

Proračun slijeganja terena

Program: MKE

Datoteka: Demo_manual_21.gmk

Ovaj primjer sadrži rješenje slijeganja terena uslijed površinskog opterećenja korištenjem metode konačnih elemenata.

Opis zadatka

Odredite slijeganje terena uzrokovano trakastim opterećenjem od $q = 250$ kPa dužine 4,0 m te ukupno slijeganje nakon naknadnog rasterećenja. Geološki profil je homogeni; parametri tla su sljedeći:

- Jedinična težina tla: $\gamma = 19.0$ kN/m³
- Modul elastičnosti: $E = 15.0$ MPa
- Modul rasterećenja: $E_{ur} = 45.0$ MPa
- Poissonov koeficijent: $\nu = 0.35$
- Kohezija tla: $c_{ef} = 8.0$ kPa
- Kut unutarnjeg trenja: $\phi_{ef} = 29.0$ °
- Jedinična težina saturiranog tla: $\gamma_{sat} = 21.0$ kN/m³

Što se tiče *modificiranog elastičnog modela*, ulazni parametri tla uzimat će se kako slijedi:

- Modul deformacije tla: $E_{def} = 15.0$ MPa
- Modul rasterećenja: $E_{ur} = 45.0$ MPa

Usporedite proračun slijeganja odnosno ukupne vrijednosti vertikalne deformacije d_z [mm] s drugim modelima materijala (nećemo uzimati u obzir Cam-Clay model i hipoplastični model za glinovita tla jer je tlo građeno od nekohezivnog tla).

Napomena: Mohr-Coulombov i Drucker-Pragerov model koriste se u inženjerskoj praksi i za kohezivna tla jer se temelje na posmičnom otkazivanju i koriste uobičajene ulazne parametre tla i stijena (ϕ , c).

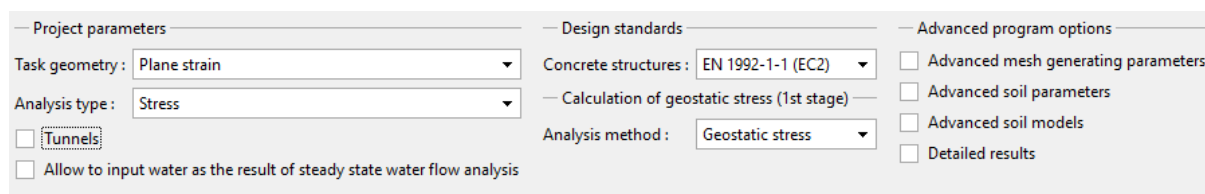
Rješenje

Za proračun ćemo koristiti GEO5 – MKE program. Opisat ćemo rješenje problema korak po korak kao u tekstu ispod:

- Topologija: postavljanje i modeliranje problema,
- Faza konstrukcije 1: proračun geostatičkih naprezanja,
- Faza konstrukcije 2: unos dodatnog opterećenja, proračun slijeganja terena,
- Faza konstrukcije 3: rasterećenje površine terena, proračun slijeganja terena,
- Procjena rezultata (zaključak).

Topologija: postavljanje i modeliranje problema

Prvo ćemo prijeći na postavke, gdje ćemo definirati vrstu problema, vrstu proračuna i metodu proračuna osnovnih naprezanja.



Postavke problema – Vrsta problema; proračun osnovnih naprezanja

Nećemo uključivati opcije „Tunnels“ i „Advanced input and detailed results“ – one su namijenjene iskusnim korisnicima metode konačnih elemenata ili za drugačije vrste problema. Njihov opis prelazi opseg i svrhu ovog priručnika.

Napomena: Planarni problem (uz pretpostavku ravninskih deformacija) prikladan je za rješavanje linearnih konstrukcija (tunel, nasip, otvoreni rov, brana i sl.) za koje vrijedi da je njihova uzdužna dimenzija za red veličine veća od bočnih dimenzija područja koje se rješava – u smjeru y-osi pretpostavljaju se nulte deformacije. Proračun se provodi pod pretpostavkom ravninskih deformacija (za više detalja pogledajte Pomoć – F1). Druga vrsta problema (aksijalna simetrija) obrađuje se u sljedećem poglavlju.

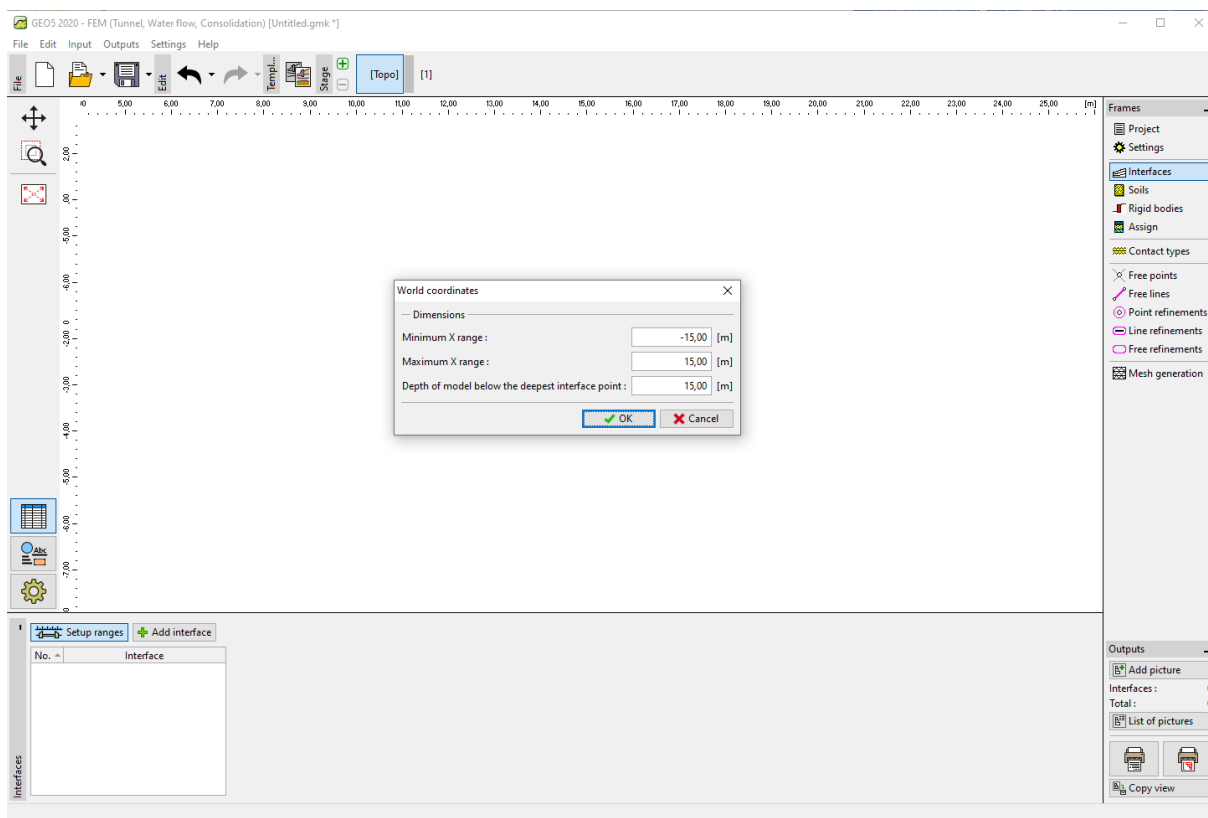
Napomena: Vrsta proračuna „Stress“ bavi se naprezanjima i deformacijama unutar područja koje se rješava. To je osnovni tip proračuna; drugi tipovi proračuna i druge opcije (tok, stabilnost kosina) bit će opisani zasebno u drugim poglavljima.

Napomena: Dostupne su dvije opcije za proračun osnovnih naprezanja (za fazu konstrukcije 1):

- **Geostatičko naprezanje:** *Standardna metoda za proračun geostatičkih naprezanja, uzimajući u obzir vlastitu težinu tla i horizontalna naprezanja prema teoriji elastičnosti. Koeficijent bočnog pritiska tada je dan formulom $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$.*

- **K_0 postupak** *(prema Jáky, za prekonsolidirana tla itd.).*

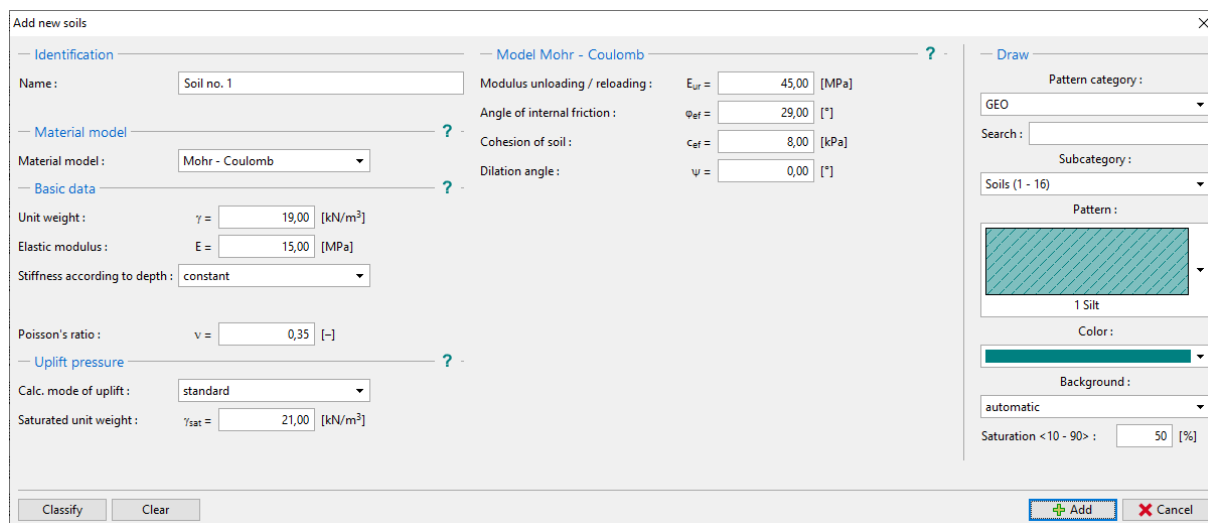
Postavljamo svjetske koordinate (dimenzije numeričkog modela problema koji se rješava) i granicu terena u kartici „Interface“. Koordinate svijeta odabrat ćemo tako da rezultati ne budu pod utjecajem uvjeta na rubu modela. Za naš konkretni problem odabrat ćemo dimenzije modela $\langle -15 \text{ m}; 15 \text{ m} \rangle$ te postaviti debljinu sloja koji ćemo ispitivati na 15,0 m. Koordinate terena (x, z) postaviti ćemo na: $[-15, 0]; [15, 0]$.



Kartica „Interface“

Napomena: Vrijednosti preporučenih dimenzija za postavljanje granica modela za pojedinačne slučajeve proračuna prikazane su i detaljnije opisane u pomoći programa (za više informacija pogledajte Pomoć – F1).

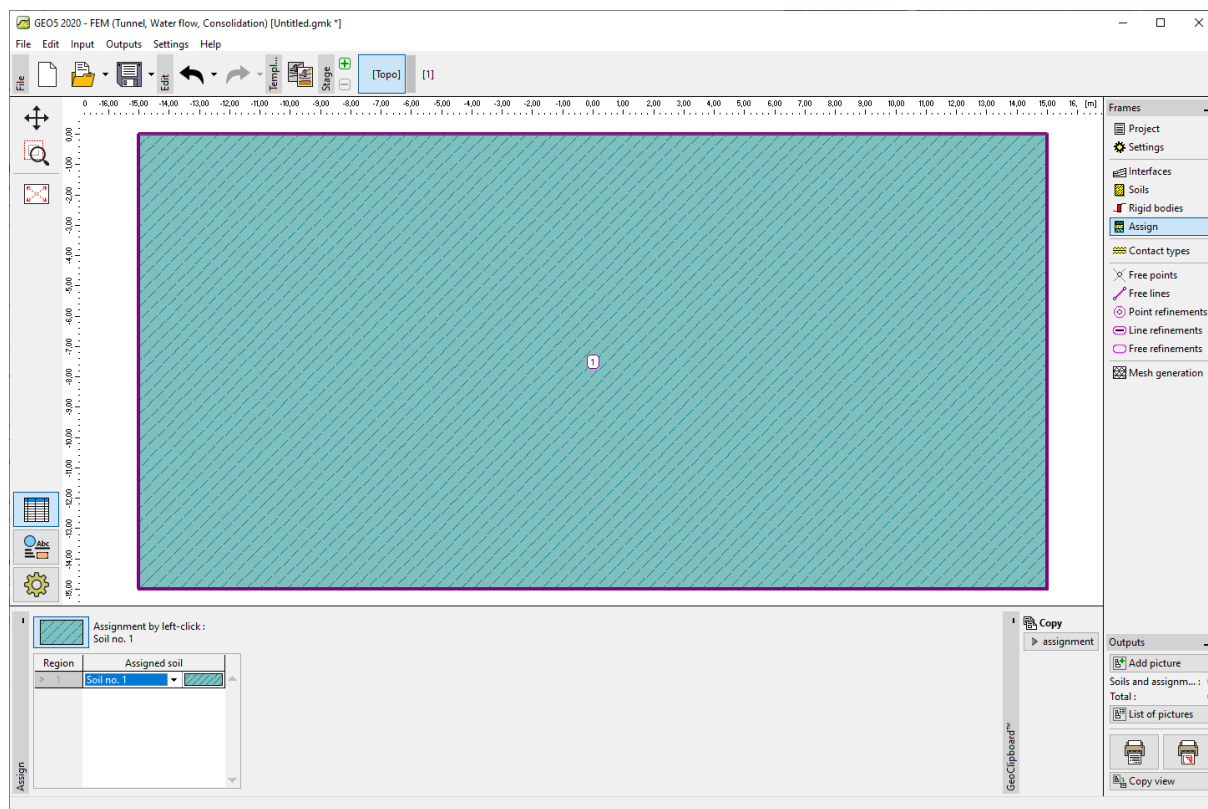
Za ovaj proračun odabiremo **Mohr-Coulomb** model tla (usporedba različitih modela prikazana je na kraju ovog primjera) te definiramo odgovarajuće parametre tla. Ovaj nelinearni model omogućit će nam praćenje razvoja plastičnih deformacija ili raspodjele potencijalnih zona otkazivanja.



Postavljanje parametara tla

Napomena: Elastični model pretpostavlja ponašanje tla prema Hookeovom zakonu (idealno elastičan materijal). Glavna prednost ovog modela jest da uvijek provodi proračun do kraja. Nedostatak je što se tlo tako ponaša samo pri malim veličinama opterećenja – stoga nije prikladan za stvarne konstrukcije. S druge strane, prikladan je za modeliranje područja u kojima ne očekujemo plastična otkazivanja materijala (npr. gabionski zidovi, krute podloge itd.) ili za provjeru osnovnog numeričkog modela.

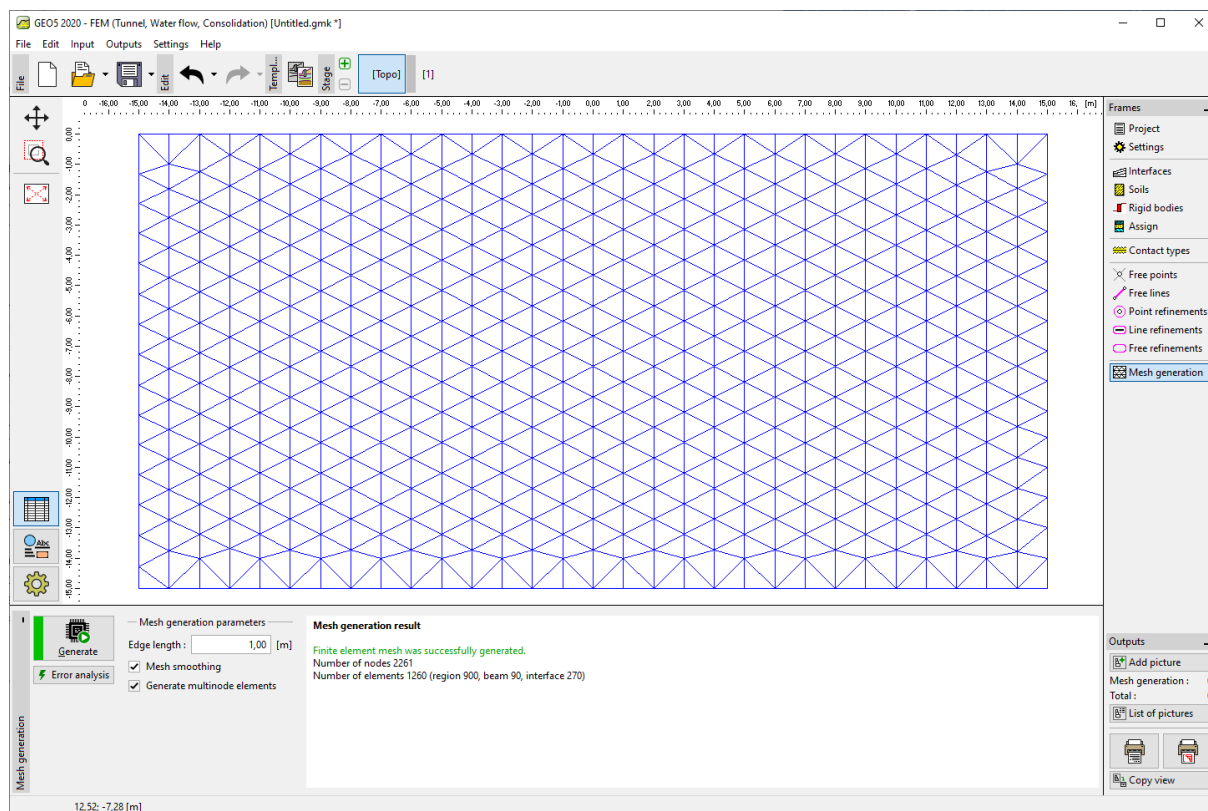
Nakon toga dodjeljujemo tlo području koje smo izradili.



Kartica "Assign"

Ostale kartice za definiranje tipova kontakta, slobodnih točaka i linija izostavit ćemo jer nisu relevantni za rješavanje našeg problema.

Sljedeći korak je generiranje mreže konačnih elemenata (u daljnjem tekstu FE mreža). Za parametre generiranja mreže odabrat ćemo duljinu ruba elemenata od 1,0 m (duljina ruba bira se ovisno o dimenzijama problema i njegovoj varijabilnosti). Označit ćemo opciju Mesh Smoothing i pritisnuti gumb **Generate**. Program će automatski generirati i izravnati FE mrežu. Provjerit ćemo je li gustoća mreže prikladna s obzirom na veličinu problema.



Generiranje mreže konačnih elemenata – Topologija (trokutasta mreža)

Napomena: Standardna trokutasta mreža sa šesteročlanim elementima prikladna je za većinu geotehničkih problema. U načinu rada s naprednim unosom program omogućuje i generiranje drugih tipova mreža (mješovita, trokutasta) – to je namijenjeno iskusnim korisnicima metode konačnih elemenata.

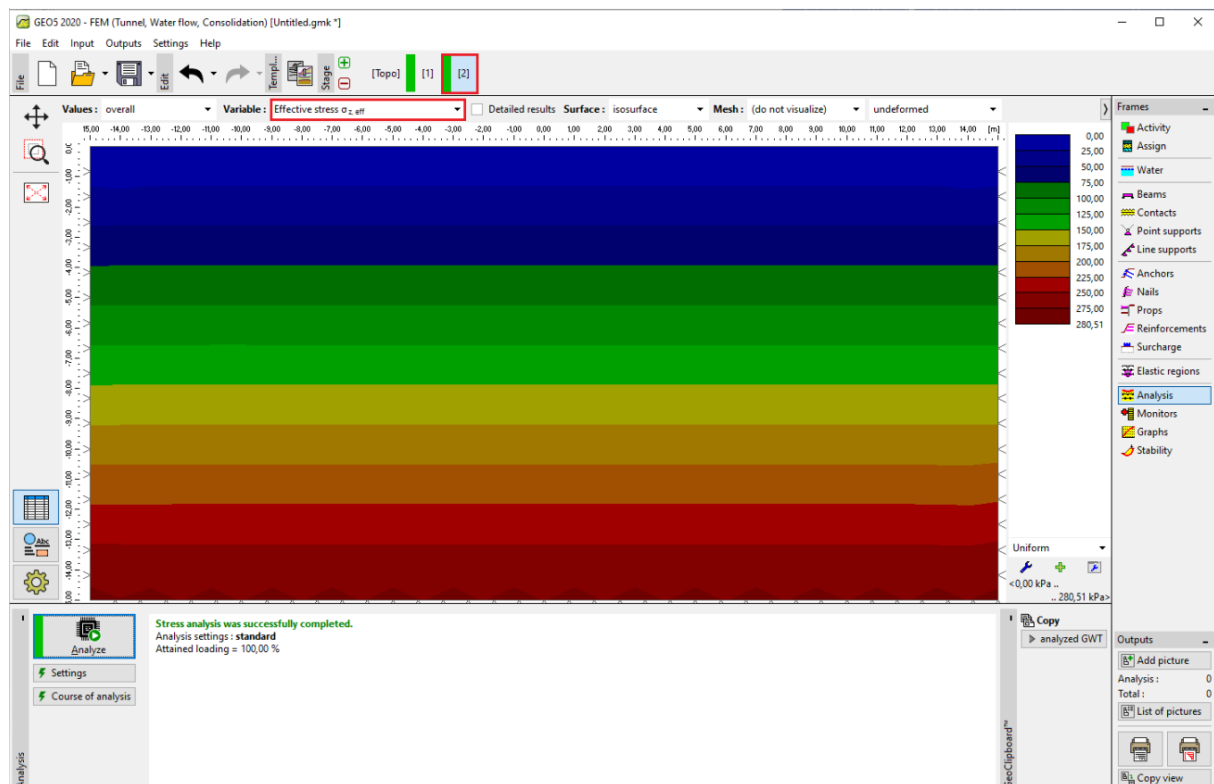
Napomena: Ispravno generirana mreža konačnih elemenata osnovni je preduvjet za postizanje rezultata koji razmjerno dobro odražavaju stvarno ponašanje konstrukcije. FE mreža značajno utječe na dobivene vrijednosti jer se metodom konačnih elemenata prvenstveno određuju pomaci u čvorovima. Ostale varijable (naprezanja, deformacije) iz njih se naknadno izvode.

Nažalost, zbog razlika među pojedinim problemima nije moguće dati opće pravilo za pravilnu gustoću mreže. Za početnike u proračunu metodom konačnih elemenata preporučujemo da se najprije odabere grublja mreža, provede proračun problema, a zatim isprobaju različite opcije koje uključuju

zaobljenje mreže ili njezinih dijelova. (Također je moguće lokalno povećati gustoću mreže oko točaka ili linija – više o tome nalazi se u drugim poglavljima inženjerskih priručnika). Općenito vrijedi da što je mreža grublja, to je ponašanje modela kruće (rezultantno slijeganje je manje).

Faza konstrukcije 1: proračun geostatičkih naprezanja

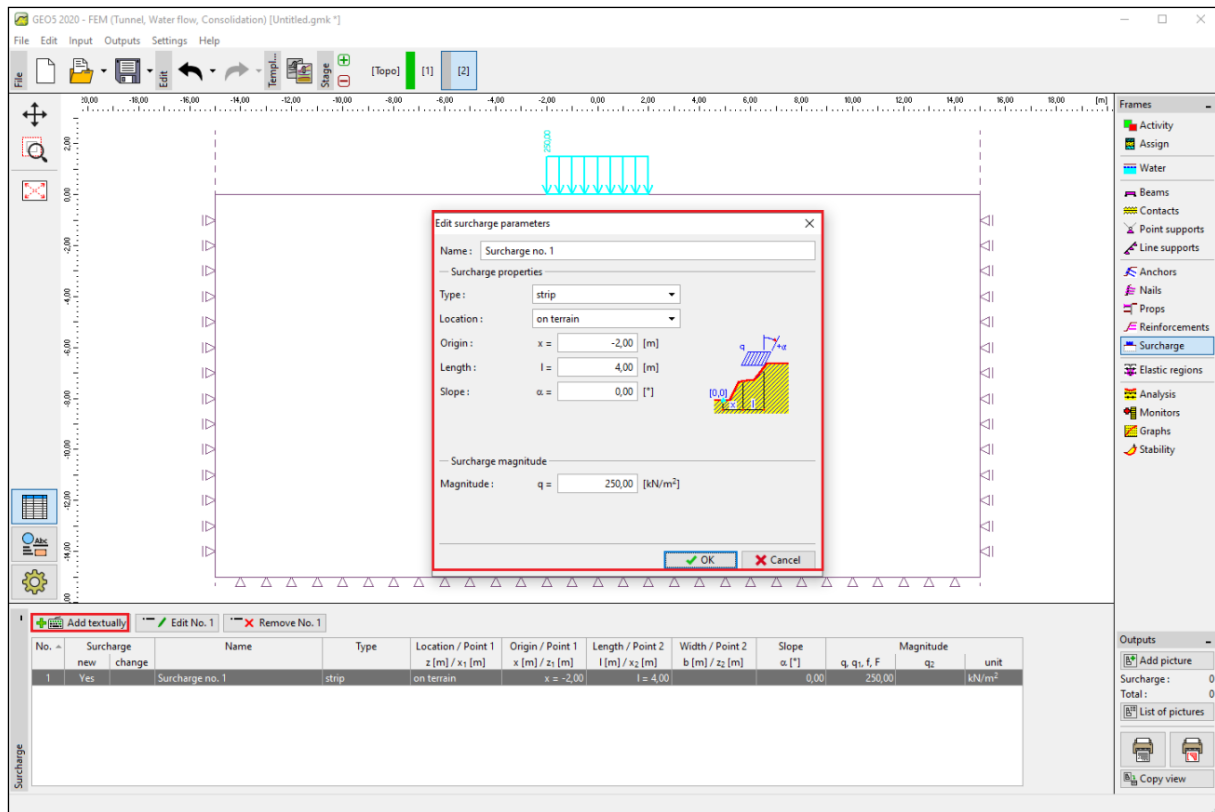
Nakon što je generiranje FE mreže završeno, prijeći ćemo na Fazu 1 (pomoću alatne trake na gornjem rubu zaslona) i provesti proračun geostatskih naprezanja pritiskom na gumb “**Analyse**”. Zatim ćemo pregledati rezultate za efektivno naprezanje $\sigma_{z,eff}$ [kPa].



Proračun faze konstrukcije 1 – osnovno geostatičko naprezanje

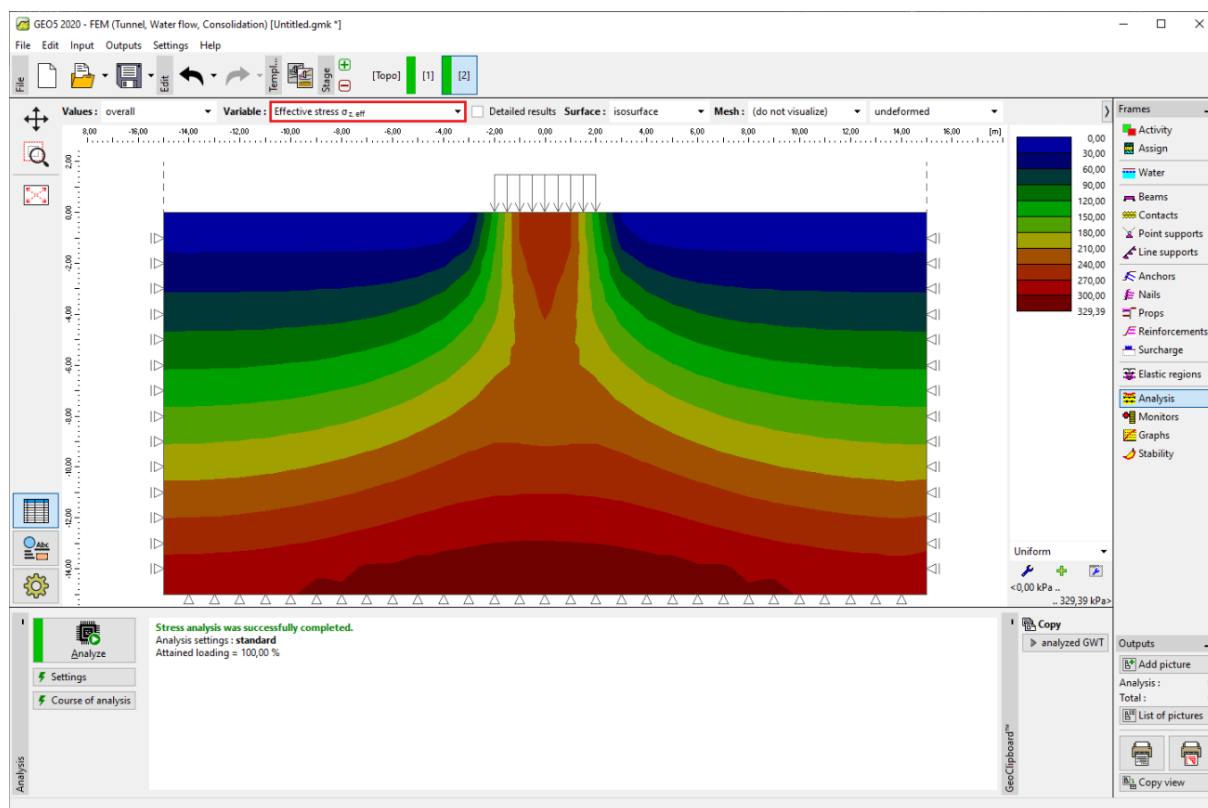
Faza konstrukcije 2: unos dodatnog opterećenja

U sljedećem koraku dodat ćemo fazu konstrukcije 2. Zatim ćemo definirati dodatno opterećenje koje djeluje na teren i postaviti odgovarajuće karakteristike. Sve ćemo na kraju potvrditi pritiskom na gumb “Add”.



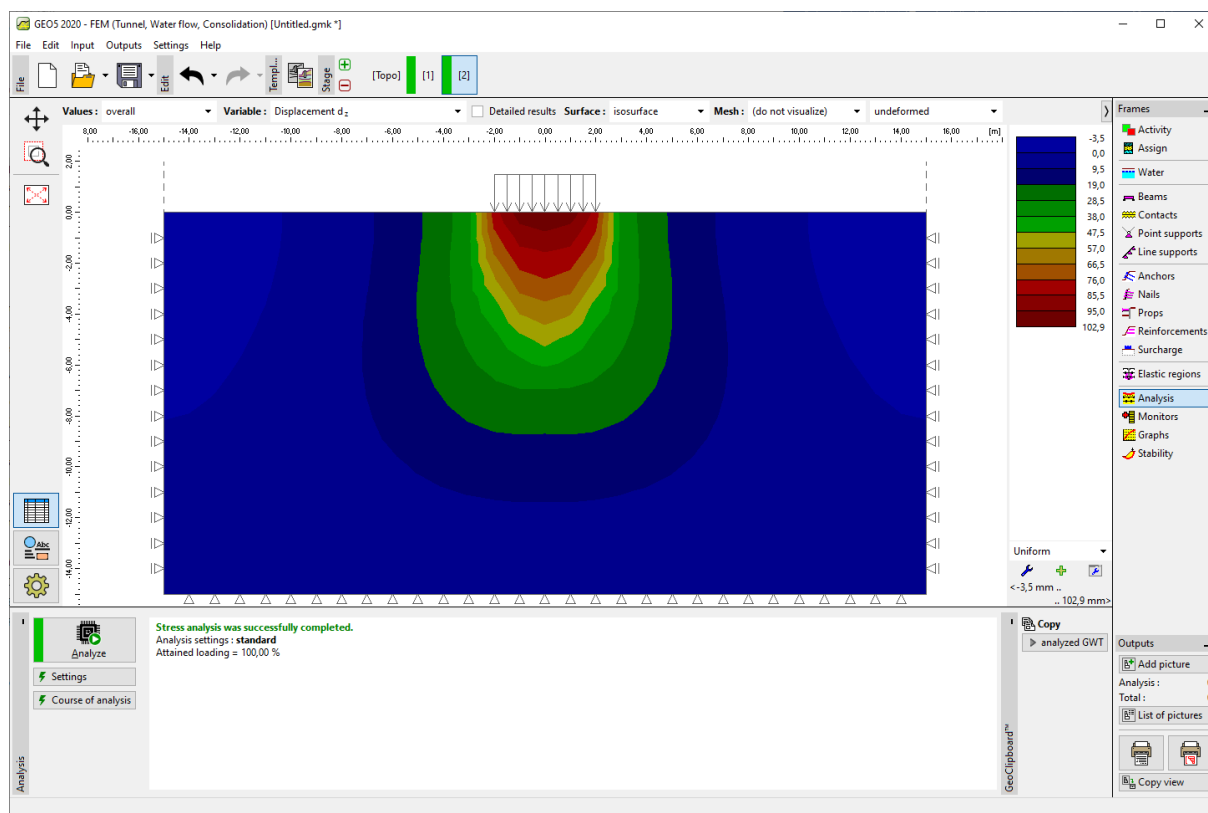
Postavljanje novih dodatnih opterećenja

U ovoj fazi konstrukcije ponovno ćemo provesti proračun i provjeriti rezultate, najprije za normalna vertikalna naprezanja $\sigma_{z,eff}$ [kPa].



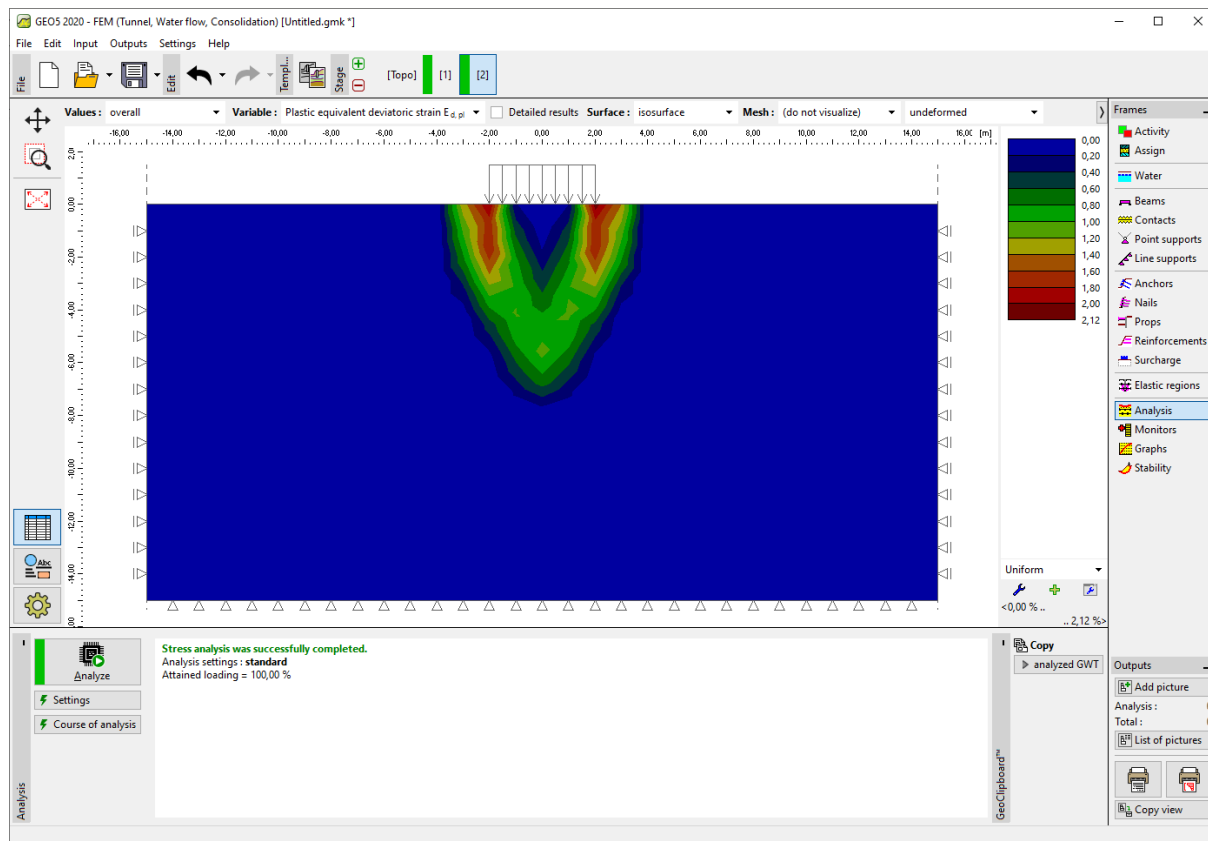
Proračun faze konstrukcije 2 – vertikalna normalna naprezanja $\sigma_{z,eff}$ [kPa]

Nakon toga ćemo prikazati vizualizaciju vertikalnih pomaka d_z [mm]. Iz prikaza možemo vidjeti da je maksimalna vertikalna deformacija jednaka 102.9 mm.



Proračun faze konstrukcije 2 – vertikalne deformacije uslijed dodatnih opterećenja d_z [mm]

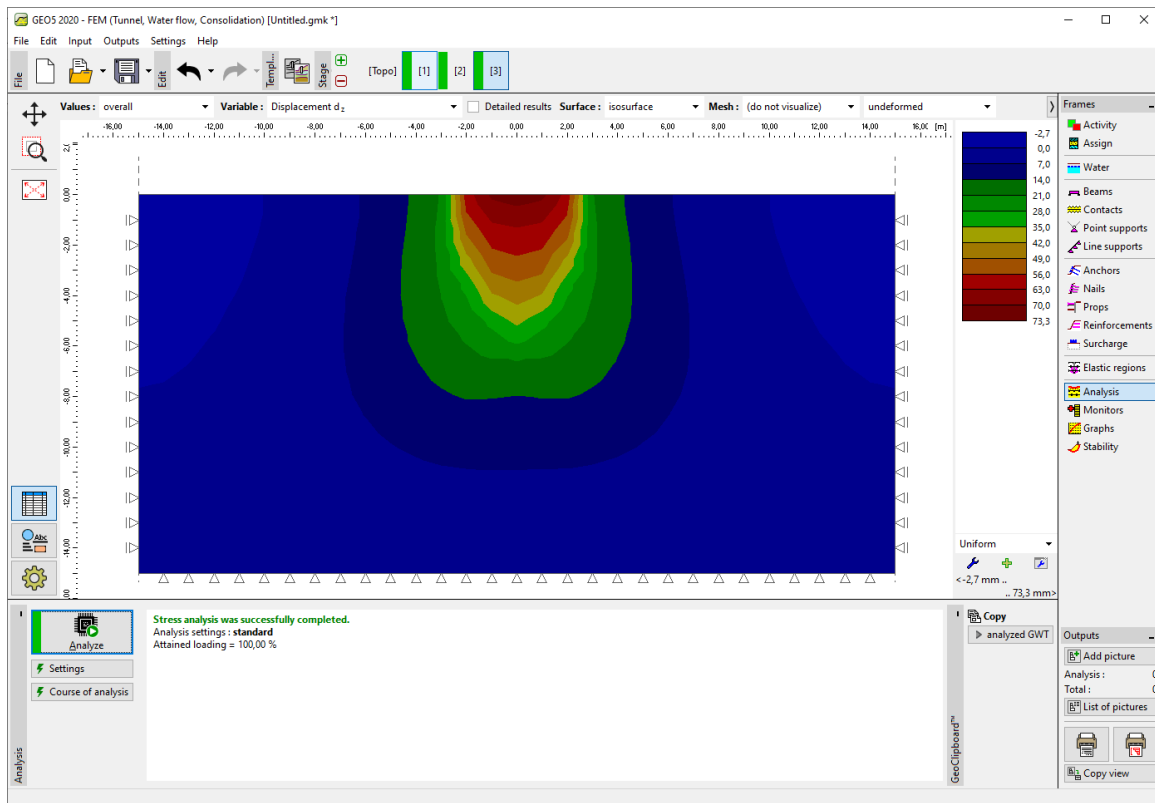
Kod proračuna problema metodom konačnih elemenata važan izlazni parametar (za nelinearne modele) predstavljaju ekvivalentne plastične deformacije. One označavaju mjesta gdje je prekoračeno granični uvjet popuštanja, odnosno gdje se tlo nalazi u stanju plastičnih deformacija s trajnim plastičnim deformacijama.



Proračun faze konstrukcije – omjer ekvivalentnih plastičnih deformacija $\varepsilon_{eq,pl}$. [%]

Faza konstrukcije 3: rasterećenje površine terena

U sljedećem koraku dodat ćemo fazu konstrukcije 3. U ovoj fazi ne uzimamo u obzir površinsko opterećenje terena (uklanjamo ga). Ponovno ćemo provesti proračun i odrediti vrijednosti naprezanja i deformacija. Ukupni pomak nakon rasterećenja površine terena iznosi 73,3 mm (za trokutastu FE mrežu).



Proračun faze konstrukcije 3 – vertikalne deformacije uzrokovane dodatnim opterećenjem

d_z [mm]

S ovim završavamo osnovni proračun. Kakođer ćemo provesti i druge komparativne proračune za druge modele materijala.

Procjena rezultata

Sljedeća tablica predstavlja rezultate za ukupni pomak d_z [mm] na istom primjeru, ali za različite modele materijala GEO5 – MKE programa.

Model materijala / program	Razmak mreže [m]	Faza 2 d_z [mm]	Faza 3 d_z [mm]	Bilješka
Elastični	1.0	88.3	0	---
ELM	1.0	88.2	58.8	---
DP	1.0	114.1	84.8	---
MC	1.0	102.9	73.3	---
MCM	1.0	93.5	64	---
Slijeganje	---	73.7	---	CSN 73 1001

Rezultati ukupnog slijeganja

*Napomena: Za potrebe analitičkog proračuna u programu **GEO5 – Slijeganje**, uzet je u obzir proračun slijeganja prema edometrijskom modulu (u skladu s normom ČSN 73 1001), s područjem utjecaja ograničenim na 10 % početnog geostatičkog naprezanja. Modul deformacije definiran je kao $E_{def} = 15.0 \text{ MPa}$.*

Kao što je prikazano ranije, modeli materijala GEO5 MKE omogućuju unos modula primarnog opterećenja, označenog kao E , te modula rasterećenja i sekundarnog opterećenja, označenog kao E_{ur} . S druge strane, GEO5 Slijeganje prihvaća samo jednu vrijednost modula, označenu kao E_{def} . Budući da smo za proračun primarnog opterećenja koristili GEO5 Slijeganje, unijeli smo istu vrijednost i kao E u MKE.

Proračun metodom konačnih elemenata s elastičnim modelom i analitičko rješenje u programu Slijeganje temelje se na teoriji linearne elastičnosti. Stoga bi oba modela trebala dati slične rezultate. Neizbježne razlike u rezultatima mogu se pripisati sljedećim činjenicama:

a) Područje utjecaja u MKE je fiksno i određeno geometrijom modela. Nasuprot tome, u programu Slijeganje područje utjecaja ovisi o opterećenju i ostalim parametrima.

b) U MKE se naprezanja izračunavaju iz uvjeta ravnoteže i uzimaju u obzir vertikalne i horizontalne komponente deformacija. U programu Slijeganje polje naprezanja se unaprijed određuje, što nema veze sa stvarnim poljem deformacija.

c) U MKE se tlo ispod temeljne trake može deformirati i u poprečnom smjeru te dolazi do horizontalnih pomaka. Analitički pristup u programu Slijeganje koristi edometrijski modul i pretpostavlja da je tlo ograničeno u horizontalnom smjeru.

Zaključci

Iz sažetne tablice ukupnog slijeganja moguće je izvesti sljedeće zaključke:

- Drucker-Pragerov model je u ovom konkretnom slučaju nešto podatniji od klasičnog Mohr-Coulombovog modela ili modificiranog Mohr-Coulombovog modela materijala.
- Slijeganje proračunato pomoću elasto-plastičnih modela veće je od vrijednosti dobivene korištenjem linearnog modela.
- Slijeganje proračunato analitički u programu GEO5 Slijeganje otprilike odgovara vrijednosti dobivenoj metodom konačnih elemenata s linearnim elastičnim modelom. Blaga razlika u dobivenim vrijednostima može se objasniti različitim pretpostavkama koje te dvije metode koriste.