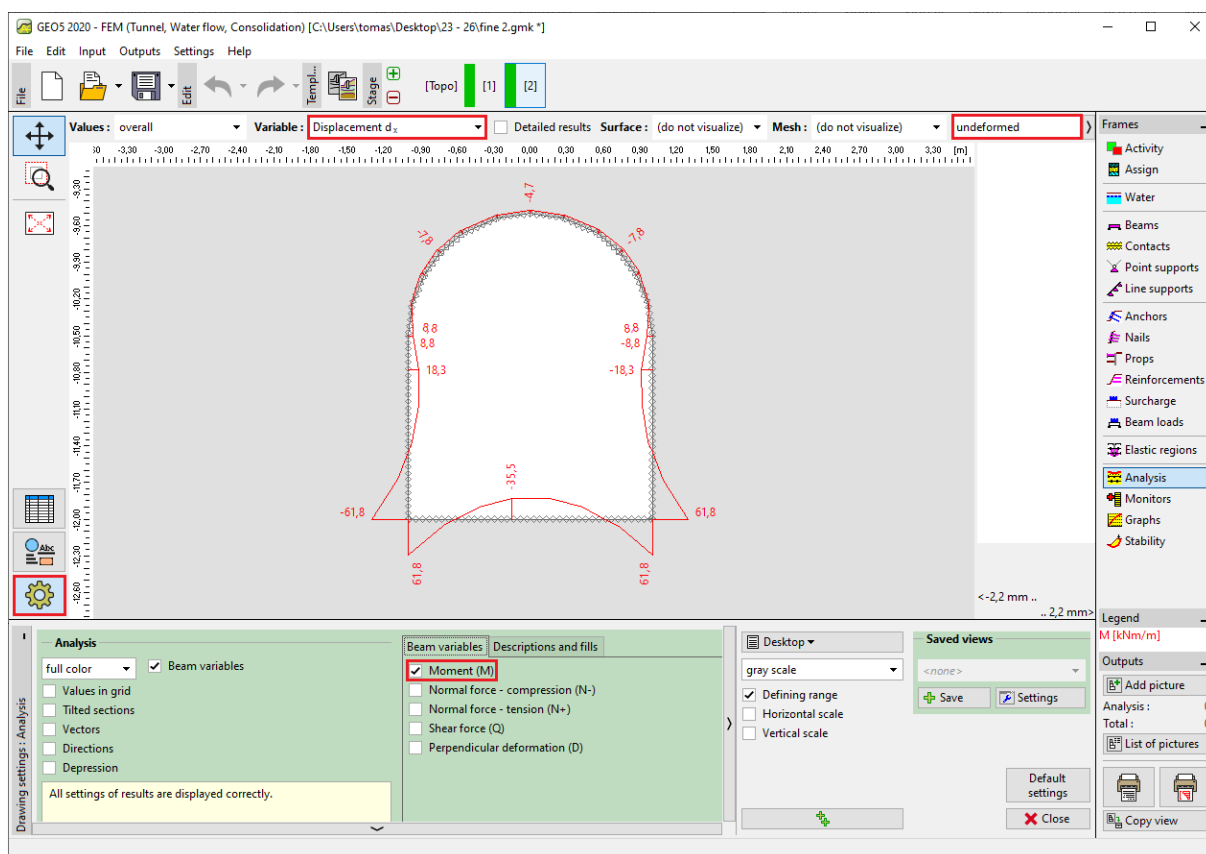


“New picture” dijaloški prozor

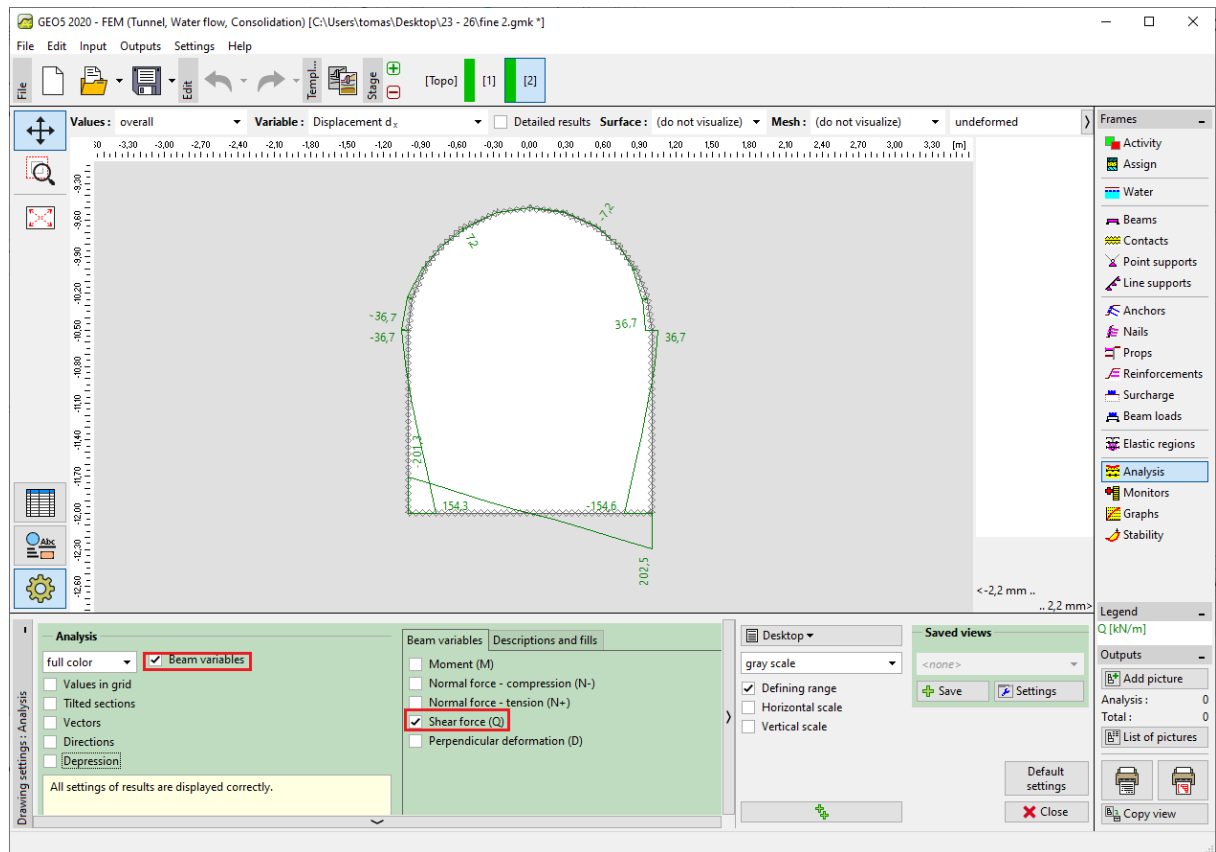
Sada ćemo pregledati dijagrame momenta savijanja M [kNm/m], posmičnih sila Q [kN/m] i normalnih tlačnih sila N^- [kN/m] za fazu gradnje 2 (pomoću gumba „Settings“ u opciji „Beam variables“).

Napomena: Kako bi se zadržala dovoljna preglednost i razumljivost, neki se rezultati ne mogu istodobno prikazivati. Primjerice, nije moguće istodobno prikazati deformirani oblik konstrukcije i dijagrame unutarnjih sila duž grede; uvijek je potrebno odabrati samo jednu opciju. Program na dnu dijaloškog prozora daje upozorenje ako su postavljene nedopuštene kombinacije izlaznih rezultata (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

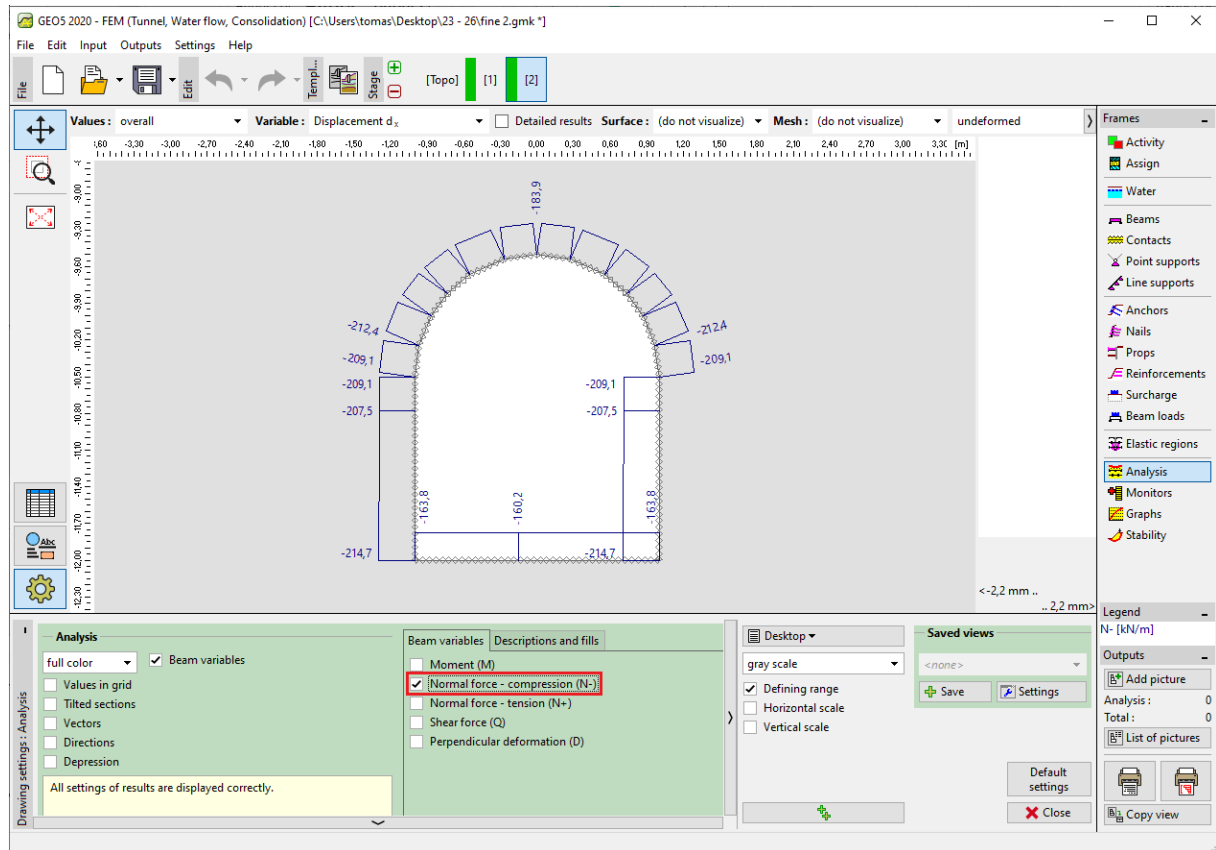
Armatura obloge kolektora može se dimenzionirati i provjeriti za ove vrijednosti u bilo kojem odgovarajućem statičkom programu (npr. FIN EC – CONCRETE 2D). Dobivene rezultate evidentirat ćemo u sažetoj tablici.



Kartica „Analysis“ – Faza gradnje 2 (varijacija momenata savijanja M)



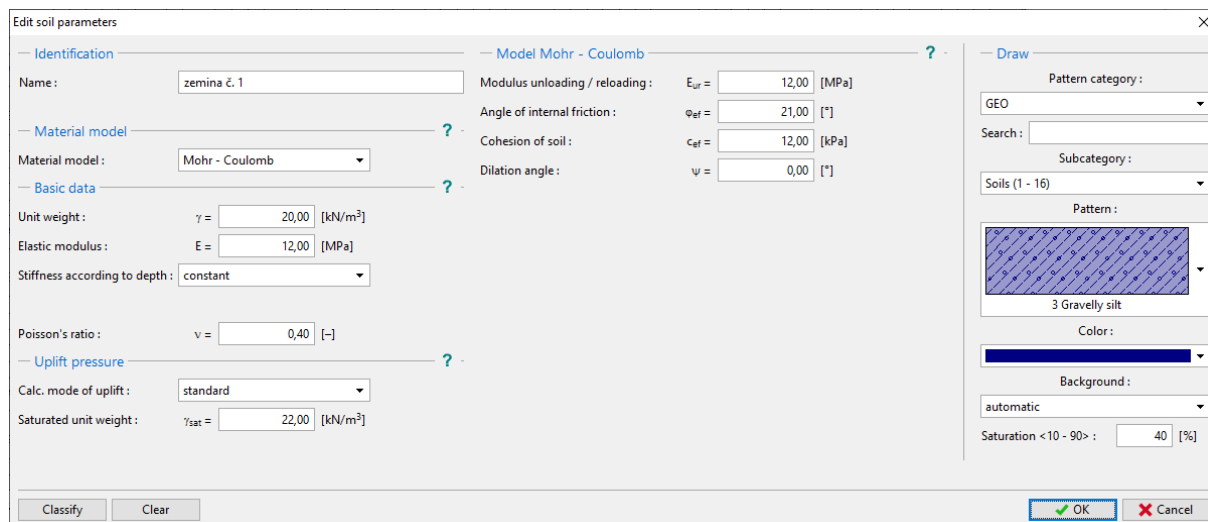
Kartica "Analysis" – Faza gradnje 2 (vratijacija posmične sile Q)



Kartica "Analysis" – Faza gradnje 2 (varijacija normalne tlačne sile N^-)

Provjera uvjeta popuštanja: Mohr-Coulomb-ov model materijala

Sad ćemo provjeriti razvijaju li se plastične deformacije koristeći nelinearne modele. Vratit ćemo se u mod “Topology” i promijeniti model materijala u “Mohr-Coulomb” u kartici “Soils”.



Edit soil parameters

Identification

Name: zemina č. 1

Material model

Material model: Mohr - Coulomb

Basic data

Unit weight: $\gamma = 20,00$ [kN/m³]

Elastic modulus: $E = 12,00$ [MPa]

Stiffness according to depth: constant

Poisson's ratio: $\nu = 0,40$ [–]

Uplift pressure

Calc. mode of uplift: standard

Saturated unit weight: $\gamma_{sat} = 22,00$ [kN/m³]

Model Mohr - Coulomb

Modulus unloading / reloading: $E_{ur} = 12,00$ [MPa]

Angle of internal friction: $\phi_{ef} = 21,00$ [°]

Cohesion of soil: $c_{ef} = 12,00$ [kPa]

Dilatation angle: $\psi = 0,00$ [°]

Draw

Pattern category: GEO

Search:

Subcategory: Soils (1 - 16)

Pattern: 3 Gravelly silt

Color:

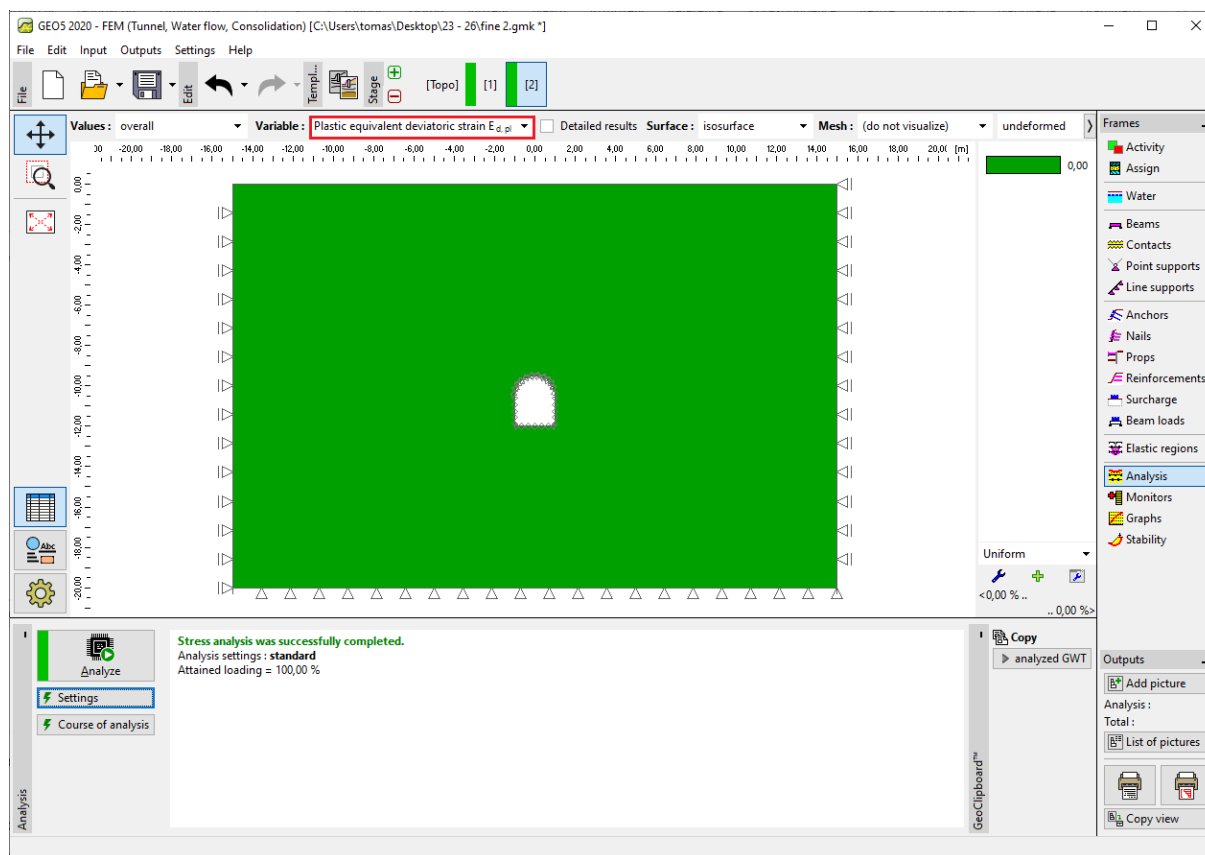
Background: automatic

Saturation <10 - 90>: 40 [%]

Classify Clear OK Cancel

Dijaloški prozor “Edit soil parameters”

Nakon izvršavanja proračuna, proučit ćemo ekvivalentne plastične deformacije.



Kartica "Analysis" – Faza gradnje 2 (ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ prema MC modelu)

Iz prethodne slike vidimo da uvjet popuštanja za Mohr-Coulomb-ov model nije prekoračen – ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ su jednake nuli, što odgovara ponašanju konstrukcije utvrđenom prema elastičnom modelu. Rezultatne vrijednosti pomaka, geostatičkih naprezanja i unutarnjih sila su zato identične.

Procjena rezultata

Sljedeća tablica prikazuje vrijednosti ekstrema unutarnjih sila uzduž grednih elemenata (obloga kolektora) za fazu gradnje 2 (vrijednosti momenata savijanja, posmičnih sila i normalnih sila). Proveli smo ovaj proračun za elastični model materijala s lokalno povećanom gustoćom trokutastih elemenata.

Model materijala	Faza gradnje 2		
	N^- [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Elastično	– 160.2	+ 61.8	+ 202.5
	– 214.7	– 61.8	– 201.3

Krivulje unutarnjih sila uzduž grednih elemenata (ekstremi) – Faza gradnje 2

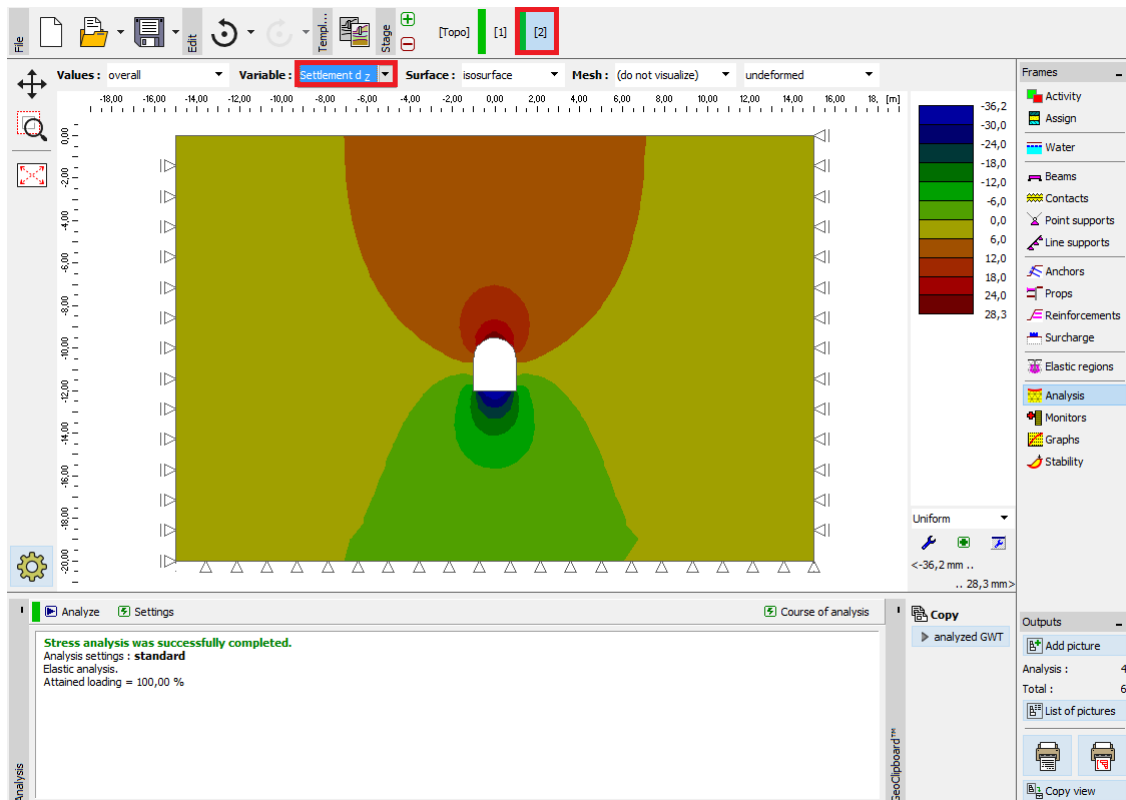
Zaključak

Na temelju rezultata numeričkog proračuna mogu se izvesti sljedeći zaključci:

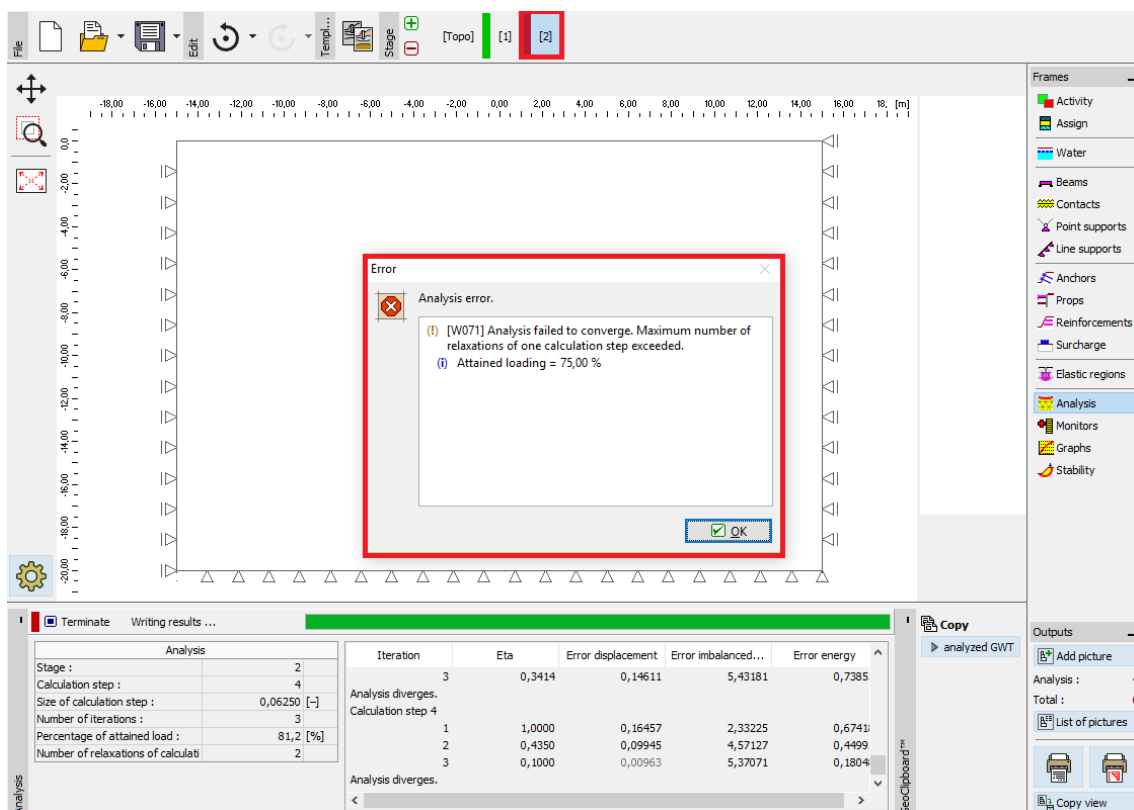
- Lokalno zgušnjavanje mreže konačnih elemenata dovodi do točnijih rezultata.
- Ako nelinearni modeli materijala (npr. Mohr-Coulomb) daju nulte vrijednosti ekvivalentnih plastičnih deformacija $\varepsilon_{eq.,pl.}$, konstrukcija se ponaša elastično te su rezultati unutarnjih sila, pomaka i naprezanja jednaki za oba tipa modela.

Napomena: Proračun koji smo proveli temelji se na nerealnoj pretpostavci da obloga djeluje istodobno s iskopom tla. Takav postupak bio bi prikladan za konstrukcije izvedene potiskivanjem kroz meka tla (utiskivanje gotovih konstrukcija u tlo). U stvarnosti se tlo tijekom iskopa rasterećuje i deformira prema iskopanom prostoru. Stvarni primjer modeliranja tunela opisan je u poglavlju 26. Numeričko modeliranje iskopa tunela primjenom NATM metode.

Ako u našem konkretnom slučaju obloga ne bi bila aktivirana odmah (što se može modelirati kao dodatna faza bez definiranja grednih elemenata), došlo bi do urušavanja iskopa; kod elastičnog modela to se očituje velikim deformacijama, dok u slučaju nelinearnog modela program ne bi pronašao rješenje.



Proračun bez grednih elemenata (slijeganje d_z prema elastičnom modelu)



“Error” dijaloški window – proračun bez korištenja grednih elemenata (prema MC modelu)