

Numeričko rješenje za konstrukciju zagatne stijene

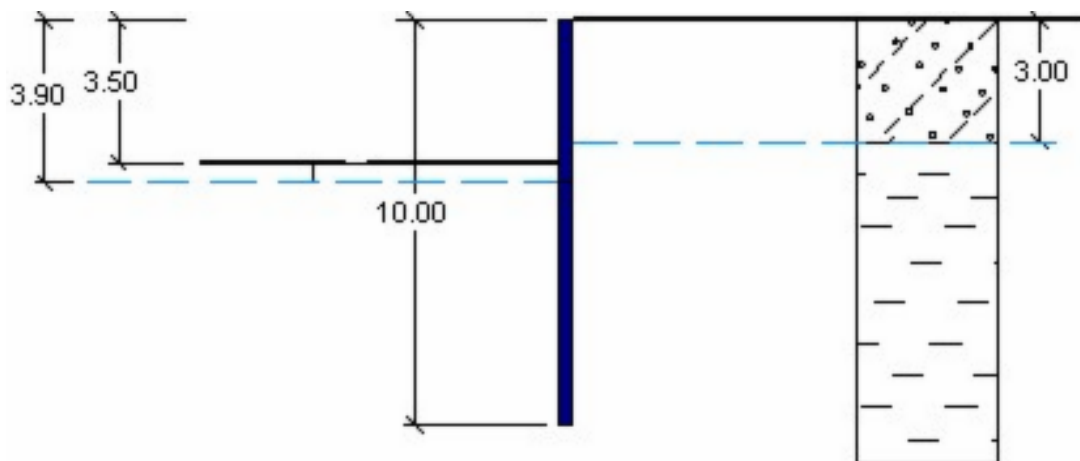
Program: MKE

File: Demo_manual_24.gmk

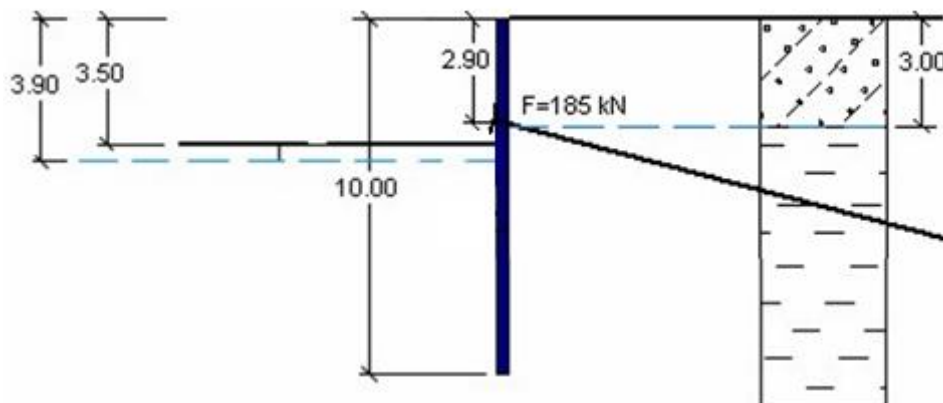
Cilj ovog priručnika je proračun deformacija usidrenog zida na pilotima i određivanje dijagrama unutarnjih sila koristeći metodu konačnih elemenata.

Opis zadatka

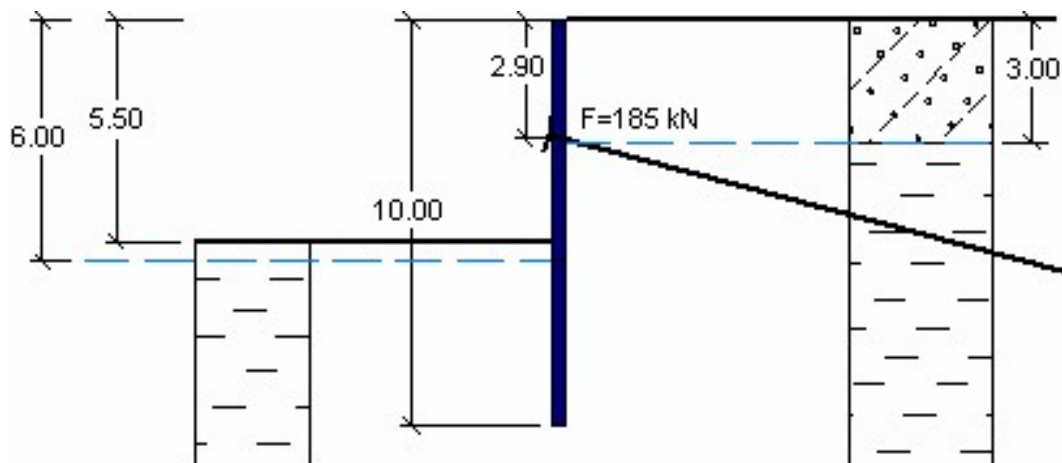
Odredite stanje naprezanja (deformacija) usidrenog zida na pilotima koji se sastoji od $500 \times 340 \times 9,7 \text{ mm}$ VL 503 pilota; shema konstrukcije za individualne faze izgradnje je prikazana na slikama ispod. Odredite unutarnje sile koje djeluju pod duljini usidrenog zida. Piloti su izrađeni od EN 10 025: Fe 360 čelika. Zid je visok 10.



Faza konstrukcije 2 – iskop tla do dubine 3.5 m



Faza konstrukcije 3 – dodavanje sidra



Faza konstrukcije 4 – iskop tla do dubine 5.5 m

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

- 0.0 do 3.0 m: Muljeviti pijesak (SM – srednje gusto tlo),
- ispod 3 m: Niskoplastična glina (CL, CI – krute konzistencije).

Parametri tla / Klasifikacija	Muljeviti pijesak (SM)	Niskoplastična glina (CL, CI)
Jedinična težina tla: γ [kN/m^3]	18	21
Modul elastičnosti: E [MPa]	10	4,5
Modul elastičnosti rasterećenja: E_{ur} [MPa]	20	13
Poissonov koeficijent: ν [–]	0,3	0,4
Kohezija tla: c_{eff} [kPa]	5	12
Kut unutarnjeg trenja: ϕ_{eff} [$^\circ$]	29	19
Kut dilatacije: ψ [$^\circ$]	0	0
Saturirana jedinična težina: γ_{sat} [kN/m^3]	20	23

Tablica parametara tla – usidreni zid na pilotima

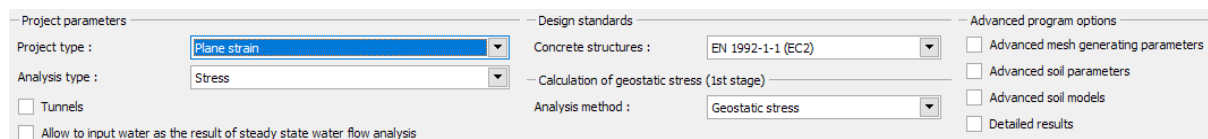
Rješenje

Koristit ćemo GEO5 – MKE program za analizu ovog problema. U tekstu ispod ćemo opisati korake do rješenja:

- Topologija: priprema i modeliranje problema (granice slojeva, kontakti, povećanje gustoće linija)
- Faza konstrukcije 1: primarno geostatičko naprezanje, određivanje točaka za praćenje rezultata
- Faza konstrukcije 2: aktiviranje regija, određivanje greda, proračun deformacija, unutarnje sile
- Faza konstrukcije 3: određivanje sidara
- Faza konstrukcije 4: iskop tla, proračun rezultata + točke za praćenje rezultata.
- Procjena rezultata: usporedba, zaključak.

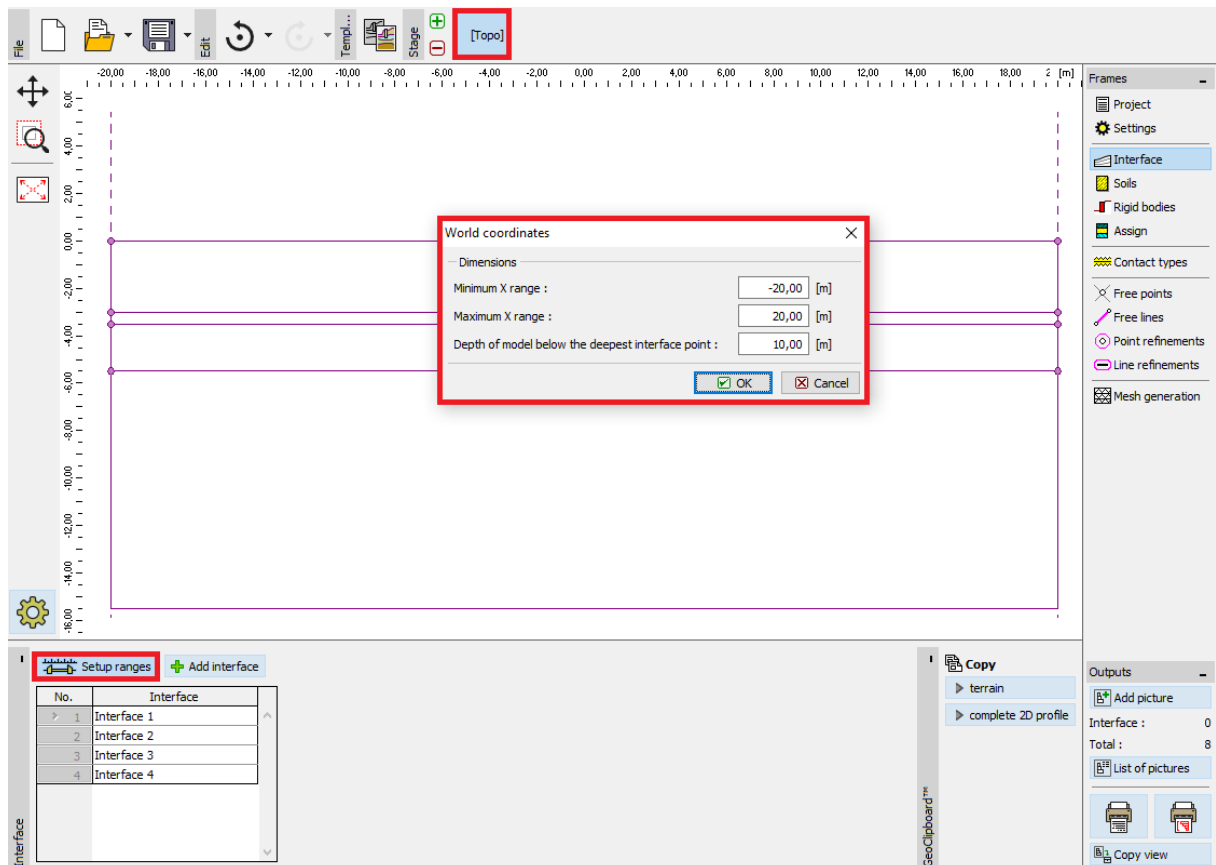
Topologija: postavke problema

Ostavit ćemo metodu proračuna za fazu konstrukcije 1 na “geostatic stress”. Za vrstu proračuna odabrat ćemo *plane strain*.



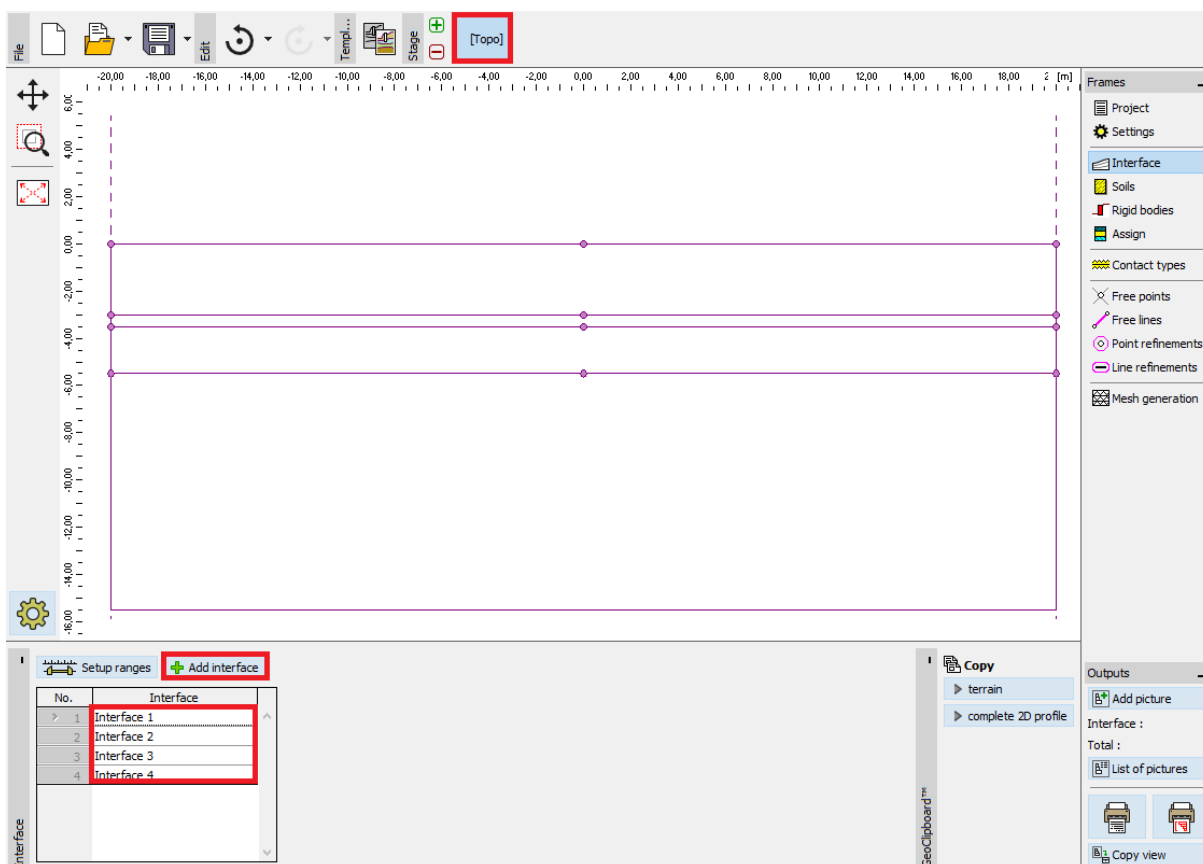
kartica “Settings”

Nakon toga ćemo postaviti koordinate; odabrat ćemo dovoljne dimenzije gabarita kako rezultati ne bi bili pod utjecajem rubova. Za naš problem odabrat ćemo dimenzije modela $\langle -20 \text{ m}; 20 \text{ m} \rangle$, a dubinu od najnižeg sloja tla na 10m.



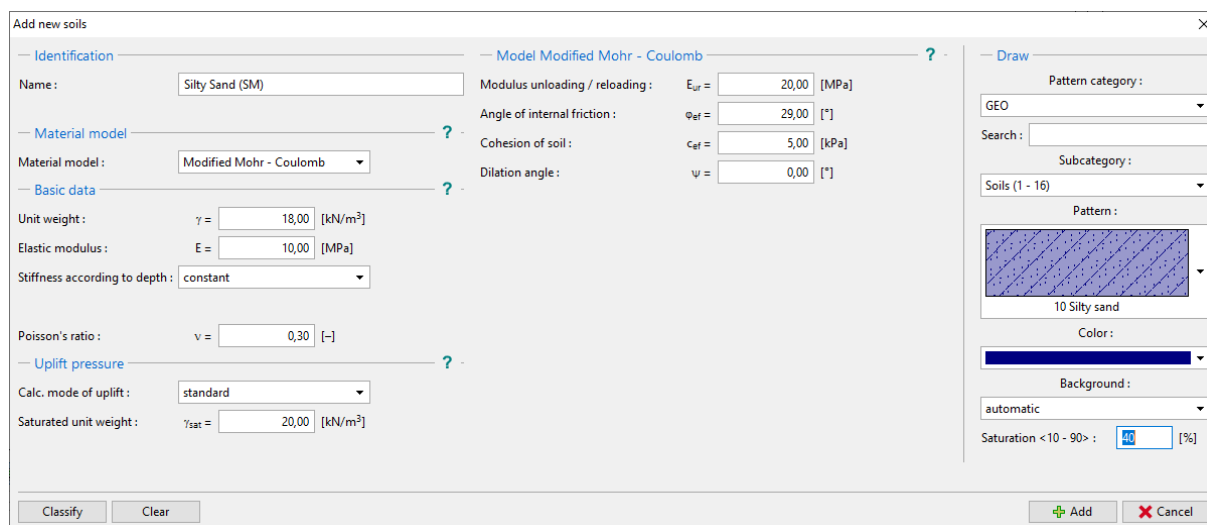
“World coordinates” dijaloški prozor

Prilikom modeliranja konstrukcije dijafragme, potrebno je definirati dubine do kojih će se iskopati tlo u individualnim fazama konstrukcije na način da se zadaju granice slojeva tla. U ovom slučaju postaviti ćemo razinu terena na 0.0 m i horizontalne granice slojeva na -3.0 m, -3.5 m i -5.5. m. Točka s koordinatama [0.0; 0.0] bit će ujedno i vrh zida (dijafragme).



kartica "Interface"

Sad ćemo odrediti parametre tla te ćemo dodijeliti tla odgovarajućim regijama. Koristit ćemo modificirani Mohr-Coulombov model (pogledajte napomenu).



Add new soils

Identification

Name: Silty Sand (SM)

Material model

Material model: Modified Mohr - Coulomb

Basic data

Unit weight: $\gamma = 18,00$ [kN/m³]
 Elastic modulus: $E = 10,00$ [MPa]
 Stiffness according to depth: constant
 Poisson's ratio: $\nu = 0,30$ [-]

Uplift pressure

Calc. mode of uplift: standard
 Saturated unit weight: $\gamma_{sat} = 20,00$ [kN/m³]

Model Modified Mohr - Coulomb

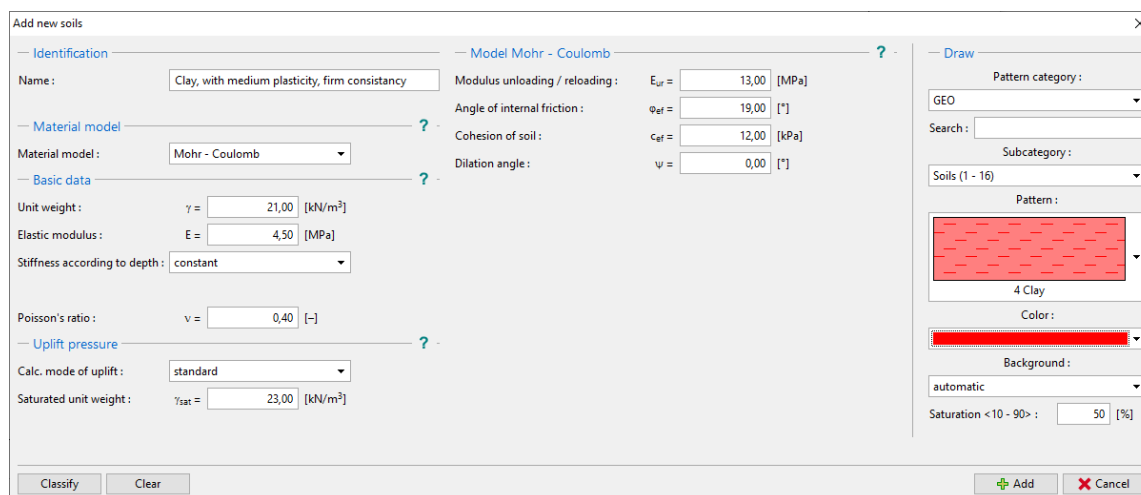
Modulus unloading / reloading: $E_{ur} = 20,00$ [MPa]
 Angle of internal friction: $\phi_{ef} = 29,00$ [°]
 Cohesion of soil: $c_{ef} = 5,00$ [kPa]
 Dilation angle: $\psi = 0,00$ [°]

Draw

Pattern category: GEO
 Search:
 Subcategory: Soils (1 - 16)
 Pattern: 10 Silty sand
 Color:
 Background: automatic
 Saturation <10 - 90>: 40 [%]

Classify Clear Add Cancel

“Add new soils” dijaloški prozor



Add new soils

Identification

Name: Clay, with medium plasticity, firm consistency

Material model

Material model: Mohr - Coulomb

Basic data

Unit weight: $\gamma = 21,00$ [kN/m³]
 Elastic modulus: $E = 4,50$ [MPa]
 Stiffness according to depth: constant
 Poisson's ratio: $\nu = 0,40$ [-]

Uplift pressure

Calc. mode of uplift: standard
 Saturated unit weight: $\gamma_{sat} = 23,00$ [kN/m³]

Model Mohr - Coulomb

Modulus unloading / reloading: $E_{ur} = 13,00$ [MPa]
 Angle of internal friction: $\phi_{ef} = 19,00$ [°]
 Cohesion of soil: $c_{ef} = 12,00$ [kPa]
 Dilation angle: $\psi = 0,00$ [°]

Draw

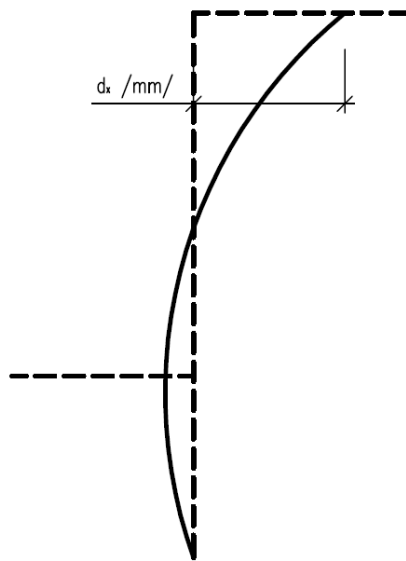
Pattern category: GEO
 Search:
 Subcategory: Soils (1 - 16)
 Pattern: 4 Clay
 Color:
 Background: automatic
 Saturation <10 - 90>: 50 [%]

Classify Clear Add Cancel

“Add new soils” dijaloški prozor

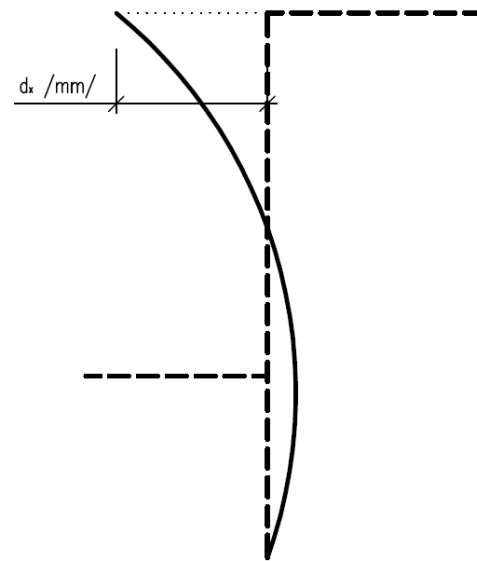
Napomena: Prilikom modeliranja zagatnih konstrukcija, potrebno je unijeti i elemente kontakta između tla i greda. Rješavanje problema bez elemenata kontakta dovodi do nerealističnih rezultata (za više detalja posjetite Pomoć – F1).

Solution without contacts



deformation of sheeting to a soil
(wrong)

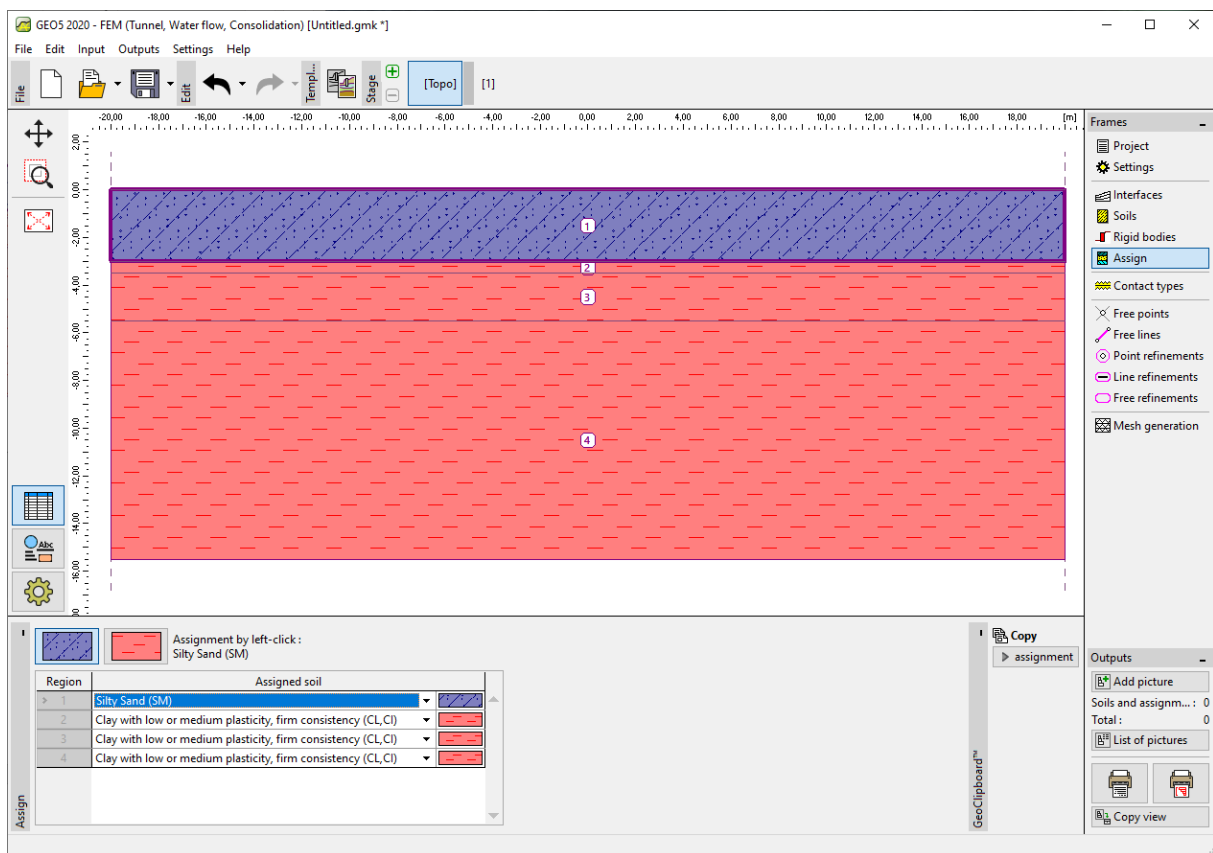
Solution with contacts



deformation of sheeting from a soil
(right)

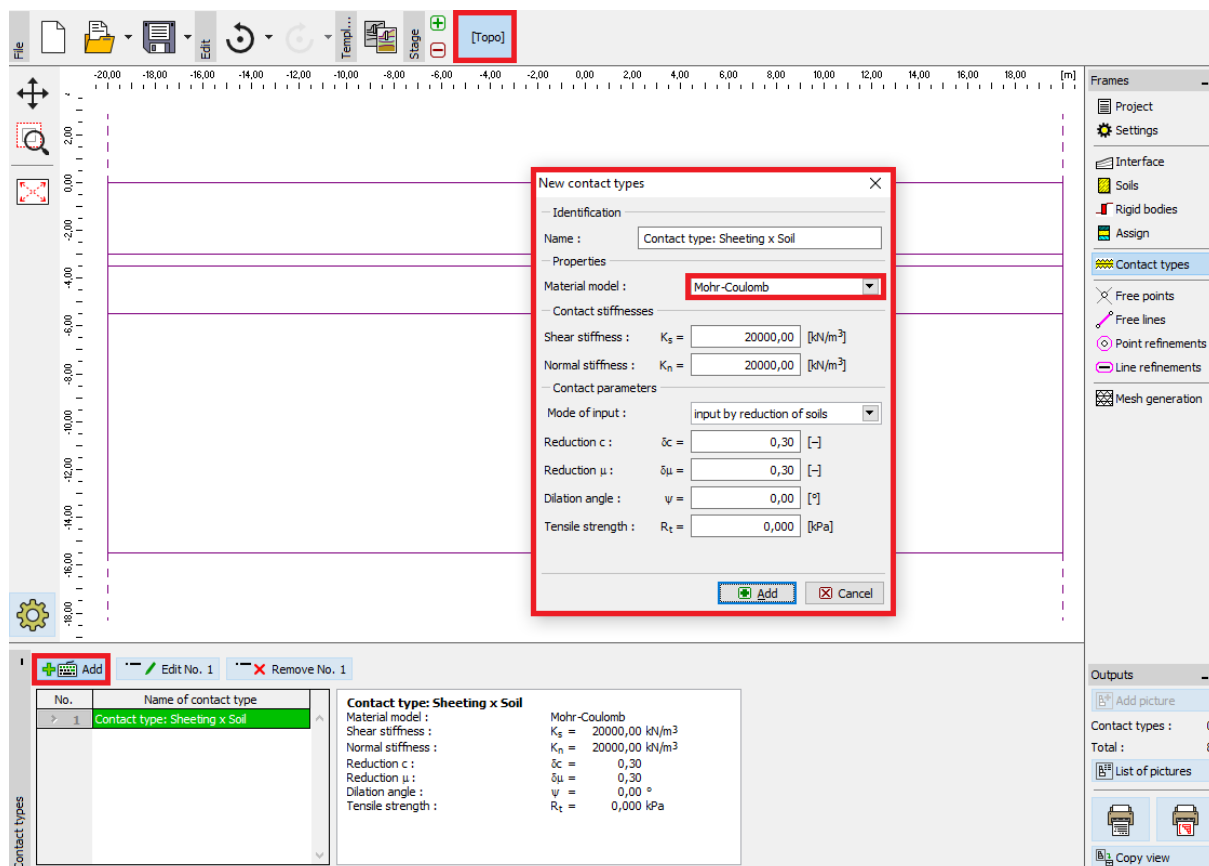
Primjena odgovarajućeg modela materijala u numeričkom proračunu zagatnih konstrukcija

Sljedeća slika prikazuje dodjelu tla geološkom profilu.



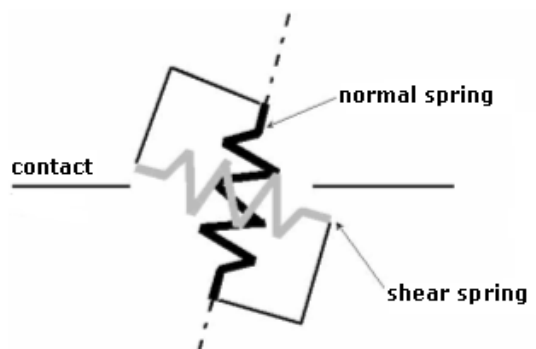
kartica "Assign"

Sljedeći korak je definiranje parametara kontakata (korištenjem tipke “Add”). Prilikom proračuna zagatnih konstrukcija, uvijek je potrebno definirati kontakt s nelinearnim modelom materijala za gredne elemente. U našem slučaju odabrat ćemo opciju “Mohr-Coulomb” za dobivanje realističnih rezultata. Pretpostavljamo redukciju parametara tla na kontaktu za $\delta c = \delta \mu = 0.3$ i zadržavamo standardne vrijednosti krutosti kontakta $K_s = K_n = 20\,000\text{ kN/m}^3$.



“New contact types” dijaloški prozor

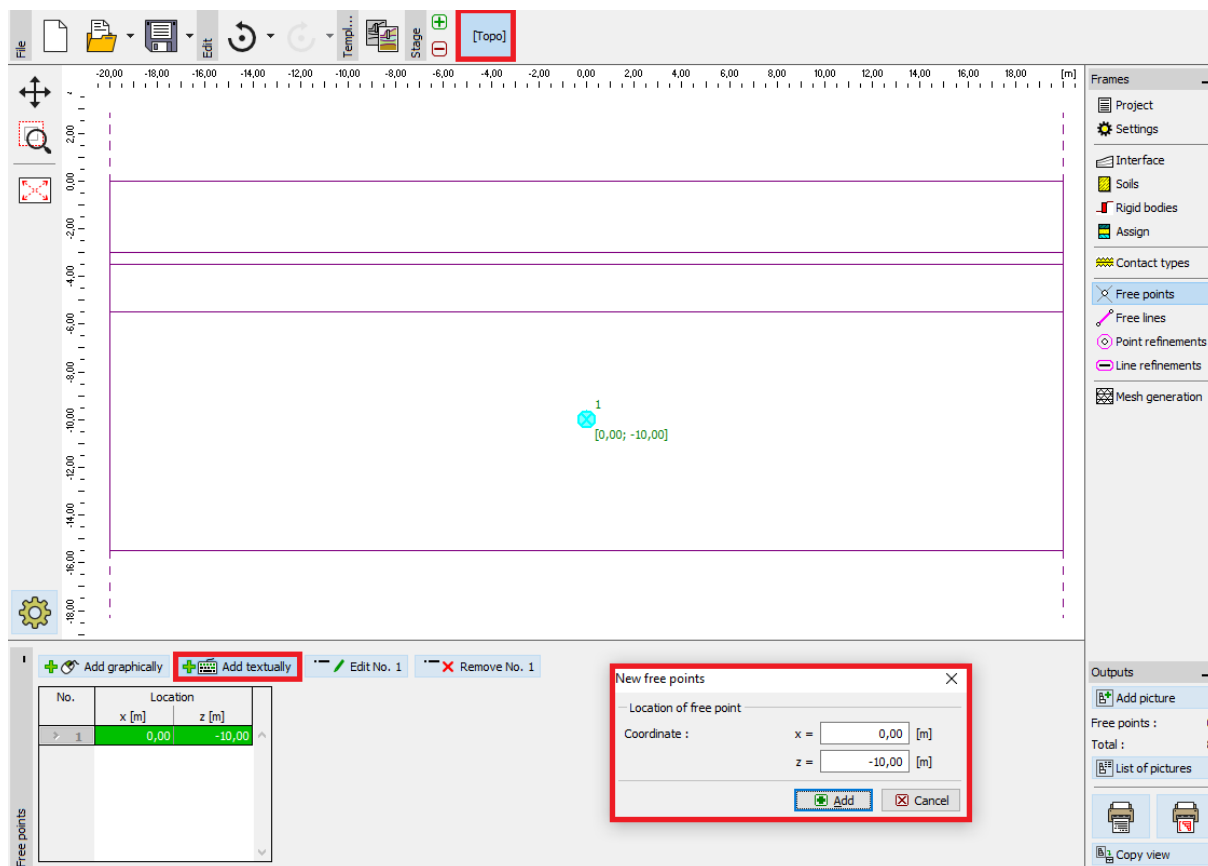
Napomena: Elementi kontakta su korišteni u proračunu gdje je potrebno dopustiti interakciju između konstrukcije i okoline – granica dvaju potpuno drugačijih materijala (tlo-zagatna konstrukcija). Tipičan primjer korištenja elemenata kontakta je modeliranje zagatnih konstrukcija, potpornih zidova ili obloga tunela, gdje koristimo elemente kontakta za simulaciju tankog područja tla ili stijene unutar kojeg djeluju intenzivna naprezanja (najčešće posmično naprezanje). Kontakti se mogu koristiti čak i između različitih slojeva tla. Element kontakta je element bez debljine, a predstavlja vezu između kontaktnih naprezanja i relativnih promjena u pomacima duž kontakta (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



Shematski prikaz elementa kontakta

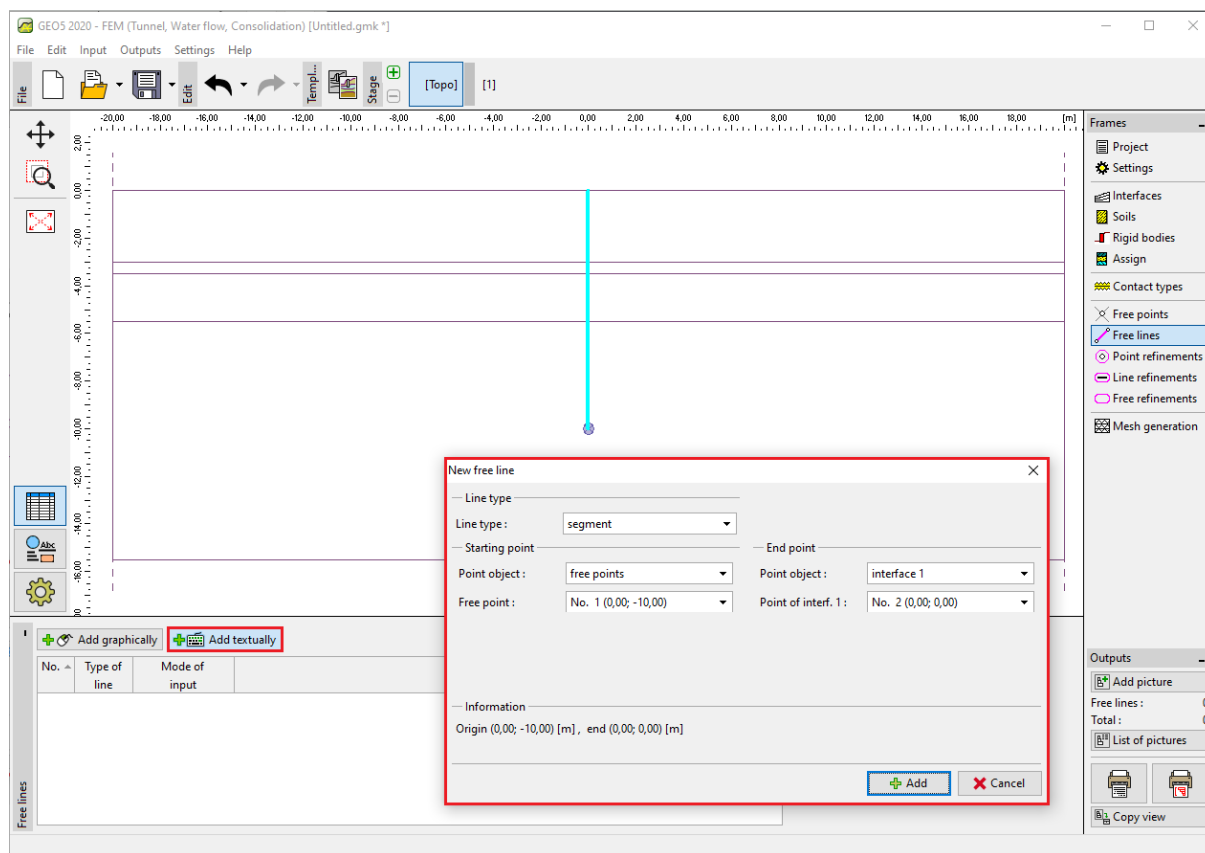
Napomena: Usprkos činjenici da odabir parametra K_s nije važan u slučaju potpuno plastičnog ponašanja kontakta, veličina ove vrijednosti je od značajne važnosti za uspješno rješenje ovakvog nelinearnog problema. Prevelike vrijednosti krutosti (iznad $100\,000\text{ kN/m}^3$) mogu dovesti do oscilacija numeričkog rješenja. S druge strane, vrlo niske vrijednosti parametara K_s i K_n (ispod $10\,000\text{ kN/m}^3$) mogu dovesti do nerealističnih deformacija konstrukcija. Kako bilo, vrijednosti kontaktnih naprezanja K_s i K_n nisu značajno ovisne od odabiru krutosti K_s i K_n (za više detalja posjetite Pomoć – F1).

Nakon toga postaviti ćemo geometriju zagatne konstrukcije u karticama “Free points” i “Free lines”. Princip postavljanja slobodnih točaka i slobodnih linija je detaljnije opisan u prethodnom priručniku broj 23 (*Collector lining analysis*).



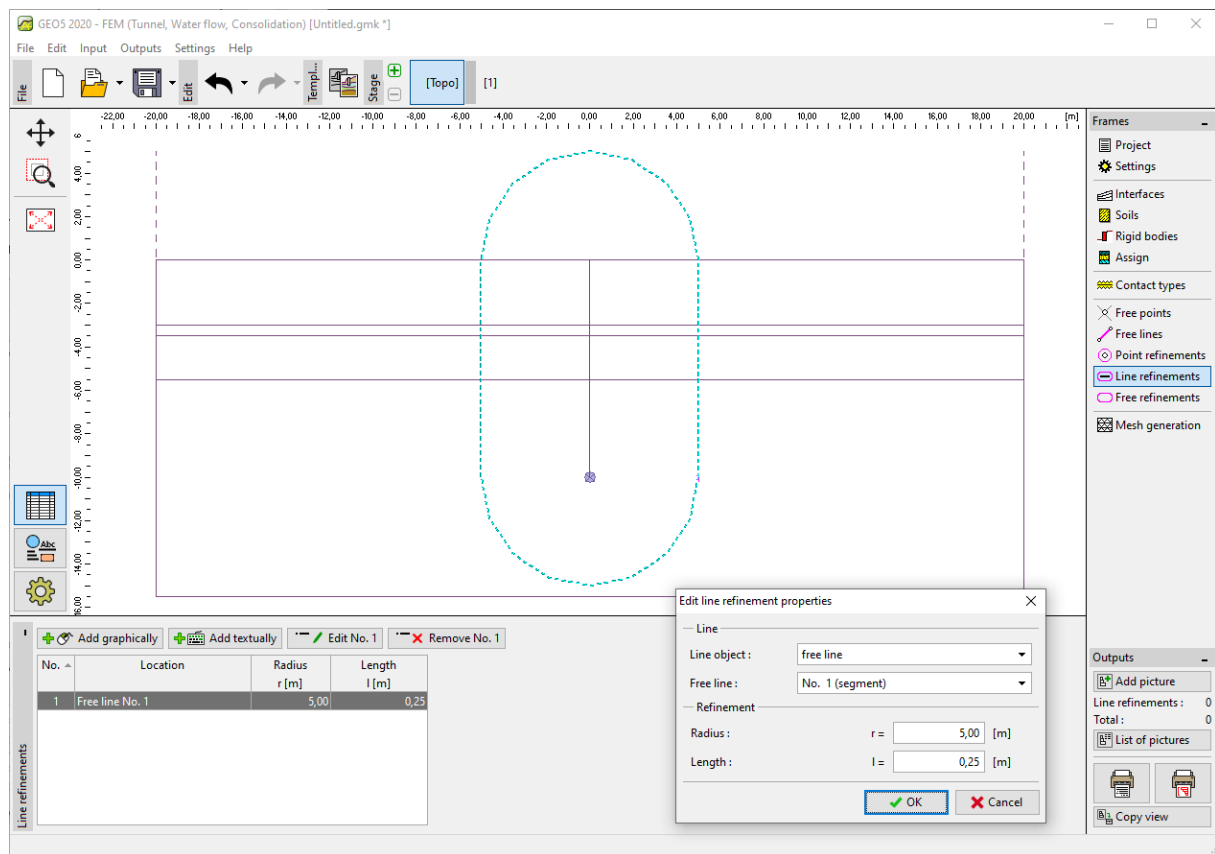
“New free points” dijaloški prozor

Prvo ćemo dodati novu slobodnu točku s koordinatama $[0.0; -10.0]$. Slobodna linija koja oblikuje zagatnu stijenu započinje spajanjem ove točke s točkom granične linije terena (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



“New free lines” dijaloški prozor

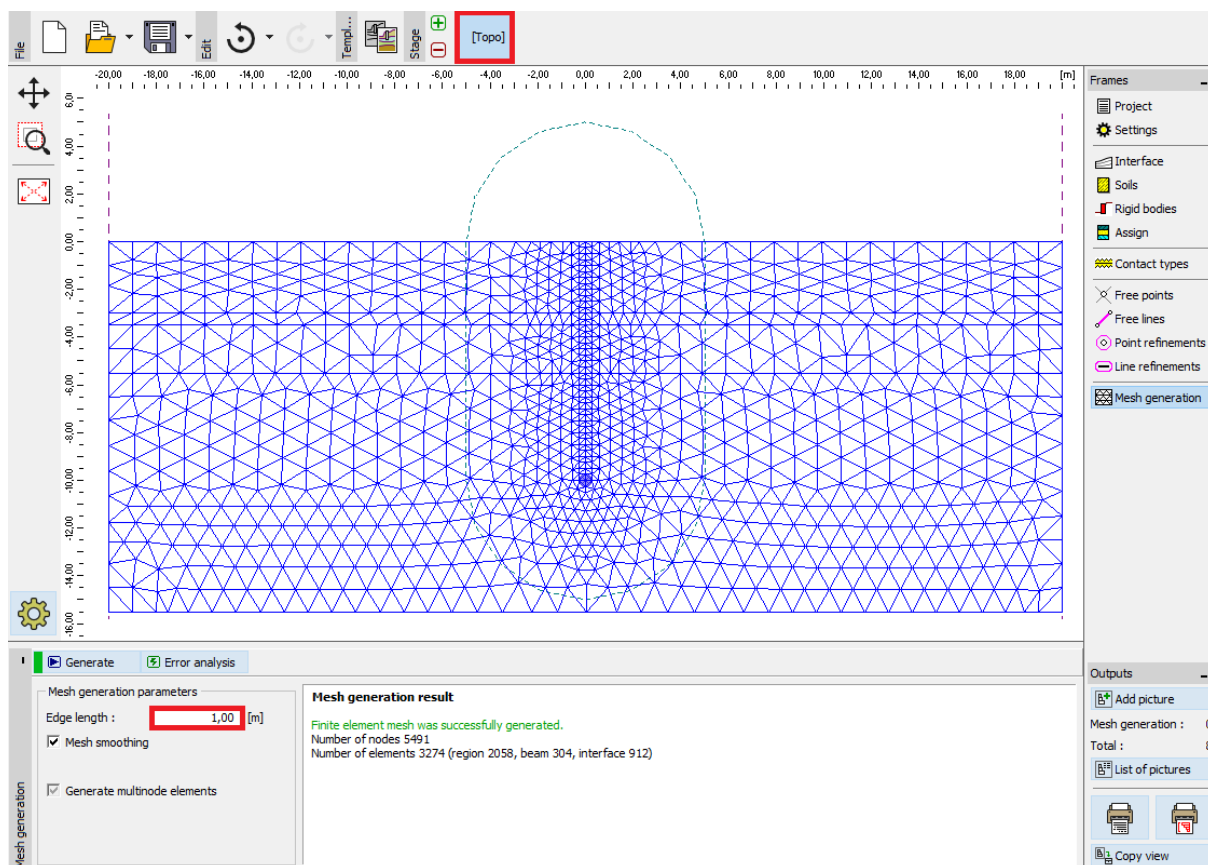
Posljednji korak u postavljanju topologije je generiranje mreže konačnih elemenata. Razumno je ugladiti mrežu konačnih elemenata oko zagatne stijene. U kartici “New line refinements” odabrat ćemo radijus od $r = 5.0 \text{ m}$ i duljinu rubova elemenata $l = 0.25 \text{ m}$.



“New line refinements” dijaloški prozor

Zatim idemo u karticu “Mesh generation” i generiramo mrežu s duljinom rubova elemenata od 1.0 m (klikom na tipku “**Generate**”). Program će automatski ugladiti mrežu konačnih elemenata.

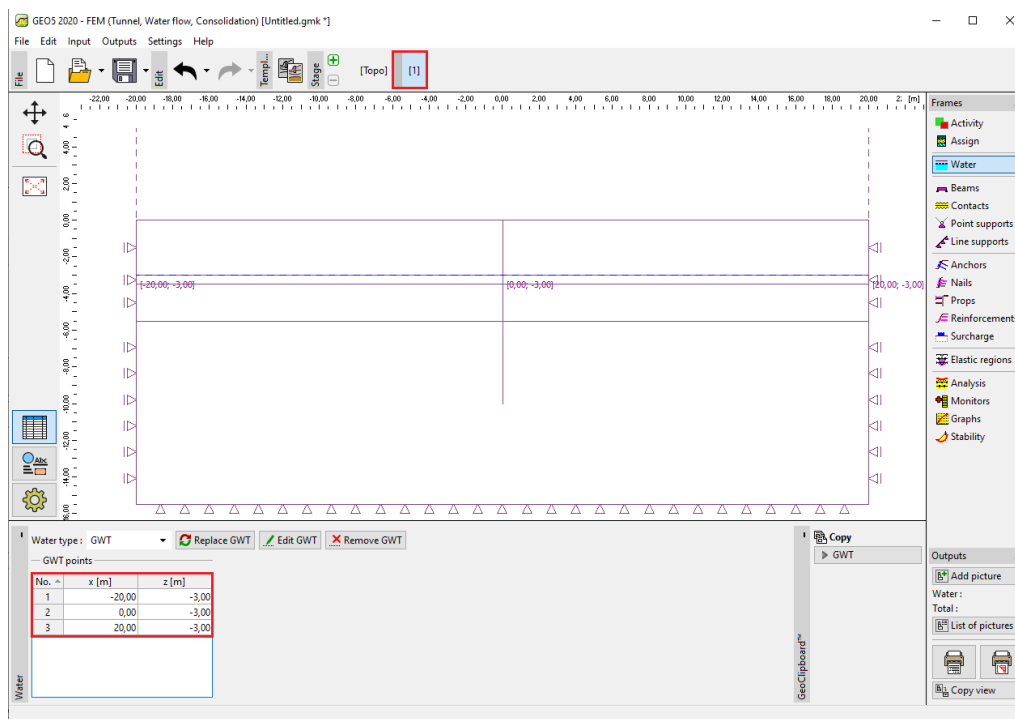
Napomena: Vizualno ćemo pregledati je li mreža konačnih elemenata dovoljno gusta ovisno o kompleksnosti danog problema (za više detalja posjetite Pomoć – F1). Povećana gustoća mreže doprinosi stabilizaciji nelinearnog proračuna slično efektu smanjenja posmične krutosti.



kartica "Mesh generation" – rubovi elemenata od 1 m (s lokalno povećanom gustoćom mreže)

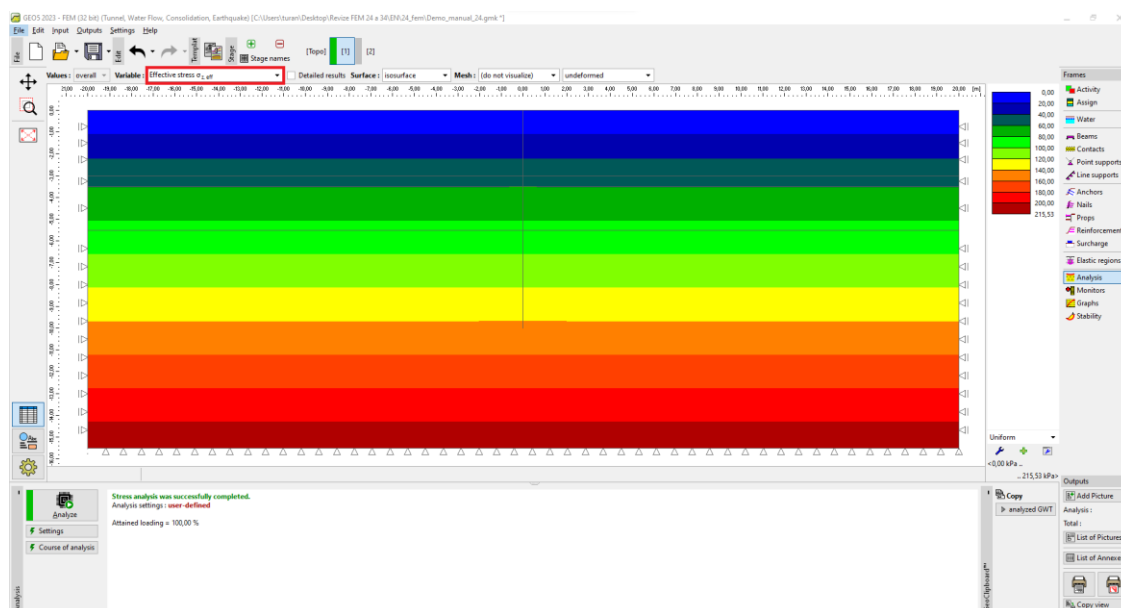
Faza konstrukcije 1: primarno geostatičko naprezanje

Nakon generiranja mreže, prelazimo na fazu konstrukcije 1 i postavljamo razinu podzemne vode (ubuduće GWT(ground water table)) na dubinu od 3.0 m ispod razine terena (pogledajte sliku).



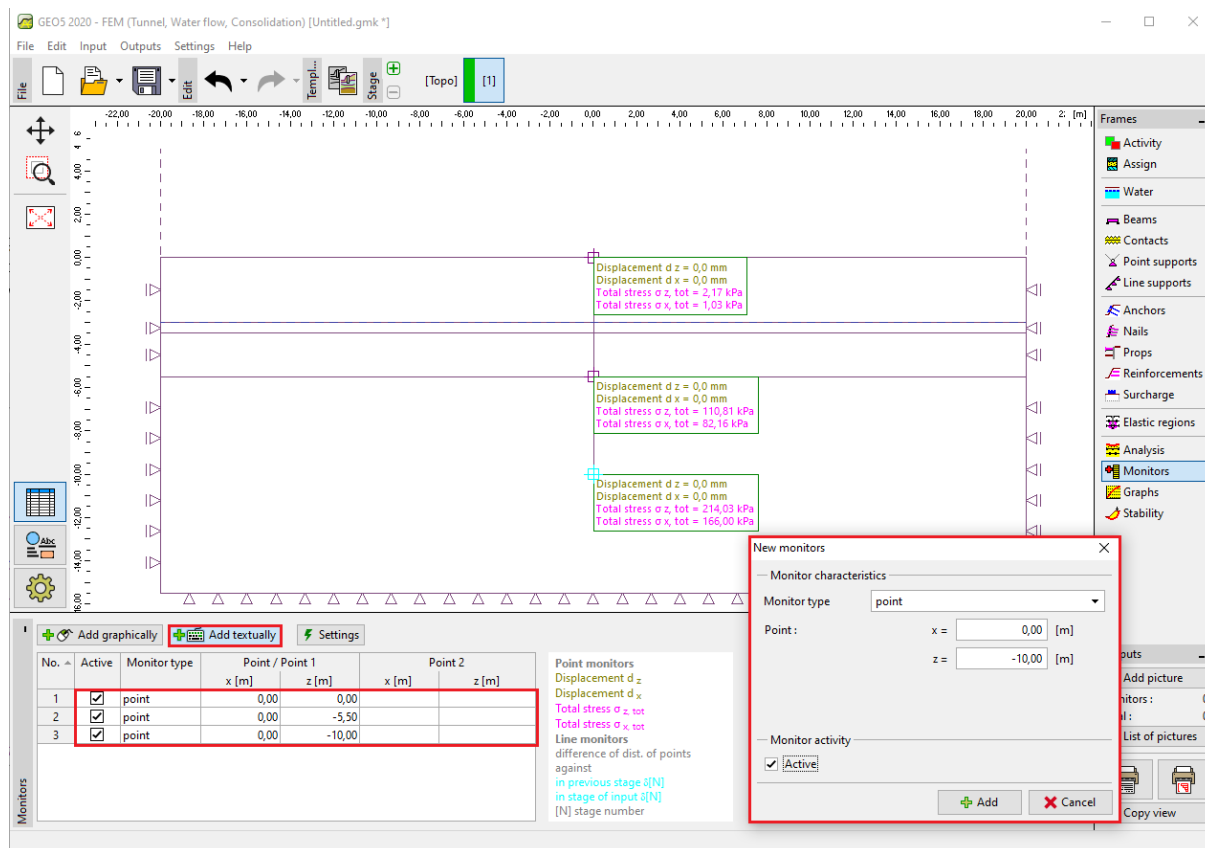
kartica "Water" – Faza konstrukcija 1 (GWT na dubini od 3.0 m)

Provest ćemo proračun primarnog geostatičkog naprezanja. Ostavit ćemo postavke proračuna na "Standard" (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



kartica "Analysis" – Faza konstrukcija 1 (Vertikalno geostatičko naprezanje $\sigma_{z,ef}$)

U svrhu praćenja vrijednosti određenih bitnih točaka (tijekom proračuna individualnih faza konstrukcije) definirat ćemo takozvane *point monitors* unutar programa (koristeći tipku “Add”). Odabrat ćemo lokacije za praćenje u točkama koje predstavljaju vrh i dno zagatne stijene koju modeliramo, tj. [0.0; 0.0] i [0.0; – 10.0] i još na području iskopa tla na dnu građevne jame [0.0; – 5.5].

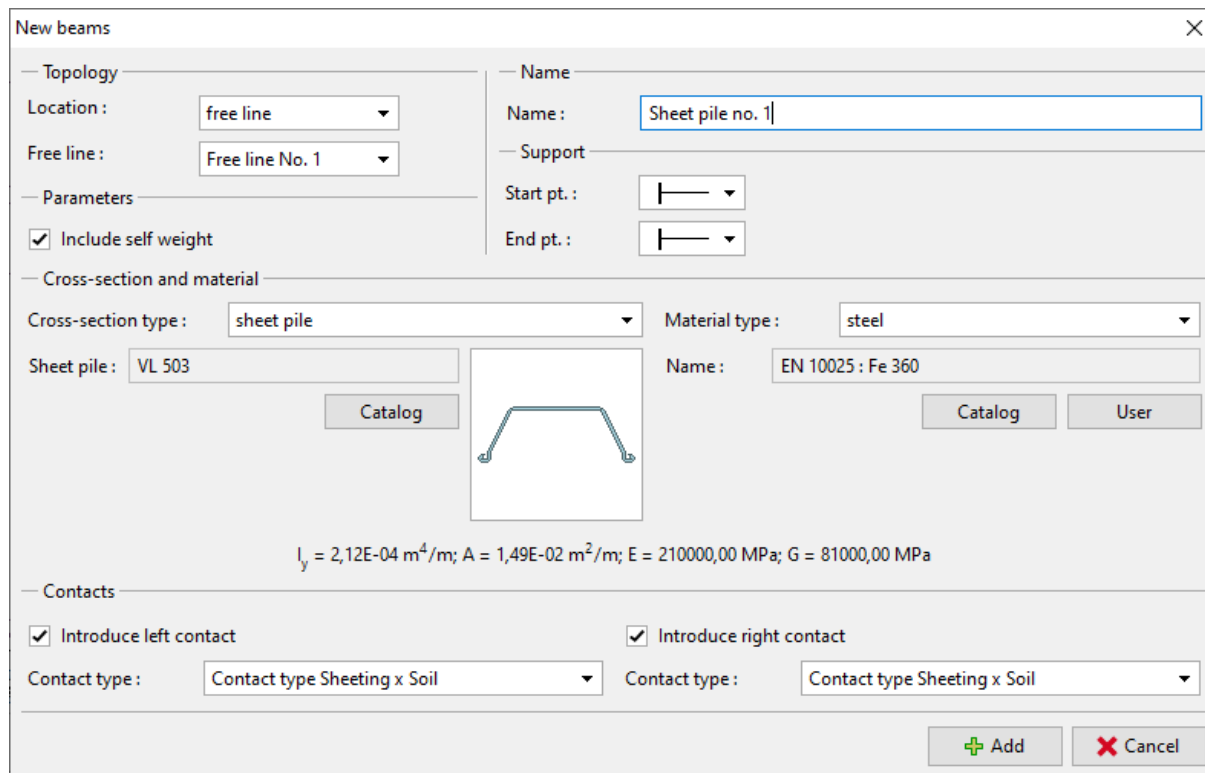


kartica “Monitors” – Faza konstrukcije 1 (točke praćenja rezultata)

Napomena: Uredit ćemo individualne vrijednosti točaka koje želimo prikazati u rezultatima koristeći tipku “Settings” (u donjem desnom dijelu ekrana). Prilikom proračuna zagatne konstrukcije, najviše nas interesira promjena geostatičkog naprezanja i veličina vertikalnih i bočnih pomaka.

Faza konstrukcije 2: modeliranje grednih elemenata

U ovoj fazi konstrukcije najprije idemo u karticu "Beams" gdje modeliramo zagatni zid. Definirat ćemo sljedeće odnose: lokaciju, materijal i klasu čelika, tip poprečnog presjeka (VL 503), ležajave krajeva grede i kontakte (za više detalja posjetite Pomoć – F1).




New beams

— Topology
Location : free line
Free line : Free line No. 1

— Parameters
☒ Include self weight

— Name
Name : Sheet pile no. 1

— Support
Start pt. : Free
End pt. : Free

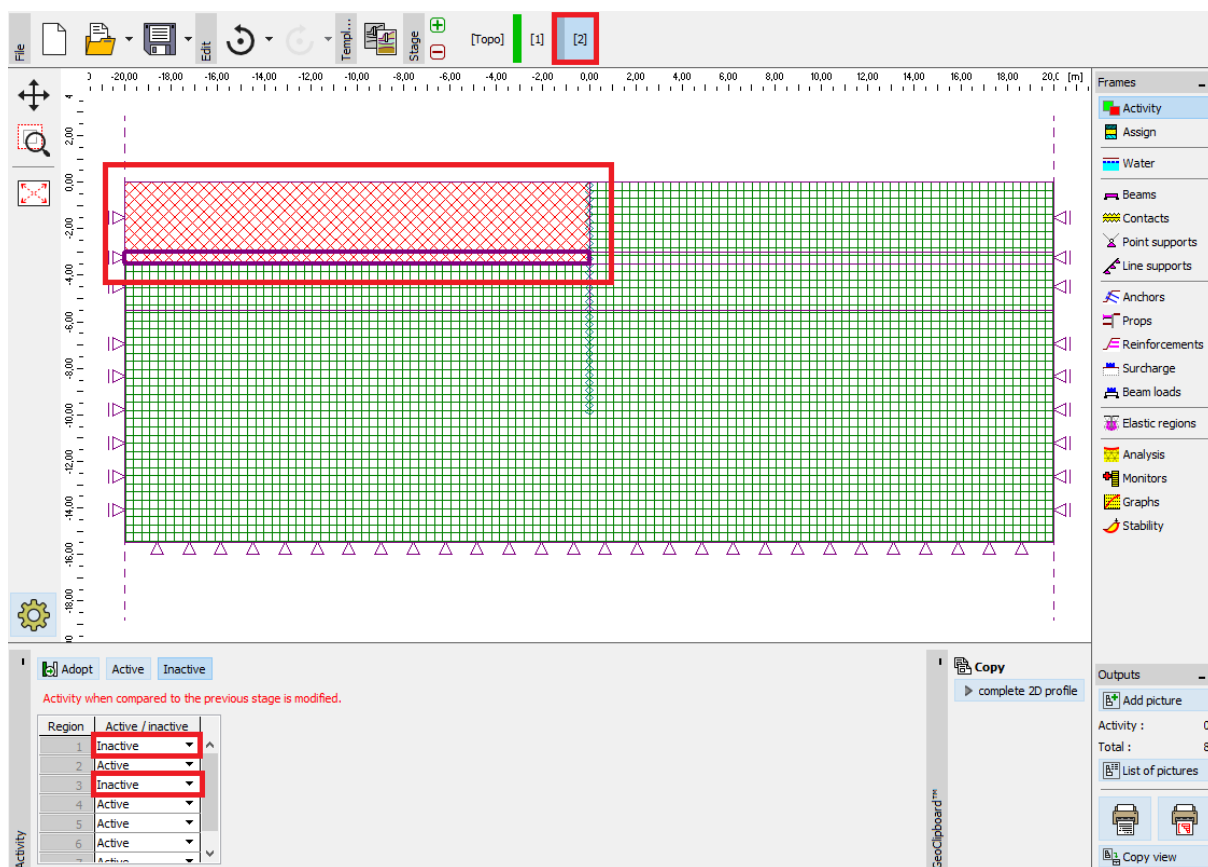
— Cross-section and material
Cross-section type : sheet pile
Sheet pile : VL 503
Catalog

Material type : steel
Name : EN 10025 : Fe 360
Catalog User
 $I_y = 2,12E-04 \text{ m}^4/\text{m}$; $A = 1,49E-02 \text{ m}^2/\text{m}$; $E = 210000,00 \text{ MPa}$; $G = 81000,00 \text{ MPa}$

— Contacts
☒ Introduce left contact
Contact type : Contact type Sheeting x Soil
☒ Introduce right contact
Contact type : Contact type Sheeting x Soil

+ Add X Cancel

"New beams" dijaloški prozor – Faza konstrukcije 2

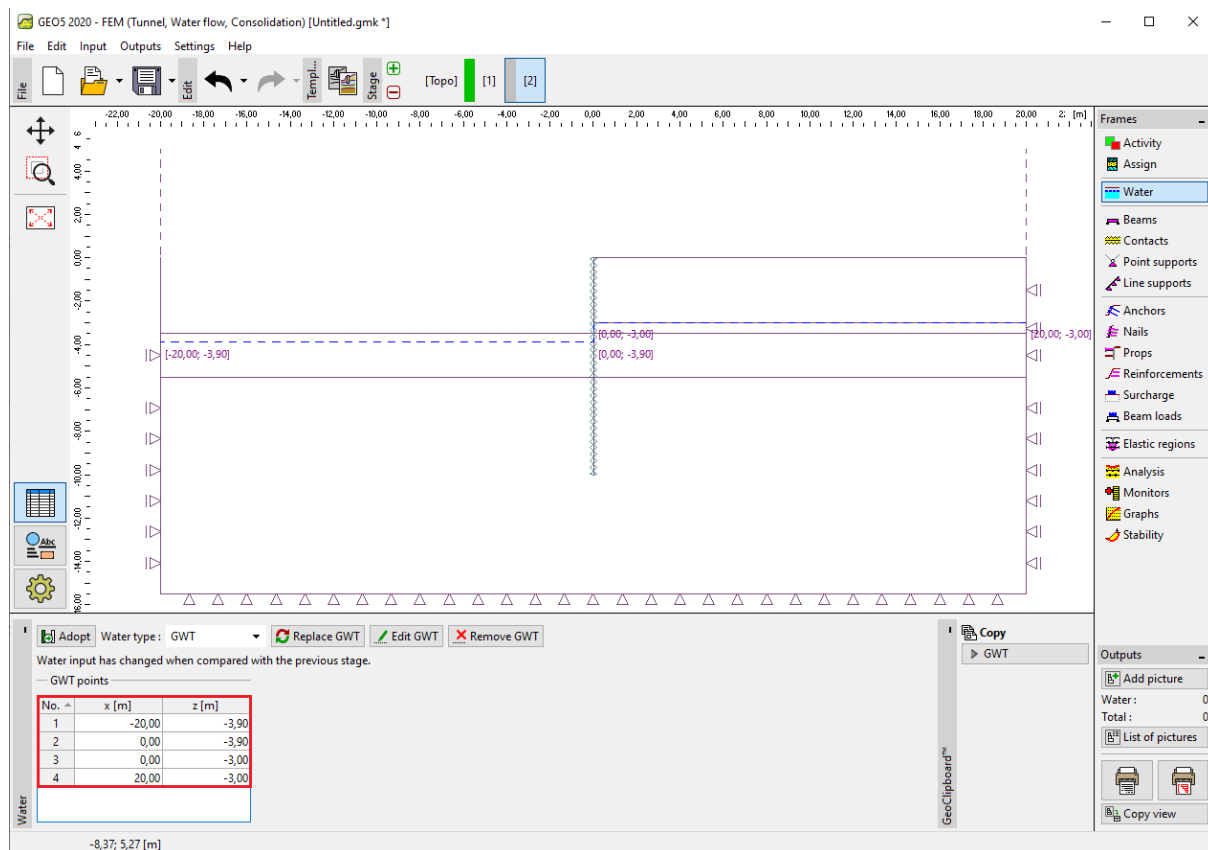
Zatim ćemo modelirati iskop tla u kartici “Activation” – postaviti ćemo dane regije u programu s kursorom miša kao neaktivne (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



kartica “Activation” – Faza konstrukcije 2

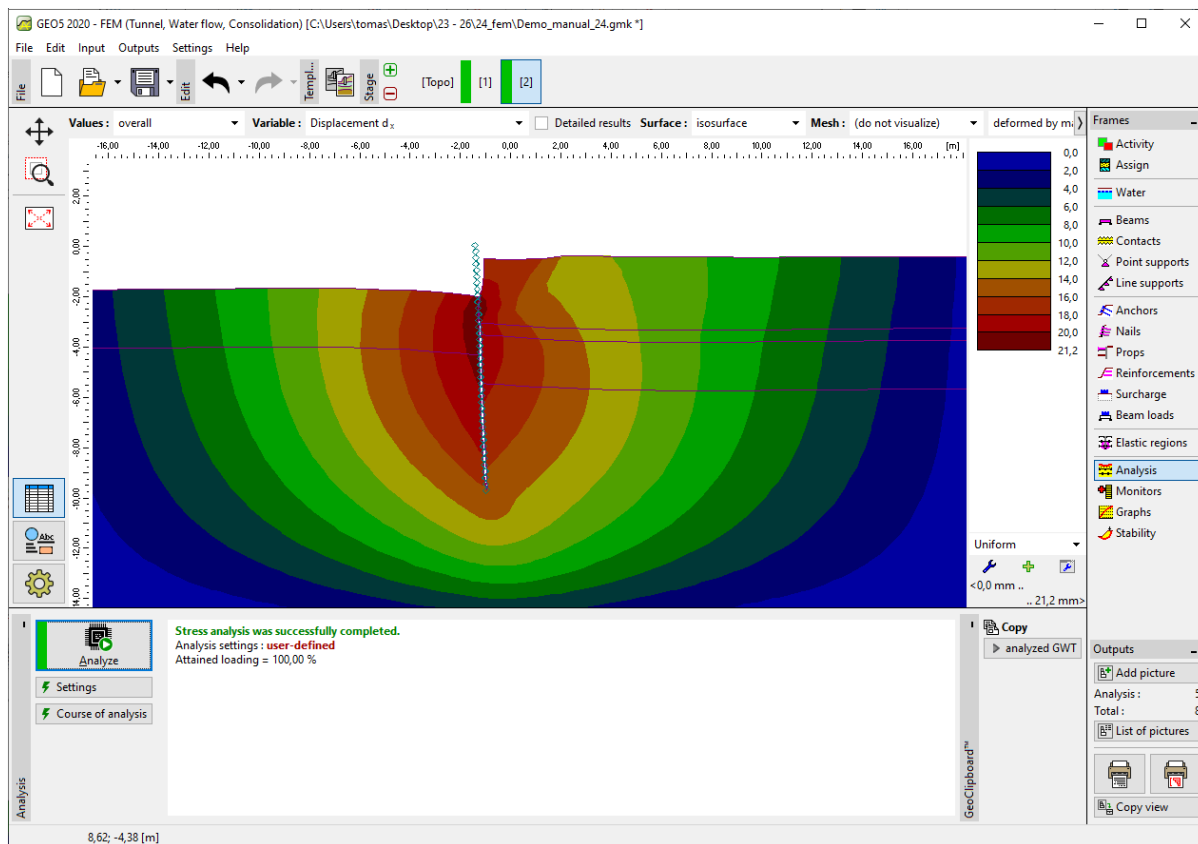
Napomena: Jasno je iz prikaza na slici da program automatski ispravlja konstrukciju prema podjeli granica tla koje se presjecaju sa zidom na individualno obrezanim regijama. (za više detalja posjetite Pomoć – F1).

Dalje, u kartici “Water” unosimo promjenu u GWT prema sljedećoj slici. Ostali parametri ostaju nepromijenjeni.

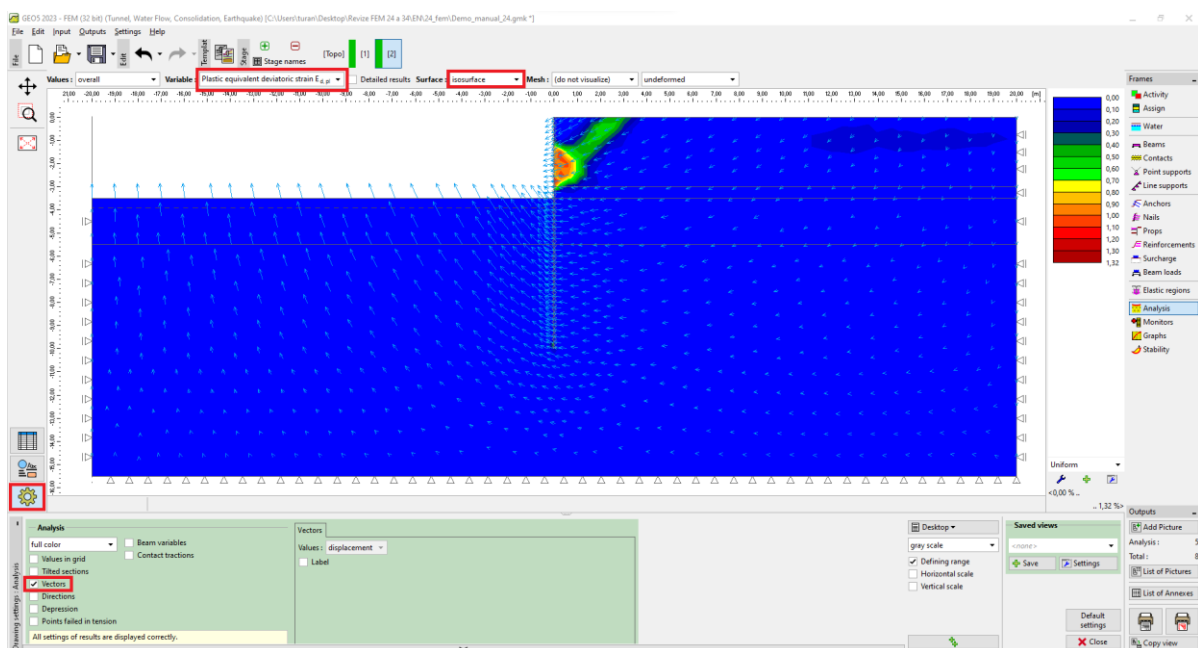


kartica “Water” – Faza konstrukcije 2 (promjene unutar GWT)

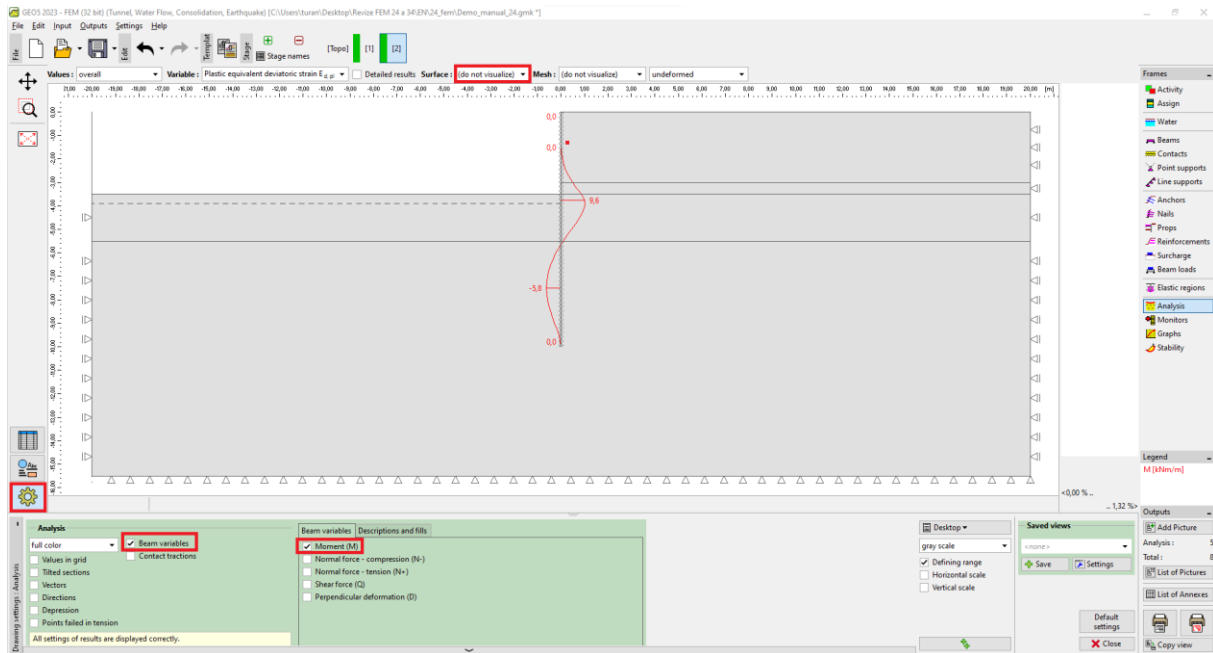
Sad ćemo provesti proračun faze konstrukcije 2 i proučiti rezultate za dijagrame unutarnjih sila duž grede, ekvivalentne plastične deformacije i deformiranu konstrukciju.



kartica "Analysis" – Faza konstrukcije 2 (slijeganje d_x – deformirana konstrukcija)



kartica "Analysis" – Faza konstrukcije 2 (ekvivalentna devijacijska deformacija $E_{a,pl}$ i vektori pomaka)



kartica “Analysis” – Faza konstrukcije 2 (raspodjela momenata savijanja M)

Faza konstrukcije 3: postavke za sidra

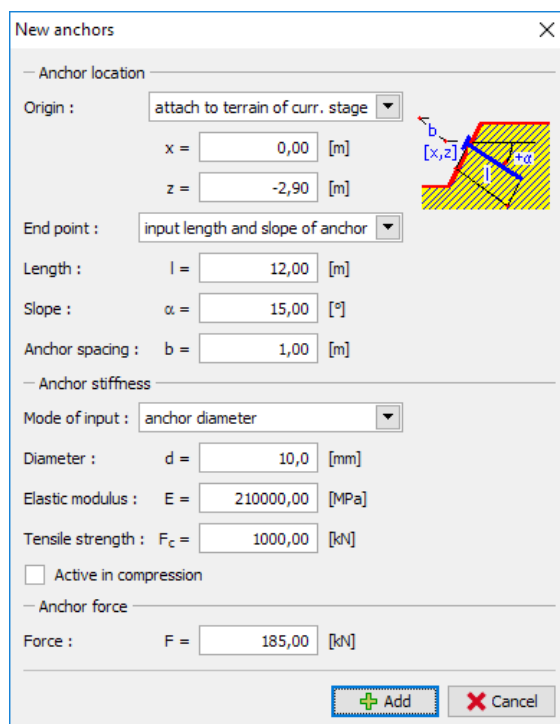
Dodat ćemo fazu konstrukcije 3 i unutar kartice “Anchors” kliknuti na tipku “Add”. Zatim u dijaloškom prozoru “New anchors” postaviti ćemo čelično sidro sa silom prednapinjanja $F = 185 \text{ kN}$. Postaviti ćemo sidro na dubinu od 2.9 m ispod razine terena – postaviti ćemo koordinate glave sidra na točku $[0.0; -2.9]$.

Napomena: Sidra su modelirana u programu kao elastična šipka s konstantnom normalnom krutosti. Otkazivanje elementa sidra je kontrolirano definiranjem maksimalne sile. Sidro je fiksirano u tlo dvjema svojim točkama – na početku i na kraju elementa. Nije pretpostavljena nikakva interakcija između tla i elementa ojačanja po duljini sidra (za više detalja posjetite Pomoć – F1).

Pretpostaviti ćemo sljedeće parametre sidra za ovaj problem:

- Duljina sidra: $l = 12 \text{ m}$,
- Nagib sidra: $\alpha = 15^\circ$,
- Promjer sidra: $d = 10 \text{ mm}$,
- Razmak sidara: $b = 1 \text{ m}$.

Napomena: Krutost sidra je definirana u proračunu prema modulu elastičnosti, poprečnom presjeku sidra i razmaku sidara. Neophodno je shvatiti da u slučaju planarnih (plane strain) deformacija, diskretizirana sidra su postavljena prema 1 m širokoj membrani. Još jedan bitan podatak koji unosimo je sila prednapinjanja u sidru i sila otkazivanja sidra. U ovom slučaju nećemo uzeti u obzir otkazivanje elementa ojačanja, pa ćemo postaviti silu otkazivanja F_c na dovoljno veliku vrijednost (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



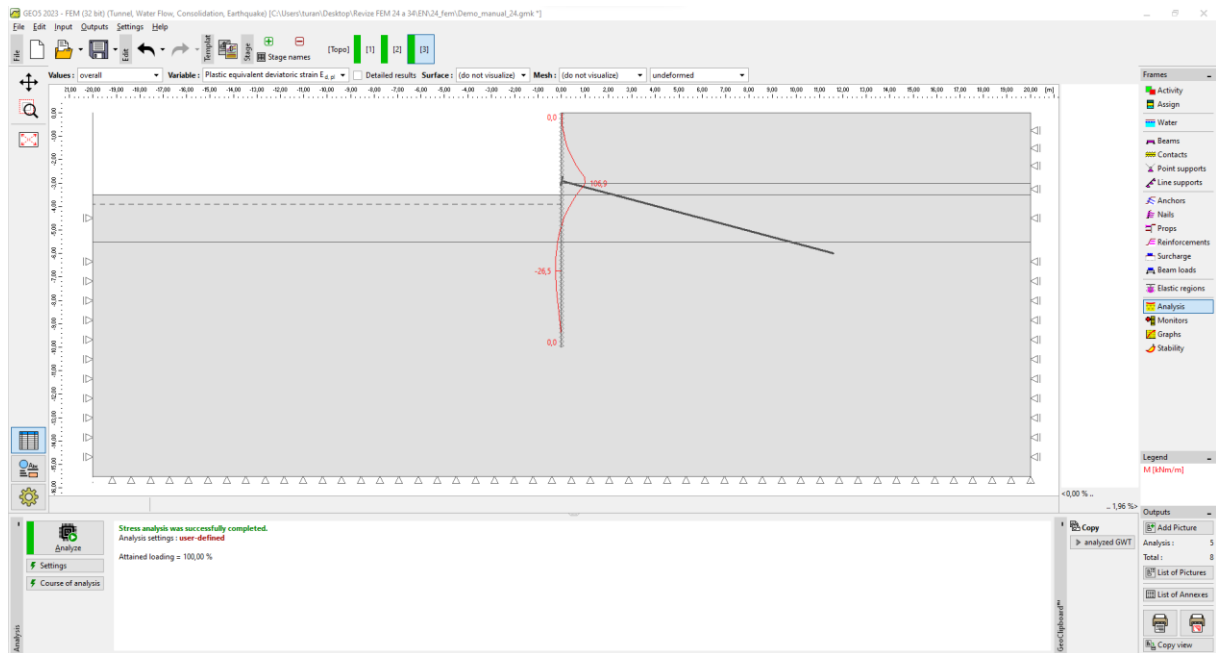
“New anchors” dijaloški prozor – Faza konstrukcije 3

Napomena: Sidro postaje deformirano tijekom proračuna. Kao rezultat deformacije sidra i okolnog masiva, sila prednapinjanja postavljena za sidro može se smanjiti. Zbog toga, ako želimo postići silu prednapinjanja u betonu, neophodno je unijeti dodatna naprezanja u sidro tijekom sljedeće faze ili postaviti dovoljno veliku silu prednapinjanja (rezultantna sila u sidru nakon proračuna je prikazana u dijagramu na području glave sidra, prema postavljenoj sili prednapinjanja). U sljedećim fazama konstrukcije parametri sidara se ne mogu promijeniti; jedino je moguće dodati naprezanja kako bi se postigla nova vrijednost sile prednapinjanja ili potpuno ukloniti sidro iz konstrukcije.

Prijanjanje sidra u tlu bi trebalo biti dovoljno čvrsto (fiksacija na element) kako ne bi došlo do nerealističnog izvlačenja sidara prilikom znatnih plastičnih deformacija koje se razvijaju u blizini

korijena sidra (fiksacija na čvor, preveliko povećanje gustoće u okolini korijena), što uzrokuje nerealne gubitke sile prednapinjanja.

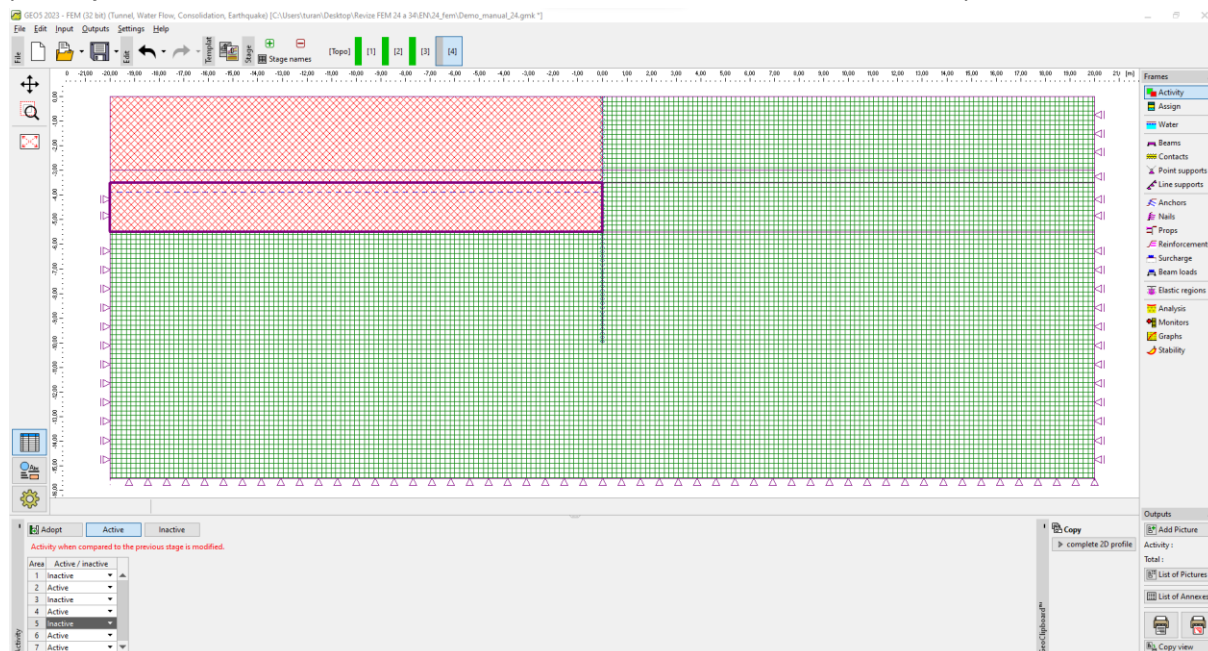
Sad ćemo provesti proračun faze konstrukcije 3 i ponovno provjeriti rezultate numeričkog rješenja (slično kao u prethodnoj fazi konstrukcije).



kartica “Analysis” – faza konstrukcije 3

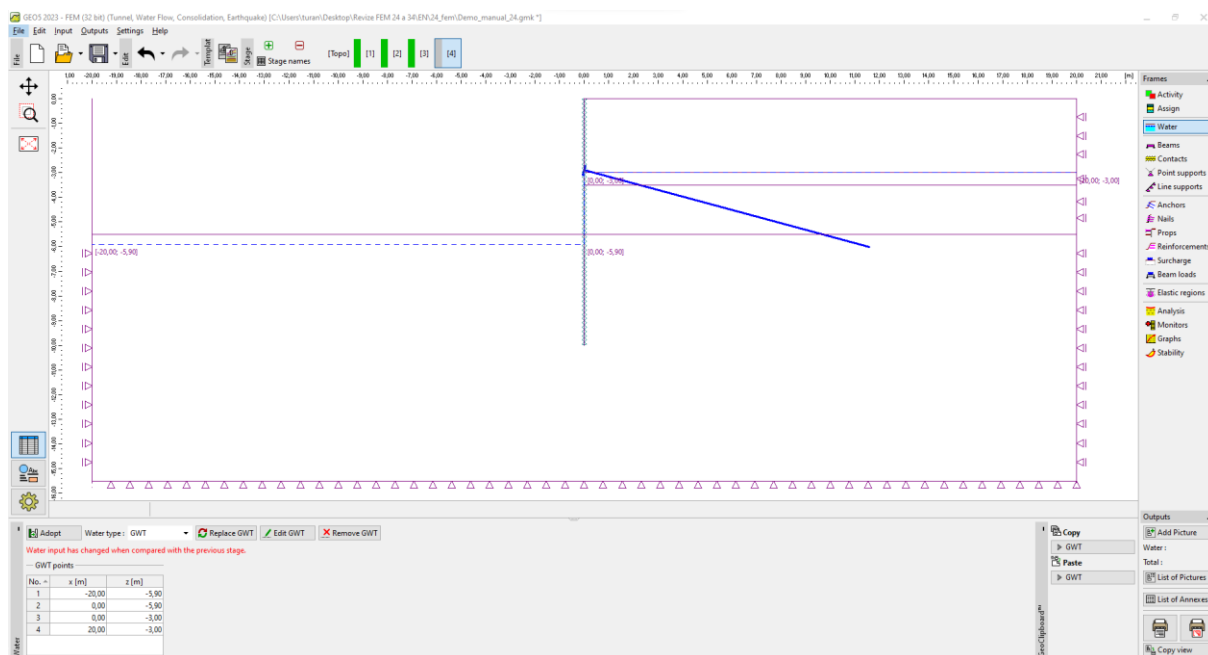
Faza konstrukcije 4: iskopavanje preostalog tla

Dodat ćemo fazu konstrukcije 4 te ćemo iskopati preostalo tlo. Najprije, odabrat ćemo dano područje s kursorom miša i kliknuti na tipku “Inactive”.

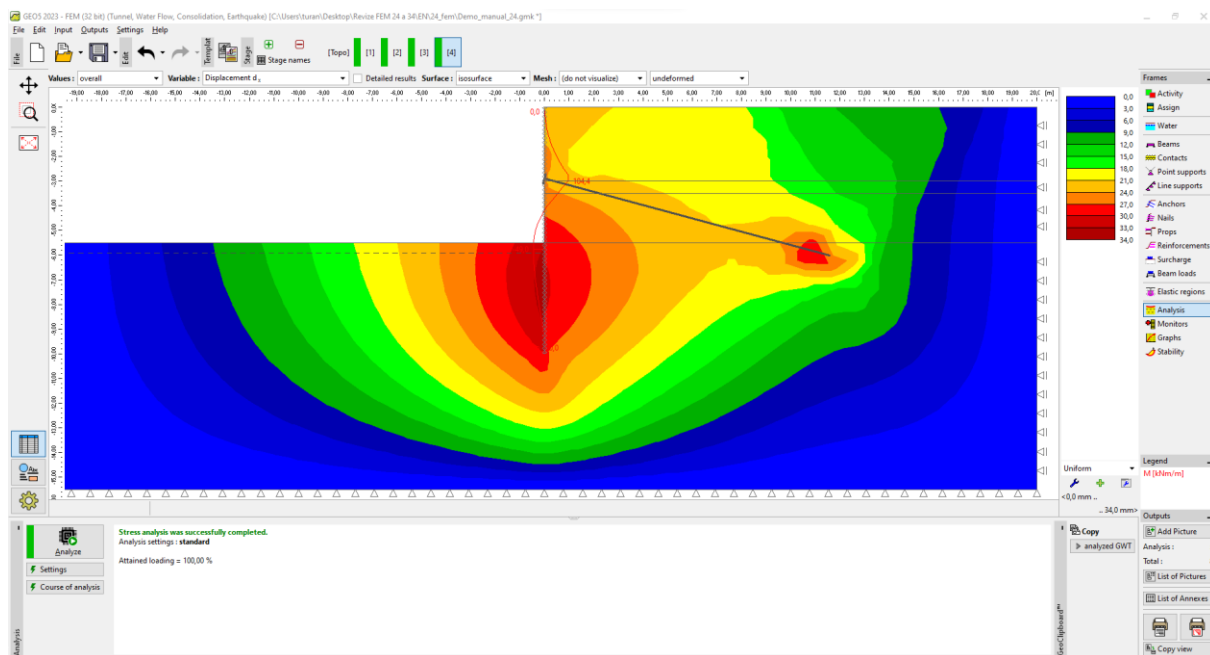


kartica “Activity” – Faza konstrukcije 4

U posljednjem koraku postavljanja faze konstrukcije 4 promijenit ćemo razinu podzemne vode prema slici ispod. Ostali parametri će ostati nepromijenjeni.

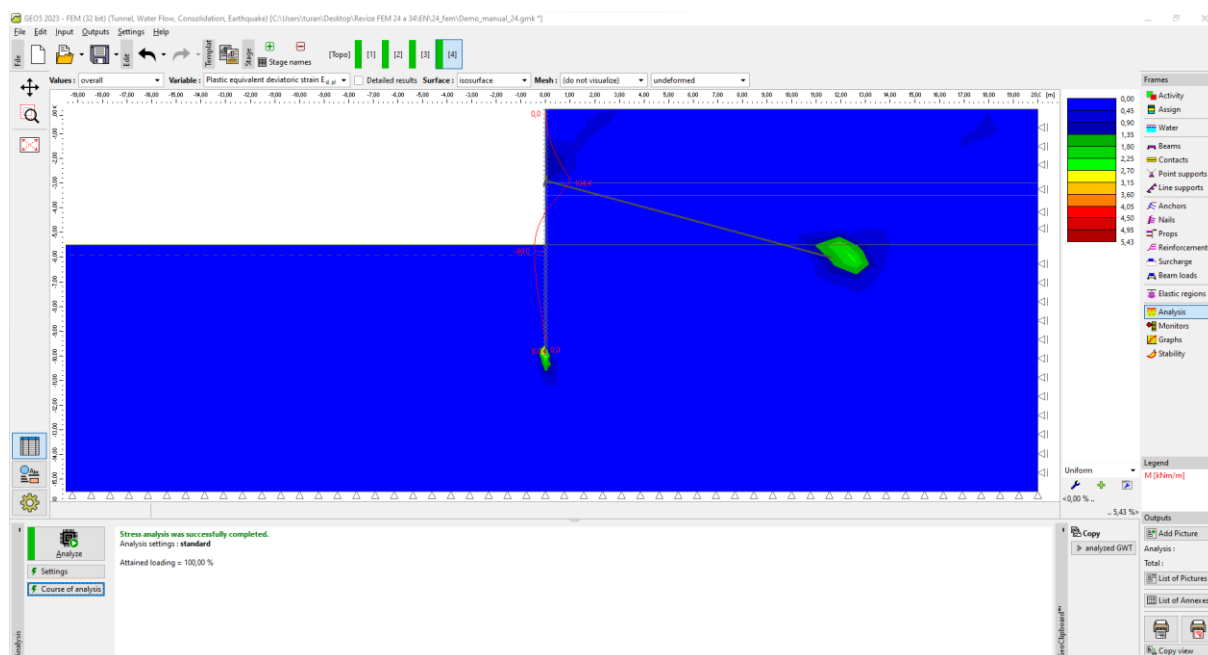


kartica “Water” – Faza konstrukcije 4 (promjena razine GWT)



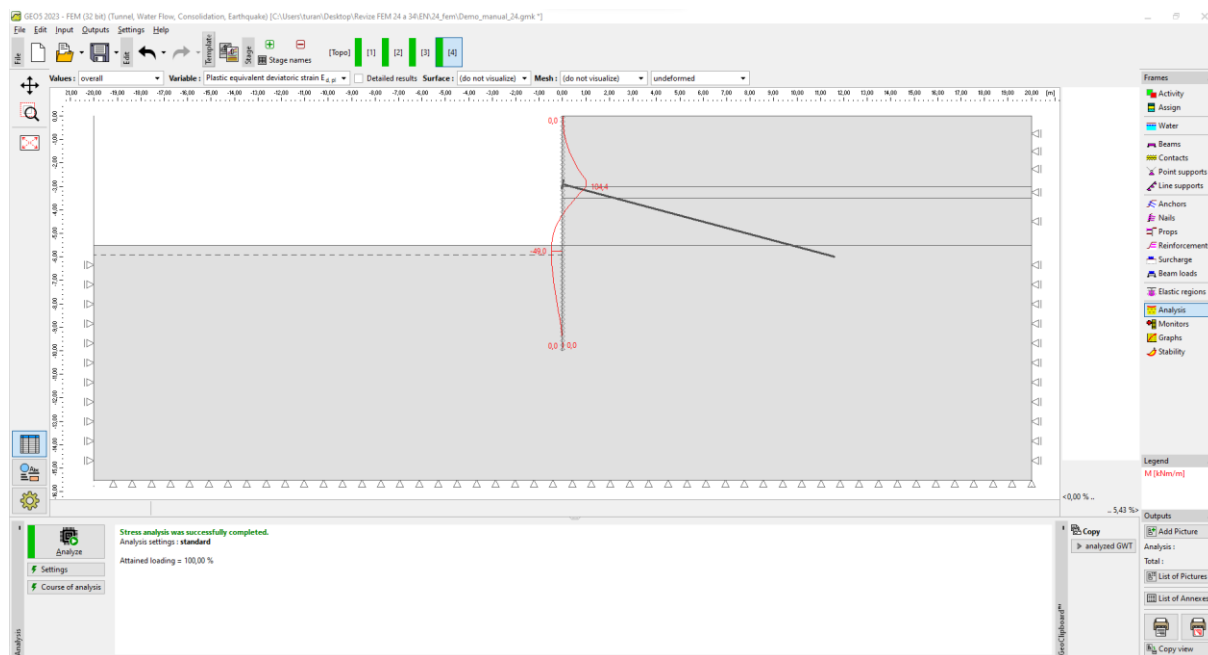
kartica “Analysis” – Faza konstrukcije 4 (slijeganje d_x – deformirana konstrukcija)

Iz slike slijedi da je maksimalni bočni pomak u blizini zagatnog zida od čeličnih pilota jednak 34 mm.



kartica “Analysis” – Faza konstrukcije 4 (ekvivalentna plastična deformacija $\varepsilon_{eq,pl}$)

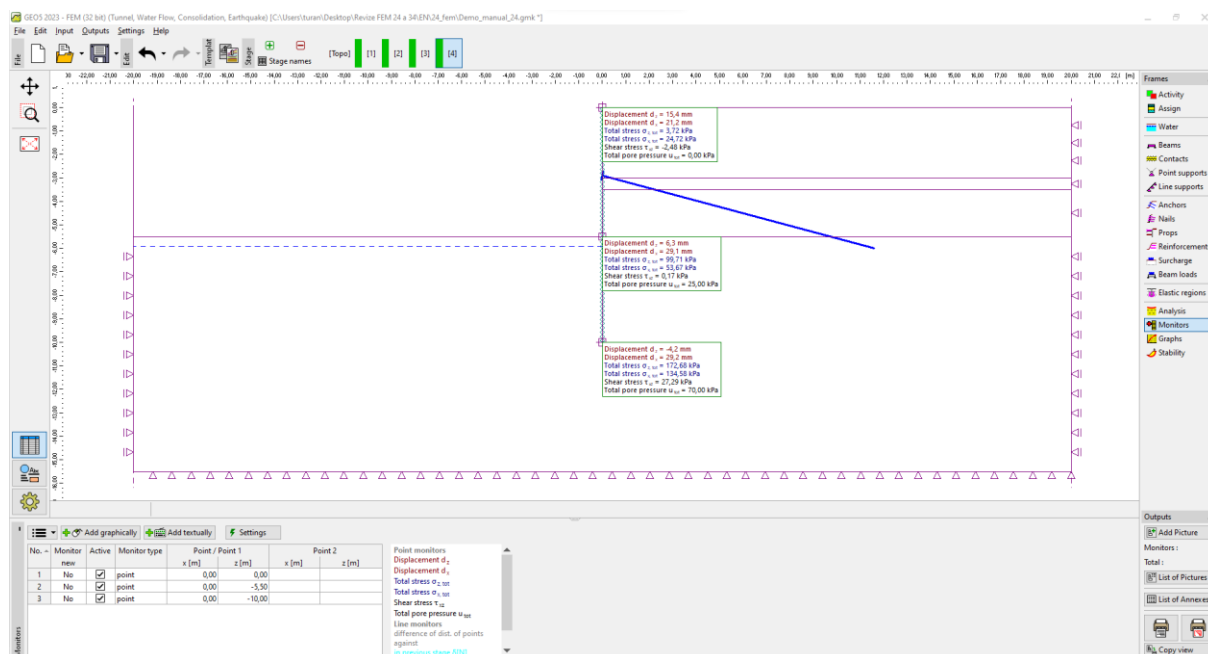
Jasno je iz ispisanih ekvivalentnih plastičnih deformacija da su najveće plastične deformacije u tlu formirane u blizini dna zagatnog zida. U drugoj fazi, tlo je plastificirano u blizini lokacije sidra (za više detalja posjetite Pomoć – F1).



kartica “Analysis” – Faza konstrukcije 4 (raspodjela momenata savijanja M)

Identificirat ćemo lokalne ekstreme u dijagramu krivulja momenata savijanja po duljini zagatnog zida; zapisat ćemo ih u tablicu, koja je pojašnjena u zadnjem dijelu ovog poglavlja.

Sad ćemo provjeriti rezultate za točke praćenja i odrediti deformacije na glavi zagatnog zida.



kartica “Monitors” – Faza konstrukcije 4 (Točke praćenja rezultata)

Procjena rezultata:

Sljedeća tablica prikazuje ekstreme unutarnjih sila duž visine zagatnog zida na pilotima za faze konstrukcije 2 i 3. Radi se o vrijednostima momenata savijanja. Proveli smo ovaj proračun naprije prema modificiranom Mohr-Coulomb modelu materijala s lokalno povećanom gustoćom mreže koristeći opciju linijskog ugađivanja mreže. Zatim smo usporedili rezultate s **GEO5 – Provjera zagatne stijene** programom za procjenu.

Materijal model / program	Faza 2 $M [kNm/m]$	Faza 4 – polje $M [kNm/m]$	Faza 4 – sidro $M [kNm/m]$
MCM (Modificirani M-C)	9.60	-49.00	104.4
Provjera zagatne stijene* (Analitičko rješenje)	29.16	- 28.91	110.57

Suma rezultata – momenti savijanja uzduž zagatne konstrukcije (visina)

*Napomena *: Za analitičko rješenje uzimamo u obzir proračun modula horizontalne reakcije prema Schmitt-u (za više detalja posjetite Pomoć – F1). Definirali smo dodatne parametre kako slijedi:*

- **Klasa tla SM, srednje gustoće:** proračun tlaka u mirovanju – kohezivno tlo,
kut unutarnjeg trenja između konstrukcije i tla $\delta = 17^\circ$;
deformacijski modul tla $E_{def} = 10 \text{ MPa}$.
- **Klasa tla CL, krute konzistencije:** proračun tlaka u mirovanju – kohezivno tlo ($\nu = 0.4$),
kut unutarnjeg trenja između konstrukcije i tla $\delta = 14^\circ$;
deformacijski modul tla $E_{def} = 4.5 \text{ MPa}$.

Uzeli smo u obzir standardne postavke proračuna kao “Standard – Limit states”. Proračun zemljanih pritisaka je proveden bez redukcije parametara tla. Dalje nismo uzeli u obzir vrijednosti minimalnog tlaka za dimenzioniranje (za više detalja posjetite Pomoć – F1).

Zaključak

Sljedeći zaključci se mogu izvući iz rezultata numeričkog proračuna:

- Lokalno povećana gustoća mreže konačnih elemenata u okolici linija dovodi do točnijih rezultata unutarnjih sila.
- Neophodno je za proračun zagatnih zidova koristiti elemente kontakta za modele nelinearnih materijala, što dopušta razvoj plastičnih deformacija i točniju sliku stvarnog ponašanja konstrukcija koje su okružene tlom.
- Maksimalne ekvivalentne plastične deformacije $E_{d,pl}$ predstavljaju potencijalne lokacije otkazivanja (kao rezultat prekoračenja granice popuštanja materijala).