

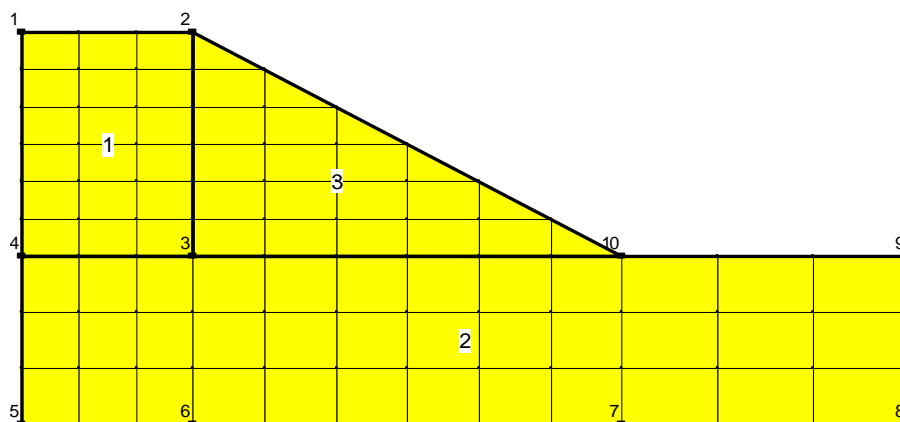
UVOD

U kolegiju *Procesi tečenja u tlu i stijeni* susrećemo se s vodom u tlu i stijeni, s tim da će glavni naglasak biti na tlu, kao osnovnom materijalu od interesa kroz koji voda teče. Stijenama, kroz koje voda teče sustavom pukotina, nećemo se baviti. Osnovne definicije, međutim, vrijede za tlo i stijenu. Tlo se sastoji od zrna i/ili čestica, između kojih su šupljine (pore), ispunjene vodom i/ili zrakom. Ako su sve šupljine u potpunosti ispunjene vodom, tlo je potpuno saturirano ili potpuno zasićeno vodom. Klasična mehanika tla bavi se isključivo potpuno saturiranim ili potpuno suhim tlom. Sve se više, međutim, pozornosti posvećuje ponašanju parcijalno saturiranoga tla u kojemu su šupljine između zrna ili čestica djelomično ispunjene vodom, a djelomično zrakom. U ovom ćemo se kolegiju baviti potpuno i djelomično saturiranim tlom. Budući da se o djelomično saturiranom tlu ne govori u drugim geotehničkim kolegijima, bavit ćemo se osnovnim svojstvima djelomično saturiranoga tla, njegovom posmičnom čvrstoćom i strujanjem vode kroz takvo tlo.

Glavni alat za vježbe bit će program *GeoStudio*. Radi se o nizu dijelova toga programa, svaki za sebe po jedan program, od kojih ćemo koristiti program SEEP/W za probleme strujanja vode kroz tlo, program SIGMA/W za analizu odnosa naprezanja i deformacija i program SLOPE/W za proračun stabilnosti kosina. Ovi se programi, naime, mogu kombinirati tako da, primjerice, rezultati programa SEEP/W budu korišteni u programu SIGMA/W ili SLOPE/W. Tako će biti moguće analizirati raznovrsne geotehničke probleme koji uključuju strujanje vode kroz tlo. Zato će se najviše koristiti program SEEP/W, a budući da strujanje vode utječe na efektivna naprezanja u tlu, neophodno je pri tome razumjeti kako se efektivna naprezanja i odgovarajuće deformacije mijenjaju sa strujanjem vode kroz tlo. Isto se tako, posmična čvrstoća tla, koja ovisi o normalnom efektivnom naprezanju na ravnini sloma, mijenja ako voda struji kroz tlo u odnosu na hidrostatsko stanje, pa će faktor sigurnosti neke kosine biti manji uz strujanje vode nego bez njega (hidrostatsko stanje). Iako su u kolegiju *Mehanika tla i stijena* izneseni svi osnovni pojmovi i principi vezani uz strujanje vode kroz tlo, efektivna naprezanja i posmičnu čvrstoću tla, tijekom kolegija ćemo ih ponoviti, kako bismo dobili konzistentnu cjelinu.

Na početku će biti iznesene osnovne informacije o programima koje ćemo koristiti tijekom kolegija za ilustraciju postavki i principa vezanih uz tečenje vode kroz tlo. Programi SEEP/W i SIGMA/W koriste metodu konačnih elemenata, o kojoj će više biti riječi u kolegiju *Numeričko modeliranje u geotehnici*, dok program SLOPE/W koristi metodu granične ravnoteže. U metodi konačnih elemenata, model tla se podijeli (diskretizira) na elemente, povezane čvorovima. Čvorovi su obvezatno u vrhovima elemenata, a mogu biti i u polovištima njihovih stranica (sekundarni čvorovi). Čvorovi omogućavaju formiranje kompatibilne mreže konačnih elemenata. Elementi mogu svi biti oblika trokuta (nestrukturirana mreža konačnih elemenata), svi oblika četverokuta (strukturirana mreža konačnih elemenata), ili mreža konačnih elemenata može biti miješana strukturirana, s četverokutima uz pravilne i trokutima uz kose dijelove geometrije. Moguće je koristiti kombinaciju ovih vrsta mreža, tako što se model tla

uvijek prvo podijeli na regije, a onda se unutar pojedine regije formira strukturirana, nestrukturirana ili miješana strukturirana mreža elemenata. Jedna se regija sastoji od jedne vrste materijala, a ukupan broj regija, osim o broju materijala, ovisi i o geometriji modela. Na slici 1 prikazan je model tla, koji se sastoji od jedne vrste tla unutar triju regija, sa strukturiranom mrežom konačnih elemenata u regijama broj 1 i broj 2 i miješanom strukturiranom mrežom u regiji broj 3.

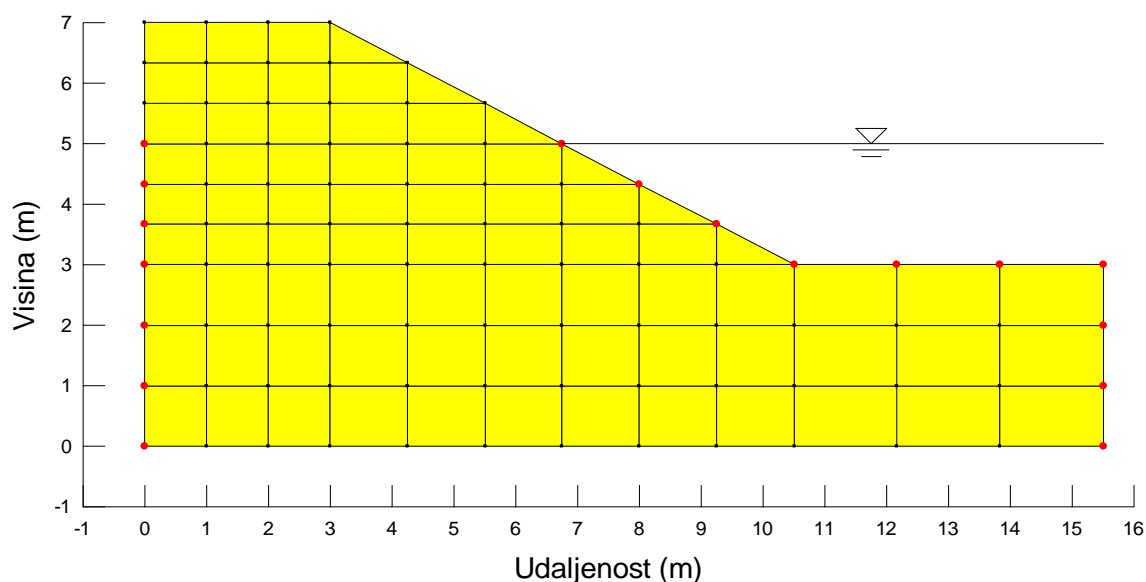


Slika 1. Model jedne vrste tla u tri regije i mrežom konačnih elemenata

Na slici 1, čvorovi su u svim vrhovima elemenata. Treba razlikovati čvorove (*Nodes*) od točaka (*Points*). Na slici 1 prikazano je 10 točaka, koje se podudaraju s pojedinim čvorovima. Regije se ucrtavaju između točaka, koje se mogu prethodno zadati ili se one pojave prilikom crtanja regije. Nakon zatvaranja pojedine regije, u njoj se pojave elementi. Broj elemenata unutar regije može se mijenjati duž stranica regije. Tako je za regiju broj 1 zadano da duž vertikalne stranice ima 6 elemenata, a duž horizontalne stranice 3 elementa. Treba uočiti da regija broj 2 ima elemente koji nisu svi istih dimenzija. To je moguće postići tako što ova regija, osim u vrhovima, ima po dvije točke na svojim horizontalnim stranicama. Za pojedinu se regiju broj elemenata zadaje između dviju točaka na njegovim stranicama i u vrhovima. Između točke broj 5 i broj 6, zadana su 3 elementa, između točke 6 i točke 7, 6 elemenata, a između točke 7 i točke 8, 3 elementa.

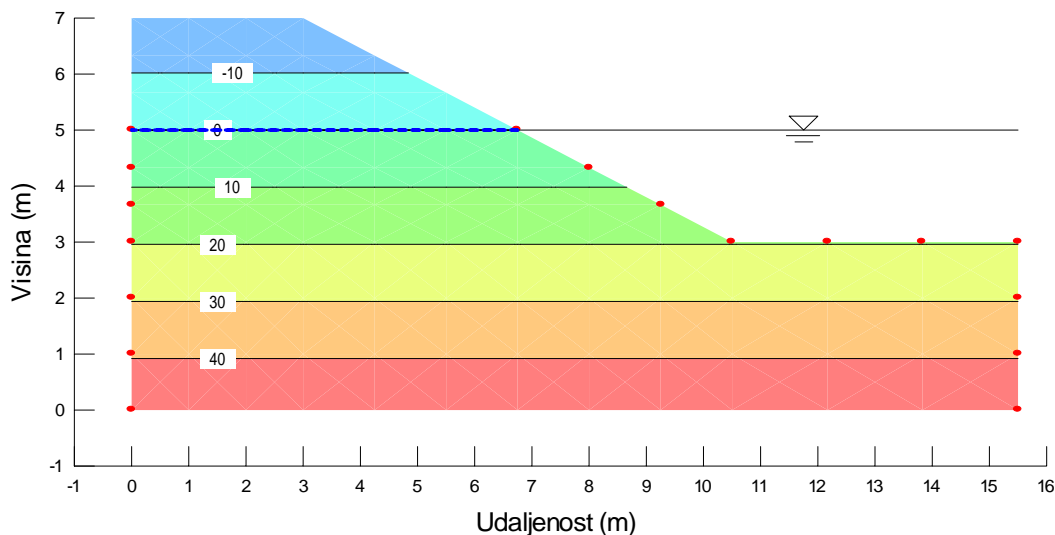
Za svaki materijal (vrstu tla) treba zadati odgovarajuća svojstva, odnosno parametre tla. Svaki od triju programa *GeoStudia* traži zadavanje različitih svojstava tla. Za program SEEP/W treba zadati parametre relevantne za strujanje vode kroz tlo, prvenstveno koeficijent propusnosti tla. Za program SIGMA/W treba zadati odgovarajući konstitucijski odnos za tlo, to jest odnos efektivnih napreznja i deformacija te parametre tla koje taj odnos traži. Primjerice, za linearno-elastičan konstitucijski odnos, treba zadati Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent. Za program SLOPE/W treba zadati parametre posmične čvrstoće tla, koheziju i kut unutarnjeg trenja, za Mohr-Coulombov kriterij sloma, a još se traži zadavanje i zapreminske težine tla.

Za zadatke koji se rješavaju metodom konačnih elemenata, nužno je na modelu tla zadati odgovarajuće rubne uvjete. U programu SEEP/W rješenje ovisi upravo o zadanim rubnim uvjetima. Tako ćemo za model sa slike 1 zadati rubne uvjete za hidrostatsko stanje tlaka vode u tlu, gdje tlak vode linearno raste s dubinom, od razine podzemne vode, gdje je 0. Radi lakšeg snalaženja s modelom, uvijek je korisno ucrtati koordinatne osi, kao što je prikazano na slici 2. Sada se vidi da je model tla visok 7 m i širok 15,5 m. Razinu vode zadajemo 2 m ispod gornje površine tla. To znači da će u rubnim čvorovima modela, počevši od y koordinate 5 m, pa na niže, biti zadan konstantan hidraulički potencijal $H = 5$ m. Ovi su čvorovi sada označeni crvenim točkama, kao što je prikazano na slici 2. Ucrtana razina vode u jezeru nije sastavni dio modela, već služi samo za ilustraciju gdje se nalazi voda. U programu SEEP/W nije potrebno zadavati rubne uvjete na nepropusnoj donjoj horizontalnoj granici modela jer se podrazumijeva da je u svim rubnim čvorovima, gdje nije zadan rubni uvjet, protok 0, to jest u tom je čvoru model nepropusan (*default*).



Slika 2. Zadani rubni uvjeti za hidrostatsko stanje tlaka vode u tlu

Iako u ovom primjeru voda ne struji kroz tlo, program SEEP/W proračunat će rješenje za zadane rubne uvjete. Rezultati su prikazani na slici 3, gdje se vidi raspodjela tlaka vode, odnosno linije jednakih vrijednosti tlaka vode (izolinije), koje su, očekivano, horizontalne. Plavom je bojom označena razina vode u tlu, duž koje je tlak vode 0. Tlak vode linearno raste s dubinom od razine vode, tako da se dubina vode pomnoži sa zapreminskom težinom vode. Treba uočiti da je iznad razine vode u tlu, tlak vode negativan, što odgovara kapilarnom tlaku vode ili tlaku vode u nesaturiranom tlu. Program SEEP/W, naime, sve proračune provodi i za nesaturirano tlo, pri čemu uzima u obzir odgovarajuće zakonitosti ponašanja tla i vode.



Slika 3. Izolinije tlaka vode u tlu (kPa)

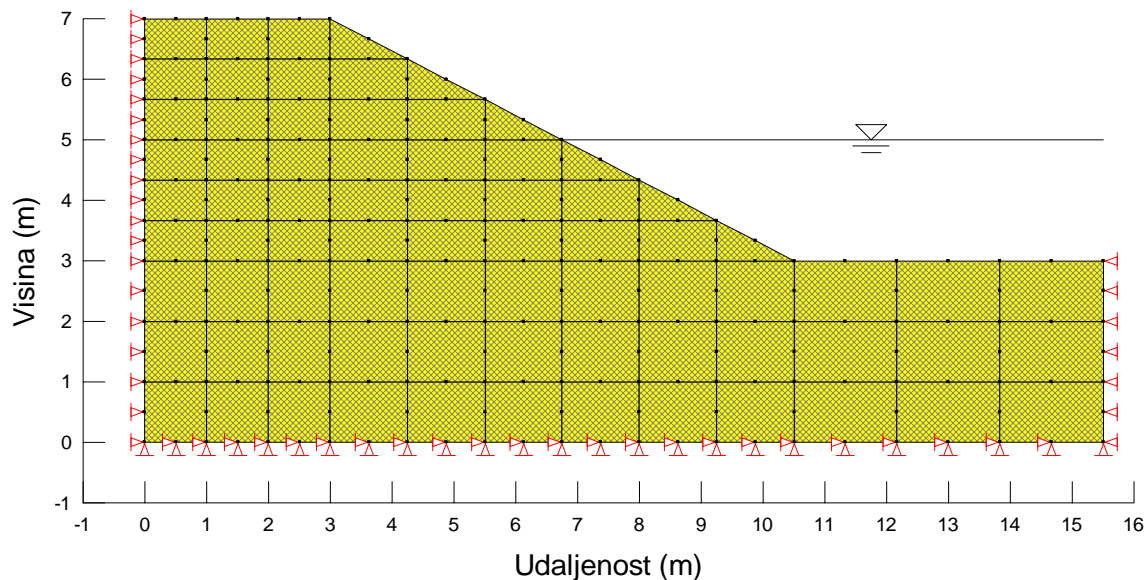
Sada ćemo, pomoću programa SIGMA/W, proračunati naprezanja u ovom modelu. Budući da na model nećemo primijeniti opterećenje, ovdje nas zanima takozvano početno stanje naprezanja. Vertikalno ukupno naprezanje bit će jednako umnošku dubine tla od njegove površine i zapreminske težine tla. U tlu ispod površine jezera, vertikalna su ukupna naprezanja zbroj umnoška dubine tla od njegove površine i zapreminske težine tla i umnoška dubine vode i zapreminske težine vode. Zbog tlaka vode u tlu, efektivna će naprezanja biti razlika ukupnih naprezanja i tlaka vode. Ako je cijela površina tla horizontalna, u programu SIGMA/W za proračun početnog stanja naprezanja koristi se opcija *InSitu 1*. Uz ovu se opciju ne koriste parametri konstitucijskog odnosa za tlo, već samo zapreminska težina tla i koeficijent bočnog naprezanja tla u mirovanju K_0 . Vertikalna efektivna naprezanja računaju se kao razlika vertikalnih ukupnih naprezanja i tlaka vode, a horizontalna se efektivna naprezanja dobiju iz umnoška K_0 i vertikalnih efektivnih naprezanja. Zatim se horizontalna ukupna naprezanja dobiju tako što se horizontalnim efektivnim naprezanjima doda tlak vode.

Ako je dio površine terena nagnut, kao što je slučaj u ovom primjer, koristi se opcija *InSitu 2*. Ovdje se početna naprezanja dobiju iz analize naprezanja i deformacija, pa je potrebno zadati parametre konstitucijskog odnosa za tlo i zapreminsku težinu tla, a ne zadaje se K_0 . Za proračun početnog stanja naprezanja uvijek se zadaje linearno-elastičan konstitucijski odnos za tlo. Za što točniji proračun početnog stanja naprezanja, potrebno je za sve elemente modela, odnosno za sve regije, zadati sekundarne čvorove na polovištima stranica elemenata, kao što je prikazano na slici 4. Na ovoj je slici zadavanje vlastite težine tla, odnosno njegove zapreminske težine, označeno šrafiranom površinom modela.

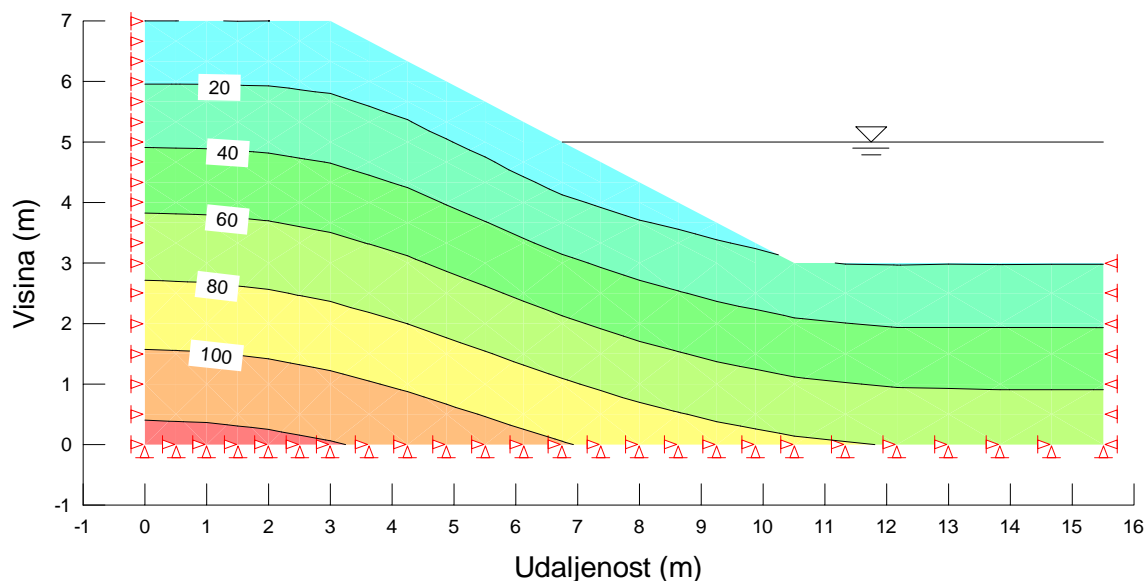
U programu SIGMA/W također treba zadati rubne uvjete, koji su prikazani na slici 4. U čvorovima vertikalnih stranica modela dopušten je pomak samo u vertikalnom smjeru, a

svi su čvorovi donjeg horizontalnog ruba modela fiksirani u horizontalnom i u vertikalnom smjeru.

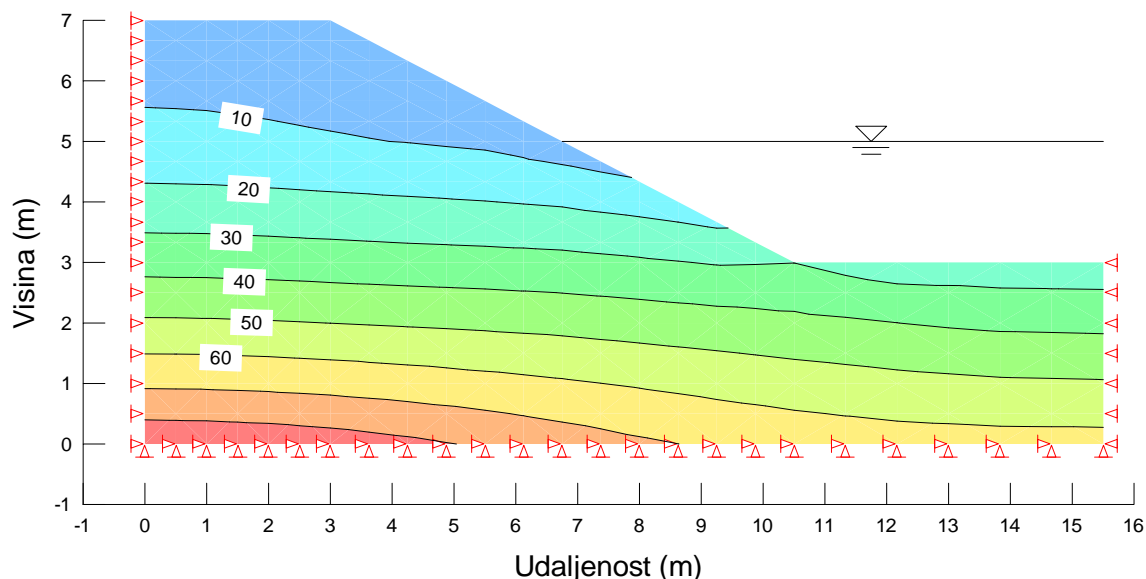
Plak vode preuzima se iz rezultata proračuna programom SEEP/W. Zapreminska težina tla je $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, Youngov modul elastičnosti $E' = 5 \text{ MPa}$ (zadaje se u kPa), a Poissonov koeficijent $\nu' = 0,33$. Rezultati proračuna početnog stanja naprezanja opcijom *InSitu 2*, prikazani su na slikama 5 do 8. Na slikama 7 i 8, u svakoj su točki modela efektivna naprezanja jednaka razlici ukupnih naprezanja i tlaka vode.



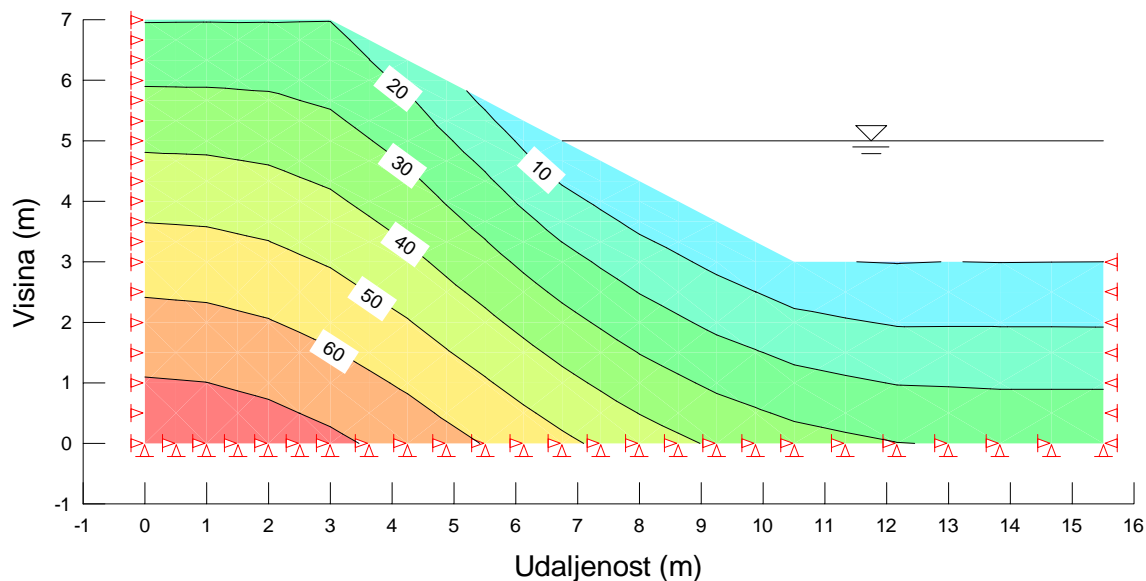
Slika 4. Model tla za program SIGMA/W sa zadanim sekundarnim čvorovima, zapreminskom težinom tla i rubnim uvjetima



Slika 5. Izolinije vertikalnih ukupnih naprezanja (kPa)

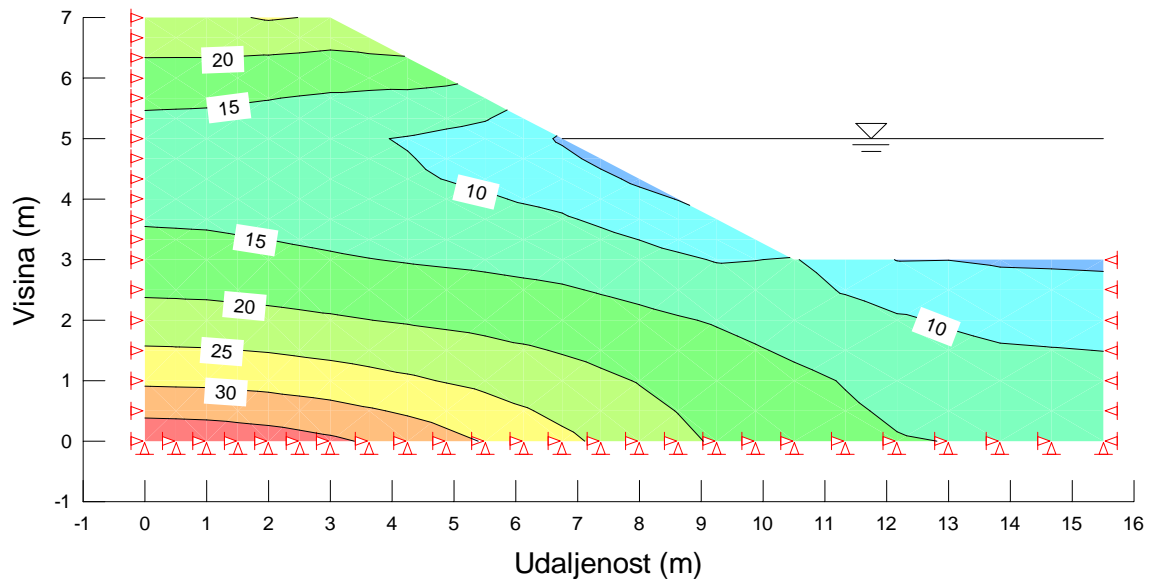


Slika 6. Izolinije horizontalnih ukupnih napreznja (kPa)



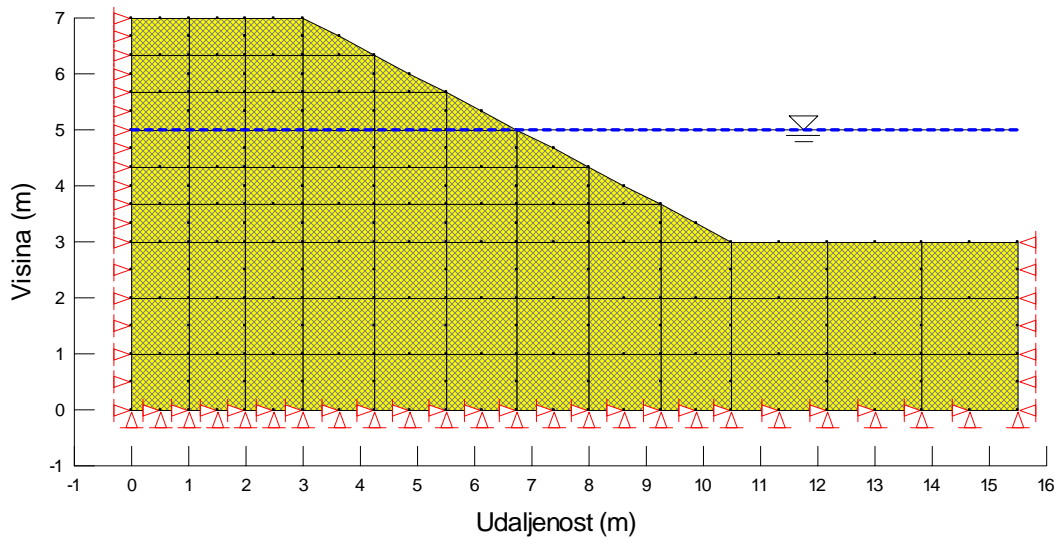
Slika 7. Izolinije vertikalnih efektivnih napreznja (kPa)

Nakon proračuna početnog stanja napreznja opcijom *InSitu 1* ili *InSitu 2*, svakako treba pregledati izolinije horizontalnih efektivnih napreznja. Njihov je oblik, naime, pokazatelj korektnosti postavljanja mreže konačnih elemenata. Ako su ove linije glatke, mreža konačnih elemenata je dobro postavljena, a ako su na nekim mjestima „kvrgave“ treba ispraviti mrežu konačnih elemenata na tim mjestima (najčešće treba progustiti mrežu). Izolinije na slici 8 su zadovoljavajuće.



Slika 8. Izolinije horizontalnih efektivnih napreznja (kPa)

Ovaj proračun programom SIGMA/W dao bi iste rezultate i bez korištenja podataka o tlaku vode u tlu iz programa SEEP/W, jer u tlu nema strujanja vode. Tako je moguće, za hidrostatsko stanje tlaka vode u tlu, zadati samo odgovarajuću razinu vode, 2 m ispod gornje površine terena, kao što je na slici 9 prikazano plavom linijom.



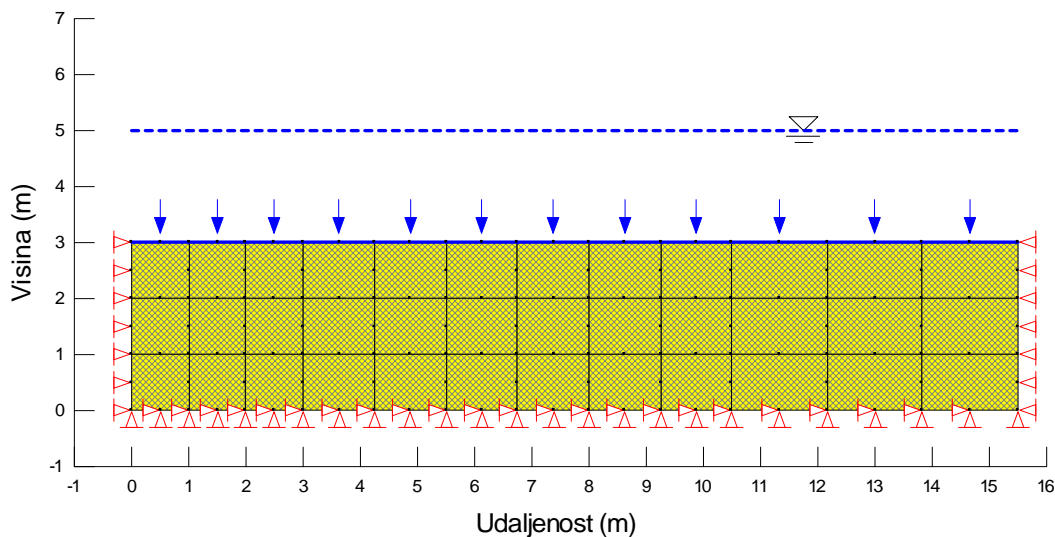
Slika 9. Model tla za proračun *InSitu 2* sa zadanom razinom vode

Za ilustraciju ćemo prikazati proračun početnog stanja naprezanja programom SIGMA/W pomoću opcije *InSitu 1* za horizontalnu površinu terena (promatramo samo regiju broj 2 modela sa slike 1) i vodu 2 m iznad površine terena (slika 10). Budući da voda nije u tlu, već iznad njega, svakako treba naglasiti da za proračun *InSitu 1* nije dovoljno zadati razinu vode. Program će ispravno izračunati vertikalna ukupna naprezanja u tlu, samo ako se na površini terena zada odgovarajući tlak vode. Ovaj se rubni uvjet ne zadaje u čvorovima modela, već na stranicama rubnih elemenata, kao što je na slici 10 prikazano punom plavom linijom i strelicama okomito na površinu tla.

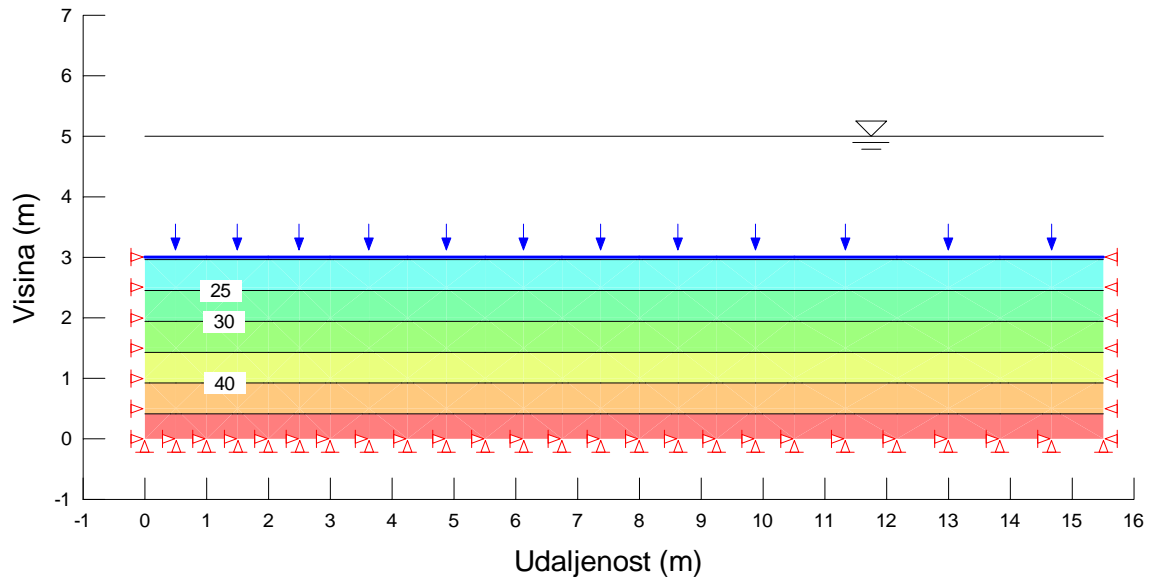
Za proračun *InSitu 1*, potrebno je zadati koeficijent bočnog naprezanja tla u mirovanju. Ovdje zadajemo $K_0 = 0,5$, što odgovara Poissonovom koeficijentu $\nu' = 0,33$ prema izrazu

$$K_0 = \frac{\nu'}{1 - \nu'}$$

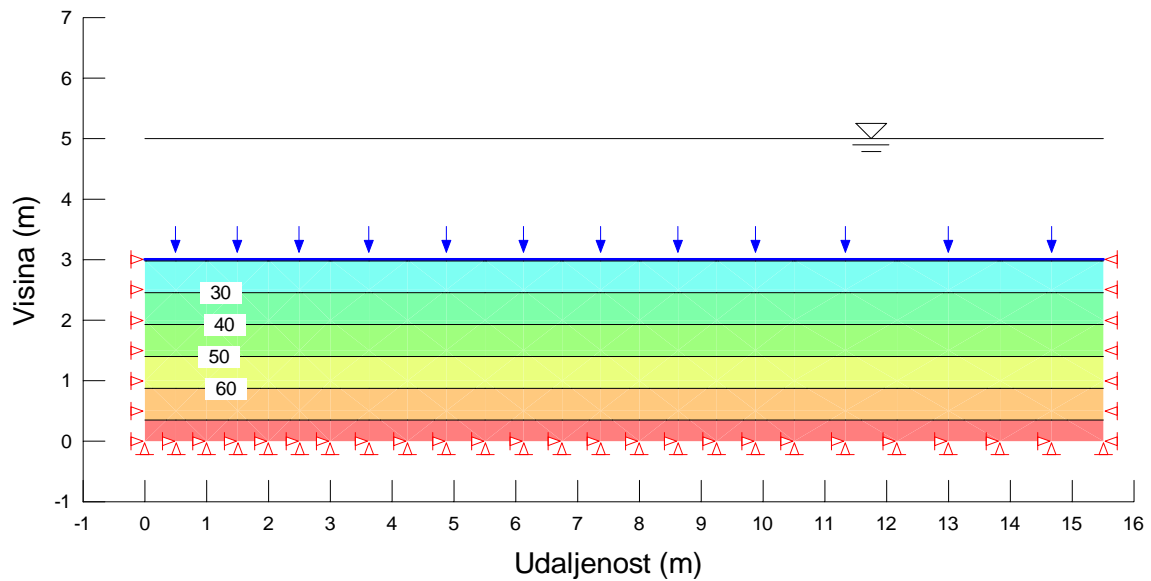
Rezultati proračuna prikazani su na slikama 11 do 15. Sada su izololinije za sva naprezanja horizontalne.



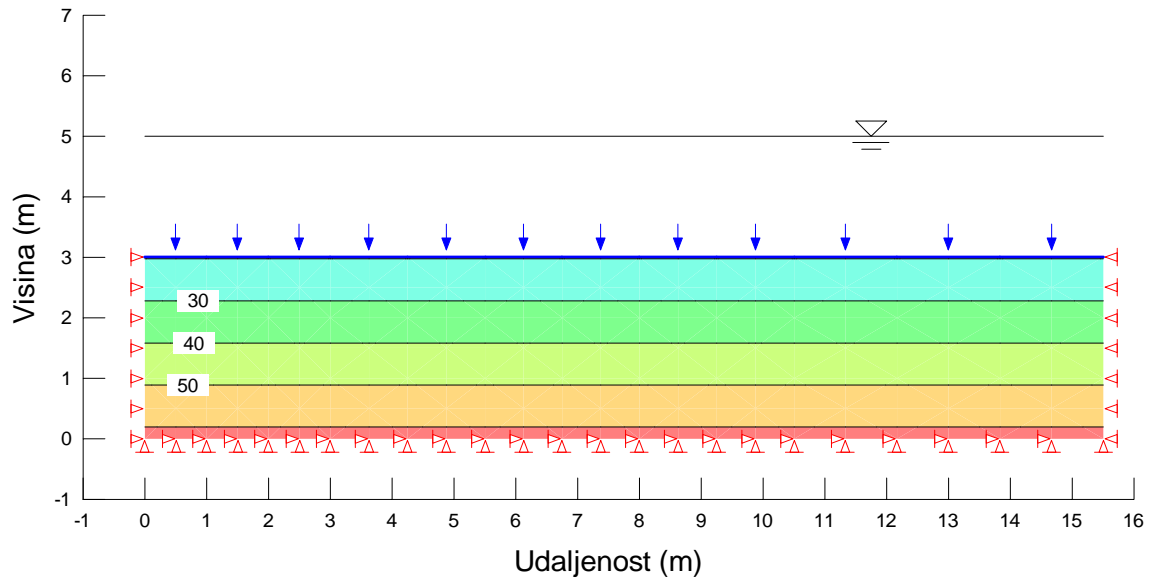
Slika 10. Model tla za proračun *InSitu 1* sa zadanom razinom vode i tlakom vode na površini terena



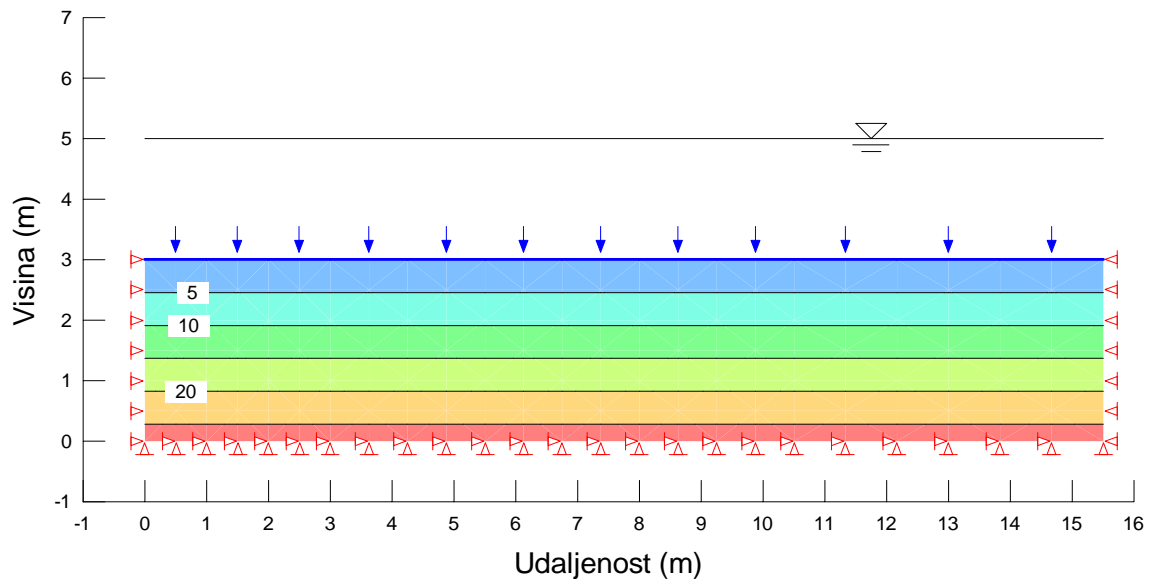
Slika 11. Izolinije tlaka vode u tlu (kPa)



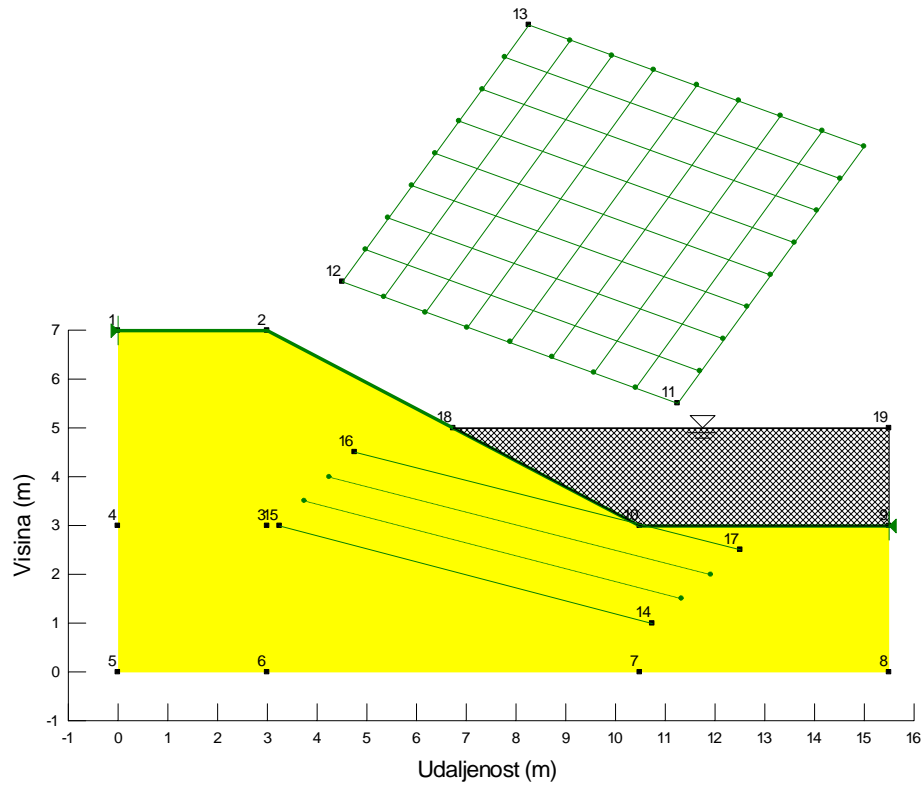
Slika 12. Izolinije vertikalnih ukupnih naprezanja (kPa)



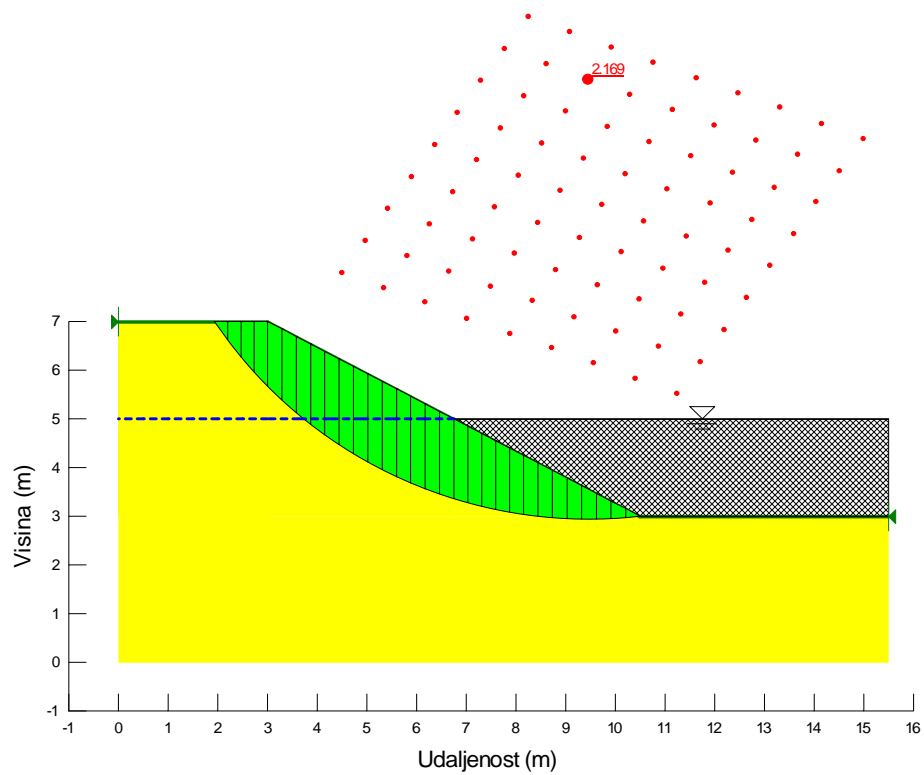
Slika 13. Izolinije horizontalnih ukupnih naprezanja (kPa)



Slika 14. Izolinije vertikalnih efektivnih naprezanja (kPa)

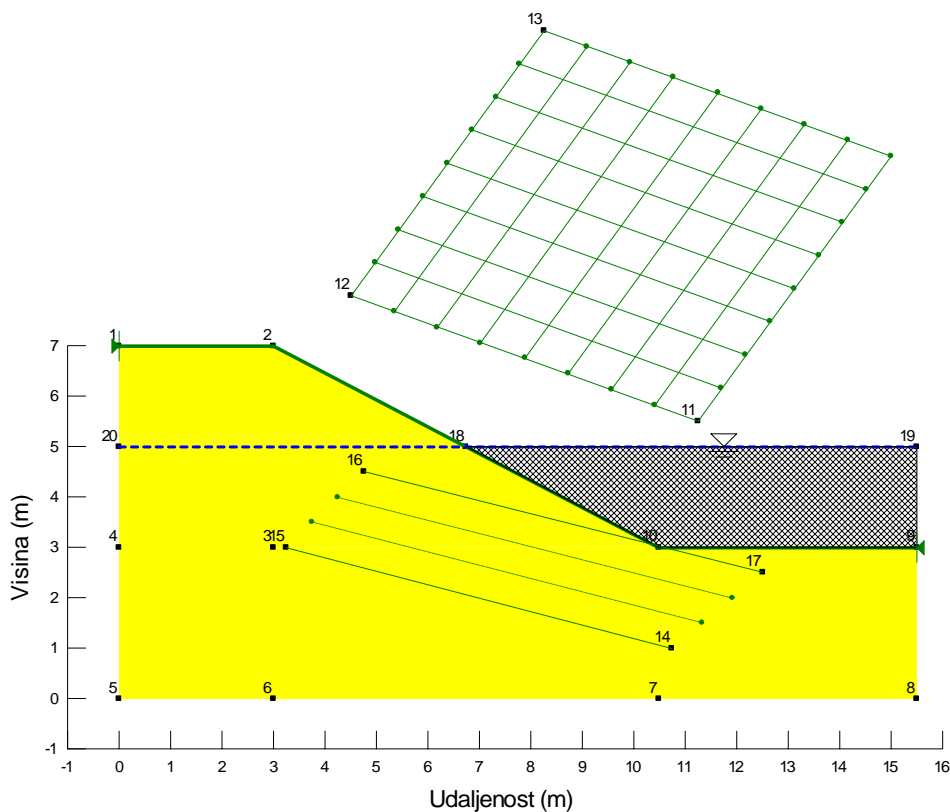


Slika 16. Model tla za proračun stabilnosti kosine



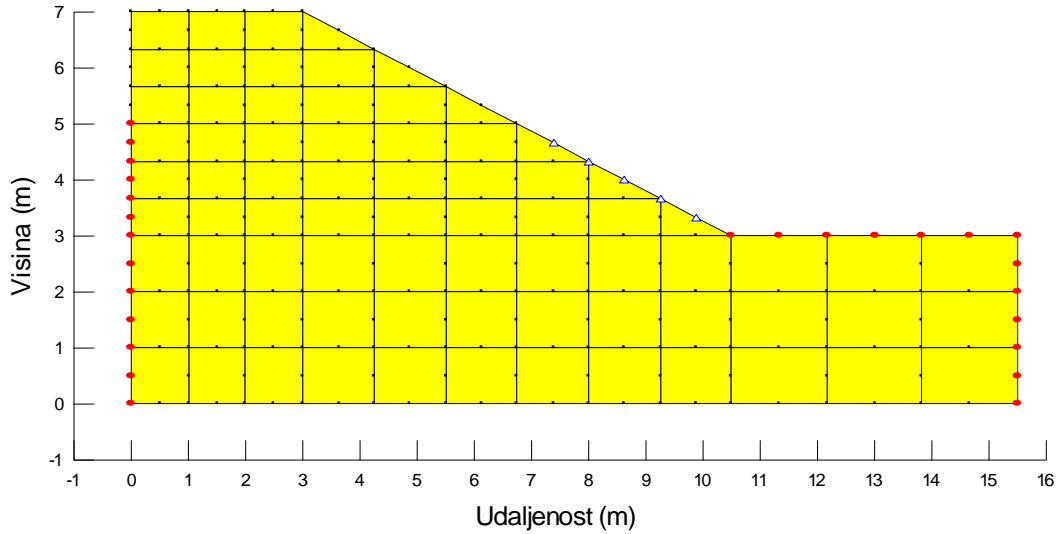
Slika 17. Rezultati proračuna stabilnosti kosine

Opet kao u programu SIGMA/W, ovdje smo također mogli zadati razinu vode, bez preuzimanja tlaka vode iz programa SEEP/W, jer nema strujanja vode kroz tlo. Model tla, sa zadanom razinom vode, koji bi dao iste rezultate kao prethodni proračun, prikazan je na slici 18.



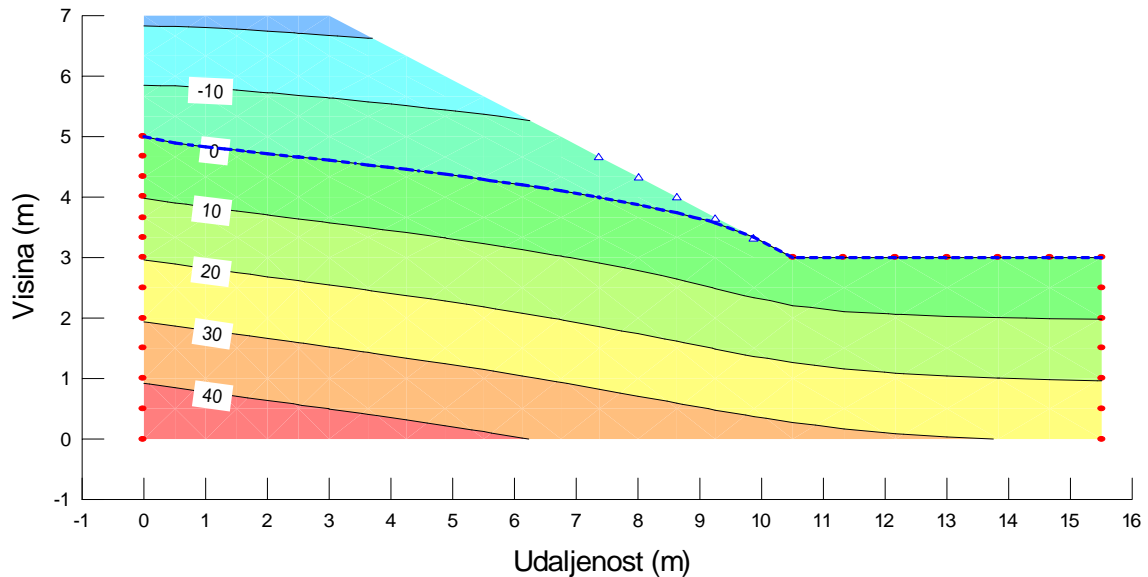
Slika 18. Model tla sa zadanom razinom vode

Sada ćemo, u odnosu na model sa slike 2, gdje je zadan hidrostatski tlak vode, program SEEP/W koristiti za proračun stacionarnog strujanja vode kroz tlo (tlak vode ne mijenja se u vremenu). Model tla za ovaj proračun prikazan je na slici 19. Na lijevom je vertikalnom rubu modela ostao zadan isti hidraulički potencijal, za razinu vode 2 m ispod gornje površine terena, dakle, hidraulički je potencijal u svim točkama označenim crvenim točkama na tom rubu, $H = 5$ m. Na desnom dijelu modela više nema jezera i voda je na površini terena od nožice kosine. Ovdje, dakle, treba zadati hidraulički potencijal $H = 3$ m, isto kao i u svim točkama desnog vertikalnog ruba modela. Sada u tlu postoji razlika hidrauličkoga potencijala, zbog kojega će voda strujati od mjesta višeg k mjestu nižeg hidrauličkog potencijala. Na slici 19, plavim su praznim trokutićima prikazani rubni uvjeti koji označavaju mjesta potencijalnog izlaza vodnog lica na kosinu.

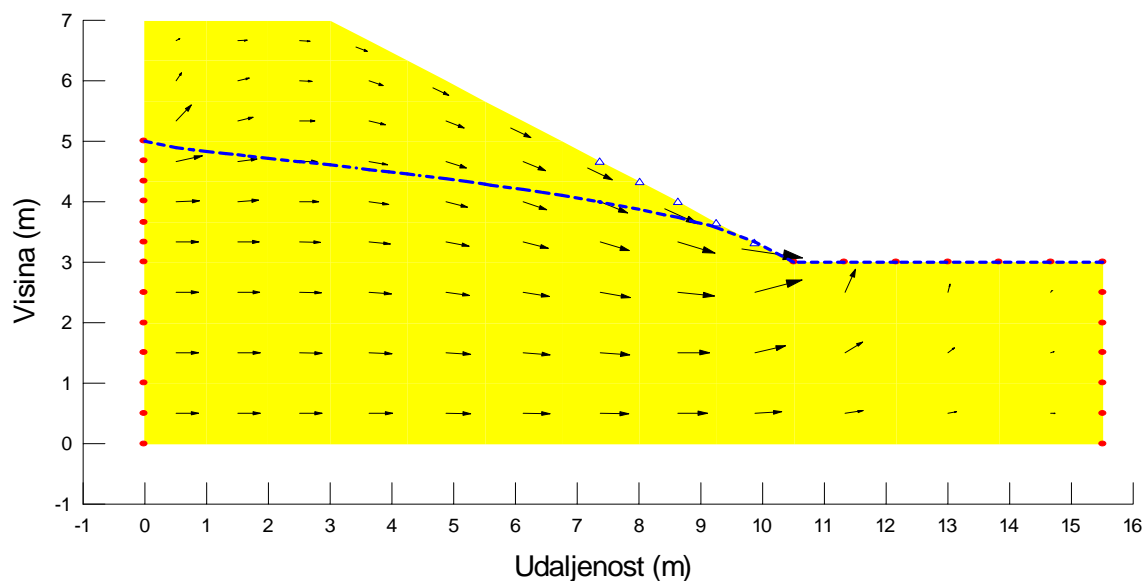


Slika 19. Model tla za proračun stacionarnog strujanja vode

Rezultati ovog proračuna prikazani su na slikama 20 i 21. Na slici 20 prikazana je raspodjela tlaka vode u tlu. Izolinije tlaka vode više nisu horizontalne, kao u slučaju hidrostatskog tlaka vode. Smjer strujanja vode prikazan je na slici 21, gdje se vide vektori strujanja vode u pojedinim dijelovima modela. Ovi su vektori skalirani tako da veća duljina vektora predstavlja veću brzinu strujanja. Sa slike 21 se vidi da voda struji i kroz nesaturirano tlo iznad vodnoga lica.



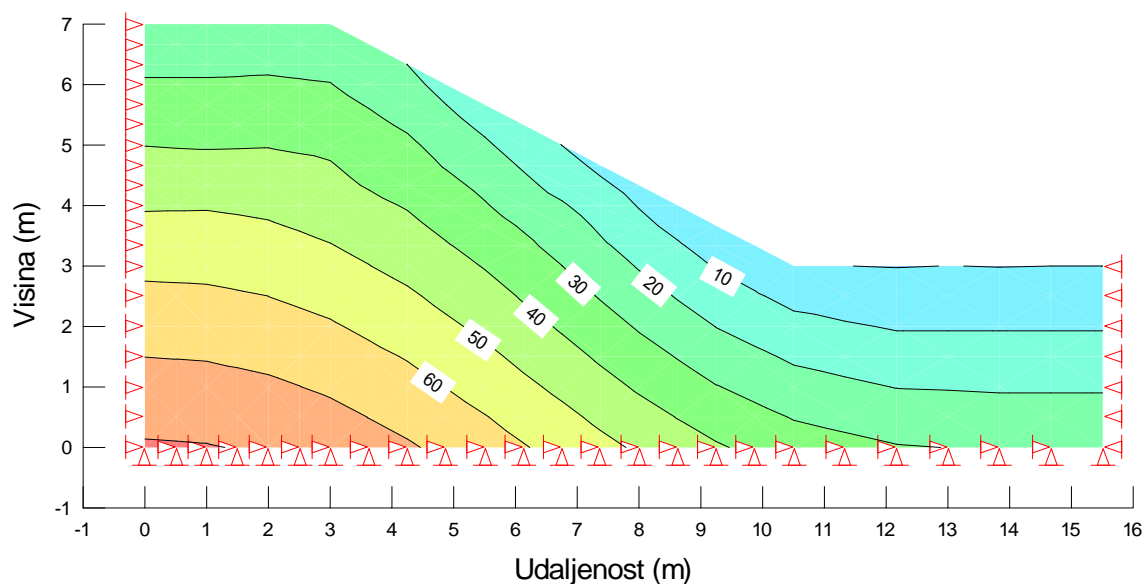
Slika 20. Izolinije tlaka vode u tlu (kPa)



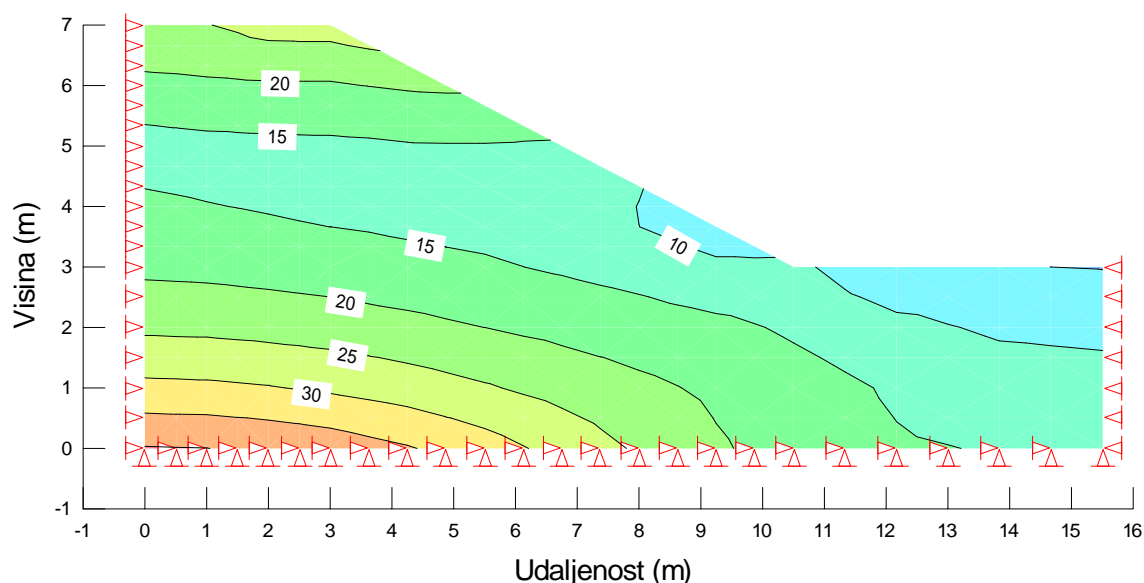
Slika 21. Vektori strujanja vode kroz tlo

Sada ćemo, s rezultatima proračuna programom SEEP/W, proračunati početno stanje naprezanja u tlu programom SIGMA/W. Zbog strujanja vode kroz tlo, ovdje je neophodno koristiti tlak vode iz programa SEEP/W.

Zbog strujanja vode kroz tlo, nisu se promijenila ukupna naprezanja, već samo efektivna, kao što se vidi na slikama 22 i 23 za raspodjelu vertikalnih, odnosno horizontalnih efektivnih naprezanja u tlu. Ovdje su izolinije efektivnih naprezanja drukčije nego na slikama 7 i 8 za hidrostatski tlak vode, posebno u području gdje su brzine strujanja vode najveće.



Slika 22. Izolinije vertikalnih efektivnih naprezanja (kPa) za strujanje vode kroz tlo



Slika 23. Izolinije horizontalnih efektivnih napreznja (kPa) za strujanje vode kroz tlo

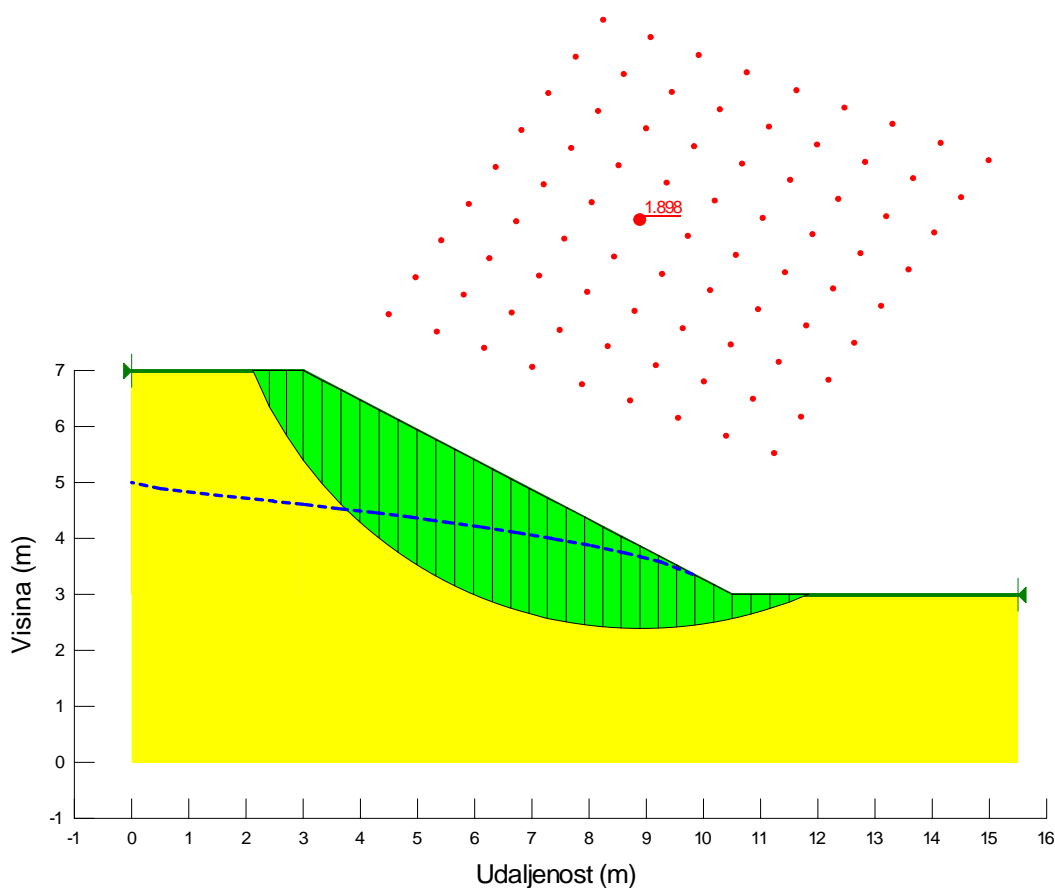
Rezultati proračuna stabilnosti kosine sa strujanjem vode kroz tlo, prikazani su na slici 24. Za ovaj je proračun programom SLOPE/W također bilo nužno preuzeti tlak vode u tlu iz rezultata proračuna programom SEEP/W. Sada je faktor sigurnosti kosine manji nego u proračunu s hidrostatskim tlakom vode (2,169) i iznosi 1,898.

Iz prethodnih smo proračuna vidjeli kako strujanje vode kroz tlo djeluje na efektivna napreznja i na stabilnost kosine. Promjena efektivnih napreznja u odnosu na hidrostatsko stanje tlaka vode, rezultira odgovarajućim deformacijama tla. Smanjenje faktora sigurnosti kosine uslijed strujanja vode, a i inače, zbog promjene režima vode u tlu, može dovesti do klizanja mase tla niz kosinu. Za ovakve se kalvarije obično izvještava da su nastale nakon obilnih kiša.

Vidjeli smo također rezultate uzimanja u obzir negativnog tlaka vode iznad vodnog lica. U hidrostatskom stanju, negativni tlak vode po apsolutnoj vrijednosti linearno raste od vodnog lica do površine tla, neovisno o vrijednosti koeficijenta propusnosti. Ovo je rezultat rješavanja jednadžbe strujanja vode kroz tlo za zadane rubne uvjete. Treba se prisjetiti da su sve granice modela, na kojima u programu SEEP/W nisu zadani rubni uvjeti, nepropusne. S ovako zadanim rubnim uvjetima, u modelu tla nema strujanja vode i rezultat je hidrostatsko stanje. U programu SIGMA/W se, pak, pretpostavlja da vrijedi klasični Terzaghijev princip efektivnih napreznja, koji, međutim, vrijedi samo za saturirano tlo. Iznad vodnog lica tlo je saturirano do visine kapilarnog dizanja, koja ovisi o vrsti tla, a iznad ove je visine tlo nesaturirano. U nesaturiranom tlu više ne vrijedi princip efektivnih napreznja. To znači da će u slučajevima kada se kapilarno dizanje vode realno ne proteže do površine terena, vertikalna efektivna napreznja (pa i horizontalna) biti fizikalno nerealno proračunata kombinacijom programa SEEP/W i SIGMA/W.

Program SEEP/W ispravno uzima u obzir karakteristike strujanja vode kroz nesaturirano tlo. Za stacionarno strujanje vode kroz tlo, zadaje se ovisnost koeficijenta propusnosti o tlaku vode. Pri tome se za saturirano područje tla obično očekuje konstantna vrijednost koeficijenta propusnosti, dok vrijednost koeficijenta propusnosti više ili manje naglo pada s porastom apsolutne vrijednosti negativnog tlaka vode, ovisno o vrsti materijala. Ovime se korektno, prema rezultatima laboratorijskih istraživanja, uzima u obzir strujanje vode kroz nesaturirano područje tla. Zato je moguće da se vektori strujanja vode pojavljuju i iznad vodnog lica (slika 21).

Za nestacionarno strujanje vode kroz tlo (saturirano i nesaturirano), program SEEP/W još traži ovisnost obujamske vlažnosti θ (omjer volumena vode u tlu i ukupnog volumena) o negativnom tlaku vode, što omogućava korektne simulacije strujanja vode i kroz nesaturirano tlo.



Slika 24. Rezultati proračuna stabilnosti kosine sa strujanjem vode kroz tlo

Na kraju će biti dane upute kako se programima SEEP/W, SIGMA/W i SLOPE/W može doći do navedenih rezultata.

Sva tri navedena programa imaju sličan izgled za korisnika. Na vrhu su ekrana ispisani meniji, u sljedećem su redu standardne ikone *Microsoft Windowsa*, a u trećem su redu ikone pojedinog programa, koje se mogu koristiti za učestale radnje, a do istih se ishoda može doći i pomoću menija. U lijevom su vertikalnom stupcu, na kraju tri ikone, koje omogućavaju provjeru zadanog modela (*Verify*), rješavanje zadatka (*Solve*), odnosno pregled rezultata proračuna (*Contour*). U desnom su vertikalnom stupcu ikone koje omogućavaju uključivanje, odnosno isključivanje, pojedinih dijelova crteža modela, primjerice mogu se vidjeti ili isključiti brojevi elemenata ili brojevi čvorova mreže konačnih elemenata.

Za svaki zadatak treba krenuti od postavljanja veličine radnog prostora (*Set – Page*). Za jedinice se postave milimetri, a standardne dimenzije radnog prostora su: širina (*Width*) 260 mm i visina (*Height*) 200 mm. Zatim se pod (*Set – Scale*) postavi mjerilo, koje ovisi o veličini geometrije geotehničkog problema koji se modelira. Povoljno je koristiti isto mjerilo u horizontalnom i vertikalnom smjeru, jer se inače dobije iskrivljena slika rezultata. Za model sa slike 1, zadano je mjerilo (*Scale*) 1:100. Zatim se upišu minimalne koordinate u horizontalnom i vertikalnom smjeru (*Problem Extents – Minimum*) kako bi zadani model bio centriran u radnom prostoru. Ovdje je za minimalne koordinate u oba smjera zadano -5 m. Pod ovom se opcijom još može promijeniti vrijednost zapreminske težine vode, za koju je ponuđena (*default*) vrijednost 9,807 kN/m³. Ponekad je, radi lakšeg pregleda rezultata za jednostavne primjere, povoljno za ovu veličinu zadati 10 kN/m³.

Radi olakšavanja crtanja regija i drugih dijelova crteža, korisno je koristiti opciju *Set – Grid*. Pri tom će se, za jednaki zadani razmak u horizontalnom i vertikalnom smjeru (*Grid Spacing*), u radnom prostoru pojaviti mreža točkica. Za to je još potrebno označiti *Display Grid*. S opcijom *Snap to Grid*, pri crtanju u radnom prostoru uvijek će početak i kraj onoga što se crta biti baš u točkicama, iako je miš možda postavljen u njihovoj blizini. Koordinate točkice, u čijoj je blizini postavljen miš, mogu se vidjeti u donjem desnom uglu ekrana. Kada se ova opcija isključi, moguće je crtati između točkica, s koordinatama naznačenim u donjem desnom uglu ekrana.

Sada treba upisati parametre tla. U programu SEEP/W treba zadati funkciju koeficijenta propusnosti k (m/s) u ovisnosti o tlaku vode. Ova se funkcija tako zadaje posebno zbog nelinearne ovisnosti koeficijenta propusnosti o tlaku vode u nesaturiranom tlu, gdje vrijednost koeficijenta propusnosti pada s većom apsolutnom vrijednošću negativnog tlaka vode, više ili manje, ovisno o vrsti tla. Koeficijent propusnosti može se zadati i kao konstantna funkcija, kao što je zadano u ovom zadatku. Ovdje treba naglasiti da rezultati za stacionarno strujanje vode kroz tlo ili za zadani hidrostatski tlak vode, ne ovise o zadanoj vrijednosti koeficijenta propusnosti, ali ovu funkciju ipak treba zadati. Ona se zadaje pod opcijom *KeyIn – Hydraulic Functions – Hydraulic Conductivity – Edit* (za funkciju broj 1).

Kada se, u sva tri programa, koristi *KeyIn* za unos podataka, uvijek se, za odabranu opciju, pokaže prozor s praznom tablicom iznad koje su označeni nazivi podataka za unos. Tako, za unos podataka o koeficijentu propusnosti, piše: redni broj (#), koji se, s unosom svakog retka, povećava od 1 na dalje, zatim tlak vode (*Pressure*) i koeficijent propusnosti (*Conductivity*). Podaci za svaki redak tablice unose se ispod ove tablice: za prvi redak, broj 1, tlak vode 0 i koeficijent propusnosti 1×10^{-5} (m/s). Nakon što su uneseni svi podaci u jednom retku, treba zadati *Copy* kako bi se ovaj redak unio u tablicu. Za konstantnu se funkciju koeficijenta propusnosti, u drugom retku zadaje broj 2, za tlak vode neki veći broj, recimo, 1000 (kPa) i ista vrijednost koeficijenta propusnosti 1×10^{-5} (m/s).

Zadanu funkciju koeficijenta propusnosti treba pridružiti odgovarajućem materijalu pod *KeyIn – Material Properties*. Bez ulaženja u značenje svih pojmova na vrhu tablice, o kojima će biti riječi tijekom kolegija, ovdje se za jedan materijal zadaje jedan redak, upiše se redni broj 1, a pod *K-Fn* izabere se broj 1 za prethodno zadanu funkciju koeficijenta propusnosti. Može se izabrati i boja (*Color – Set*), kojom će pojedina vrsta tla biti obojana na crtežu.

U programu SIGMA/W konstitucijski se odnos za svaku vrstu tla zadaje pod *KeyIn – Material Properties*. Nakon što se upiše redni broj 1, treba pod *Model* izabrati odgovarajući konstitucijski odnos, u ovom slučaju linearno-elastičan (*Linear-Elastic*). Pod *Parameter Type* uvijek se zadaje *Effective*, osim kada se provode analize u nedreniranim uvjetima, kada se zadaje *Total*, a o tome će također biti riječi tijekom kolegija. Nakon toga se, za unos, pojave nazivi parametara za odabrani konstitucijski odnos. Ovdje treba unijeti vrijednost Youngovog modula elastičnosti (*E Modulus*) $E' = 5000$ (kPa) i vrijednost Poissonovog koeficijenta (*Poisson's Ratio*) $\nu' = 0,33$.

U programu SLOPE/W parametri tla također se zadaju pod *KeyIn – Material Properties*. Nakon što se zada redni broj 1 i odabere kriterij sloma (u ovom slučaju Mohr-Coulombov), treba zadati zapreminsku težinu tla (*Unit Weight*) $\gamma = 19$ (kN/m³), koheziju (*Cohesion*) $c' = 5$ (kPa) i kut unutarnjeg trenja (*Phi*) $\phi' = 35^\circ$.

Za proračun modela sa slike 2 programom SEEP/W, u ovom se programu ucrtaju tri regije i odgovarajuća mreža konačnih elemenata (slika 1). Koordinate točaka mogu se unijeti pod *KeyIn – Points*, ili se točke mogu direktno ucrtati u radni prostor s opcijom *Draw – Points* ili se za to uporabi odgovarajuća ikona (*Draw – Points*), ili se naprosto točke ucrtavaju u radni prostor tijekom crtanja regija. Regije se crtaju s opcijom *Draw – Regions* ili se za to uporabi odgovarajuća ikona (*Draw Regions*). S križićem, koji se pojavi, regija se ucrtava od točke do točke, s tim da prva točka mora biti i posljednja, kako bi se regija zatvorila. Čim se regija zatvori, u njoj se pojave elementi i meni *Region Properties*. Pod *Material* se izabere odgovarajuća vrsta tla (broj 1 u ovom zadatku), a pod *Mesh Pattern* strukturirana (*Structured Quad*) ili nestrukturirana (*Unstructured*) mreža konačnih elemenata. Sekundarni se čvorovi izaberu pod *Elements – Secondary Nodes*. Pod *Edges* se između svakih dviju točaka može zadati željeni broj elemenata.

Kada je mreža konačnih elemenata gotova, crtaju se koordinatne osi pod opcijom *Set – Axes*. Upišu se nazivi koordinatnih osi, a zatim se zadaju podjele na osima: minimalna vrijednost (*Min.*), razmak između dvije podjele (*Increment Size*) i broj podjela (*# of Increments*), koji definira maksimalnu vrijednost na osi.

Rubni se uvjeti, u programu SEEP/W zadaju pod opcijom *Draw – Boundary Conditions* ili se uporabi odgovarajuća ikona (*Draw Boundary Conditions*). U ovom je programu moguće zadati nekoliko vrsta rubnih uvjeta, a bar u jednom čvoru mora biti zadan hidraulički potencijal (ili piezometarska visina). Za zadavanje hidrauličkog potencijala pod *Type* se izabere *Head (H)*, a pod *Action* se upiše vrijednost hidrauličkog potencijala za dane čvorove. Zatim se ovi čvorovi obilježe i time se u njima zada uneseni rubni uvjet.

U sva se tri programa, u radnom prostoru mogu crtati linije, kružnice ili lukovi, a može se upisati i tekst. Na slici 2 prikazana razina vode u jezeru i oznaka za razinu vode, ucrtani su pomoću *Sketch – Lines*, a može se uporabiti i odgovarajuća ikona (*Sketch Lines*).

Time je dovršen model za proračun sa slike 2. Sada treba definirati vrstu analize. Pod *KeyIn – Analysis Settings – Type – Analysis Type*, nude se dvije vrste analiza. Jedna je proračun stacionarnog strujanja vode kroz tlo (*Steady-State*), a druga je proračun nestacionarnog strujanja vode kroz tlo (*Transient*), gdje se tlak vode u tlu mijenja u vremenu, kao, primjerice, u slučaju konsolidacije tla. Iako se u primjeru sa slike 2 radi o hidrostatskom tlaku vode u tlu, ovdje treba izabrati opciju stacionarnog strujanja vode.

Nakon crtanja mreže konačnih elemenata, a i inače, prije proračuna uvijek treba provjeriti ispravnost modela. Za to treba uporabiti ikonu *Verify* u lijevom vertikalnom stupcu. Ako postoji neka greška u modelu, ovdje će biti napisano o čemu se radi. Osim detektiranja grešaka u modelu, ovim se postupkom ujedno sortiraju elementi i čvorovi mreže konačnih elemenata, kako bi se osigurala što manja udaljenost između čvorova sa susjednim brojevima, što je povoljno za metodu konačnih elemenata. Zato je nužno koristiti ovu opciju nakon što se formira nova mreža konačnih elemenata i nakon svake njene promjene.

Sada se može pokrenuti rješavanje zadanog zadatka pomoću ikone *Solve*. Nakon toga se mogu pregledavati rezultati pomoću ikone *Contour*. Sva su tri programa bogato opremljena mogućnostima pregleda rezultata. Nudi se prikaz izolinija raznih varijabli i prikaz raznih varijabli u obliku dijagrama. Za prikaz izolinija, koristi se opcija *Draw – Contours*, ili se uporabi odgovarajuća ikona (*Draw Contours*). Izabere se varijabla za izolinije, a mogu se promijeniti ponuđene vrijednosti početne izolinije (*Starting Contour Value*), razlike vrijednosti između dviju izolinija (*Increment by*) i ukupnog broja izolinija (*Number of Contours*). Vrijednosti prikazanih izolinija mogu se napisati pomoću *Draw – Contour Labels* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Contour Labels*). Odgovarajući se broj napiše nakon što se mišem klikne na određenu izoliniju.

Za proračun početnog stanja naprezanja programom SIGMA/W sa slike 4, koristi se ista mreža konačnih elemenata kao u programu SEEP/W. To se postiže tako što se pod *File – Select Analyses* odabere još i program SIGMA/W. Sada se pod *Window* odabere program

SIGMA/W, gdje je mreža konačnih elemenata već ucrtana. Još treba zadati odgovarajuće parametre tla i rubne uvjete. Rubni se uvjeti u programu SIGMA/W mogu zadavati u rubnim čvorovima i na rubnim stranicama elemenata. Za zadavanje rubnih uvjeta u čvorovima sa slike 4, koristi se opcija *Draw – Node Boundary Conditions*, ili se uporabi odgovarajuća ikona (*Draw Node Boundary Conditions*). Za lijevi i desni vertikalni rub, gdje su u čvorovima dozvoljeni pomaci samo u vertikalnom smjeru, pod *X-Boundary – Type* se odabere *X-Displacement*, a pod *Action* se upiše da je vrijednost horizontalnog pomaka 0. Za ove se čvorove, pod *Y-Boundary – Type* odabere (*none*). Na donjem horizontalnom rubu čvorovi su fiksirani u oba smjera, pa se za njih, pored zadavanja da je vrijednost horizontalnog pomaka 0, takvom zada i vrijednost vertikalnog pomaka.

Ovdje još treba zadati zapreminsku težinu tla, pod *KeyIn – Body Load*, gdje se za prvi (jedini) materijal, pod nazivom *Vertical* upiše odgovarajuća vrijednost ($\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$).

Kao u programu SEEP/W, sada treba zadati vrstu analize. Za proračun početnog stanja napreznja tla, koje nema horizontalnu površinu, pod *Analysis Type* se zada *InSitu 2 (General, using submerged weight)*. Ovdje također treba naznačiti da će se tlak vode preuzeti iz rezultata proračuna programom SEEP/W, što odgovara zadavanju početnih uvjeta (*Initial Conditions*). Znači, za tlak vode u tlu (*PWP*, što je kratica za *Pore Water Pressure*), označi se da se preuzima iz filea (*from file*), a file se definira pod Budući da je analiza programom SEEP/W u istom fileu kao i SIGMA/W, ovdje je dovoljno pod *Analysis* odabrati SEEP/W.

Za proračun sa slike 9, gdje je u programu SIGMA/W zadana razina vode, dovoljno je promijeniti početne uvjete za tlak vode, tako da se sada označi da će se razina vode zadati u modelu (*from Initial Water Table*). Zatim se pod *Draw – Initial Water Table*, ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Initial Water Table*), ucrtta razina vode.

Za proračun sa slike 10, gdje tlo ima horizontalnu površinu, umjesto analize *InSitu 2* se zada analiza *InSitu 1 (Horizontal ground surface only)*. Razina vode ovdje se zadaje u modelu. Kako je već rečeno, za razinu vode iznad tla treba zadati odgovarajući tlak vode na gornjem horizontalnom rubu modela, odnosno na stranicama rubnih elemenata. Koristi se opcija *Draw – Edge Boundary Conditions*, ili se uporabi odgovarajuća ikona (*Draw Edge Boundary Conditions*). Pod *Type* se odabere tlak vode (*Fluid Pressure*), a pod *Elevation* se unese y koordinata na kojoj se u modelu nalazi razina vode. Ovdje je to 5 (m).

Iako se za analizu *InSitu 1* ne koristi konstitucijski odnos, potrebno ga je zadati kao linearno-elastičan, s tim da je dovoljno zadati vrijednost Youngovog modula elastičnosti. Ovdje svakako, pod *KeyIn – Body Load*, treba zadati i vrijednost koeficijenta bočnog napreznja tla u mirovanju K_0 (0,5). Sekundarni su čvorovi nužni u mreži konačnih elemenata, jer inače napreznja, pri gornjem i donjem rubu modela, neće biti korektno izračunata. Svojstva pojedine regije mogu se mijenjati pod *KeyIn – Regions*.

Za proračun stabilnosti kosine, treba dodati još i program SLOPE/W u isti file. Nakon zadavanja parametara posmične čvrstoće za Mohr-Coulombov kriterij sloma i

zapreminske težine tla, treba zadati sve potrebne podatke za proračun pod *KeyIn – Analysis Settings*. Pod *Method* nude se razne metode proračuna stabilnosti kosine, a ovdje ćemo zadati metodu Morgenstern-Pricea s polusinusnom funkcijom (*Half-sine function*). Pod *PWP* se definira da će se tlak vode preuzeti iz rezultata proračuna programom SEEP/W. Pod *Slip Surface* prvo treba definirati hoće li se potencijalno klizno tijelo gibati udesno ili ulijevo. Za kosinu sa slike 16, potencijalno će se klizno tijelo gibati udesno, pa treba označiti *Left to right*. Zatim se, pod *Slip Surface Option* označi *Grid and Radius*, što znači da će se analizirati kružne potencijalne klizne plohe.

Mreža središta kružnih kliznih ploha zadaje se pod *Draw – Slip Surface – Grid*, ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Slip Surface Grid*). Ova se mreža ucrtava od donjeg desnog, preko donjeg lijevog, do gornjeg lijevog vrha. Zatim se pod *# of Grid Increments* može zadati broj podjela mreže u oba smjera stranica mreže. Tangente se crtaju pod *Draw – Slip Surface – Radius*, ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Slip Surface Radius*), tako da se krene od donjeg desnog, preko donjeg lijevog, pa gornjeg lijevog, do gornjeg desnog vrha područja tangenti. Ovdje se također može zadati broj podjela područja na tangente (*# of Radius Increments*). Crtanje dobre mreže središta kružnih kliznih ploha i njihovih tangenti, za dobivanje klizne plohe s minimalnim faktorom sigurnosti, ovisi o iskustvu korisnika. Treba probati i promatrati rezultate, zatim ponovo probati. Može se, međutim, dati preporuka da gornja tangenta svakako prođe kroz nožicu kosine.

Tlak vode iz jezera, koji djeluje na tlo ispod površine jezera, zadaje se pomoću opcije *Draw – Pressure Lines*, ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Pressure Lines*). Crta se linija duž razine vode u jezeru, nakon čega se pojavi šrafirano područje ispod ove linije do površine tla.

Kada se razina vode u tlu i u jezeru zadaje u programu SLOPE/W (slika 18), pod *Analysis Settings – PWP* se označi *Piezometric lines with Ru / B-bar* i zatim se ucrtava razina vode, isto kao u programu SIGMA/W.

Za proračun programom SEEP/W sa slike 19, gdje je definiran model tla sa strujanjem vode, na kosini smo zadali rubni uvjet koji označava mogući izlaz vodnoga lica. Ovaj se rubni uvjet postavlja tako da se u ovim čvorovima zada da je protok 0 (*Type: Total Flux (Q); Action: 0*), čime se, inače, zadaje da je u tom čvoru granica modela nepropusna. Nadalje se označi *Potential Seepage Face Review*. S ovom oznakom će se tijekom proračuna provjeravati da li u tom čvoru izlazi vodno lice. Ako izlazi, postaviti će se da je u tom čvoru tlak vode 0, a ako ne izlazi, u tom će čvoru granica modela biti nepropusna.

Ovime su dane osnovne upute za korištenje triju programa *GeoStudia*. Stečenim iskustvom, korištenjem ovih programa tijekom kolegija, kao i tijekom kolegija *Numeričko modeliranje u geotehnici*, studenti će steći znanje koje će im pomoći, ne samo za numeričko modeliranje raznih geotehničkih problema, već i za bolje razumijevanje mehanike tla.