

Procjena stabilnosti kosine

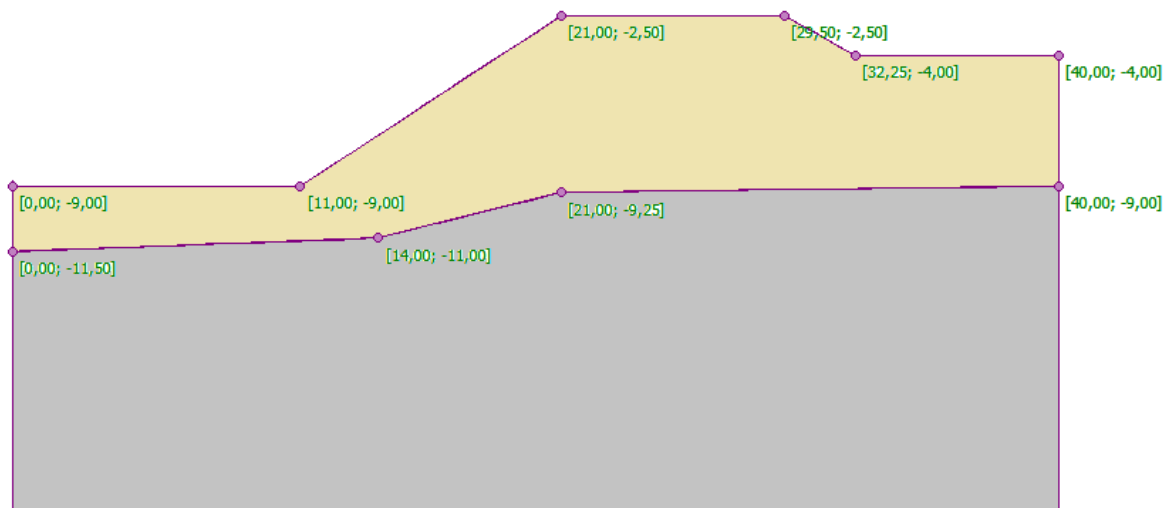
Program: MKE

Datoteka: Demo_manual_25.gmk

Cilj ovog priručnika je proračunati stupanj stabilnosti kosine (faktor sigurnosti) koristeći metodu konačnih elemenata.

Opis zadatka

Odredite stupanj stabilnosti kosine, prvo bez djelovanja trakastog opterećenja, a zatim uz djelovanje trakastog opterećenja $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$. Shema geometrije kosine za sve faze gradnje (uključujući individualne točke granica) je prikazana na sljedećoj slici. Zatim provedite stabilizaciju kosine pomoću prednapetih sidara.



Shema kosine – individualne točke granica

Geološki profil se sastoji od dvije vrste tla sa sljedećim parametrima:

Parametri tla / Klasifikacija	Tlo br. 1	Tlo br. 2 – R4
Jedinična težina tla: γ [kN/m^3]	18	20
Modul elastičnosti: E [MPa]	21	300
Poissonov omjer: ν [–]	0.3	0.2
Kohezija tla: c_{eff} [kPa]	9	120
Kut unutarnjeg trenja: ϕ_{eff} [$^\circ$]	23	38
Kut dilatacije: ψ [$^\circ$]	0	0
Saturirana jedinična težina: γ_{sat} [kN/m^3]	20	22

Tablica parametara tla – provjera stabilnosti kosine

Napomena: Nećemo razmatrati različite vrijednosti modula E za rasterećenje/ponovno opterećenje ($E_{ur}=E$).

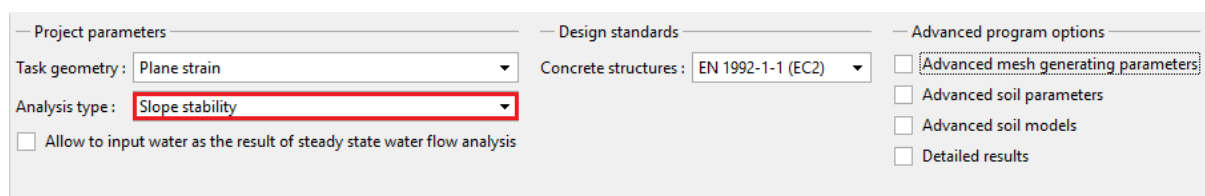
Rješenje

Koristit ćemo GEO 5 – MKE program kako bismo riješili ovaj problem. Rješenje ćemo opisati korak po korak u tekstu ispod:

- Topologija: postavljanje i modeliranje problema (granice, generiranje mreže),
- Faza gradnje 1: proračun faktora sigurnosti postojeće kosine bez dodatnog opterećenja,
- Faza gradnje 2: proračun faktora sigurnosti kosine pod djelovanjem trakastog opterećenja,
- Faza gradnje 3: stabilizacija kosine pomoću sidara; proračun stabilnosti kosine.
- Procjena rezultata: usporedba, zaključak.

Topologija: postavke problema

Postavit ćemo vrstu proračuna u kartici “Settings” s uključenom opcijom *Slope stability*. Ostavit ćemo ostale parametre nepromijenjenima.

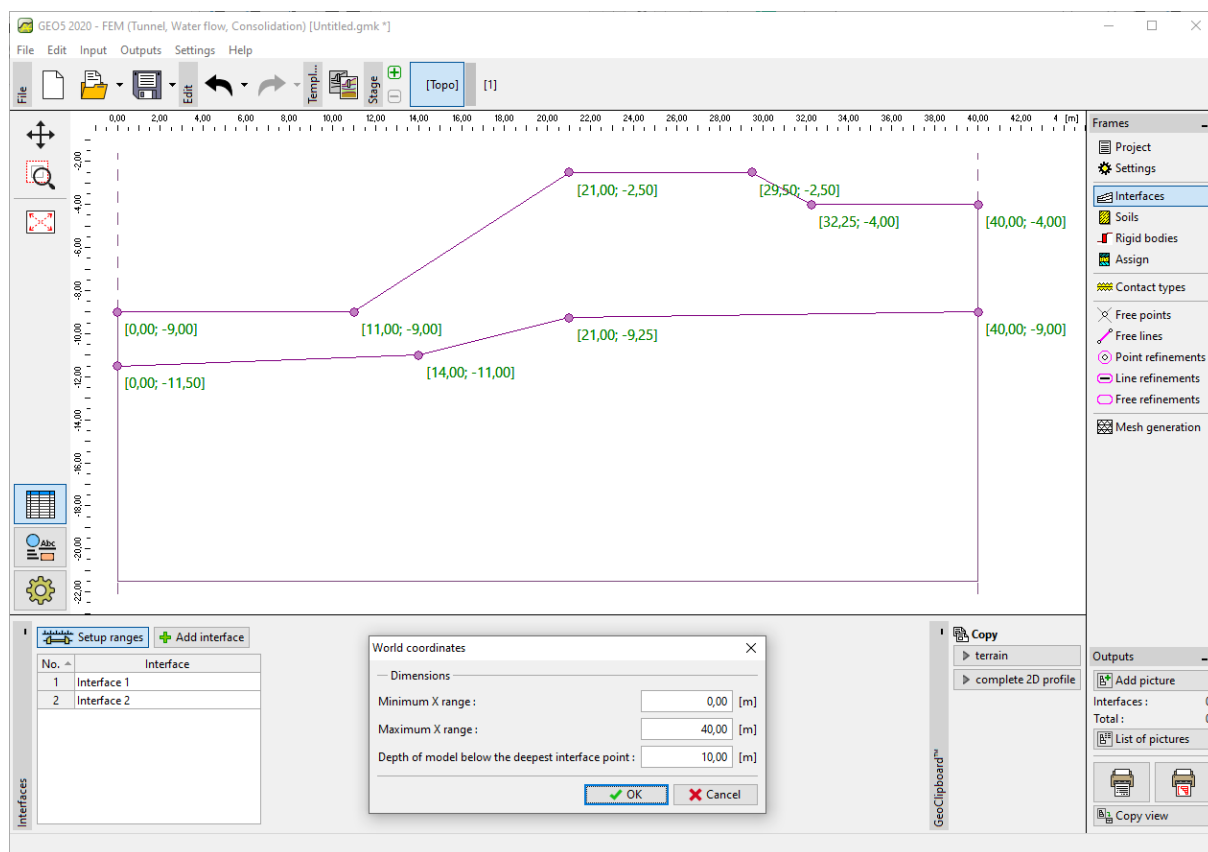


Kartica “Settings”

Napomena: Postavljanje i razvoj modela u načinu „Slope stability“ u potpunosti je identično načinu „Stress“. Proračun stabilnosti kosina provodi se pritiskom na gumb „Analyze“. Pojedinačni proračuni stabilnosti kosina po fazama gradnje potpuno su neovisni i nemaju nikakvu povezanost s prethodnim fazama i proračunima (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Nadalje ćemo postaviti globalne koordinate. Odabrat ćemo dovoljno velike dimenzije kako rezultati ne bi bili pod utjecajem rubnih uvjeta. Za naš konkretni problem odabrat ćemo koordinate modela {0 m; 40 m} te postaviti visinu iznad najniže točke granice na 10 m.

Zatim ćemo definirati točke granica individualnih slojeva tla koje su dane u sljedećoj tablici.



“World coordinates” dijaloški prozor

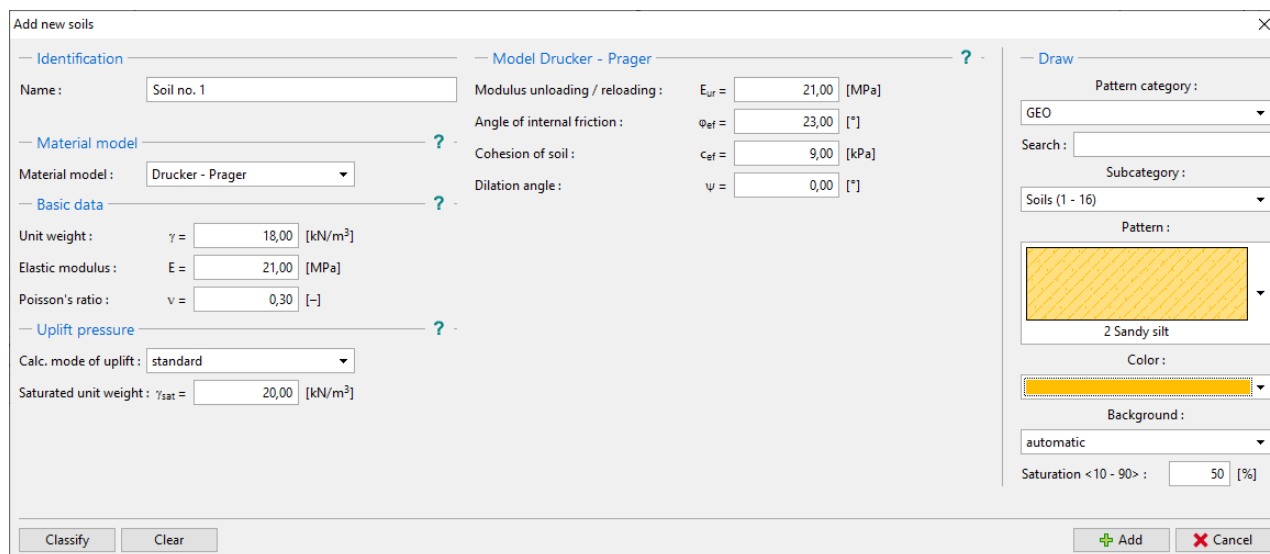
	Interface 1		Interface 2	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	0,00	-9,00	0,00	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

Popis točaka za individualne granice slojeva tla

Sada ćemo postaviti odgovarajuće parametre tla te zatim dodijeliti tlo pojedinim područjima. Odabrat ćemo Drucker–Pragerov model (više detalja vidi u napomeni). Za oba sloja tla uzet ćemo kut dilatacije ψ jednak nuli, odnosno pretpostavit ćemo da materijal pri djelovanju posmičnih naprezanja ne mijenja svoj volumen (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Napomena: Prilikom izvođenja proračuna stabilnosti kosina potrebno je odabrati nelinearni model tla, koji pretpostavlja razvoj plastičnih deformacija i formuliran je na temelju parametara čvrstoće tla c i ϕ .

U ovom konkretnom slučaju odabrali smo Drucker–Pragerov model materijala zbog većeg odziva popuštanja konstrukcije u usporedbi s klasičnim Mohr–Coulombovim modelom (za više detalja pogledajte Pomoć – F1). Usporedba rezultata dobivenih primjenom pojedinih nelinearnih modela materijala prikazana je u tablici na kraju ovog primjera.



Edit soil parameters

Identification

Name:

Material model

Material model:

Basic data

Unit weight: $\gamma =$ [kN/m³]

Elastic modulus: $E =$ [MPa]

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

Uplift pressure

Calc. mode of uplift:

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

Model Drucker - Prager

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

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

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

Dilation angle: $\psi =$ [°]

Draw

Pattern category:

Search:

Subcategory:

Pattern:

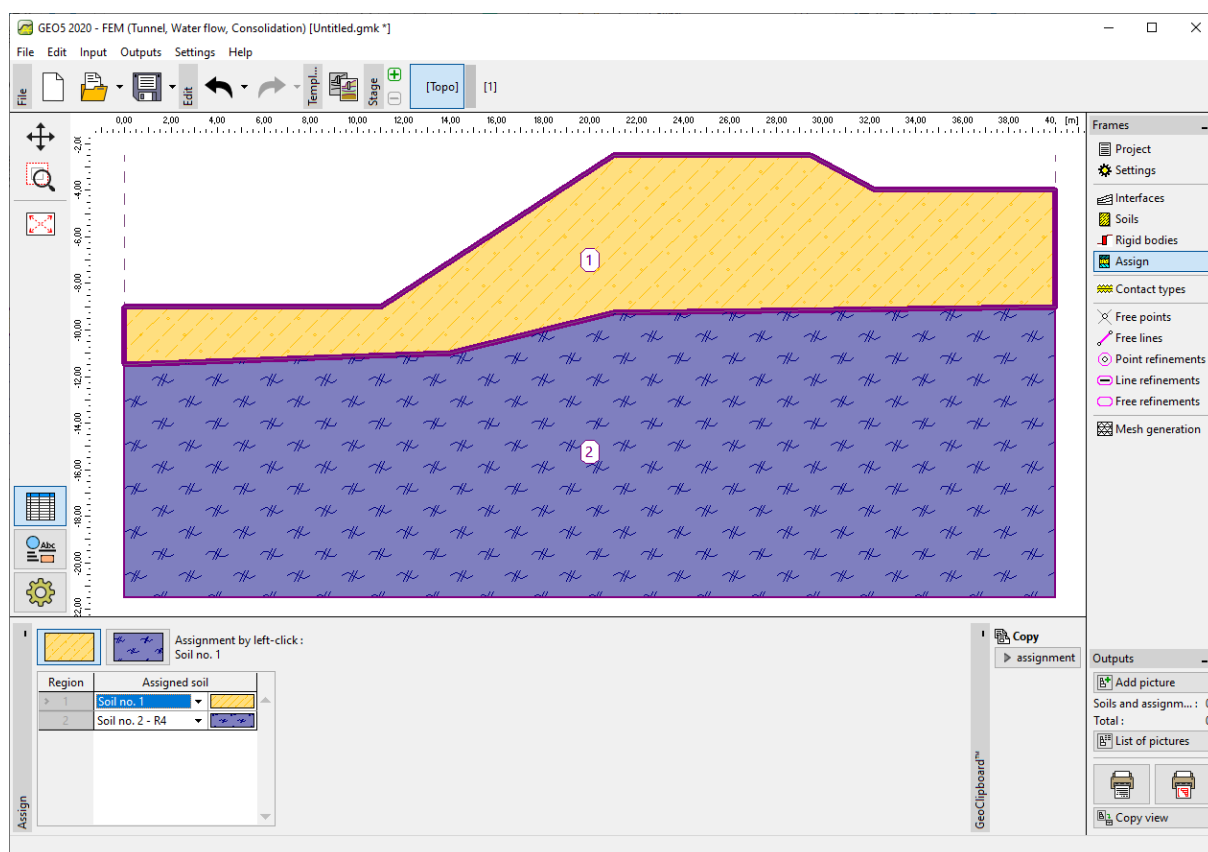
Color:

Background:

Saturation <10 - 90>: [%]

“Add new soils” dijaloški prozor

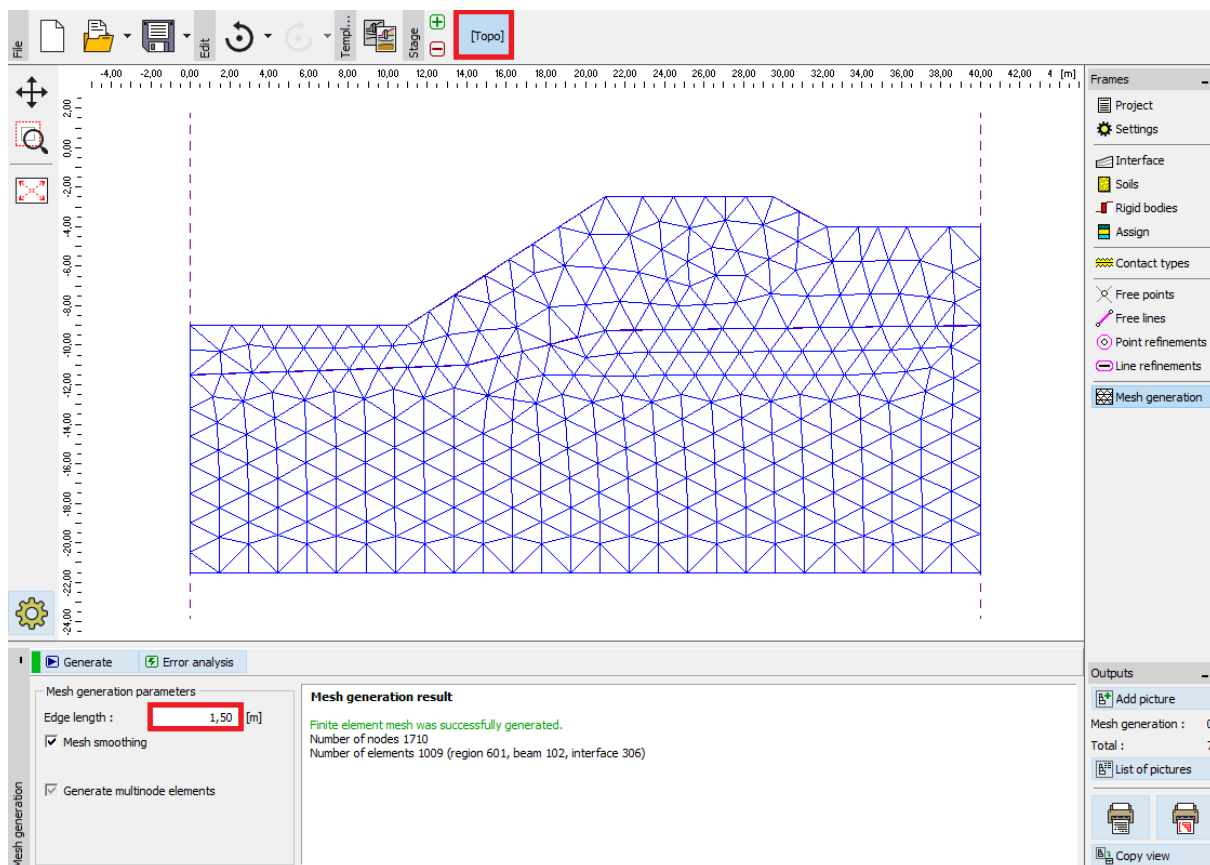
Sljedeća slika prikazuje dodjelu tla geološkom profilu.



Kartica “Assign”

Zadnji korak u procesu postavljanje topologije je generiranje mreže konačnih elemenata. Gustoća mreže značajno utječe na rezultirajući stupanj stabilnosti (faktor sigurnosti) te je zbog toga uvijek bitko odabrati dovoljno gustu mrežu.

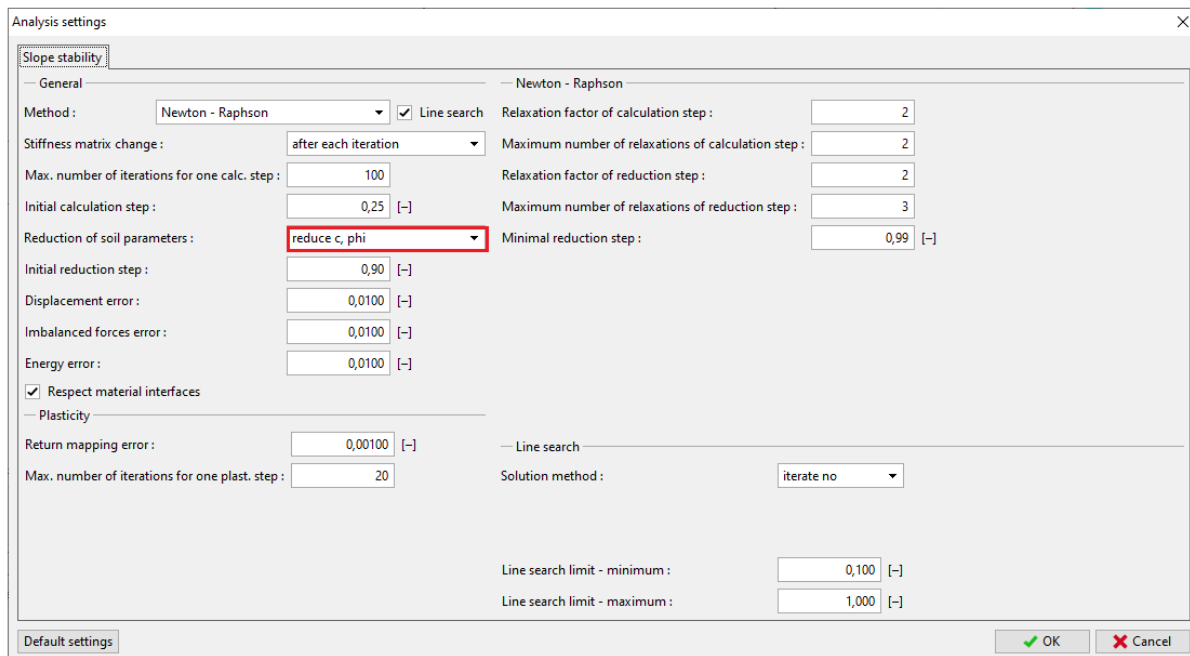
Za ovaj primjer odabrat ćemo element ruba duljine 1.5 m i generirati mrežu (koristeći tipku **“Generate”**). Rezultati dobiveni pomoću GEO 5 – MKE programa za mrežu s elementom ruba duljina 1.0, 1.5 i 2.0 m dani su u tablici na kraju ovog priručnika.



Kartica “Mesh generation” – element ruba duljine 1.5 m

Faza gradnje 1: proračun stupnja stabilnosti (faktor sigurnosti)

Nakon generiranja mreže konačnih elemenata prelazimo u fazu gradnje 1 i provodimo proračun (pritiskom na tipku "Analyse"). Postavke proračuna ćemo ostaviti na "Standard".

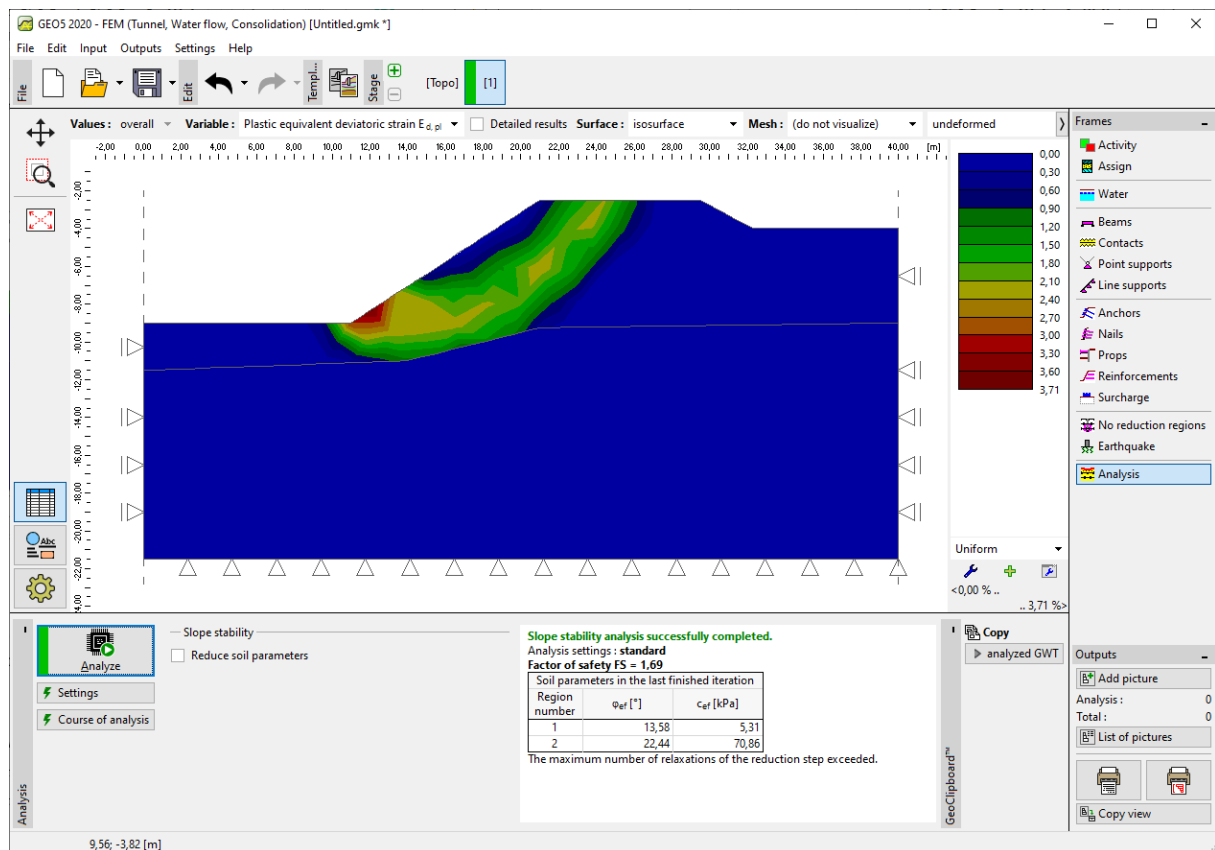


“Analysis setting” dijaloški prozor

Napomena: Proračun stabilnosti kosina se temelji na c , ϕ redukciji faktora vezanih za parametre čvrstoće tla. Faktor sigurnosti je definiran unutar okvira ove metode kao parametar koji se aplicira za reduciranje stvarnih vrijednosti parametara c , ϕ što dovodi do gubitka stabilnosti (za više detalja posjetite Pomoć – F1). Stupanj stabilnosti kosina je u programu definiran odnosom: $FS = \tan \phi^s / \tan \phi^p$,

gdje: ϕ^s – stvarna vrijednost kuta unutarnjeg trenja,
 ϕ^p – vrijednost kuta unutarnjeg trenja pri otkazivanju.

Jedan od izlaznih podataka vrlo koristan za proračun stabilnosti je prikaz vektora pomaka i ekvivalentnih plastičnih deformacija $\varepsilon_{eq,pl}$. Plastične deformacije prikazuju oblik i veličinu potencijalne plohe otkazivanja (pogledajte sljedeću sliku).

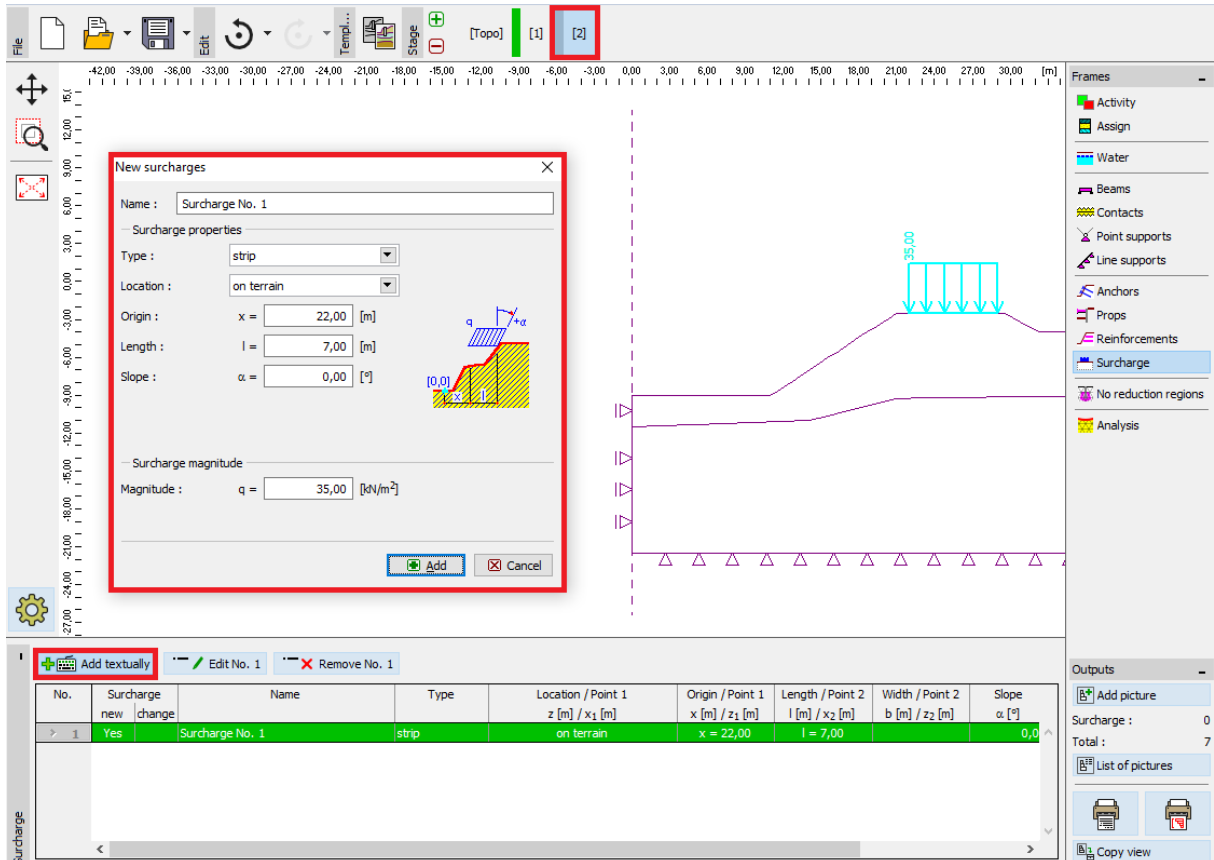


Kartica "Analysis" – Faza gradnje 1 (ekvivalentne plastične deformacije $\epsilon_{eq,pl}$)

Napomena: Program u načinu „Stability“ omogućuje prikaz samo pomaka (u smjerovima Z i X) i deformacija (ukupnih ili plastičnih). Deformacija konstrukcije odgovara stanju proračuna za smanjene parametre tla, stoga nema veze sa stvarnom deformacijom – daje samo prikaz ukupnog ponašanja kosine ili konstrukcije u trenutku otkazivanja (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

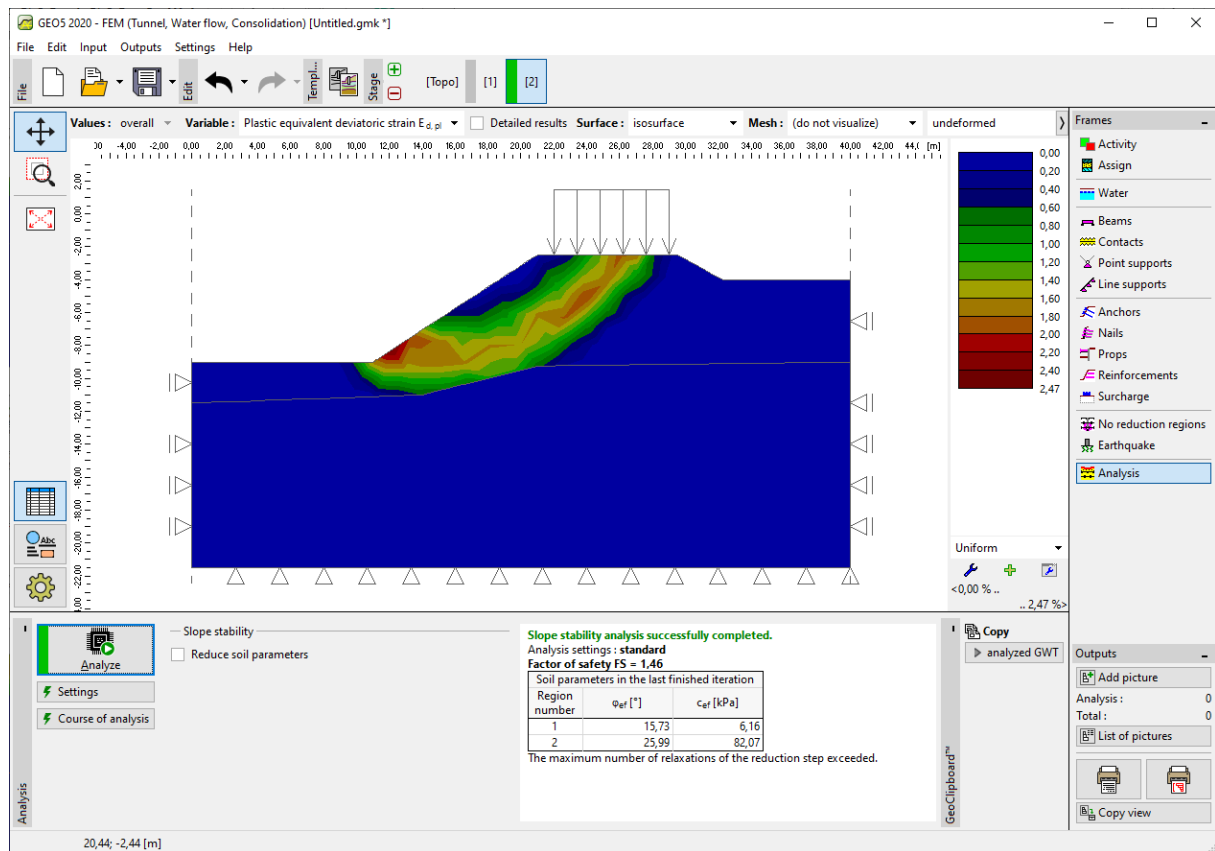
Faza gradnje 2: dodavanje opterećenja kosine, proračun

U ovoj fazi gradnje najprije idemo u karticu "Surcharge" kako bismo definirali sljedeće parametre – karakteristike dodatnog opterećenja i veličinu djelovanja.



"New surcharges" dijaloški prozor – Faza gradnje 2

Sad ćemo provesti proračun za fazu 2 i provjeriti ekvivalentne plastične deformacije.

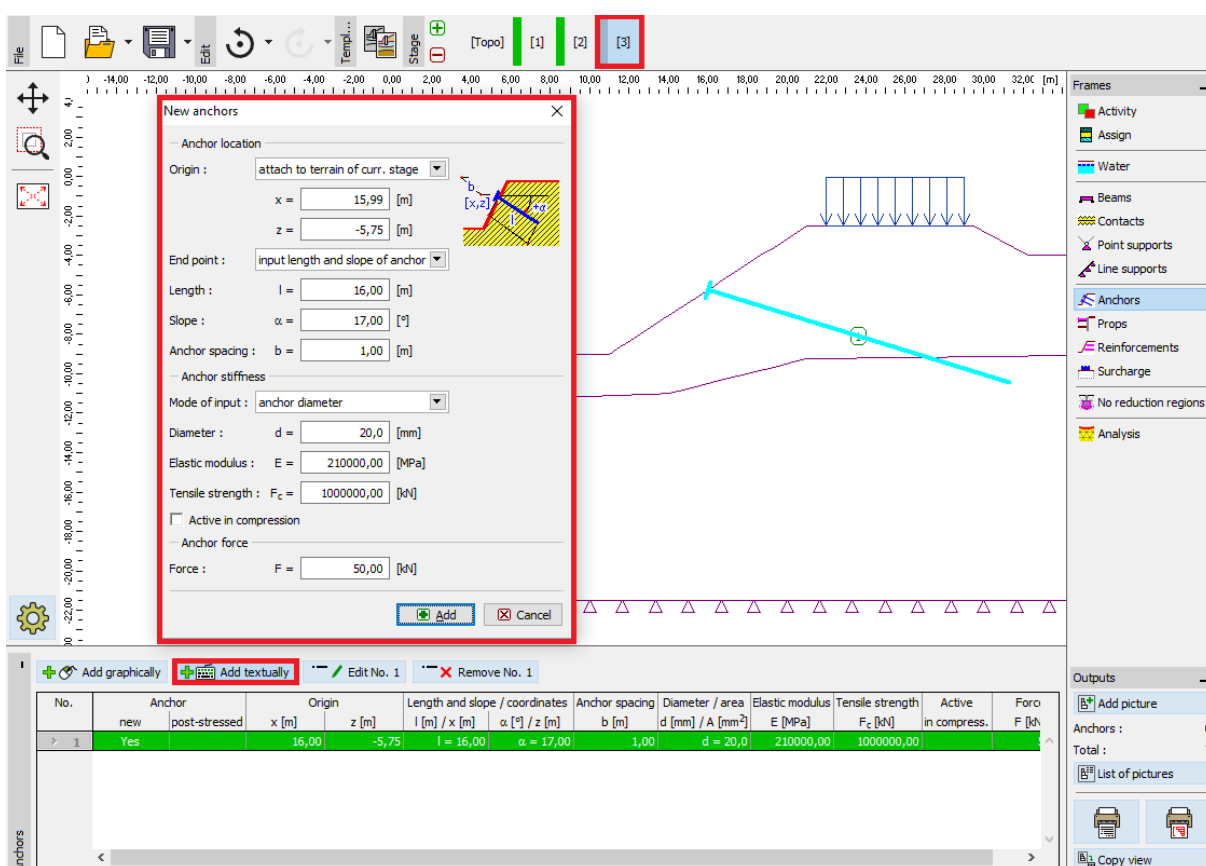


Kartica "Analysis" – Faza konstrukcije 2 (ekvivalentne plastične deformacije $\epsilon_{eq,pl}$)

Faza gradnje 3: stabilizacija kosine pomoću sidara, proračun

Dodat ćemo fazu gradnje 3. Zatim ćemo stisnuti tipku “Add” u kartici “Anchors” i postaviti čelično sidro sa silom prednapinjanja $F = 50 \text{ kN}$ u “New anchors” dijaloškom prozoru. Uzet ćemo u obzir sljedeće parametre sidra za ovaj problem:

- Duljina sidra: $l = 16 \text{ m}$,
- Nagib sidra: $\alpha = 17^\circ$,
- Promjer sidra: $d = 20 \text{ mm}$,
- Razmak sidara: $b = 1 \text{ m}$.

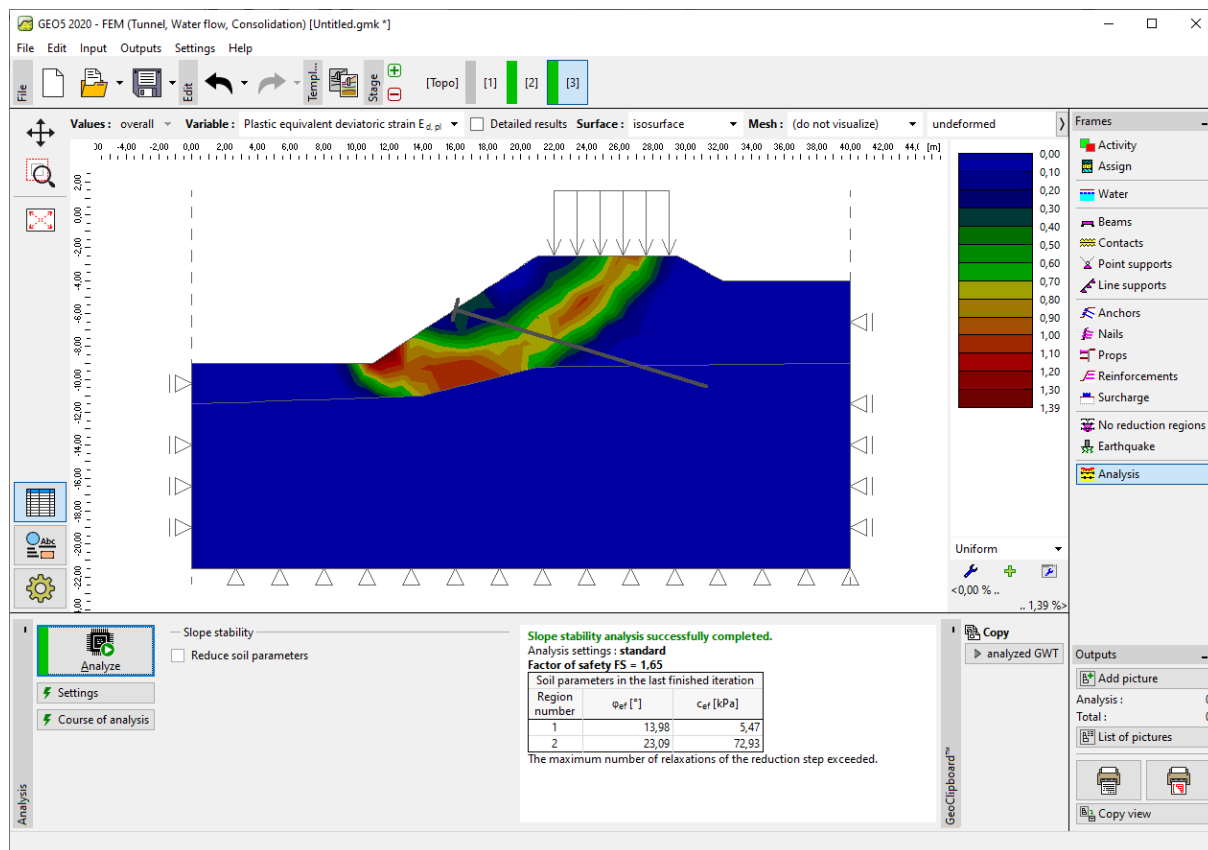


“New anchors” dijaloški prozor – Faza gradnje 3

Napomena: U proračunu stabilnosti kosina prednapregnuta sidra ulaze u sam proračun kao opterećenje izazvano silom koja djeluje na glavi sidra – krutost sidra stoga ne utječe na stabilnost. Međutim, tlo u razini glave sidra može doći u plastično stanje. Stoga je nakon završetka proračuna potrebno provjeriti lokaciju i stvarnost plastičnih deformacija koje predstavljaju kliznu plohu.

U slučaju da se tlo ispod glave sidra plastificira, potrebno je urediti model (za više detalja pogledajte Pomoć – F1).

Ostali uneseni parametri se ne mijenjaju. Sad ćemo provesti proračun faze gradnje 3 i ponovno provjeriti rezultate rješenja (slično kao u prethodnoj fazi gradnje).

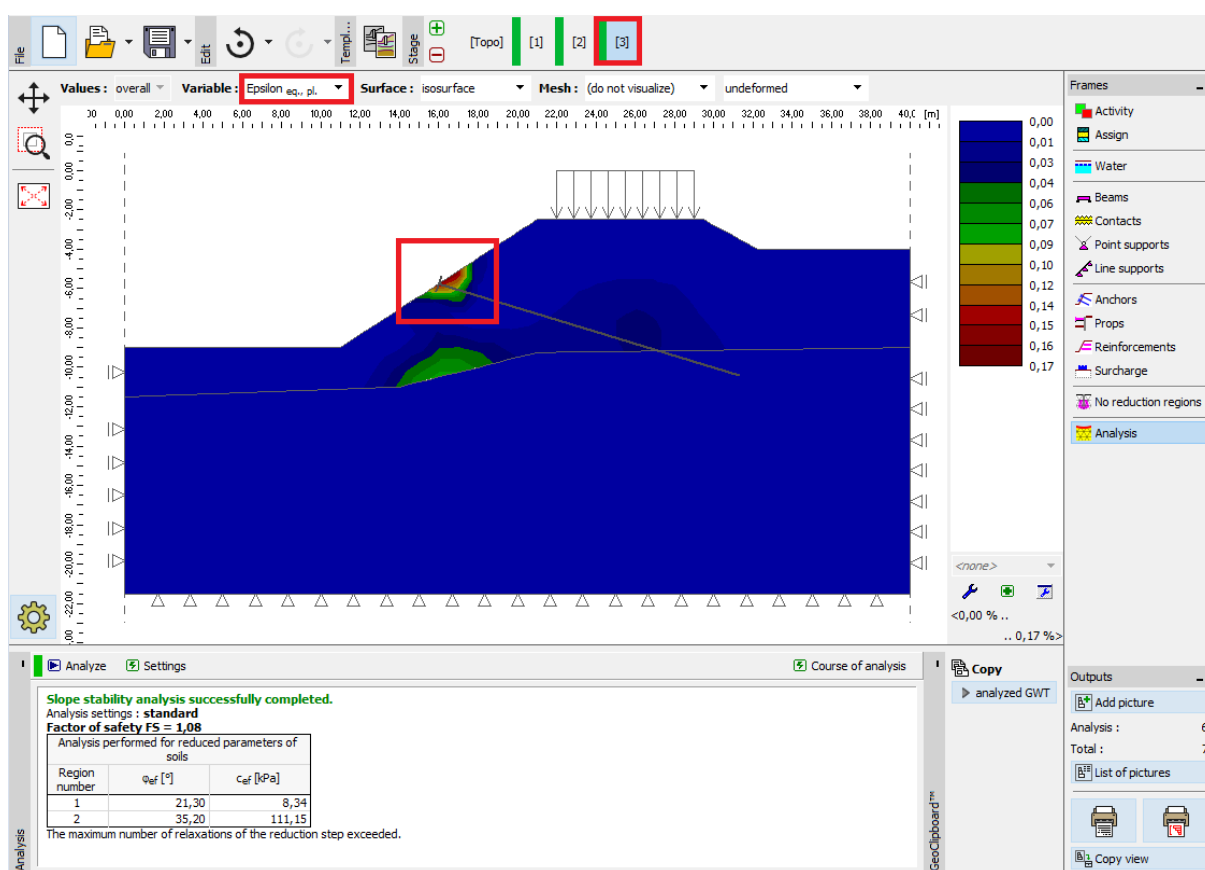


Kartica "Analysis" – Faza gradnje 3 (ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq,pl}$)

Ovaj korak zaključuje inicijalni proračuna. Zapisat ćemo vrijednosti rezultante stupnja stabilnosti kosine u sumiranoj tablici; sad možemo izvršiti procjenu danog problema za ostale modele materijala (Mohr-Coulomb i Modificirani Mohr-Coulomb).

Napomena: Provjera oblika klizne plohe vrlo je važna u nekim slučajevima, jer lokalno otkazivanje konstrukcije može nastupiti čak i u drugim područjima nego što očekujemo (za više detalja pogledajte Pomoć – F1). Na sljedećoj slici vidimo razvoj lokalizirane plastične zone tla u blizini glave sidra tijekom proračuna s gustoćom mreže od 1,0 m za Drucker–Pragerov model. Ako se to dogodi, razumno je urediti model konstrukcije, na primjer kako slijedi:

- povećati duljinu ruba elementa mreže,
- uvesti tlo s većim parametrima čvrstoće c i ϕ u razini glave sidra,
- definirati gredne elemente na glavi sidra (poboljšat će se raspodjela opterećenja u tlu),
- koristiti „No reduction“ zone (više informacija – inženjerski priručnik br. 35).



Kartica “Analysis” – Faza gradnje (lokalizirana plastičnost tla ispod glave sidra, DP model s mrežom od 1.0 m)

Procjena rezultata

Sljedeća tablica prikazuje rezultate stupnja stabilnosti kosine (faktor sigurnosti) za individualne faze gradnje. Proveli smo proračun za neke od nelinearnih modela materijala u GEO 5 – MKE programu i raznim gustoćama mreže konačnih elemenata. Za usporedbu, prikazat ćemo i rezultate dobivene u GEO 5 – Stabilnost kosina programu (prema Bishop-u i Spencer-u).

Model materijala	Razmak mreže [m]	Faza 1 <i>FS</i>	Faza 2 <i>FS</i>	Faza 3 <i>FS</i>	Napomena
DP	1.0	1.65	1.42	1.08 *	* Tlo ispod glave sidra je plastificirano.
DP	1.5	1.69	1.46	1.65	
DP	2.0	1.71	1.48	1.69	
MC	1.0	1.52	1.35	0.90 *	* Tlo ispod glave sidra je plastificirano.
MC	1.5	1.56	1.37	1.52	
MC	2.0	1.58	1.39	1.58	
MCM	1.0	1.76	1.54	1.20 *	* Tlo ispod glave sidra je plastificirano.
MCM	1.5	1.81	1.58	1.76	
MCM	2.0	1.83	1.58	1.81	
BISHOP (analitičko rješenje)	---	1.51	1.33	1.47	Vidi ispod
SPENCER (analitičko rješenje)	---	1.51	1.32	1.52	Vidi ispod

Suma rezultata – stupanj stabilnosti kosine (faktor sigurnosti)

Napomena: Uzeli smo u obzir postavku proračuna kao “Standard – Factors of safety”. Proveli smo proračun najprije prema Bishop-u, a zatim prema Spencer-u s optimizacijom kružne klizne plohe (bez limitacije).

Zaključak

Sljedeći zaključak se može izvući iz rezultata numeričkog rješenja:

- Lokalno povećana gustoća mreže konačnih elemenata vodi do točnijih rezultata; no s druge strane, trajanje proračuna za svaku fazu gradnje se povećava.
- Potrebno je za proračun koristiti nelinearne modele materijala, što dopušta razvoj plastičnih deformacija.
- Maksimalne ekvivalentne plastične deformacije $\varepsilon_{eq.,pl.}$ predstavljaju lokacije gdje će biti locirano otkazivanje na potencijalnoj kliznoj plohi.