

Numeričko modeliranje iskopa tunela prema NATM metodi

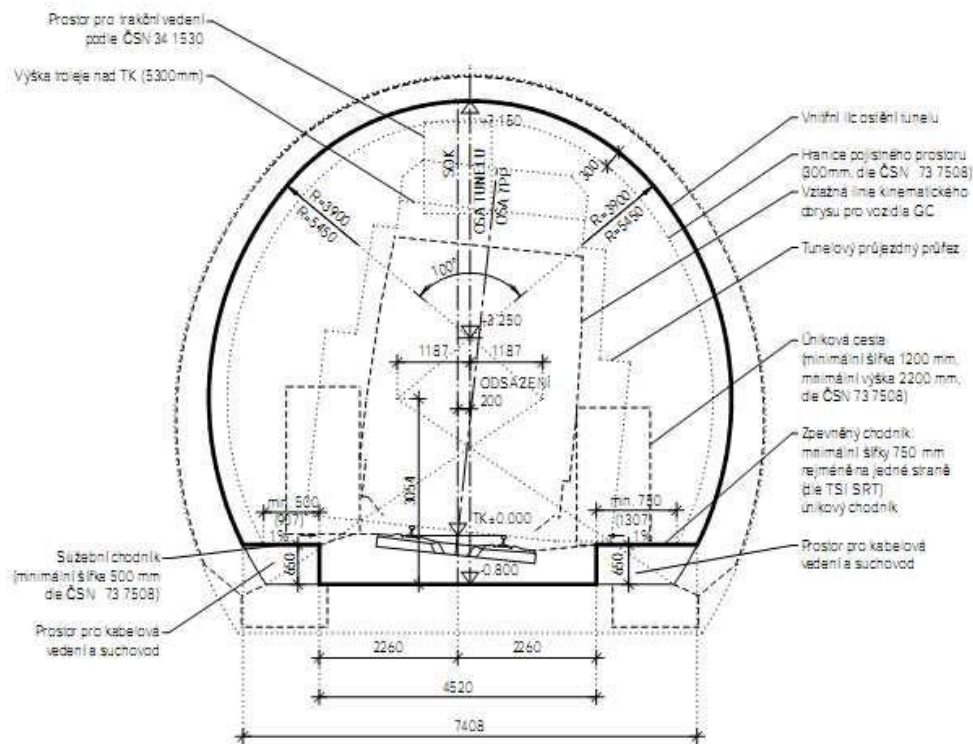
Program: MKE - Tunel

Datoteka: Demo_manual_26.gmk

Cilj ovog priručnika je opisati numeričko modeliranje tunela jednotračne željeznice koristeći metodu konačnih elemenata.

Opis problema

Razvijte model i procijenite primarnu oblogu tunela jednotračne željeznice za brzine između 160 do 230 km/h. Poprečni presjek tunela je definiran na temelju SZDC (Railway Infrastructure Administration, state organisation) standarda (pogledajte sliku).



Neto profil tunela za jednotračnu željeznicu prema SZDC standardu

Tunel će biti bušen korištenjem konvencionalnih metoda za tuneliranje (Nova austrijska metoda tuneliranja, Metoda postepenog iskapanja) sa slijedom iskopa koji se sastoji od zaglavlja, klupe i invertnog dijela (takozvani horizontalni slijed). Preopterećenje je aproksimativno 14 meatar visoko. 200 mm debela oblaka se izvodi od prskanog betona C 20/25. Kruna iskopa je poduprta s hidraulički širenim sidrima u stijeni (HUIS, vrsta WIBOLT EXP) s kapacitetom od 120kN. Pretpostavljamo na temelju

procjene faza operacija ispitivanja da su geološki slojevi paralelni s površinom terena. Sastav geološkog profila možete vidjeti u *Tablici 1*.

Tablica 1 – Parametri tla i stijena

Tlo, stijena (specifikacija)	Profil [m]	γ [kN/m ³]	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	ν [-]	E_{def} [MPa]	E [MPa]	E_{ur} [MPa]	K_0 [-]	γ_{sat} [kN/m ³]
Muljeviti pijesak (S4 / SM)	0 – 3	19	29	10	0,3	10	10	30	0,5	19
Muljeviti šljunak (G4 / GM)	3 – 5	19	33	8	0,3	70	70	210	0,5	19
Škriljci jako oštećeni vremenskim utjecalima (R5)	5 – 19,75	20	29	30	0,33	45	45	135	0,5	20
Škriljci malo oštećeni vremenskim utjecalima (R3)	19,75 i dublje	22	38	250	0,25	350	350	1050	0,35	22
Usidreno područje (R5)	–	20	29	63	0,33	45	45	135	0,5	20

Rješenje

Koristit ćemo GEO5 – MKE program za proračun ovog problema. U tekstu ispod, opisat ćemo rješenje ovog primjera korak po korak:

- Topologija: postavke problema i modeliranje (elementi kontakta, modeliranje obloge)
- Modeliranje procedure konstrukcije: primarni materijal obloge tunela, koraci iskapanja
- Faza izgradnje 1: stanje primarnog geostatičkog naprezanja stijenskog masiva
- Faza izgradnje 2: modeliranje iskopa zaglavlja, aktivacija nepoduprtog iskopanog otvora
- Faza izgradnje 3: podupiranje gornjeg svoda iskopa s primarnom oblogom od nezrelog betona

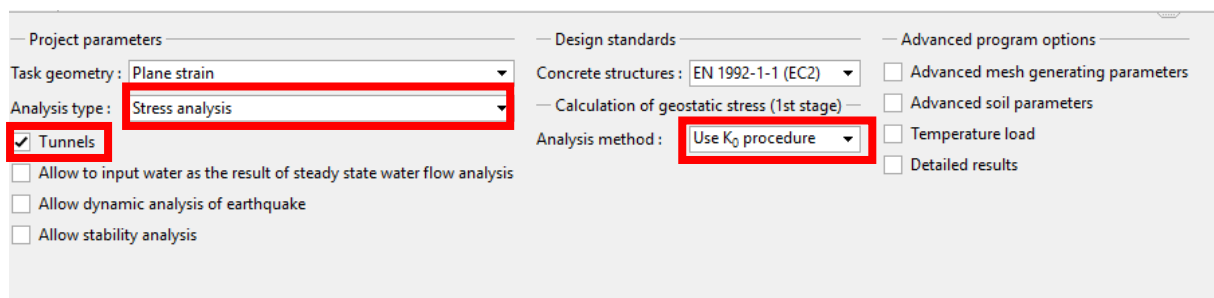
- Faza izgradnje 4: poboljšanje karakteristika zrelog betona (gornji svod)
- Faza izgradnje 5: modeliranje iskopa klupe tunela, aktivacija nepoduprtog iskopanog otvora
- Faza izgradnje 6: podupiranje bočnih zidova klupe s oblogom od nezrelog betona
- Faza izgradnje 7: poboljšanje karakteristika zrelog betona (klupa)
- Rezultati, zaključak: korito slijeganja terena, deformacija stijenskog masiva, raspodjela unutarnjih sila i pomaci primarne obloge tunela, sile u sidrima.

Napomena: Modeliranje u programu GEO5 – MKE sastoji se od dva dijela. U prvom dijelu potrebno je definirati veličinu samog numeričkog modela u topologiji, odrediti granice između tla i stijena, definirati geometriju tunelske konstrukcije pomoću točaka i linija te ih dodijeliti odgovarajućim granicama modela. (Za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

U drugom dijelu definiraju se pojedine faze izgradnje i provode proračuni. Cilj je u svakoj fazi modelirati stvarni tijek izgradnje određene podzemne konstrukcije aktiviranjem, deaktiviranjem ili promjenom materijala u prethodno definiranim regijama modela, dodavanjem ili uklanjanjem grednih elemenata koji predstavljaju konstrukciju (npr. oblogu tunela) ili promjenom njihovih parametara (materijal, dimenzije). Na taj način dobivamo numerički model za koji pretpostavljamo da će se ponašati identično kao buduća stvarna podzemna konstrukcija te će se koristiti za dimenzioniranje tunelske konstrukcije.

Topologija (1. dio): definiranje granica (profila) problema i parametara tla

U kartici “Settings”, postaviti ćemo proračun Faze konstrukcije 1 na K_0 proceduru. Za vrstu proračuna odabiremo “Stress analysis”. Dodatno uključujemo način rada s tunelima - “Tunnels”, koji dopušta realistično modeliranje tijekom izgradnje primarne obloge tunela.



The screenshot shows the 'Settings' dialog box with the following configurations:

- Project parameters:**
 - Task geometry: Plane strain
 - Analysis type: Stress analysis
 - Tunnels
 - Allow to input water as the result of steady state water flow analysis
 - Allow dynamic analysis of earthquake
 - Allow stability analysis
- Design standards:**
 - Concrete structures: EN 1992-1-1 (EC2)
 - Calculation of geostatic stress (1st stage):
 - Analysis method: Use K_0 procedure
- Advanced program options:**
 - Advanced mesh generating parameters
 - Advanced soil parameters
 - Temperature load
 - Detailed results

Kartica “Settings”

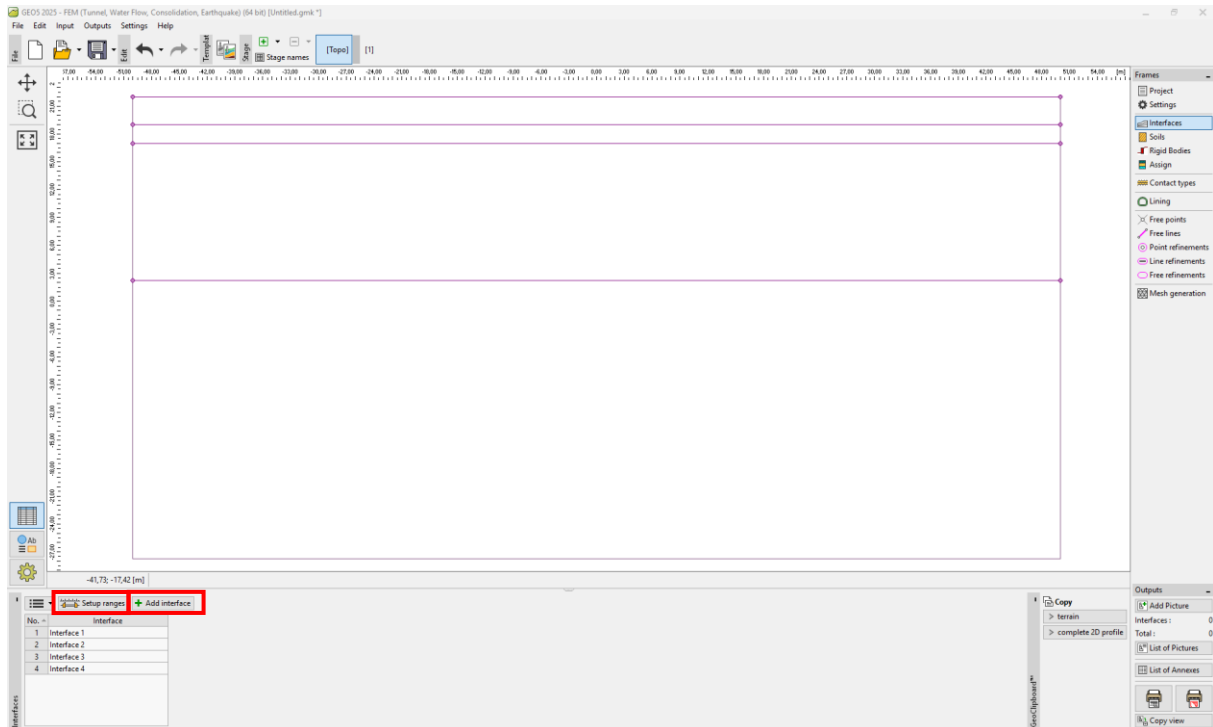
Napomena: Ako je odabran način rada "Tunnels", moguće je koristiti program za modeliranje, na primjer, iskopa (modeliranje 3D efekta čela iskopa primjenom Nove austrijske metode tuneliranja), definiranje i proračun degradacije greda, toplinskih opterećenja koja djeluju na grede i regije, opterećenja na regijama uključujući bubrenje te, na kraju, praćenje rezultata. (Za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Nakon toga ćemo definirati veličinu numeričkog modela problema koji rješavamo i granica terena. U kartici "Interface", postoji tipka "Setup ranges". Ovisno o problemu, odabiremo dimenzije modela (-50 m; 50 m) i definiramo debljinu sloja na kojem tražimo rezultate kao 30 m.

"World coordinates" dialoški prozor

Granica 1		Granica 2		Granica 3		Granica 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	2,25
50,0	22,0	50,0	19,0	50,0	17,0	50,0	2,25

Popis točaka za pojedine granice između tla i stijena



Napomena: Granice analiziranog problema ili koordinate globalnog sustava moraju biti odabrane dovoljno velike kako bi se osiguralo da naprezanja i deformacije stijenskog masiva na lokaciji konstrukcije (ili u područjima od interesa) ne budu pod utjecajem rubnih uvjeta modela. Preporučene dimenzije granica modela za pojedine slučajeve rješenja prikazane su i detaljnije opisane u pomoći programa. (Za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

U kartici “Soils”, definirat ćemo parametre slojeva tla ili stijena, te parametre stijene u području gdje su locirana sidra u stijeni (pogledajte napomenu). Apliciramo Mohr-Coulomb-ov model materijala kako bismo modelirali ovaj problem. On nam dopušta da uzimamo u obzir regije lokalnih ili globalnih otkazivanja (za više detalja pogledajte Pomoć).

Napomena: Sidra se uvode u numerički model metodom u kojoj se područje stijenskog masiva ojačava sidrima, u blizini iskopanog otvora i u duljini sidara, zamjenjuje stijenom s poboljšanim paramterima materijala. U takvim slučajevima obično se pretpostavlja povećanje kohezije stijene. Ukupna kohezija stijene povećana djelovanjem sidara određena je sljedećim izrazom:

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

gdje:

- c_{h+s} ukupna kohezija povećana djelovanjem sidara,
- c_h originalna kohezija stijene,
- c_s povećanje kohezije djelovanjem sidara.

Povećanje kohezije zbog djelovanja sidara se proračunava prema sljedećem izrazu:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \phi_{ef}}{2 \cdot \cos \phi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2.058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1,5} = 33.0 \text{ kPa}$$

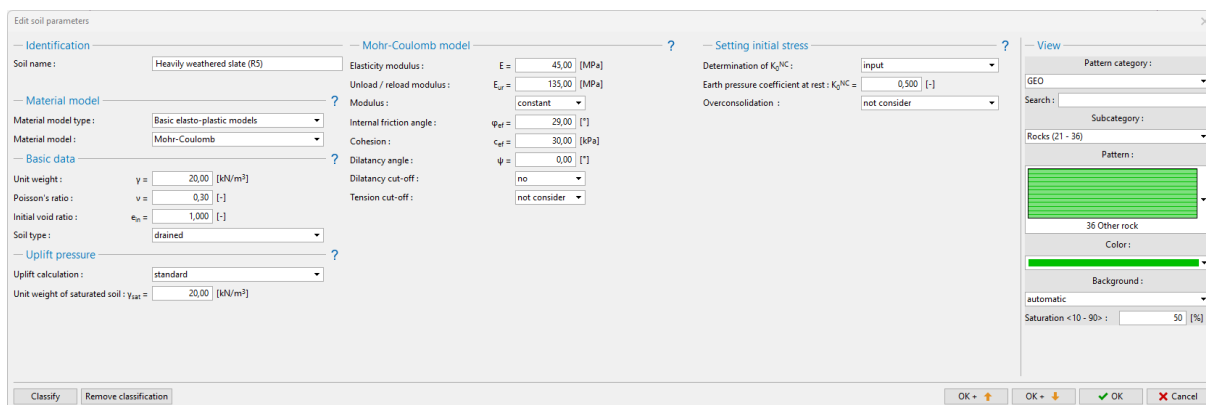
- gdje:
- N_u kapacitet sidra [kN],
 - A_k područje dodijeljeno jednom sidru [m^2],
 - ϕ_{ef} kut unutarnjeg trenja stijene [$^\circ$],
 - γ_{kc} faktor pouzdanosti sidra [-].

U ovom problemu uzimamo u obzir **10 komada HUIS sidara s kapacitetom od 120 kN, postavljenih na razmaku od 3,5 m**. Rezultantna posmična čvrstoća, odnosno kohezija, u području ojačanom sidrima odgovara stijenskom tipu R5:

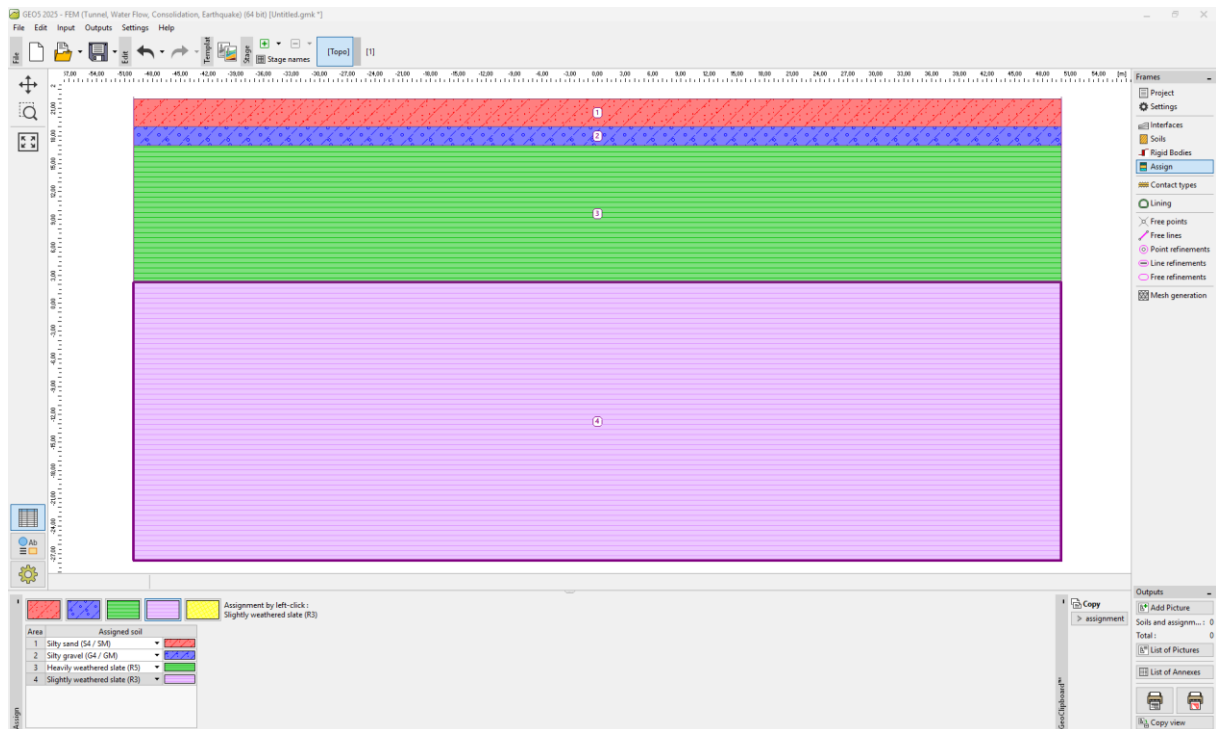
$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti E [MPa] nije direktno određen geološkim ispitivanjem. Iz nekog razloga njegova vrijednost je izvedena iz modula deformacije E_{def} [MPa] koristeći osnovnu vezu $E = E_{def}$. Modul rasterećenja je uzet kao $E_{ur} = 3E$

Uzet ćemo u obzir nulti kut dilatacije ψ [$^\circ$] za sve slojeve tla i stijena. Nakon toga ćemo dodijeliti tla i stijene pojedinačnim regijama (pogledajte sljedeću sliku).



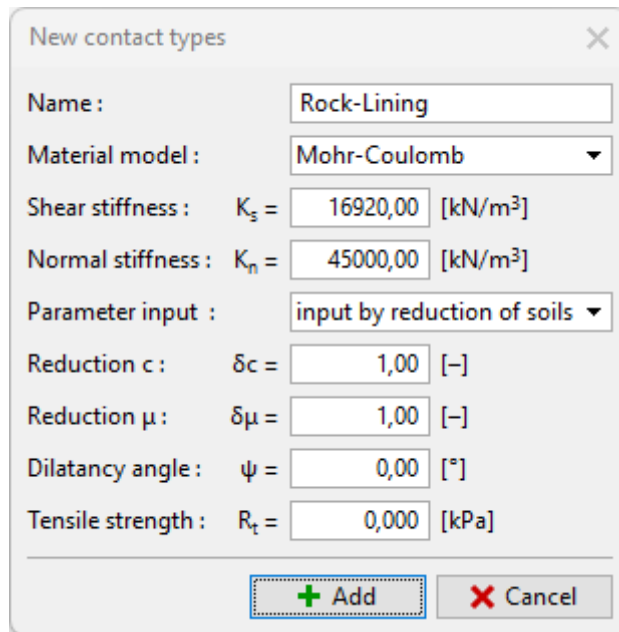
“Add new soils” dijaloški prozor



Kartica "Assign"

Sljedeći korak je odrediti vrstu elemenata kontakta, koji se unose na mjesto granice između obloge i tla ili stijene u kartici "Contact types". Pretpostavljamo sljedeće parametre kontakta na mjestu granice:

- Posmična čvrstoća: $K_s = 16,920 \text{ kN/m}^3$,
- Normalna krutost: $K_n = 45,000 \text{ kN/m}^3$,
- Redukcija za tla: $\delta c = \delta \mu = 1.0$.



“New contact types“ dijaloški prozor

Napomena: Kontaktni elementi omogućuju uzimanje u obzir interakcije između materijala duž granica između tla i konstrukcije ili između različitih tipova tla itd. Debljina kontaktnog elementa je nula. Ovaj element izražava odnos između kontaktnih naprezanja i relativnih promjena pomaka duž kontakta. (Za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

U ovom slučaju kontaktni elementi se postavljaju na granicu između primarne obloge i stijene, tj. uzima se u obzir određena mogućnost pomicanja primarne obloge na površini iskopanog otvora.

Kontaktni elementi se općenito uvode u manje čvrsta tla, dok se za svježije, neoštećene stijene (u slučaju tunelskih konstrukcija) mogu uz određeni oprez zanemariti. Problemi i metoda uvođenja kontaktnih elemenata detaljnije su opisani u Poglavlju 24: Numeričko rješenje za konstrukciju zagatne stijene (za više detalja pogledajte <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>). Preporučene vrijednosti krutosti K_s i K_n [kN/m³] prikazane su u Pomoći (za više detalja pritisnite F1).

Na ovaj način završena je osnovna specifikacija problema (modeliranje granica, parametri tla i vrste kontakta). Sada nastavljamo s modeliranjem primarne obloge tunela, a zatim sa specifikacijom područja ojačanog sidrima.

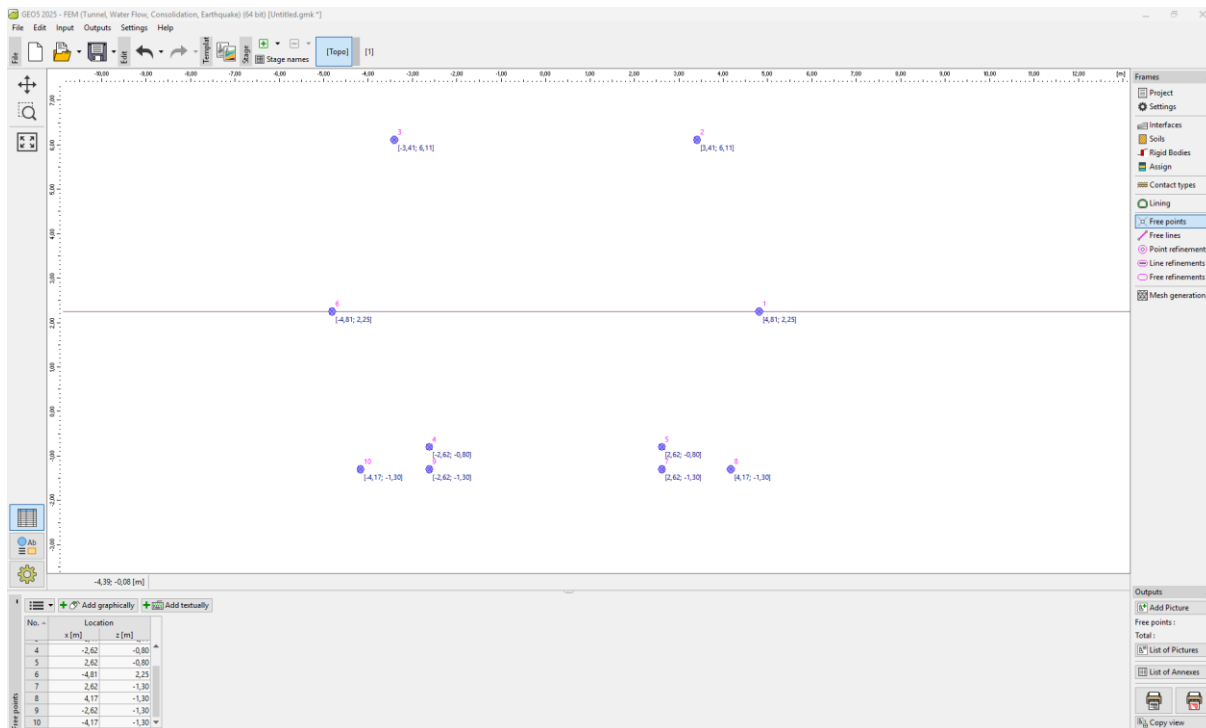
Topologija (2. dio): modeliranje obloge i regije ojačane sidrima

Prelazimo u karticu “Free points” i kliknemo na tipku “Add textually” za definiranje točaka obloge.

Geometrija iskopanog presjeka je određena pomoću deset slobodnih točaka (pogledajte Tablicu 2).

Tablica 2 – Slobodne točke iskopa (primarna obloga)

Br. točke	Lokacija x [m]	Lokacija 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



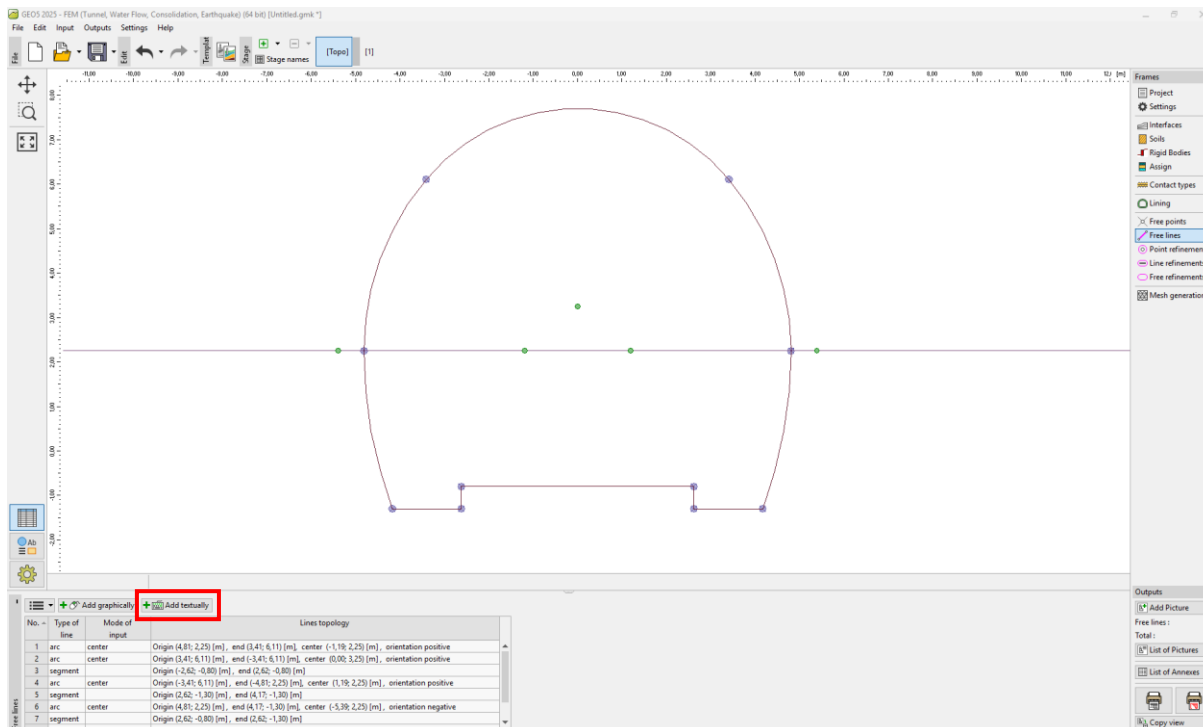
“Lining” dijaloški prozor

Nakon toga prelazimo u karticu “Free lines” i spajamo točke segmentima i lukovima (pogledajte Tablicu 3).

Tablica 3 – Slobodne linije iskopa (primarna obloga)

Linija Br.	Vrsta linije	Način unosa	Topologija linija
1	luk	centar	Početak – točka 1, kraj – točka 2 centar (-1,19; 2,25), orijentacija pozitivna
2	luk	centar	Početak – točka 2, kraj – točka 3, centar (0,00; 3,25), orijentacija pozitivna
3	segment	–	Početak – točka 4, kraj – točka 5
4	luk	centar	Početak – točka 3, kraj – točka 6, centar (1,19; 2,25), orijentacija pozitivna
5	segment	–	Početak – točka 7, kraj – točka 8
6	luk	centar	Početak – točka 1, kraj – točka 8, centar (-5,39; 2,25), orijentacija negativna
7	segment	–	Početak – točka 5, kraj – točka 7
8	segment	–	Početak – točka 9, kraj – točka 10
9	luk	centar	Početak – točka 10, kraj – točka 6, centar (5,39; 2,25), orijentacija negativna
10	segment	–	Početak – točka 4, kraj – točka 9

Slobodne točke konturne linije iskopa za primarnu oblogu su ucrtane na sljedećoj slici.



“Lining” module – FEM“ – Slobodne linije iskop (s horizontalnim sekvencama)

Ležaj krune iskop korištenjem sidara uzima se u obzir tijekom izgradnje podzemne konstrukcije. Ovaj ležaj se obično modelira u inženjerskoj praksi kao poboljšanje parametara stijene koja se nalazi u tom određenom području. Zbog toga je i u ovom slučaju potrebno specificirati područje ojačano sidrima – pomoću slobodnih točaka (pogledajte Tablicu 4) i slobodnih linija (pogledajte Tablicu 5).

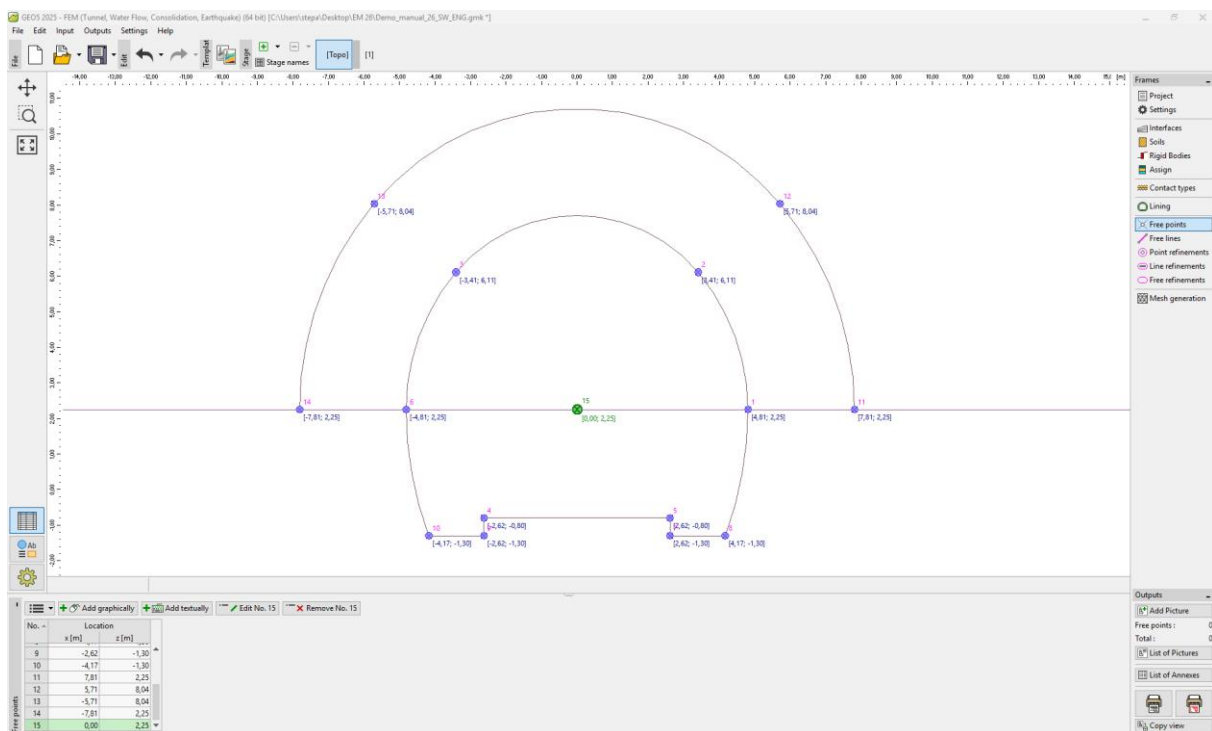
Tablica 4 – Slobodne točke u blizini sidrenog područja s hidraulički proširivim sidrima

Točka Br.	Lokacija x [m]	Lokacija y [m]
11	7.81	2.25
12	5.71	8.04
13	-5.71	8.04
14	-7.81	2.25

Tablica 5 – Slobodne linije u blizini sidrenog područja s hidraulički proširivim sidrima

Linija Br.	Vrsta linije	Način unosa	Topologija linija
11	luk	radijus	Početak – točka 14, kraj – točka 13 Radijus – 9,0 m, orijentacija – negativna Kut – oštri
12	luk	radijus	Početak – točka 13, kraj – točka 12 Radijus – 7,45 m, orijentacija – negativna Kut – oštri
13	luk	radijus	Početak – točka 12, kraj – točka 11 Radijus – 9,0 m, orijentacija – negativna Kut – oštri

Zatim ćemo dodati novu slobodnu točku Br. 15 s koordinatama $[0,0; 2,25]$ u kartici “Free points” frame i nakon toga povećati gustoću mreže konačnih elemenata oko nje (pogledajte *Topologija – 3. dio*).



Slobodne točke u blizini sidrenog područja i slobodne točke primarne obloge

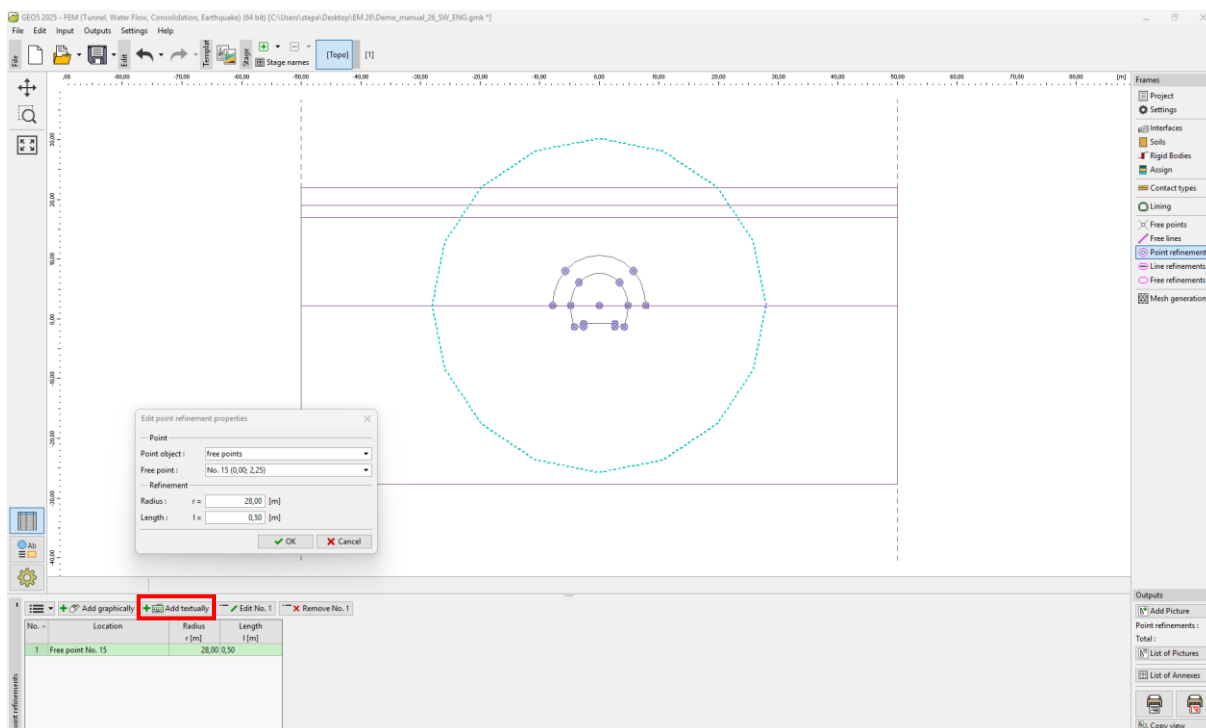
U posljednjem dijelu topologije konstrukcije generirat ćemo mrežu konačnih elemenata i povećati njenu gustoću.

Topologija (3. dio): generiranje mreže konačnih elemenata i povećanje njene gustoće

Mreža konačnih elemenata značajno utječe na rezultatne vrijednosti proračuna. Prije samog generiranja mreže, povećat ćemo gustoću na prostoru iskopa (oko točke Br. 15) s duljinom ruba elemenata $l = 0.5 \text{ m}$ i radijusom doseg $r = 28 \text{ m}$.

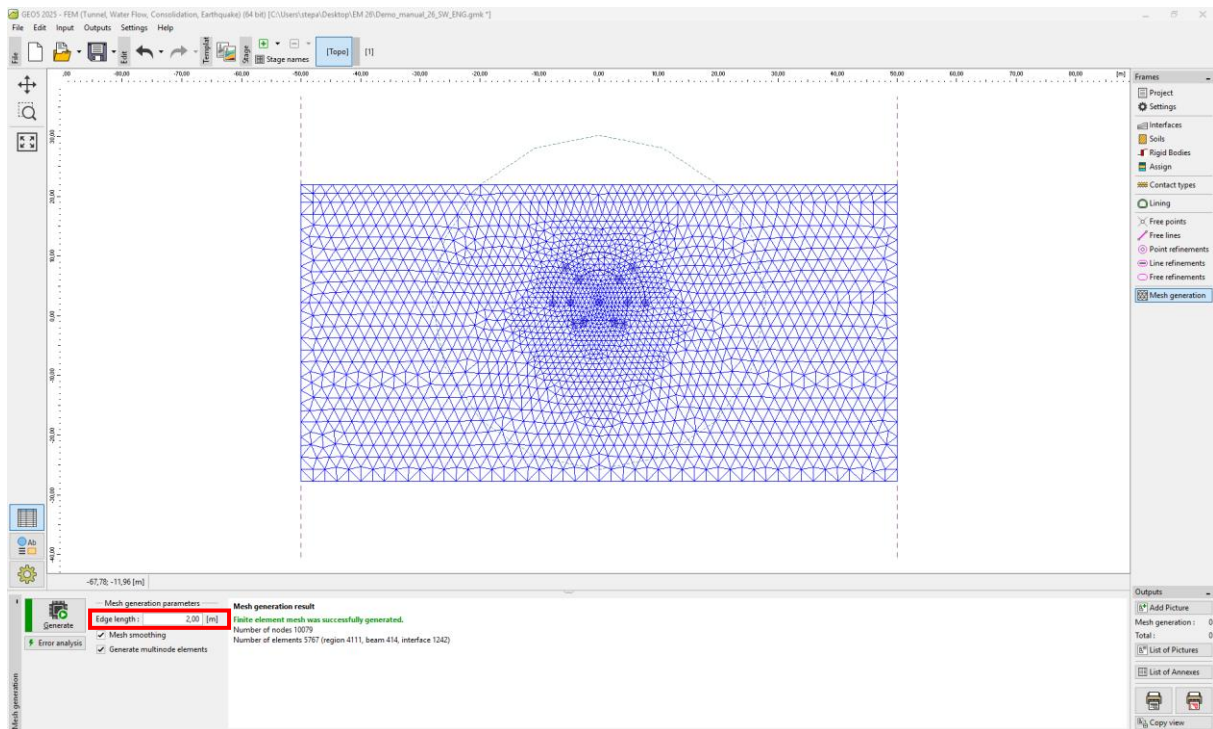
U kartici “Point refinements” klikom na tipku “Add graphically” ili “Add textually”, odabiremo točku Br. 15 i postavljamo $r = 28 \text{ m}$ i $l = 0,5 \text{ m}$.

Napomena: Kroz ovaj korak osigurat ćemo dovoljno gustu mrežu u okolini područja od interesa (iskopanog otvora). Proces povećanja gustoće slobodnih točaka ili linija detaljnije je opisan u Poglavlju 23: Proračun obloge za skupljanje vode (za više detalja pogledajte <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).



“New point refinements” dijaloški prozor

Nakon toga direktno nastavljamo s generiranjem mreže konačnih elemenata. U kartici “Mesh generation”, postaviti ćemo duljinu ruba elemenata na 2.0 m i odabrati “Mesh smoothing” opciju.



Kartica “Mesh generation” – Ugladivanje točaka u blizini područja iskopa (duljina 0.5 m)

Napomene za proceduru modeliranja konstrukcije:

U ovom dijelu priručnika predstavljamo važne napomene vezane uz sam postupak izgradnje radi lakšeg pregleda – materijal primarne obloge tunela, sekvencu iskopa (pojedinačne iskope). Ove informacije su korisne za numeričko modeliranje našeg primjera jer se neki ulazni podaci ponavljaju (npr. iskopi).

Napomena: Faze izgradnje uzimaju u obzir proces tuneliranja. Da bismo mogli sastaviti pojedine faze izgradnje, potrebno je znati materijal primarne obloge tunela, sekvencu iskopa te hidrogeološke uvjete koji će se pojaviti tijekom iskopa tunela.

*Projektirat ćemo **primarnu oblogu** debljine 200 mm od C 20/25 mlaznog betona. U numerički model ćemo uvesti samo mlazni beton te utjecaj povećanja čvrstoće i modula elastičnosti tijekom vremena (pogledajte Tablicu 6).*

Tablica 6 – Vrijednosti modula elastičnosti za mlazni beton (razvoj kroz vrijeme)

Sazrijevanje mlaznog betona	Modul elastičnosti	Modul posmika
	E_{cm} [MPa]	G [MPa]
Nezreli beton	2 900	1 134
Zreli beton	29 000	11 340

Napomena: Iskop tunela modelira se kao 2D problem, što ne omogućuje u potpunosti prikaz prostorne promjene naprezanja u stijenskom masivu koje se javljaju tijekom iskopa u području čela iskopa. Tijekom izvođenja iskopa, privremeno nepoduprti iskopani otvor podupiru jezgra napredovanja čela (uzdužni i poprečni stijenski luk) te dio iskopa koji je prethodno poduprt potpornom konstrukcijom. Ovo ponašanje može se točno opisati samo 3D modelom; u 2D modelu ponašanje u smjeru napredovanja iskopa rješava se samo približno.

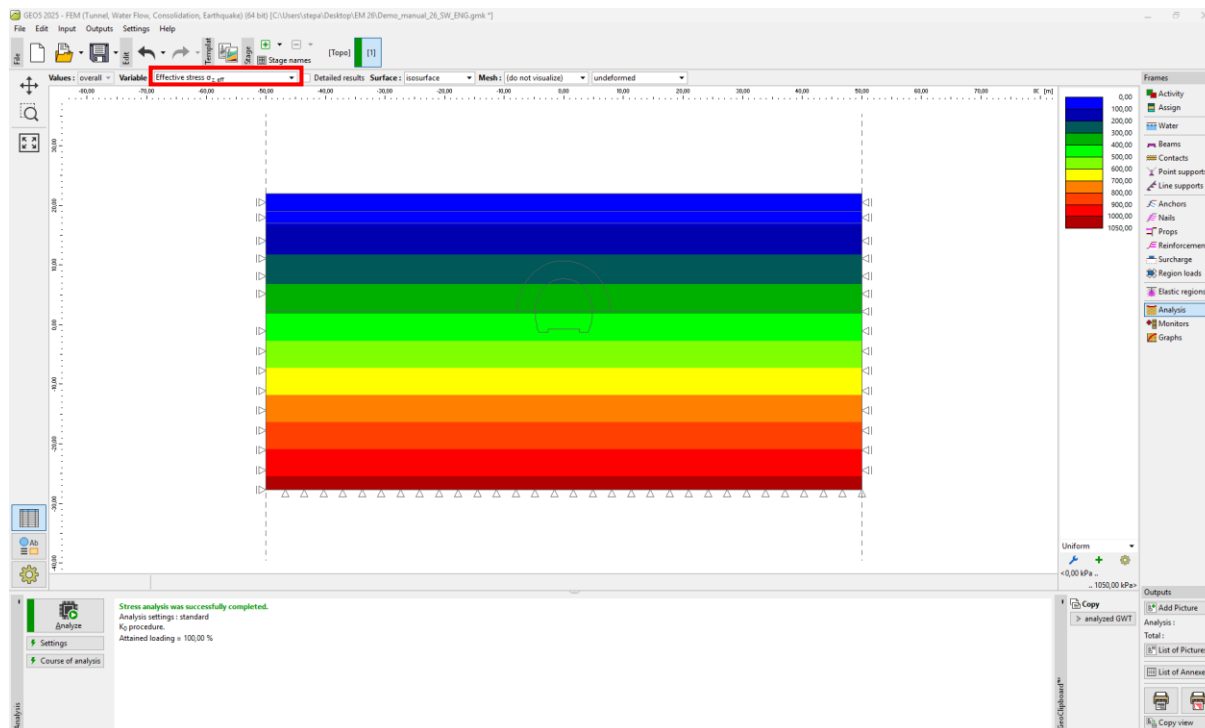
Metoda koja se najčešće koristi u inženjerskoj praksi (općenito poznata kao λ metoda ili β metoda), pretpostavlja da se primarno naprezanje masiva (tj. izvorno naprezanje σ_0 koje djeluje prije iskopa u okolini budućeg iskopanog otvora), postupno mijenja tijekom vremena prema relaciji $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ (za primarno stanje naprezanja $\beta = 1$). Ako promjenu primarnog naprezanja modeliramo u dvije faze proračuna (faze izgradnje), u prvoj fazi, neosigurani iskopani otvor opterećen je vrijednošću $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$, a u drugoj fazi, uzima se u obzir preostalo opterećenje $\beta \cdot \sigma_0$.

U slučaju sekvencijalnog sustava iskopa, ovaj postupak mora se primijeniti odvojeno za svaki pojedini iskopni odsjek. Vrijednost koeficijenta β ovisi o geologiji stijenskog masiva, dužini napredovanja po ciklusu i veličini iskopanog profila, a njezino određivanje može biti prilično složeno.

U GEO5 – MKE ovaj postupak je predstavljen tzv. iskopom (Excavation). Za potrebe numeričkog modeliranja, procijenili smo vrijednost $\beta = 0.6$ za jednokolosiječni profil, i to za gornji iskopni odsjek (top heading) i donji odsjek (bench).

Faza izgradnje 1: primarno stanje geostatičkih naprezanja

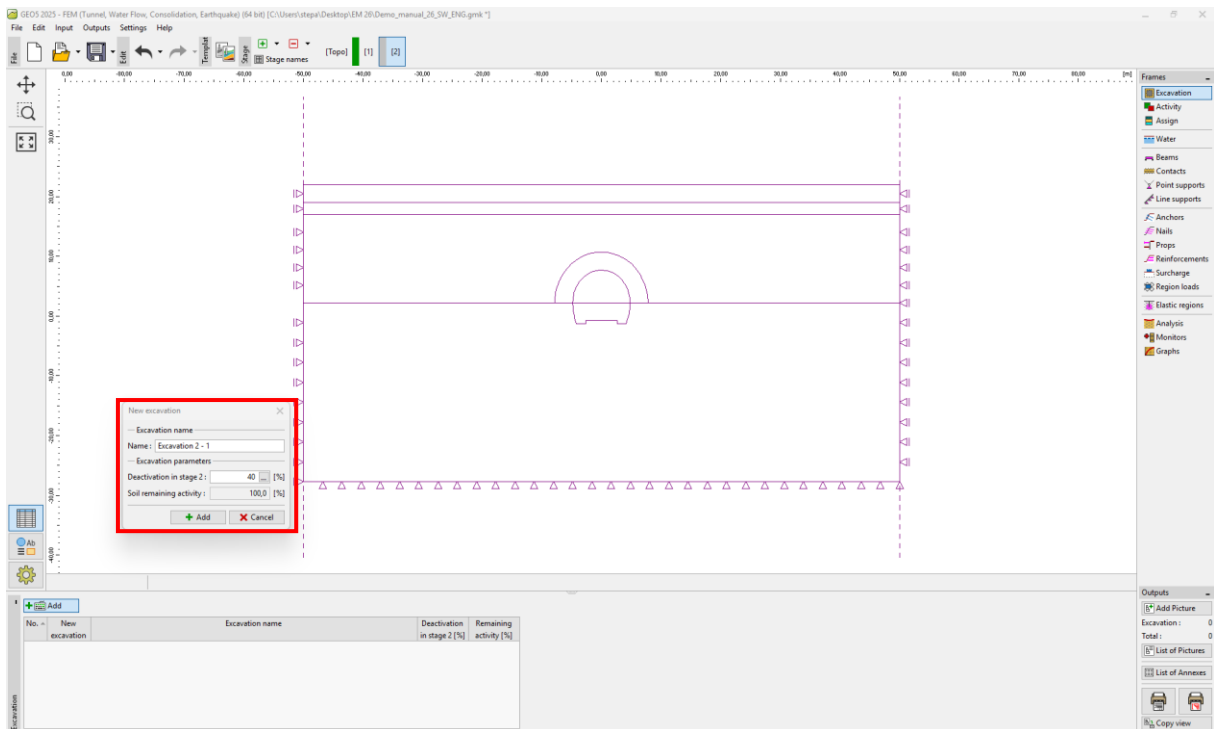
Nakon generiranja mreže elemenata prelazimo na fazu izgradnje 1 i provodimo proračun primarnog stanja geostatičkih naprezanja masiva. Ostavit ćemo "Standard" postavke proračuna za sve faze izgradnje (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 1 (primarno geostatičko naprezanje $\sigma_{z,eff}$)

Faza izgradnje 2: iskop gornjeg odsjeka, aktivacija nepoduprtog iskopa

U sljedećem koraku, dodajemo fazu izgradnje 2. U kartici "Excavation", dodajemo novi iskop i postavljamo deaktivaciju na 40%, zatim u kartici odradite iskop za područje Br. 5.



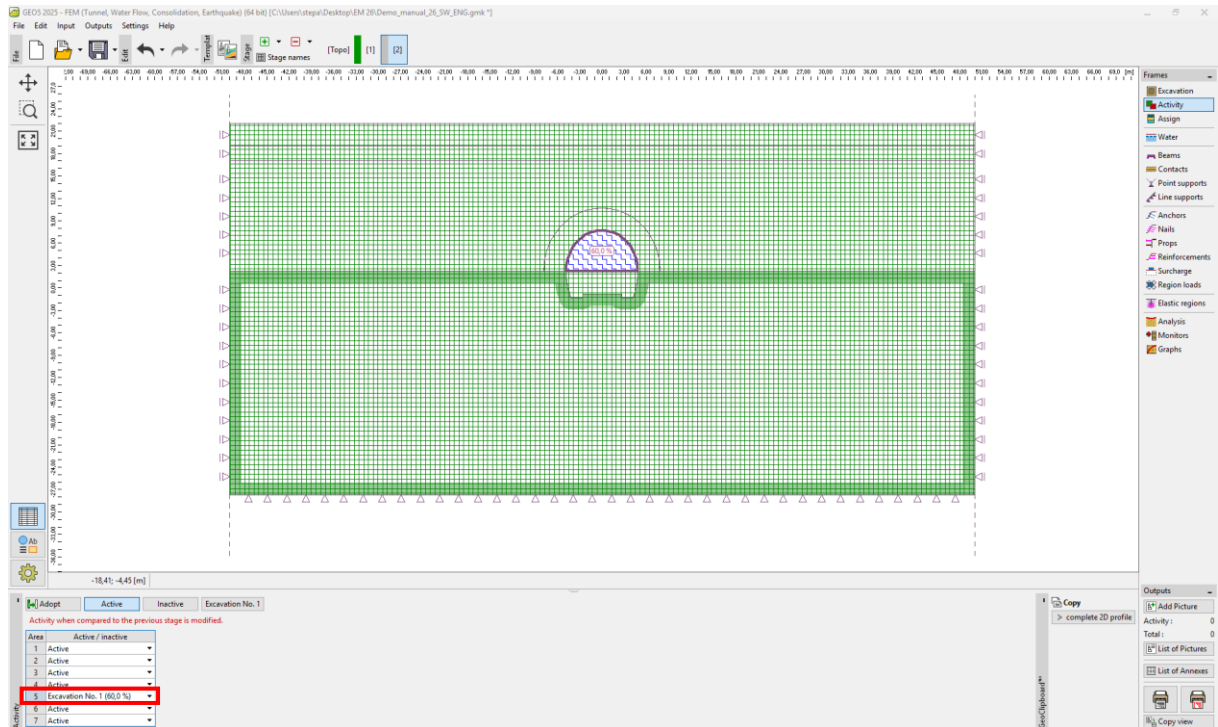
“New excavation“ dijaloški prozor – Faza izgradnje 2

Napomena: U inženjerskoj praksi, sekvenca iskopa (pojedinačni iskopi) određuje se postotkom deaktivacije stijene u odnosu na preostalo djelovanje stijene. U ovom primjeru, za pojedine faze izgradnje tunela, uzimamo sljedeće udjele iskopa:

- Iskop gornjeg odsječka, aktivacija nepoduprtog iskopanog otvora: 40 % / 60 %
- Podupiranje svoda gornjeg odsječka primarnom oblogom od nezrelog betona: 30 % / 30 %
- Poboljšanje svojstava materijala zrelog betona (gornji odsječak): 30 % / 0 %
- Modeliranje iskopa donjeg odsječka (bench), aktivacija nepoduprtog iskopanog otvora: 40 % / 60 %
- Podupiranje bočnih zidova donjeg odsječka primarnom oblogom od nezrelog betona: 30 % / 30 %
- Poboljšanje svojstava materijala zrelog betona (donji odsječak): 30 % / 0 %

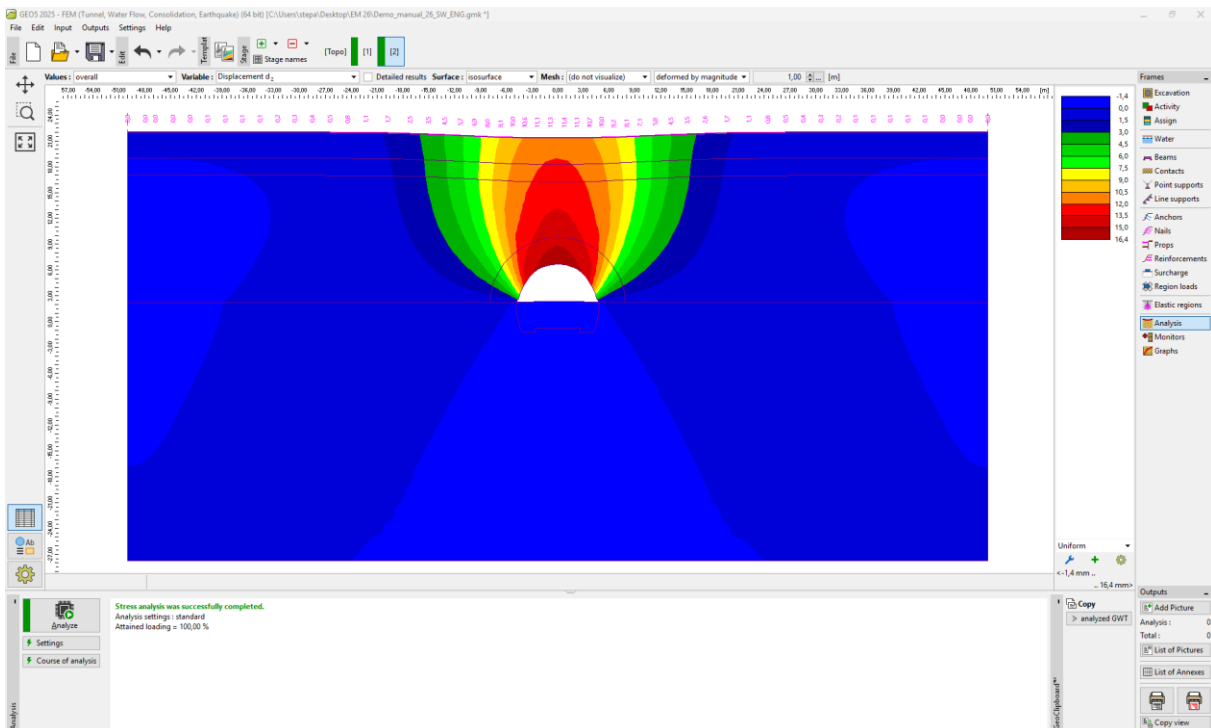
Gore navedeni postotni omjeri temelje se na godinama iskustva i daju relativno pouzdane rezultate. U programu je moguće postaviti različite postotne omjere iskopa za određene faze izgradnje (npr. 25/75, 30/45, 30/15 i 15/0) za iskop gornjeg odsječka ili donjeg odsječka (bench).

U suštini, riječ je o aktivaciji postotnog omjera opterećenja koje djeluje na nepoduprti gornji odsječak. U ovoj fazi uzimamo u obzir 40 % deaktivacije tla (pogledajte sliku).



Kartica "Activity" – Faza izgradnje 2 (aktivnost od 40 % opterećenja na iskop gornjeg odječka)

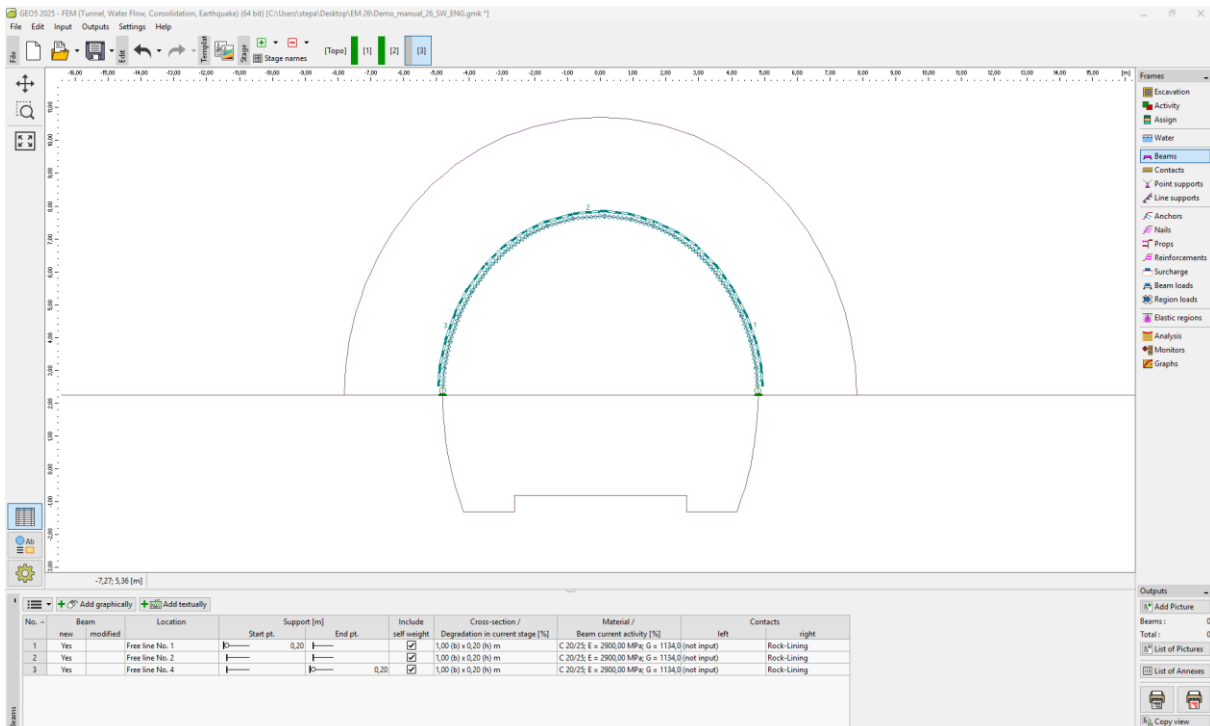
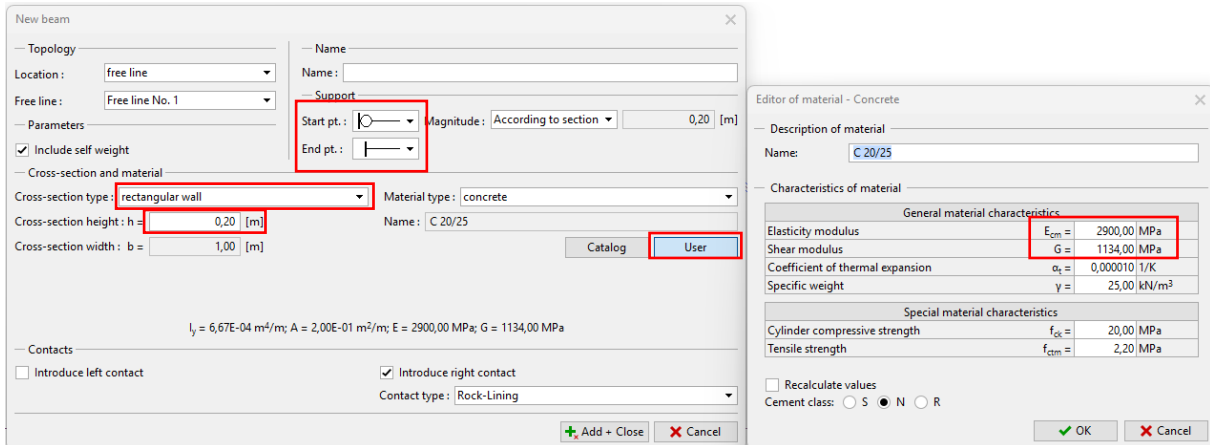
Sad ćemo provesti proračun i pregledati rezultate vertikalnih pomaka d_z [mm]. Za bolje razumijevanje ponašanja iskopa, prikazat ćemo deformiranu mrežu i slijeganje jarka.



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 2 (vertikalni pomaci d_z sa slijeganjem jarka)

Faza izgradnje 3: podupiranje svoda gornjeg odječka primarnom oblogom od nezrelog betona

U sljedećem koraku, dodajemo fazu izgradnje 3. Najprije ćemo modelirati podupiranje svoda gornjeg odsječka s 200 mm debelom primarnom oblogom od nezrelog betona ($E = 2900 \text{ MPa}$, $G = 1134 \text{ MPa}$), u kartici "Beams", klikom na tipku "Add graphically", odabiremo dijelove obloge i postavljamo parametre.

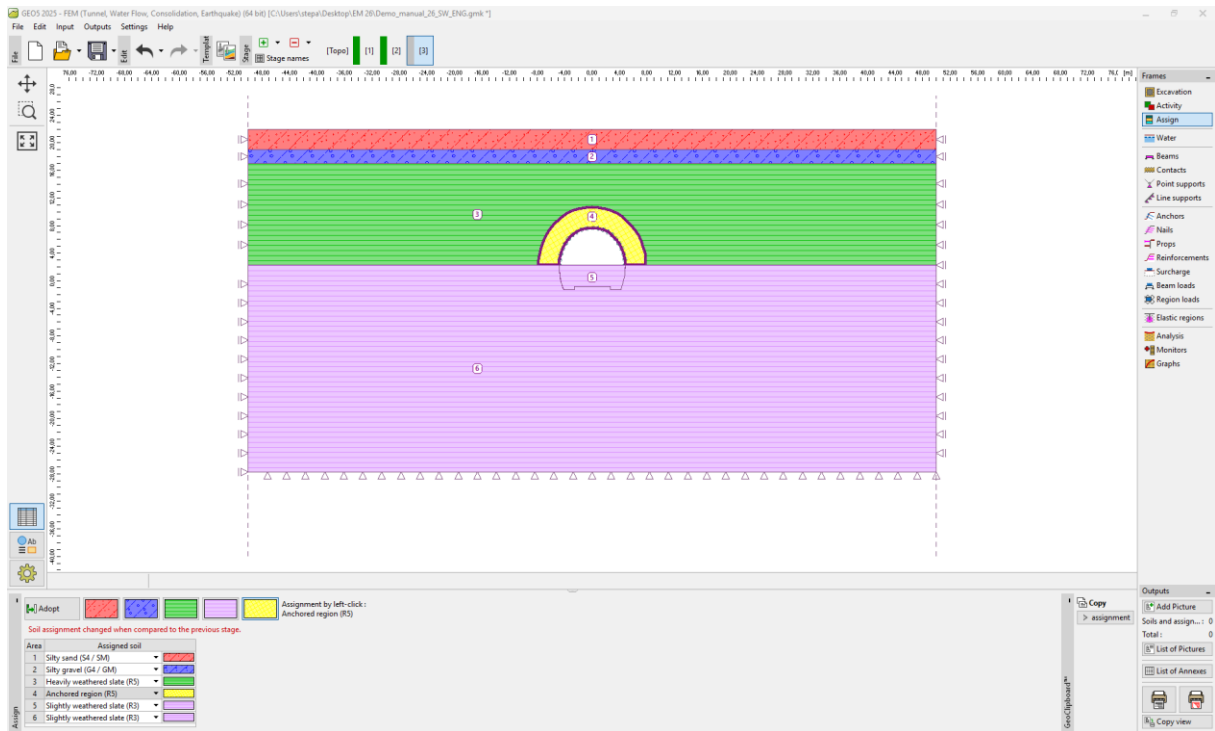


Unos primarne obloge gornjeg odječka pomoću novih greda – Faza izgradnje 3 (nezreli beton)

Napomena:

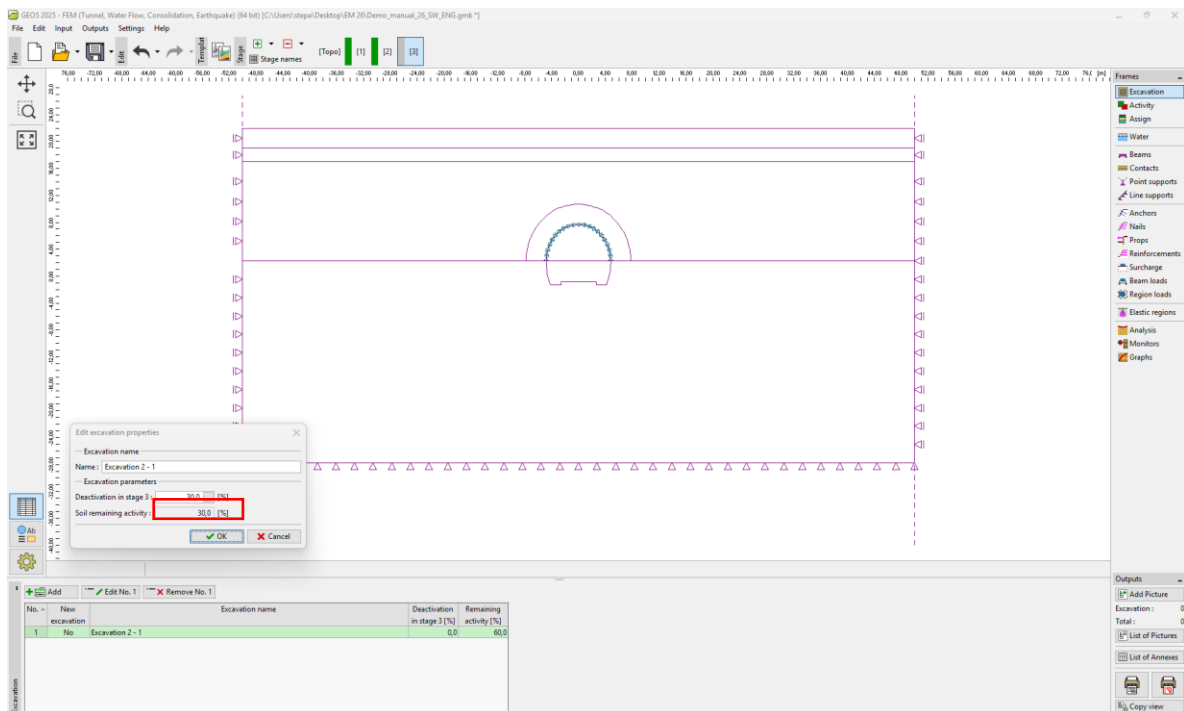
Smatramo da su krajevi greda modelirani kao oslonci (foot) na oba kraja, što znači da su momenti savijanja na donjim krajevima greda jednaki nuli. Oslonac (foot) je posebna vrsta završetka grede koja osigurava stabilnost i konvergenciju u proračunu (za više detalja pogledajte Help – F1).

U kartici “Assign” promijenit ćemo stijenu u području Br. 4 (na opciju “anchored R5”), u kojem ćemo uzeti u obzir sidrenje s hidraulički proširivim sidrima (pogledajte sliku).



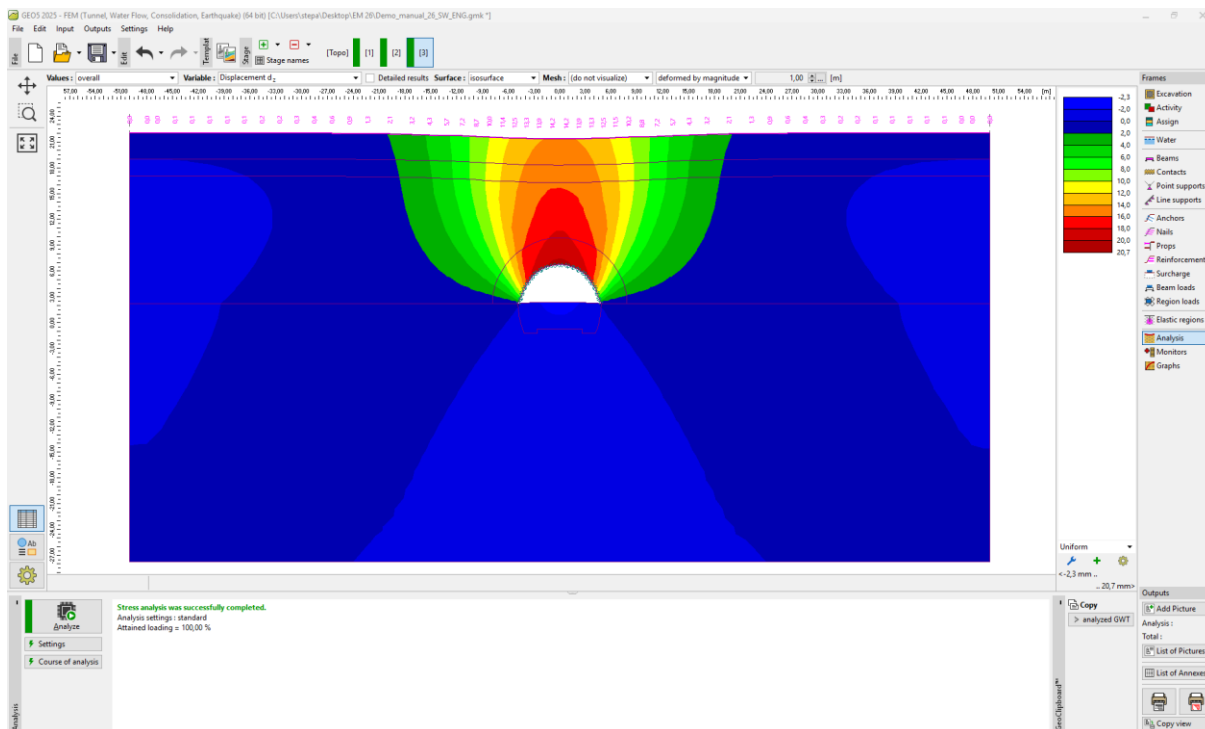
Kartica “Assign” – Faza izgradnje 3 (područje usidreno s hidraulički proširivim sidrima)

Nakon toga ćemo aktivirati sidra u stijenskom masivu ojačanom sidrima u okolini iskopa gornjeg odsjeka, te ćemo urediti svojstva iskopa dodavanjem 30 % opterećenja (koristeći tipku “Edit”).



“Edit excavation properties” dijaloški prozor – Faza izgradnje 3

Zatim ćemo ponovno pokrenuti proračun.



Kartica “Analysis” – Faza izgradnje 3 (vertikalni pomaci d_z sa slijeganjem jarka)

Faza izgradnje 4: poboljšanje karakteristika materijala zrelog betona (gornji odječak)

U fazi izgradnje 4, poboljšat ćemo karakteristike materijala već sazrelog betona koji podupire gornji odsječak. U kartici “Beam”, mijenjamo dijelove obloge i kliknemo na tipku “Edit” te u dijaloškom prozoru “Modify beam properties”, odabiremo opciju “Strengthening” te postavljamo vrijednosti modula elastičnosti ($E = 29000 \text{ MPa}$, $G = 11340 \text{ MPa}$). Ostale parametre ćemo ostaviti nepromijenjenima.

Edit beam properties

— Topology

Location:

Free line:

— Parameters

Include self weight

— Cross-section and material

Beam parameters in stage input 3
 rectangular wall 1,00 (b) x 0,20 (h) m
 concrete C 20/25; E = 2900,00 MPa; G = 1134,00 MPa; $\alpha = 0,000010$
 $1/K; \gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$

Beam parameters in the previous stage 3
 h = 0,20 m
 E = 2900,00 MPa
 G = 1134,00 MPa

Type of change:

Cross-section height: h = [m]

Elastic modulus: E = [MPa]

Shear modulus: G = [MPa]

$I_y = 6,67E-04 \text{ m}^4/\text{m}; A = 2,00E-01 \text{ m}^2/\text{m}; E = 29000,00 \text{ MPa}; G = 11340,00 \text{ MPa}$

— Contacts

Change parameters

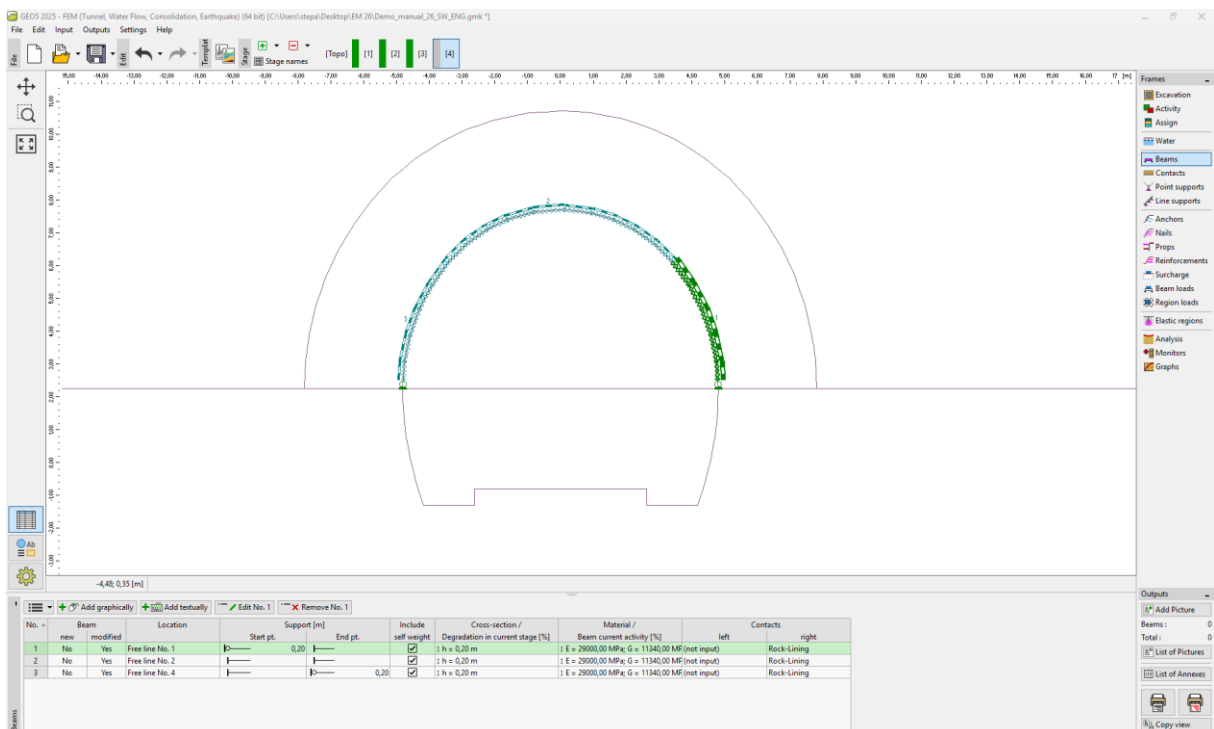
Introduce left contact

Introduce right contact

Contact type:

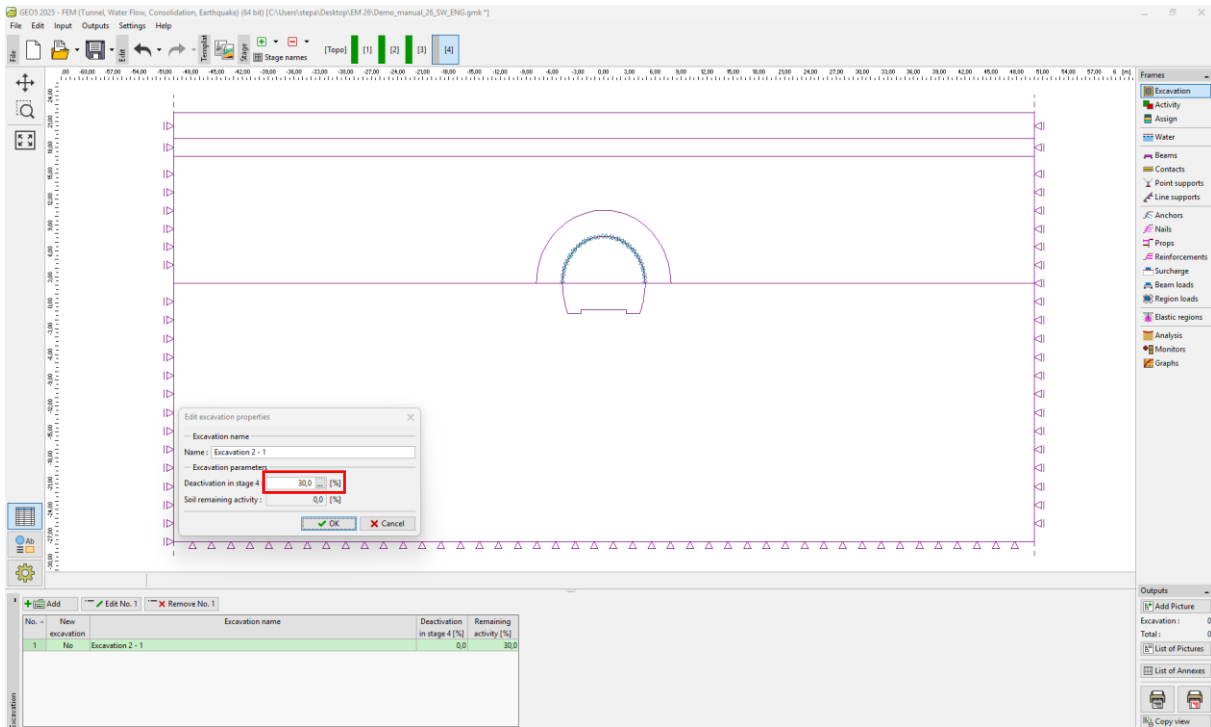
OK + OK Cancel

“Modify beam properties“ dijaloški prozor – Faza izgradnje 4 (greda br. 2)



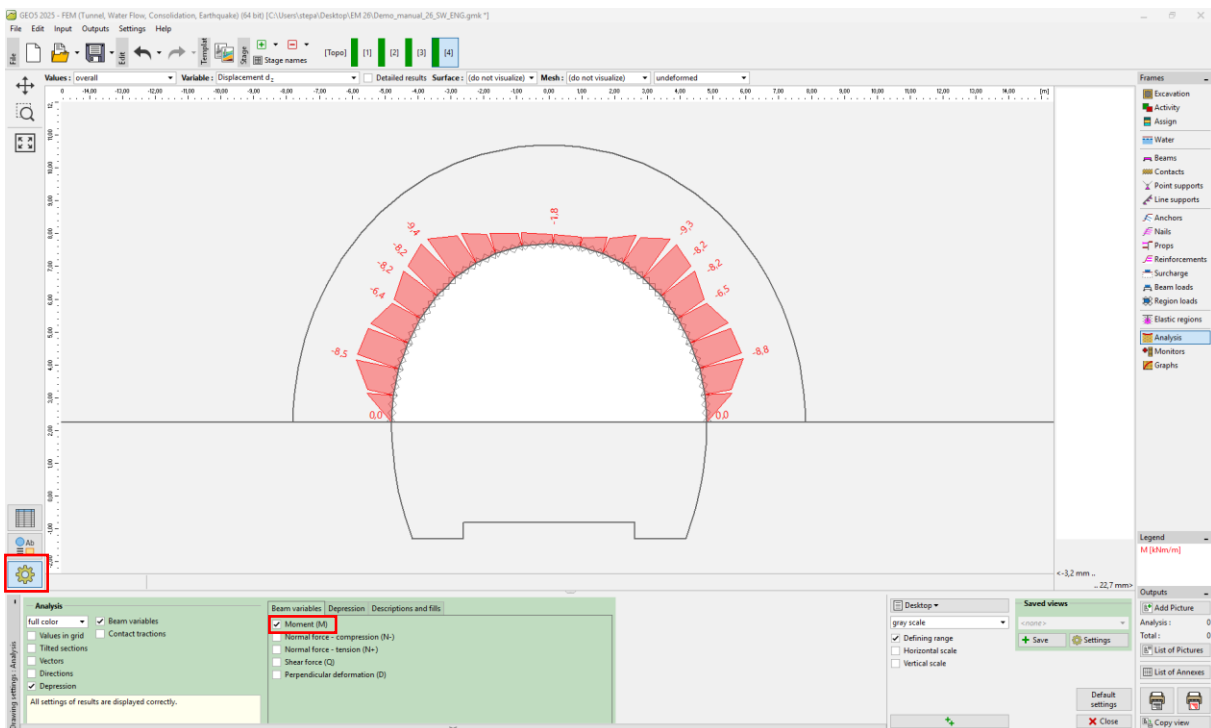
Modifikacija svojstava primarne obloge (gornji odječak) – Faza izgradnje 4 (zreli mlazni beton)

Aktivirat ćemo preostalih 30 % opterećenja koje djeluje na stijenski masiv. Postupak uređivanja svojstava iskopa je sličan onome iz prethodnih faza izgradnje.



“Edit excavation properties” dijaloški prozor – Faza izgradnje 4

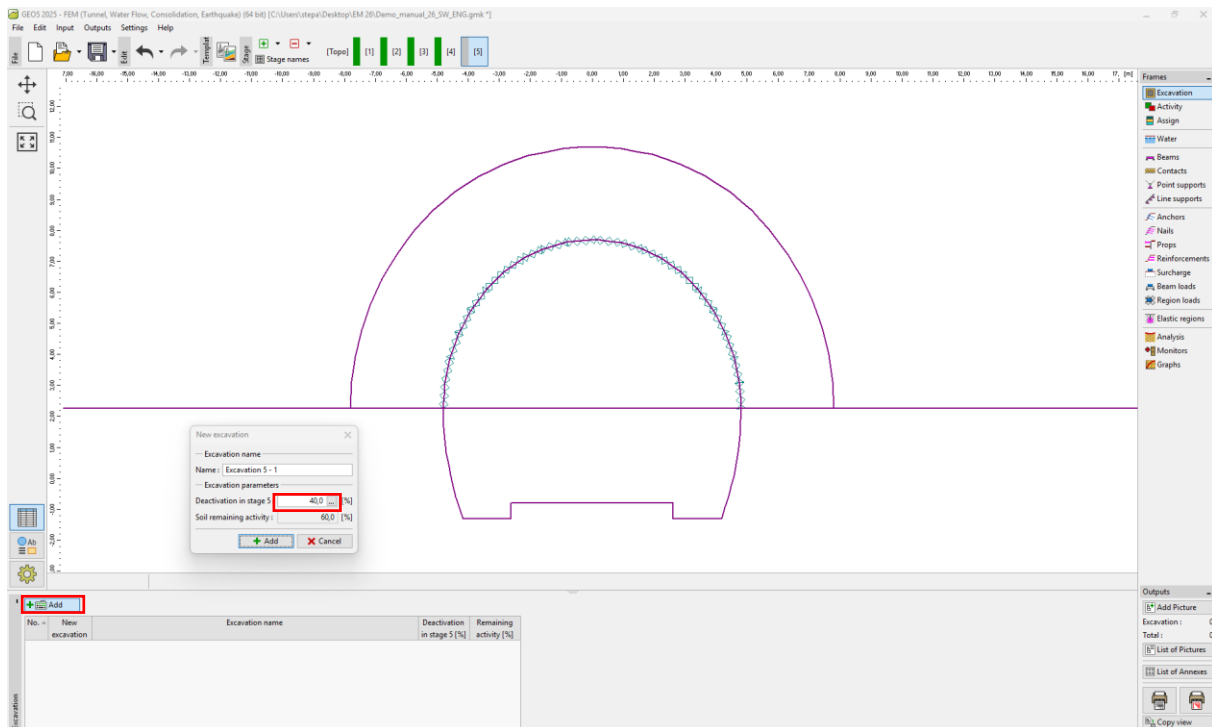
Nakon toga ćemo provesti proračun i pregledati krivulju momenta savijanja po konturnoj liniji gornjeg odječka.



Kartica “Analysis” – Faza izgradnje 4 (moment savijanja M [kNm/m])

Faza izgradnje 5: modeliranje donjeg odječka tunela (bench), aktivacija nepoduprtog otvora iskopa

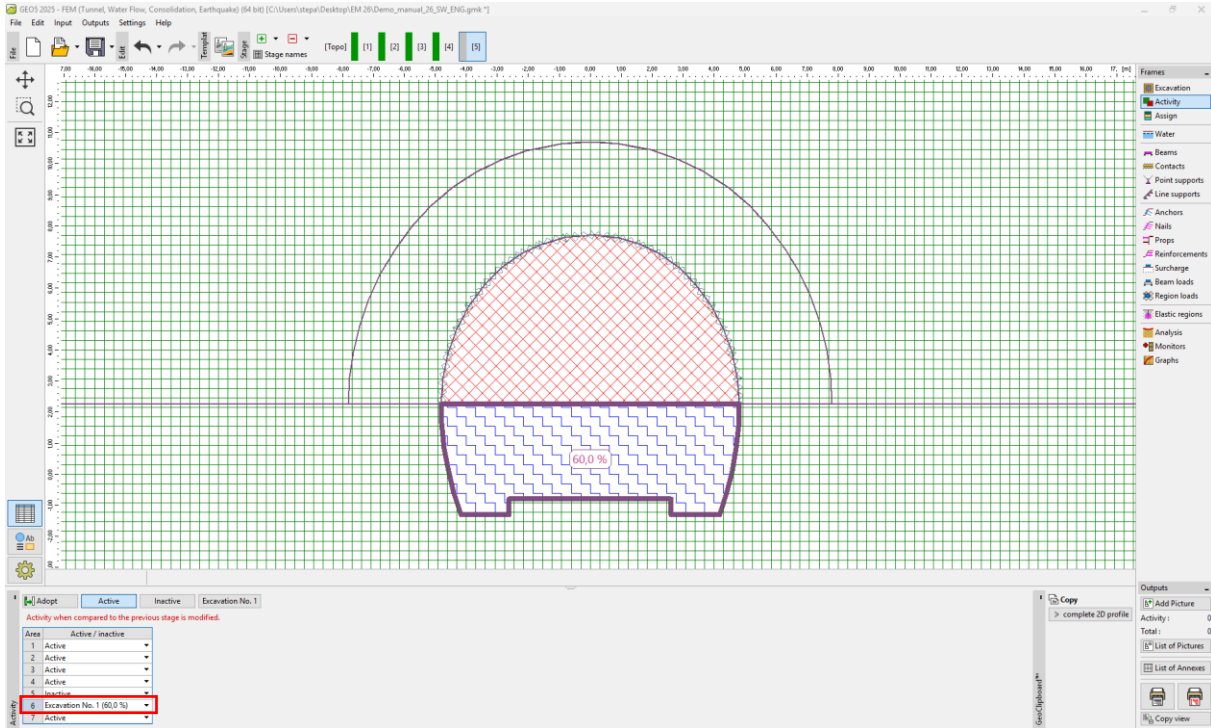
U sljedećem koraku dodat ćemo fazu izgradnje 5. U ovoj fazi izgradnje uzet ćemo u obzir deaktivaciju tla, tj. djelovanje od 40% opterećenja. Preostalo djelovanje tla ili masiva u okruženju iskopa donjeg dijela tunela je prema ovome 60%. U kartici “Excavation”, dodajemo “Excavation 5 – 1” i postavljamo deaktivaciju na 40%.



“New excavation” dijaloški prozor – Faza izgradnje 5

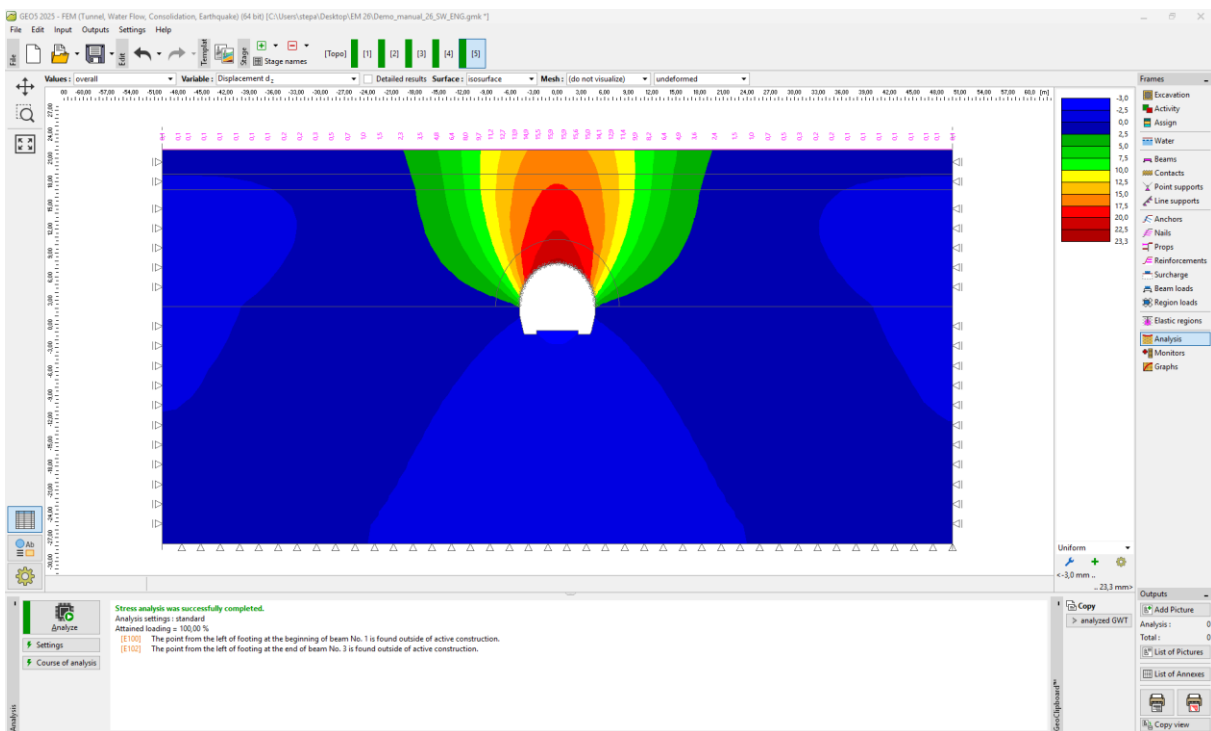
Napomena: Modeliranje ovog problema u sljedećim fazama izgradnje provodi se na sličan način. Prvo se izrađuje primarna obloga donjeg odsječka (bench) pomoću nezrelog mlaznog betona. Nakon toga, aktivira se sljedeći postotni omjer opterećenja. U sljedećoj fazi poboljšavaju se materijalne karakteristike već sazrelog mlaznog betona, a zatim se aktivira preostali dio opterećenja.

U kartici “Activity”, odabiremo područje Br. 5 i dodjeljujemo ga “Excavation No. 1 (60%)”.



Kartica "Activity" – Faza izgradnje 5 (aktivnos od 40 % opterećenja na iskupu donjeg odjeka tunela (bench)

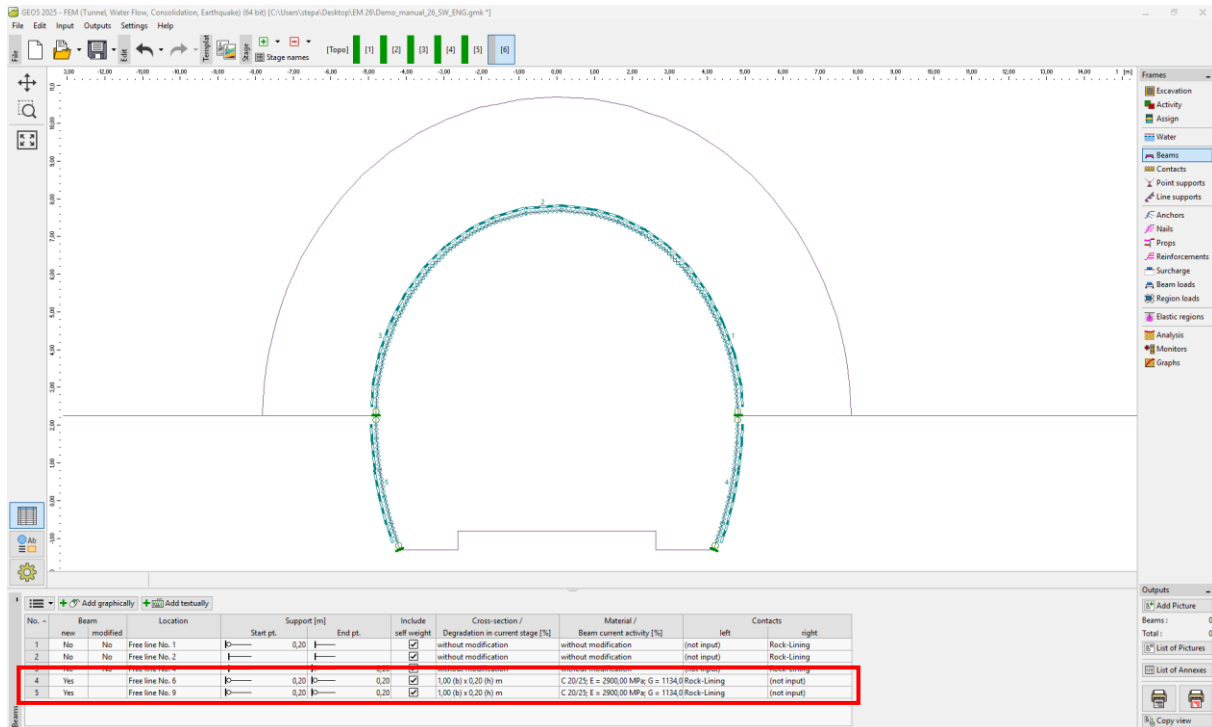
Nakon toga provodimo proračun.



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 5 (vertikalni pomaci d_z sa slijeganjem jarka)

Faza izgradnje 6: podupiranje bočnih zidova donjeg odsječka primarnom oblogom od nezrelog betona

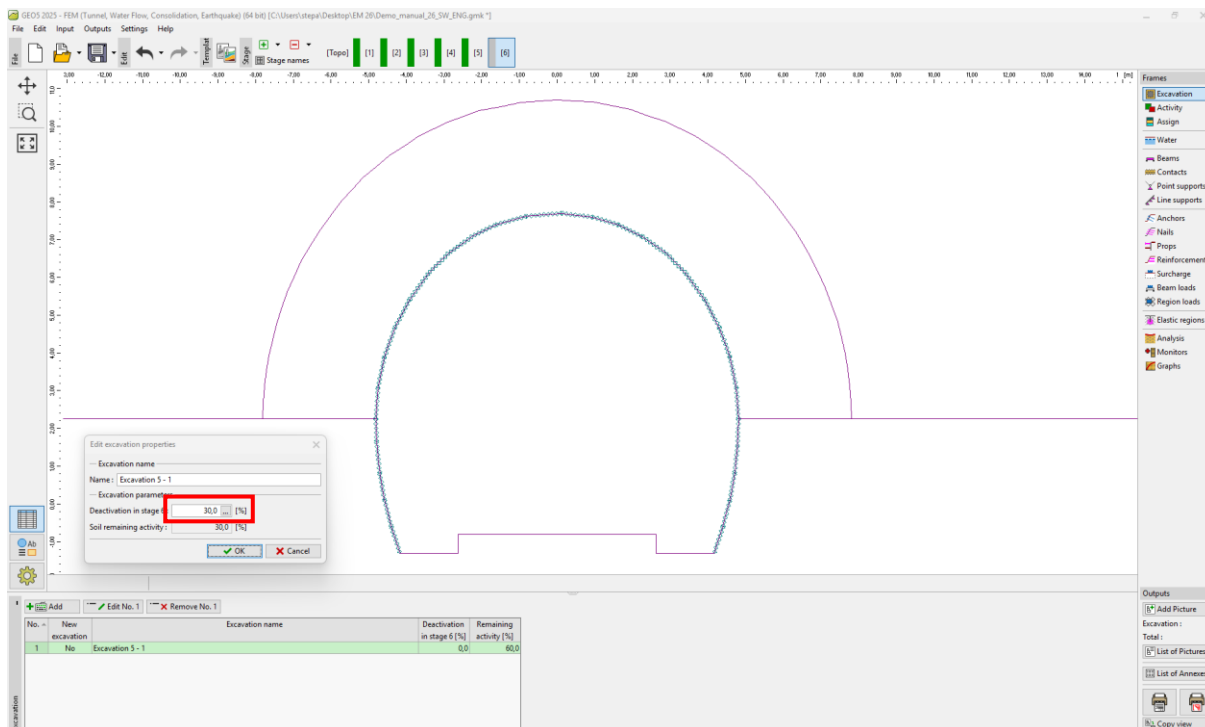
U fazi izgradnje 6 postaviti ćemo ležaj bočnih zidova donjeg odsječka s 200 mm debelom primarnom oblogom od nezrelog betona. Gornji odsječak će ostati nepromijenjen u sljedećim fazama.



Unos primarne obloge donjeg odsječka tunela s novim gredama – Faza izgradnje 6 (nezreli beton)

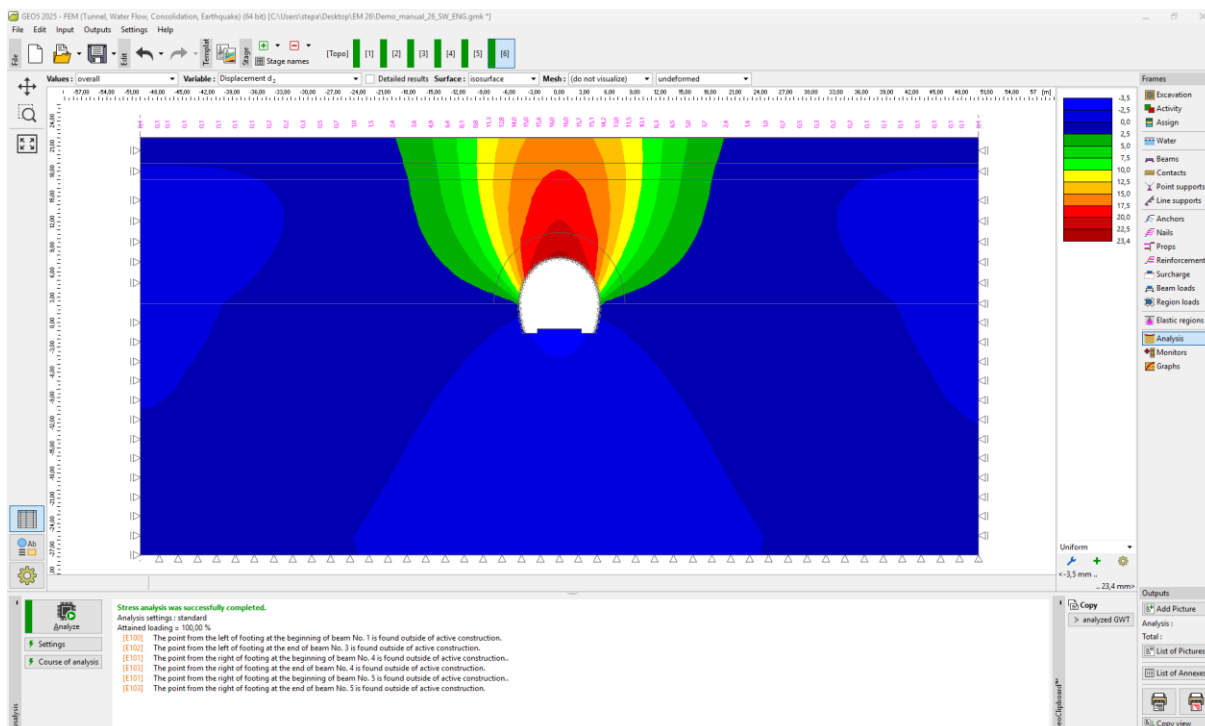
Napomena: Ponovno smatramo da grede imaju oslonac (foot) na oba kraja; kontakt između gornjeg odsječka i donjeg odsječka (bench) nije u mogućnosti prenijeti opterećenje momentom savijanja (nije riječ o potpuno kontinuiranim spojevima). Dimenzije poprečnog presjeka donjeg odsječka (bench) identične su onima zidova gornjeg odsječka, tj. $b = 1.0 \text{ m}$, $h = 0.2 \text{ m}$. Međutim, potrebno je postaviti kontakte na novim gredama na suprotan način (za više detalja pogledajte sliku), jer je orijentacija greda (bočnih zidova donjeg odsječka) negativna.

U ovoj fazi aktivirat ćemo dodatnih 30 % opterećenja uključenih u stijenski masiv.



“Edit excavation properties” dijaloški prozor – Faza izgradnje 6

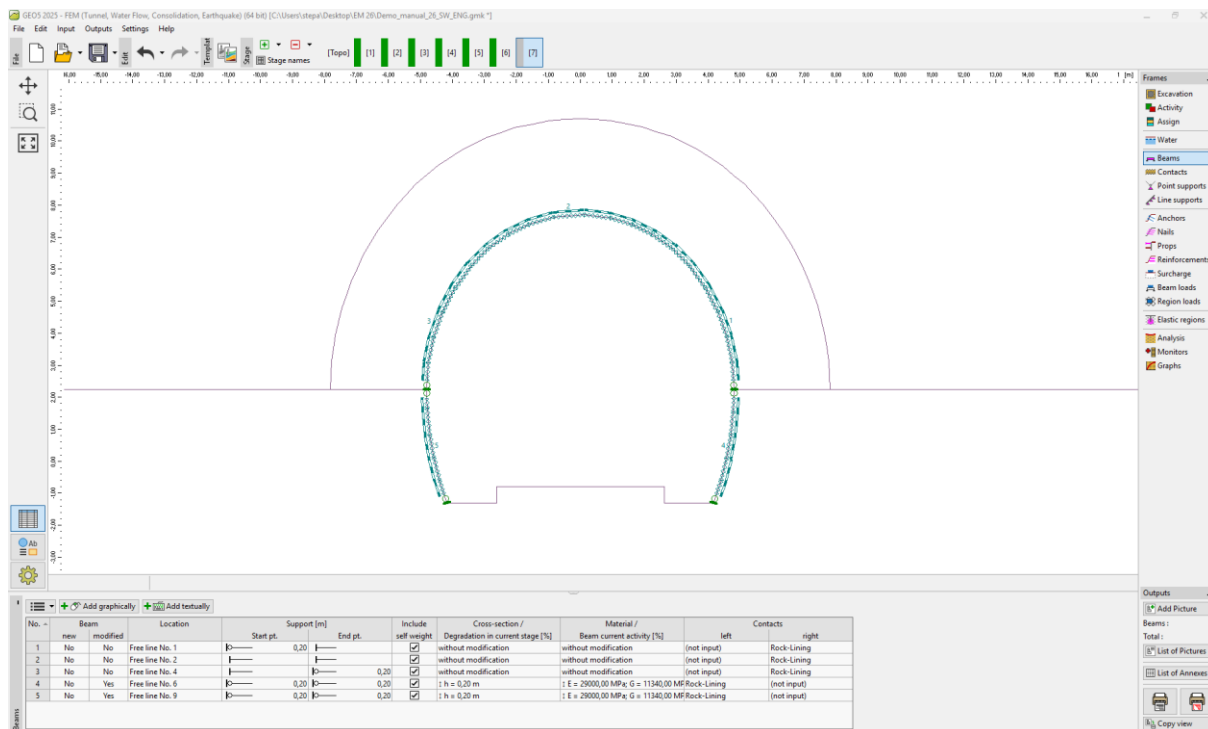
U posljednjem dijelu ove faze ponovno ćemo izvršiti proračun.



Kartica “Analysis” – Faza izgradnje 6 (vertikalni pomaci d_z sa slijeganjem jarka)

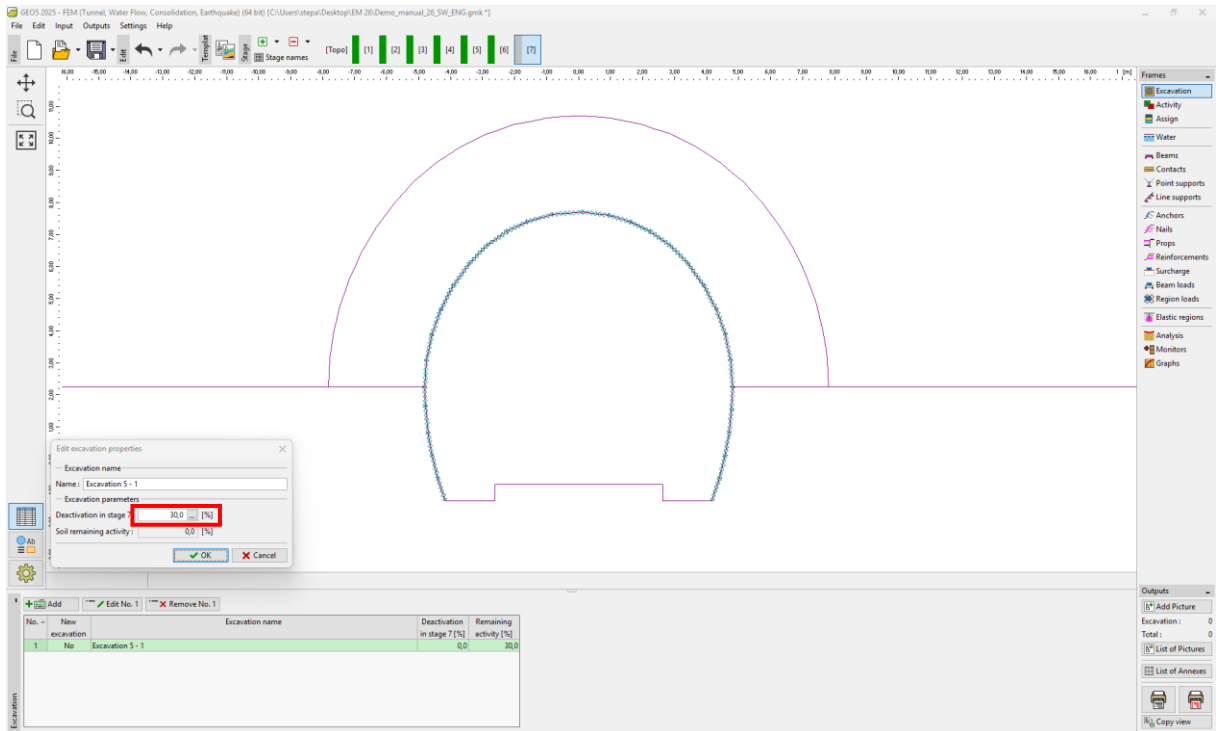
Faza izgradnje 7: poboljšanje karakteristika materijala zrelog betona (donji odsječak)

U posljednjoj fazi izgradnje, poboljšat ćemo materijalne karakteristike već sazrelog betona koji podupire iskop donjeg odsječka (bench) tunela.



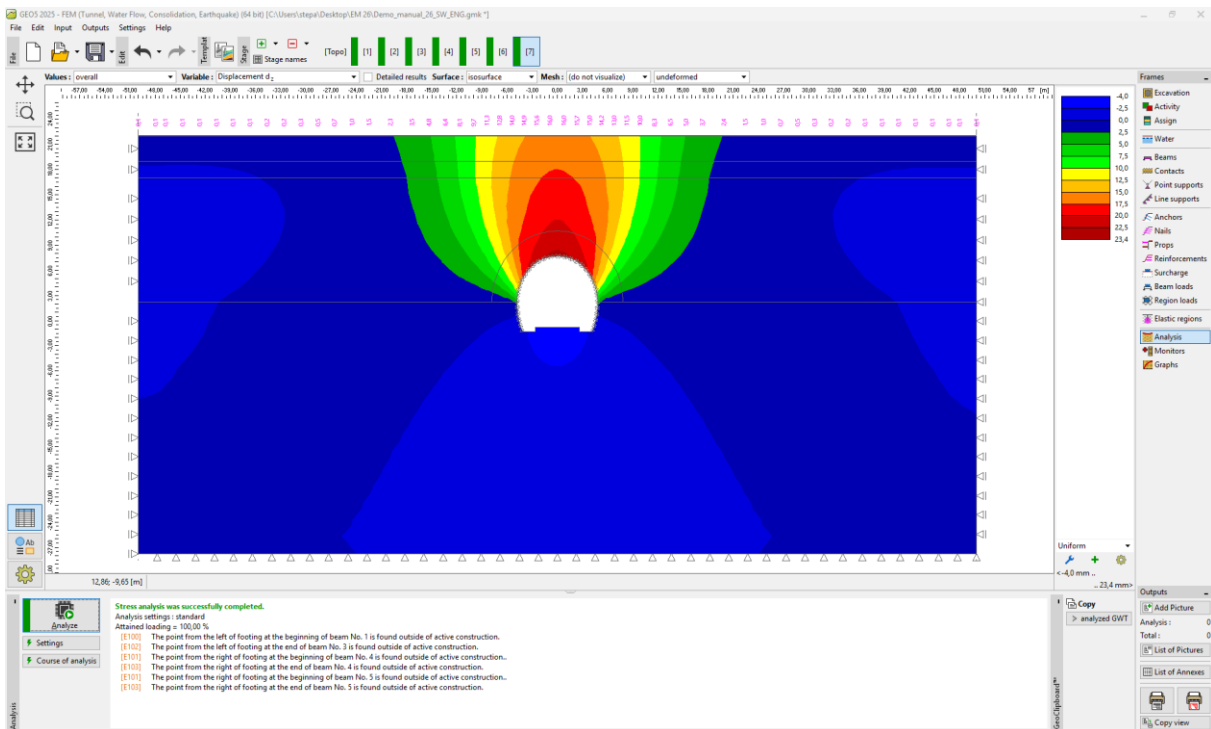
Modifikacija svojstava primarne obloge (donji odječak tunela) – Faza 7 (zreli mlazni beton)

Postupak povećanja kapaciteta greda sličan je onome koji je korišten u 4. fazi izgradnje. Aktivirat ćemo preostalih 30% opterećenja izazvanog stijenskim masivom. Ovim korakom uklanjamo svo tlo iz prostora iskopa, a opterećenje stoga djeluje na primarnu oblogu tunela (uključujući zidove gornjeg odsječka i donjeg odsječka) na 100%.



“Edit excavation properties” dijaloški prozor – Faza izgradnje 7

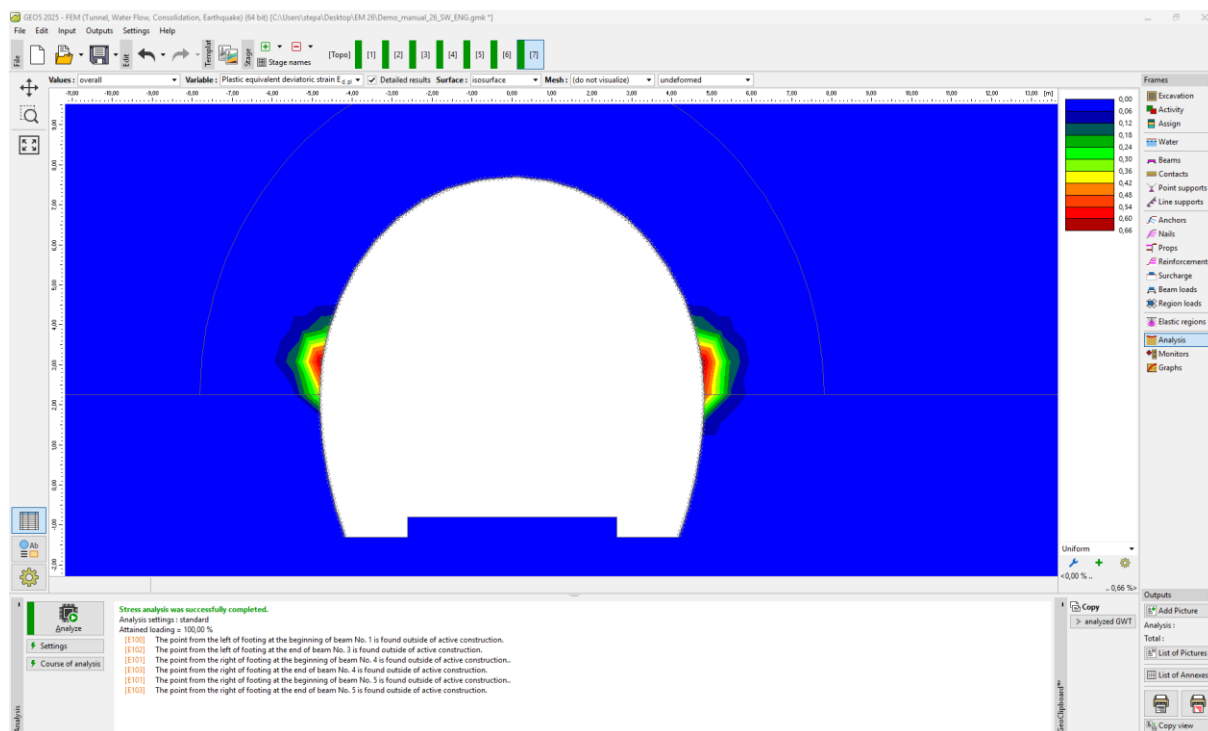
Sad ćemo provesti proračun posljednje faze izgradnje.



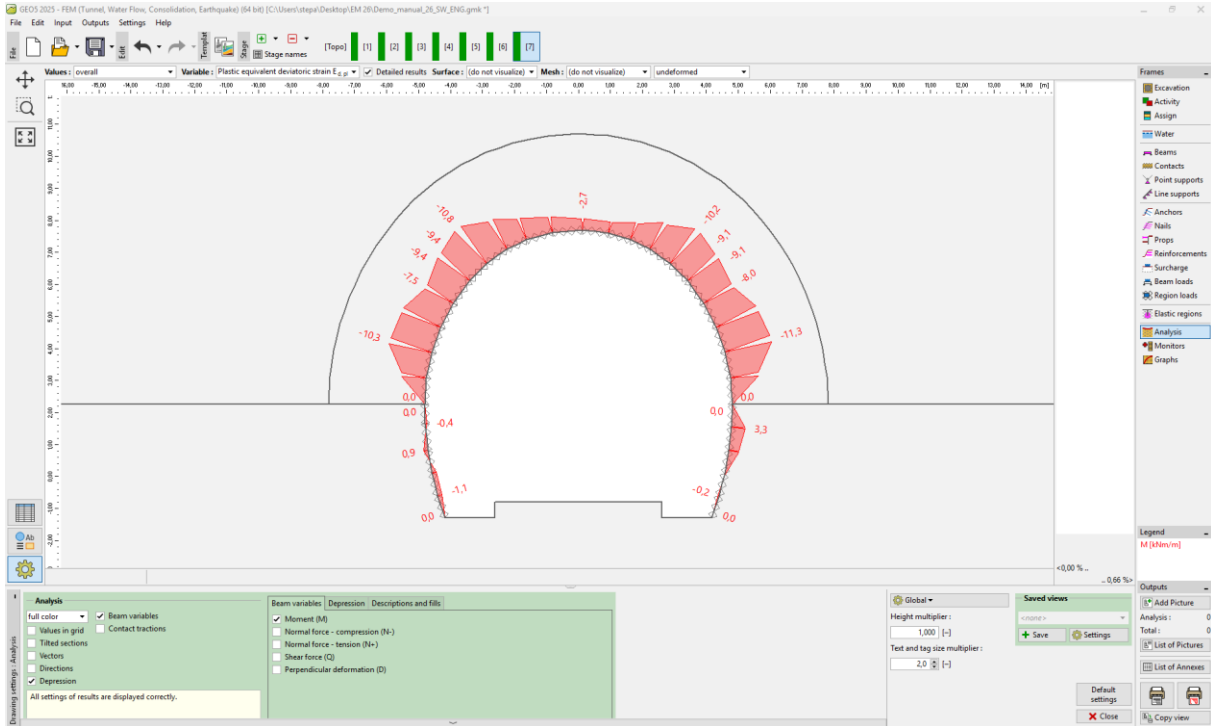
Kartica “Analysis” – Faza izgradnje 7 (vertikalni pomaci d_z sa slijeganjem jarka)

Dalje u ovoj fazi, prikazat ćemo ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ i raspodjelu unutarnjih sila za momente savijanja i normalne sile (koristeći tipku "Show", karticu "Distribution"). Rezultate ćemo zabilježiti u sažetoj tablici.

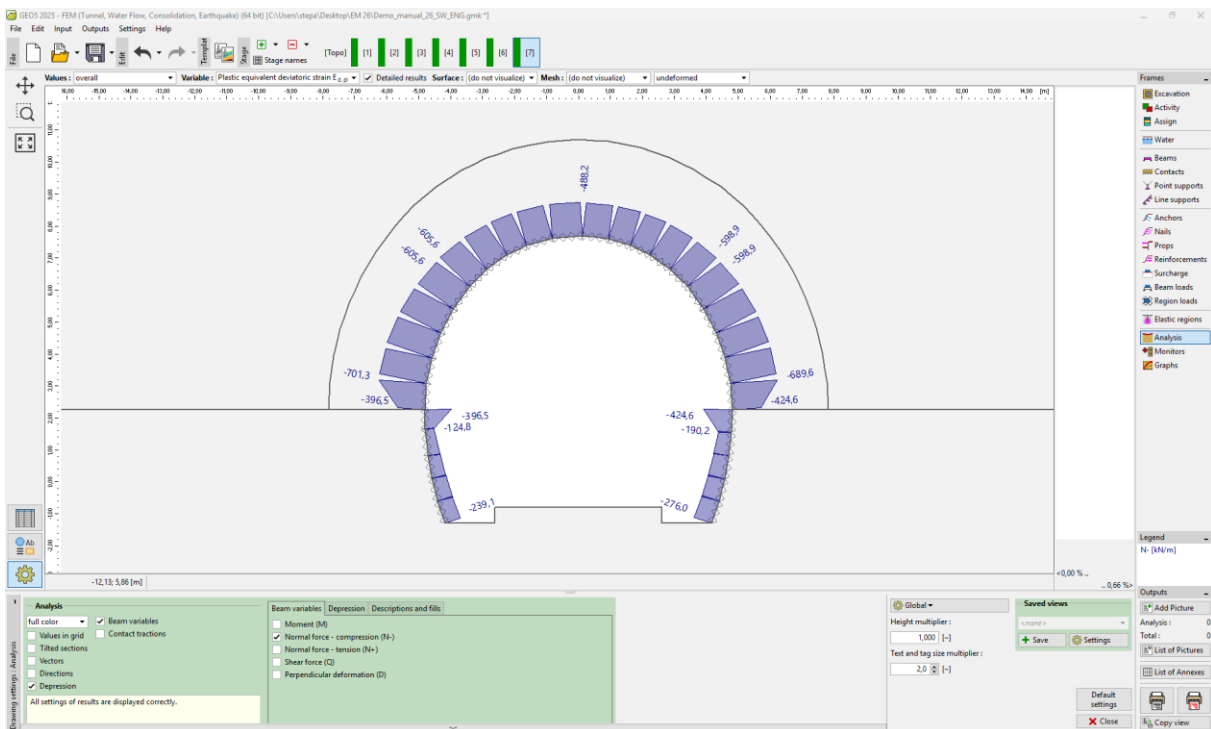
Iz sljedeće slike čini se da ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ nisu nula, što odgovara ponašanju konstrukcije prema nelinearnom modelu materijala (Mohr-Coulomb).



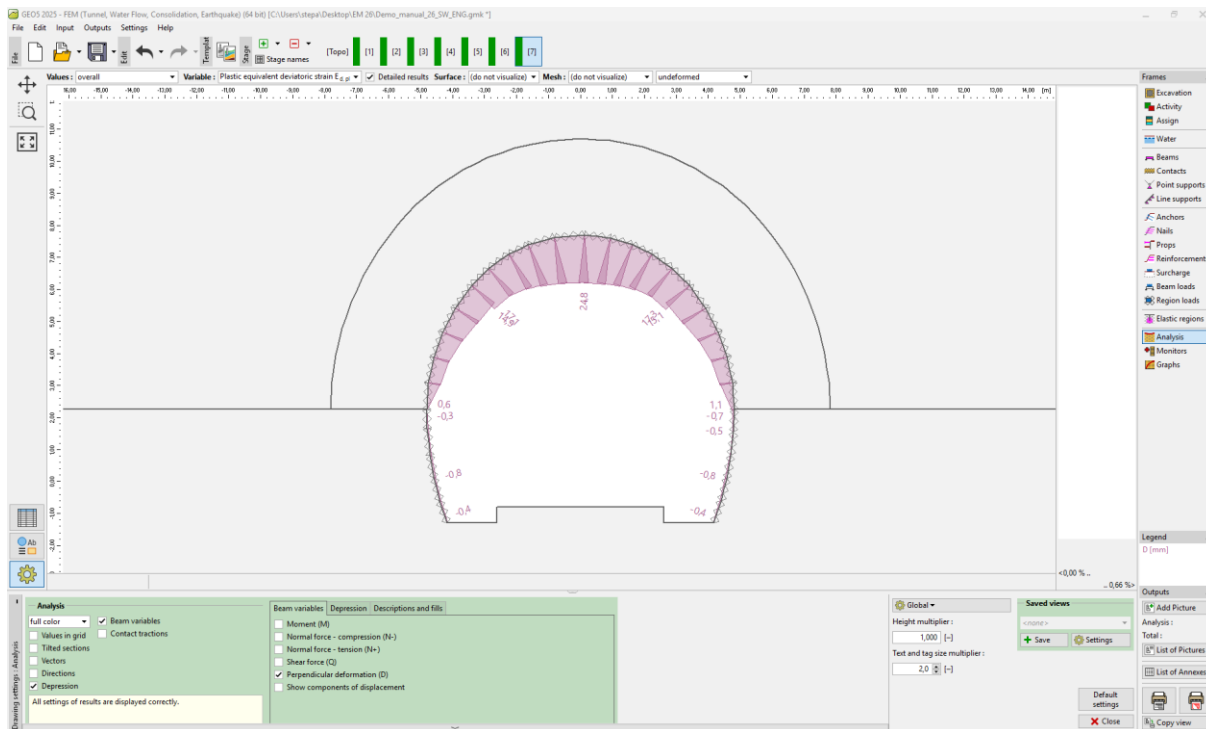
Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 7 (ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ prema Mohr-Coulomb modelu)



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 7 (moment savijanja M [kNm/m])



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 7 (normalna sila – tlak N^- [kN/m])



Kartica "Analysis" – Faza izgradnje 7 (okomite deformacije)

Procjena rezultata:

Sljedeća tablica prikazuje vrijednosti ekstrema unutarnjih sila (momenti savijanja, posmične sile i normalne sile) koje djeluju na grede (primarnu oblogu tunela) za 7. fazu izgradnje. Ovaj proračun proveli smo za plastični model materijala (Mohr-Coulomb) s lokalno povećanom gustoćom trokutastih elemenata.

Model Materijala	Faza izgradnje 7 – Unutarnje sile		
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Mohr – Coulomb	- 701,3	- 11,3	- 13,8
	- 124,8	+ 3,3	+ 9,8

Ekstremne vrijednosti unutarnjih sila primarne obloge – Faza izgradnje 7

Ova tablica predstavlja ukupne vrijednosti vertikalnih i horizontalnih pomaka d_z , d_x [mm] primarne obloge tunela za individualne faze izgradnje.

Faza izgradnje	Vrijednosti ukupnih pomaka d_z , d_x [mm]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
1	–	–	–	–
2	-1,4	+16,4	-4,9	+4,9
3	-2,3	+20,7	-6,2	+6,2
4	-3,2	+22,7	-6,7	+6,8
5	-3,0	+23,3	-6,9	+7,0
6	-3,5	+23,4	-7,0	+7,1
7	-4,0	+23,4	-7,0	+7,1

Vrijednosti pomaka d_z , d_x primarne obloge (ekstremi) – Sve faze izgradnje

Zaključak:

U ovom problemu prikazali smo modeliranje primarne obloge stvarnog tunela korištenjem metode konačnih elemenata. Tunel je izgrađen korištenjem NATM (Nova austrijska metoda tuneliranja). Iskop tunela podijeljen je u određene dijelove. Kada se stijena uklanja, masiv se rasterećuje, a tlo ili stijena se deformiraju, pri čemu smjer pomaka konture ide prema unutrašnjosti iskopanog otvora.

Primarna obloga ojačana je KARI mrežom (zavarena mreža od čeličnih šipki promjera 8 mm, s dimenzijama mreže 150 × 150 mm) i čeličnim rešetkastim nosačima s tri nosive šipke. Uvođenje KARI mreže u MKE numerički model (homogenizacija betona i armature) je diskutabilno; najčešće se uzima u obzir tek nakon zasebne procjene obloge.

Primarna obloga tunela naknadno će se procijeniti na temelju proračunatih ekstrema unutarnjih sila, koristeći softver za proračun konstrukcija (npr. FIN EC – CONCRETE 2D), kao kombinacija naprezanja na presjeku uzrokovanog momentom savijanja i normalnom silom (prema dijagramu interakcije).

Napomena: Proračun podzemne konstrukcije bez upotrebe grednih i kontaktnih elemenata prema linearnom modelu materijala (s elastičnim ponašanjem) opisana je u Poglavlju 23. Proračun obloge za skupljanje vode. (pogledajte <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).

Napomena: Primjer sa zadatkom (Demo_manual_26.gmk) možete pronaći u [Online examples](#).