

NESATURIRANO TLO

I. Uvod

Klasična se mehanika tla zasniva na zakonima ponašanja potpuno saturiranoga tla. U prirodi, međutim, ima mnogo primjera gdje nesaturirano tlo izaziva geotehničke probleme koji su od vrlo velikog značaja. Zbijeno je tlo, primjerice, nesaturirano. Tlo se uvijek zbija pri izgradnji nasipa i zemljanih brana, pa njegova nesaturiranost ima ulogu u strujanju vode kroz nasute geotehničke i hidrotehničke građevine. Nadalje, ako je nesaturirano tlo sklono bujanju, tijekom oborina se njegov volumen bitno povećava, što može izazvati velike štete na objektima izgrađenim na takvom tlu.

Klimatski uvjeti, koji izazivaju nesaturiranost tla, mogu se naći na svim kontinentima. Voda izlazi iz tla isparavanjem ili utjecajem vegetacije na površini tla, posebno u sušnim područjima. Time dolazi do postepenog sušenja i ispucavanja tla. Ponašanje takvoga tla sve više izaziva pozornost geotehničke struke. Ovdje se radi o posebnom režimu strujanja vode, jer, kao što će se vidjeti, propusnost nesaturiranog tla sve više pada s padom stupnja saturacije, tako da je, primjerice, propusnost nesaturiranog šljunka manja od propusnosti saturirane gline. Ovo se svojstvo koristi pri izgradnji takozvanih kapilarnih brana za zaštitu odlagališta otpada. Posmična čvrstoća nesaturiranog tla veća je od posmične čvrstoće saturiranog tla, tako da je u nekim slučajevima moguće iskopati jamu gotovo vertikalnih stranica u nesaturiranom tlu. Međutim, nakon oborina doći će do urušavanja jame. Promjena ponašanja tla pri prijelazu iz nesaturiranog u saturirano stanje ima vrlo bitnu ulogu za klizišta. Poznato je da do klizanja većih masa tla niz kosinu dolazi upravo nakon obilnih kiša. Koje sve promjene ponašanja nesaturiranoga tla, bilo ono na kosini ili ne, slijede nakon oborina, u novije je vrijeme predmet izučavanja znanstvenika širom svijeta.

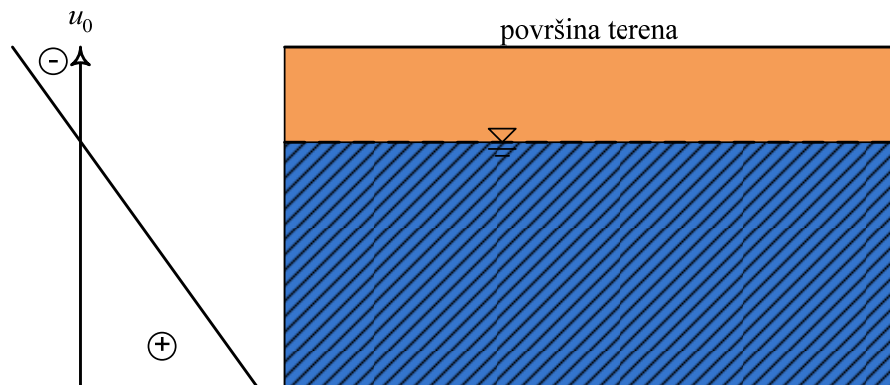
Budući da se saturirano tlo može smatrati posebnim slučajem nesaturiranoga tla, ovdje će biti ponovo iznesene neke od osnovnih postavki mehanike tla, sada uz poopćavanje i uključivanje svojstava tla koja se odnose na prisutnost zraka u porama tla.

Već je rečeno da se tlo sastoji od skeleta čvrstih zrna i čestica, između kojih su pore. Također je rečeno da se pretpostavlja kako su zrna i čestice tla nestišljivi, a da je skelet tla stišljiv, da se na njega odnose efektivna naprezanja, čija promjena rezultira deformacijama. Naime, skelet tla sastoji se od relativno mekane nakupine vrlo krutih zrna i čestica u međusobnom dodiru. Dok su zrna i čestice tla vrlo kruti, pa se gotovo ne deformiraju, skelet se relativno lako deformira pod uobičajenim opterećenjima koje susrećemo u praksi. Do deformacija dolazi tako što se, pod opterećenjem, zrna i čestice preslože u gušći raspored, pa se smanji volumen pora između njih.

Pore mogu biti potpuno ili djelomično ispunjene vodom, ili suhe. Sve ono što u porama ne ispunjava voda, najčešće ispunjava zrak, a rijetko kada, na većim dubinama, umjesto zraka može se naći neki drugi plin. Kod većeg stupnja saturacije ($S_r > 80\%$) zrak se nalazi u obliku mjehurića okruženih vodom, tako da se voda u porama tla ponaša kao stišljivi materijal.

Ako razina vode nije na površini terena, nego na nekoj dubini ispod ove površine, tlo je potpuno saturirano od razine podzemne vode naniže. Iznad razine podzemne vode tlo je također potpuno saturirano do visine kapilarnog dizanja vode. Od razine podzemne vode do visine njenog kapilarnog dizanja, tlak vode u porama tla raste po apsolutnoj vrijednosti, s negativnim predznakom, dakle u kapilarnoj je zoni tlak vode negativan. Iznad razine kapilarnog dizanja vode, stupanj saturacije pada s udaljenošću od gornje granice kapilarne zone do površine terena. Ovdje treba zamisliti pokus određivanja granice stezanja za tlo. Ova je granica definirana kao ona vlažnost tla pri kojoj je tlo još uvijek potpuno saturirano, pri čemu ima minimalni volumen. To znači da iznad granice stezanja, kako voda isparava iz tla, vlažne kapilarne sile čine da se čestice tla sve više međusobno zbližavaju, pri čemu se smanjuje volumen tla. Ovaj proces se nastavlja sve dok se ne uspostavi minimalni volumen tla (granica stezanja), a tlo je još uvijek potpuno saturirano. Dodatnim isparavanjem vode, volumen tla se više ne smanjuje, nego sa sada smanjuje stupanj saturacije tla. Pri tome kapilarno djelovanje više ne djeluje na međusobno zbližavanje čestica tla, već vodu nakuplja bliže kontaktima među česticama, a dijelovi pora ispunjeni zrakom sve se više međusobno povezuju i stvaraju kontinuirani dio pora ispunjen zrakom. Sa smanjenjem stupnja saturacije tla, tlak vode u porama dalje raste po apsolutnoj vrijednosti, s negativnim predznakom. Stupanj saturacije tla, naime, ovisi o kapilarnom usisu ($u_a - u$) (engleski: *matrix suction*), gdje je u_a tlak zraka, a u negativni tlak vode u porama tla. Ako je u_a atmosferski tlak zraka, onda mu je vrijednost nula.

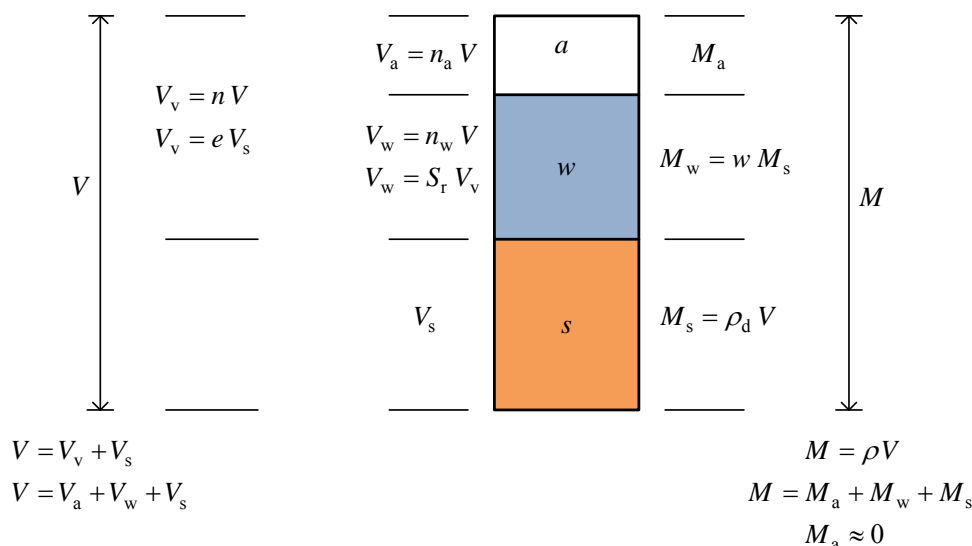
Ako pretpostavimo da visina kapilarnog dizanja vode u tlu doseže do površine terena (slika I-1), u cijelom je tlu stupanj saturacije $S_r = 100\%$, a tlak vode u porama linearno raste od površine terena s dubinom (hidrostatski tlak vode), s tim da je iznad razine podzemne vode negativan.



Slika I-1. Hidrostatski tlak vode u_0

II. Osnovne definicije

Nesaturirano se tlo sastoji od triju faza: zrna/čestica tla, vode i zraka. Fazni odnosi za nesaturirano su tlo prikazani na slici II-1, gdje w označava vlažnost tla, a ρ_d gustoću suhoga tla. U nastavku teksta slijede osnovne definicije za nesaturirano tlo, koje se poklapaju s onima za potpuno saturirano tlo, osim što za nesaturirano tlo ne zanemarujemo masu zraka M_a .



Slika II-1. Fazni odnosi za nesaturirano tlo

Stupanj saturacije definiran je kao omjer volumena vode u porama tla V_w i volumena pora V_v a izražava se u postocima:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Volumen pora sastoji se od volumena vode i volumena zraka V_a :

$$V_v = V_w + V_a$$

Za nesaturirano je tlo $V_a > 0$, pa je $S_r < 100$ %.

Relativni je porozitet tla definiran kao omjer volumena pora i ukupnog volumena tla. Ovdje ćemo, radi jednostavnosti ovaj omjer definirati kao decimalni broj n a ne kao postotak:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Osim navedenih triju faza nesaturiranoga tla, treba razmotriti i četvrtu fazu: površinsku napetost između zraka i vode u porama tla. Naime, kontaktna površina između zraka i vode (meniskus) ponaša se kao elastična membrana pod vlačnim naprezanjem. Insekti mogu hodati po ovoj membrani. Djelovanje vlačnih sila u meniskusu možemo osjetiti na koži ruke, ako na nju stavimo i razmažemo mokru glinu. Tijekom sušenja gline (isparavanja vode), koža ruke će se stezati. Volumen elastične membrane može se zanemariti, njena se masa može smatrati dijelom mase vode, ali su bitna naprezanja koja u njoj djeluju. Dok se potpuno saturirano tlo suši isparavanjem vode, ukupna naprezanja se ne mijenjaju, ali vlačne se sile u membrani sve više povećavaju.

Sada definiramo sljedeće omjere:

$$n_s = \frac{V_s}{V}$$

$$n_w = \frac{V_w}{V}$$

$$n_a = \frac{V_a}{V}$$

$$n_c = \frac{V_c}{V}$$

gdje je V_c volumen kontaktne površine između vode i zraka, koji je zanemariv, pa je $n_c \cong 0$.

Iz gornjih izraza slijedi da je

$$n_s + n_w = n_s + n_w + n_a = 1$$

Veličina n_w ima posebno značenje. Ona definira obujamsku vlažnost θ , tako da je:

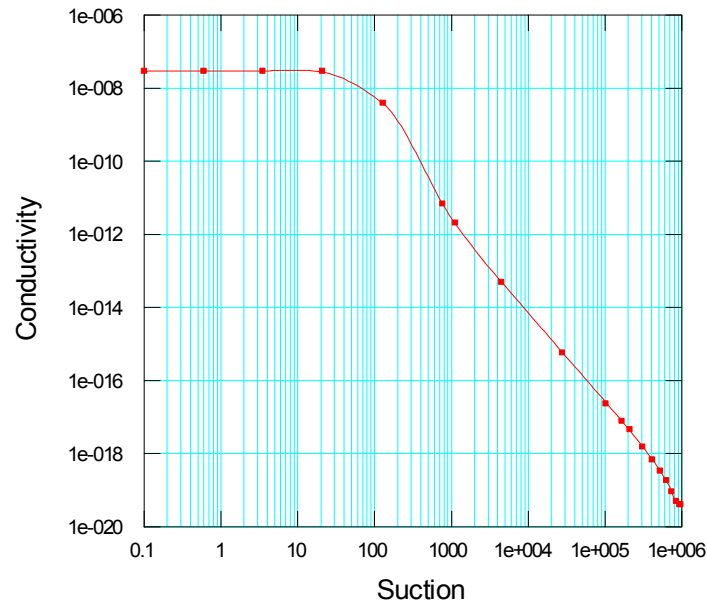
$$\theta = \frac{V_w}{V} = S_r \frac{V_v}{V} = n S_r = S_r \frac{e}{1+e}$$

III. Primjeri analize nesaturiranoga tla

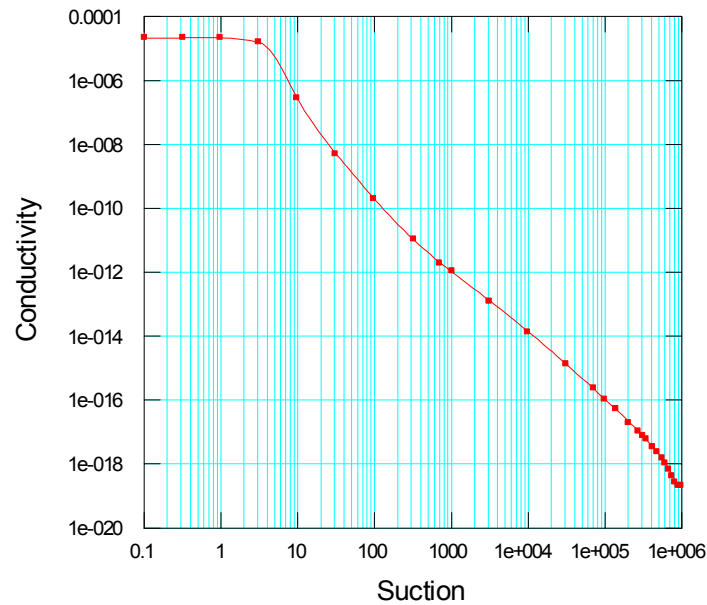
Piezometrom se mjeri pozitivan tlak vode u potpuno saturiranom tlu, dok se tensiometrom mjeri negativan tlak vode u nesaturiranom tlu. Meniskus, odnosno elastična membrana, koja se formira na kontaktu između negativnog tlaka vode i zraka, omogućava mjerenje tensiometrom negativnog tlaka zraka u porama. Standardni se tensiometar sastoji od cijevi ispunjene vodom, koja na jednom svom kraju ima poroznu keramičku pločicu, a na drugom kraju osjetilo za mjerenje negativnog tlaka vode. Keramička pločica služi za formiranje hidraulički saturirane veze između vode u porama tla, vode u cijevi tensiometra i osjetila za mjerenje negativnog tlaka vode. Voda iz pora tla prolazi kroz osjetilo za mjerenje negativnog tlaka vode u tensiometar. Negativni se tlak vode u porama prenosi kroz keramičku pločicu tako da voda iz cijevi tensiometra izlazi iz nje dok se ne izjednače unutarnji tlak vode u tensiometru i kapilarni usis u tlu. Kada bi se nesaturirano tlo namočilo vodom, voda bi iz tla ulazila u tensiometar, dok se tlakovi vode u okolnome tlu i tensiometru ne izjednače. Izjednačavanje ovih tlakova obično traje od jedne do 10 minuta. U praksi je standardnim tensiometrom moguće mjeriti negativni tlak vode do -80 kPa. Napredni tensiometri mogu mjeriti negativni tlak vode do -1500 kPa.

Kao i u potpuno saturiranom tlu, strujanje vode kroz nesaturirano tlo ovisi o razlici hidrauličkih potencijala. Darcyev zakon vrijedi i u nesaturiranom tlu. U potpuno saturiranom tlu, koeficijent propusnosti funkcija je koeficijenta pora. U nesaturiranom tlu, koeficijent propusnosti funkcija je koeficijenta pora i stupnja saturacije tla, odnosno obujamske vlažnosti tla. Sa smanjenjem stupnja saturacije, koeficijent propusnosti naglo pada, jer se smanjuje udio vode u porama, a povećava se udio zraka. Najčešće se, međutim, za nesaturirano tlo koeficijent propusnosti prikazuje u ovisnosti o kapilarnom usisu, a ova ovisnost varira prema vrsti tla.

Na slikama III-1 i III-2 prikazane su ovisnosti koeficijenta propusnosti (*Conductivity*) o kapilarnom usisu (*Suction*) za prašinstu glinu, odnosno za fini jednoliki pijesak. Ako je u_a atmosferski tlak zraka, on je jednak nuli, pa kapilarni usis ujedno predstavlja negativni tlak vode.



Slika III-1. Ovisnost koeficijenta propusnosti (m/s) o kapilarnom usisu (kPa) za prašinstu glinu



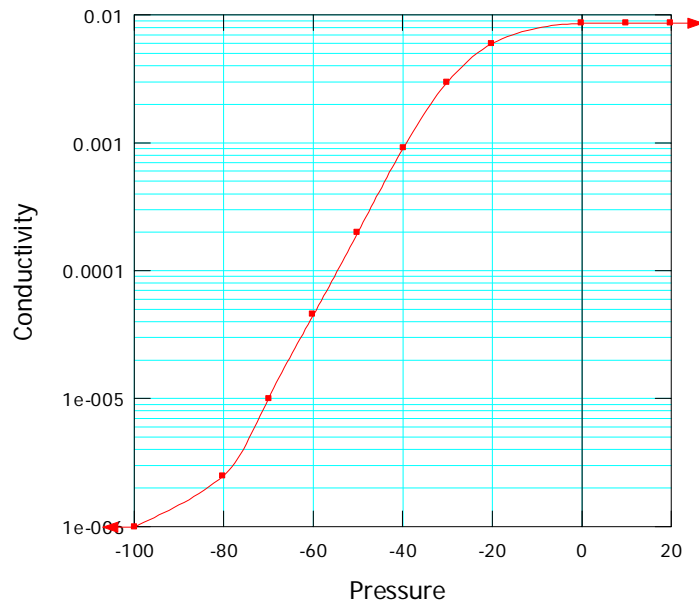
Slika III-2. Ovisnost koeficijenta propusnosti (m/s) o kapilarnom usisu (kPa) za fini jednoliki pijesak

III.1. Prvi primjer

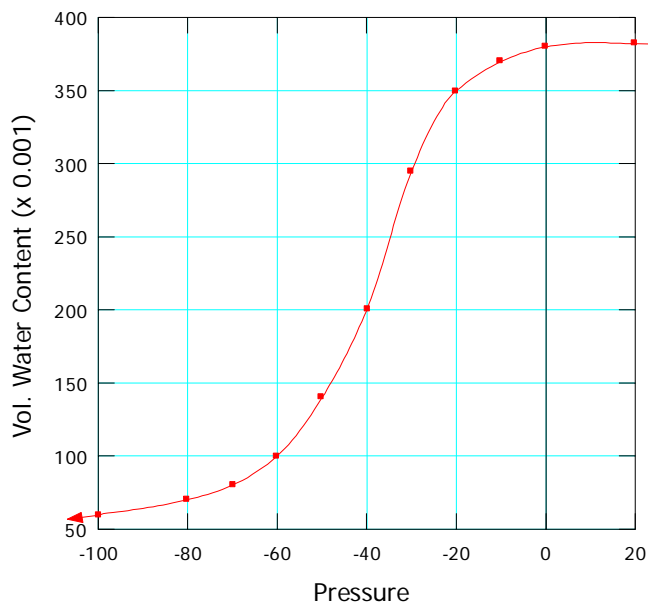
Sada ćemo prikazati primjer strujanja vode kroz nesaturirano tlo, uz modeliranje programom SEEP/W. Radi se o homogenoj nasutoj brani (ilustracije radi) visine 12 m i širine krune 4 m. Nagibi obiju kosina su 1:2. Brana se gradi na potpuno saturiranom temeljnom tlu s vodom na površini terena. Koeficijent propusnosti materijala brane zadan je funkcijom ovisnosti o negativnom tlaku vode (*Pressure*), kao što je prikazano na slici III-3. Kada je tlak vode nula, koeficijent propusnosti $k = 8,6 \times 10^{-3}$ (m/dani).

Ovisnost obujamske vlažnosti θ (*Volumetric water content*) o negativnom tlaku vode za materijal nasipa prikazana je na slici III-4.

Akumulacijsko se jezero puni vodom tijekom 6 mjeseci do visine 11 m iznad površine temeljnoga tla, zatim 5 godina ostaje puno, nakon čega se prazni tijekom sljedećih 6 mjeseci.

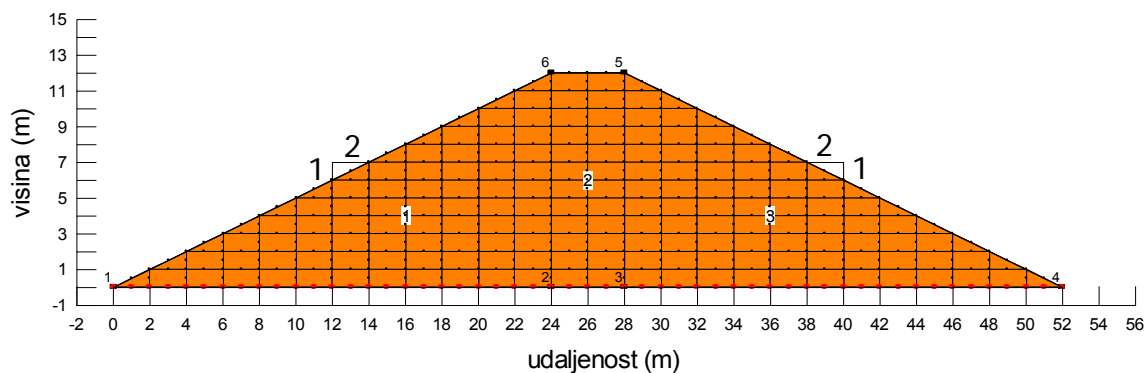


Slika III-3. Ovisnost koeficijenta propusnosti (m/dani) o negativnom tlaku vode (kPa)



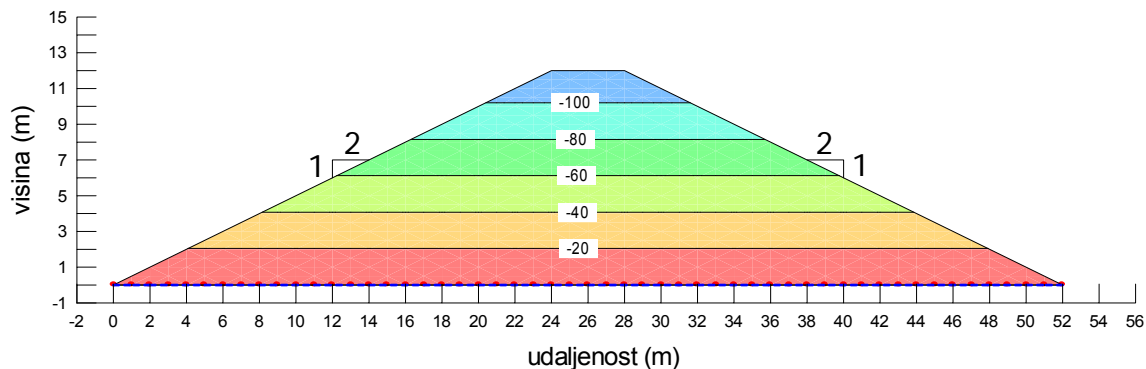
Slika III-4. Ovisnost obujamske vlažnosti o negativnom tlaku vode (kPa)

Prvo treba proračunati početno stanje tlaka vode u brani, s vodom na površini temeljnoga tla (slika III-5). U svim je donjim rubnim točkama brane zadan hidraulički potencijal $H = 0$.



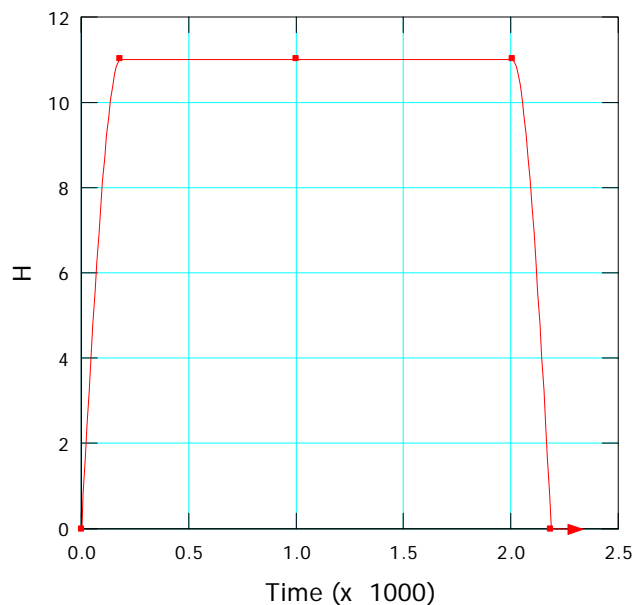
Slika III-5. Model brane s vodom na površini temeljnoga tla

Kao što se vidi na slici III-6, generiran je negativan tlak vode u brani.



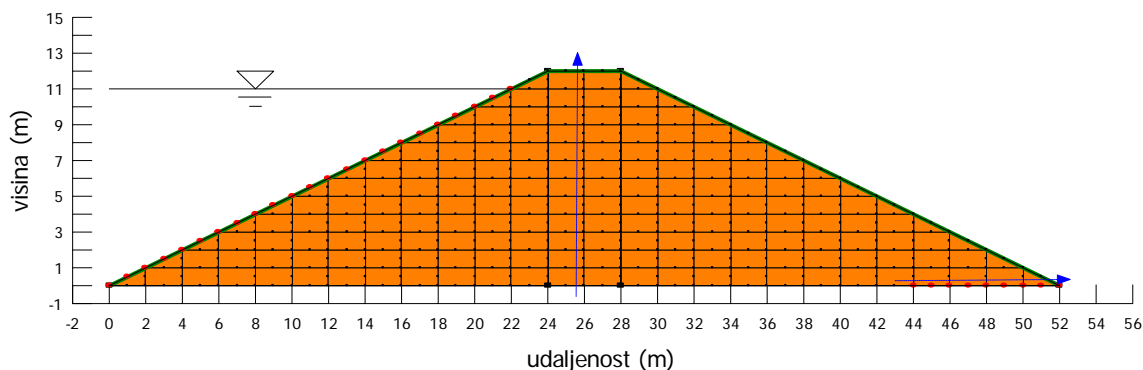
Slika III-6. Izolinije tlaka vode (kPa)

U sljedećem ćemo proračunu provesti nestacionarnu analizu strujanja vode kroz nesaturiranu branu tijekom punjenja akumulacijskog jezera, njegove konstantne razine tijekom 5 godina i zatim pražnjenja akumulacijskog jezera. Za ovaj proračun na uzvodnoj kosini treba zadati u vremenu promjenljiv rubni uvjet, koji zadajemo funkcijom hidrauličkog potencijala u vremenu (*KeyIn – Hydraulic Functions – Hydraulic Boundary*). Pod *Boundary Type* se odabere *H. vs. Time*. Na slici III-7 prikazana je zadana funkcija za rubni uvjet. Hidraulički potencijal raste do $H = 11$ m tijekom prvih 6 mjeseci (182 dana), zatim je konstantan tijekom sljedećih 5 godina (ukupno 2007 dana) i onda se prazni tijekom zadnjih 6 mjeseci (ukupno 2189 dana).



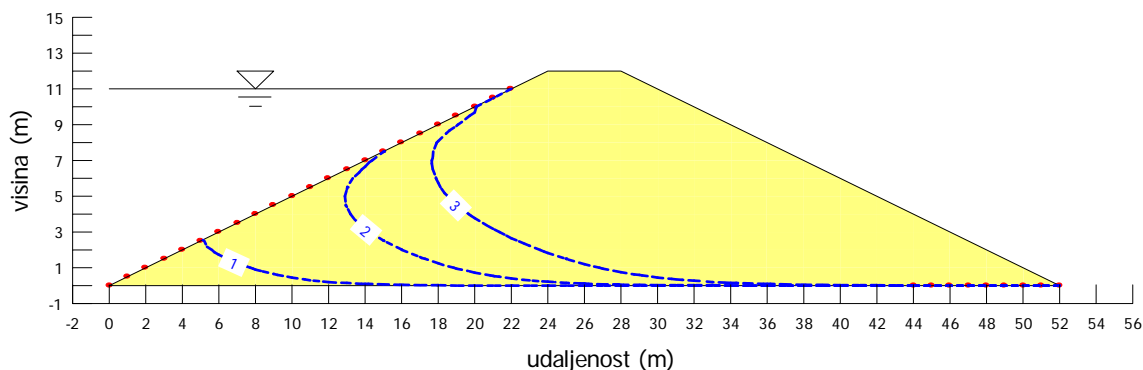
Slika III-7. Funkcija za rubni uvjet: Hidraulički potencijal (m) u vremenu (dani)

Model tla za ovaj je proračun prikazan na slici III-8. Na uzvodnoj je kosini brane zadan rubni uvjet kao funkcija hidrauličkog potencijala u vremenu sa slike III-7. Na nizvodnoj se strani brane, u njegovoj nožici, postavlja dren duljine 8 m. Za dren je postavljen rubni uvjet $H = 0$. Početne uvjete za tlak vode u brani preuzimamo iz prethodnog proračuna



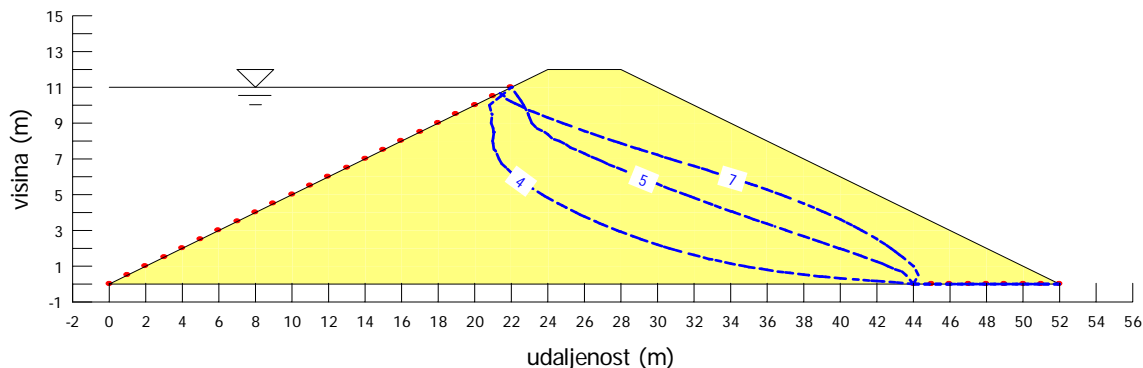
Slika III-8. Model tla za simulaciju nestacionarnog strujanja vode kroz branu

Vodno lice u brani tijekom punjenja akumulacijskog jezera prikazano je na slici III-9. Brojem 1 označeno je vodno lice nakon mjesec dana, brojem 2 nakon 3 mjeseca, a brojem 3 nakon 6 mjeseci, kada je razina vode u jezeru dosegla svoju maksimalnu vrijednost. Zbog vrlo malog koeficijenta propusnosti brane za velike apsolutne vrijednosti negativnog tlaka vode, očito će trebati puno vremena dok se ne uspostavi stacionarno strujanje vode kroz branu. To se vidi na slici III-10, gdje je brojem 4 označeno vodno lice nakon godinu dana (6 mjeseci konstantne razine vode u akumulacijskom jezeru), brojem 5 nakon 3 godine, a brojem 7 nakon 5,5 godina (5 godina punog akumulacijskog jezera). Tek se nakon punih 5 godina konstantne razine vode u akumulacijskom jezeru može smatrati da je uspostavljeno stacionarno stanje strujanja vode kroz branu. Za usporedbu su na slici III-11 prikazana vodna lica za ista vremena kao na slici III-10, s tim da je koeficijent propusnosti zadan s konstantnom vrijednošću, koja odgovara onoj za tlak vode u tlu jednak nuli ($k = 8,6 \times 10^{-3}$ (m/dani)), što znači da nije predviđeno smanjenje koeficijenta propusnosti s porastom apsolutne vrijednosti negativnog tlaka vode (kapilarnog usisa).

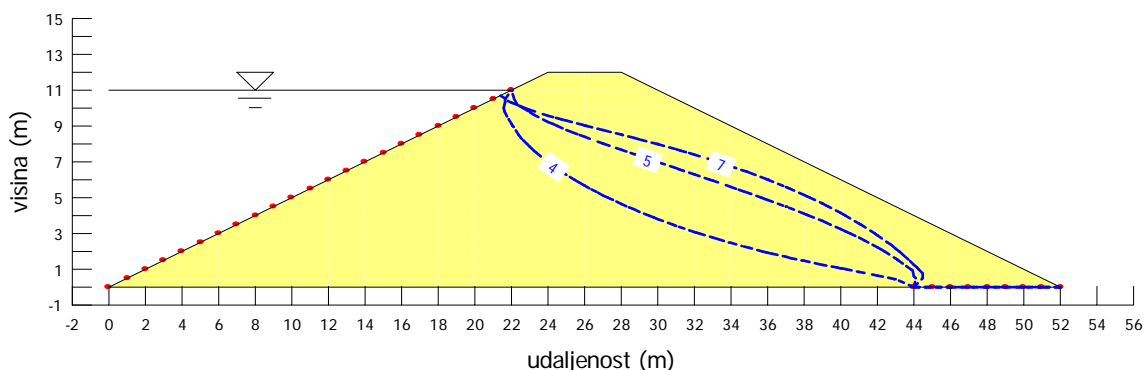


Slika III-9. Vodno lice nakon mjesec dana (1), 3 mjeseca (2) i 6 mjeseci (3)

Usporedbom slika III-10 i III-11, može se vidjeti da se u slučaju konstantnog koeficijenta propusnosti vodno lice brže približava stacionarnom stanju, što je bilo za očekivati s obzirom na to da je iznad vodnog lica koeficijent propusnosti veći nego u slučaju njegovoga pada s porastom kapilarnog usisa. Međutim, treba naglasiti da proračun s konstantnim koeficijentom propusnosti ne odgovara proračunu koji bi se proveo klasičnim pristupom u mehanici saturiranoga tla, jer se u klasičnoj mehanici tla ne uzima u obzir negativni tlak vode ni funkcija obujamske vlažnosti.

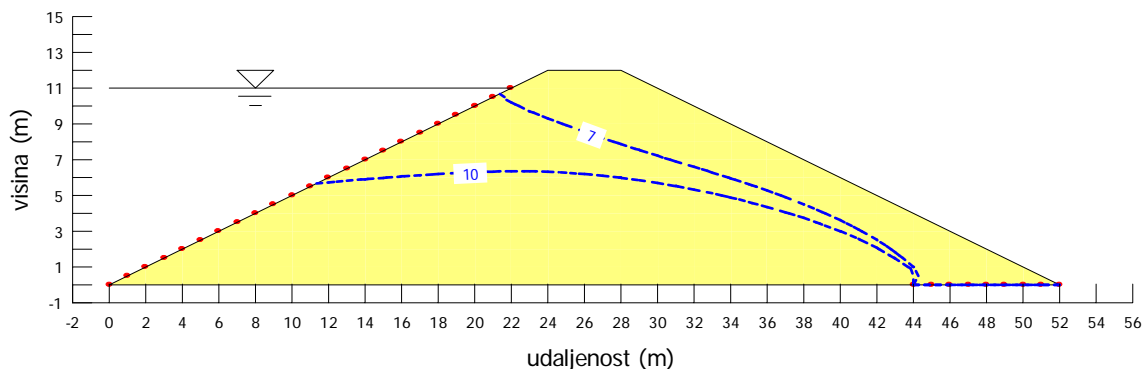


Slika III-10. Vodno lice nakon 1 godine (4), 3 godine (5) i 5,5 godina (7)

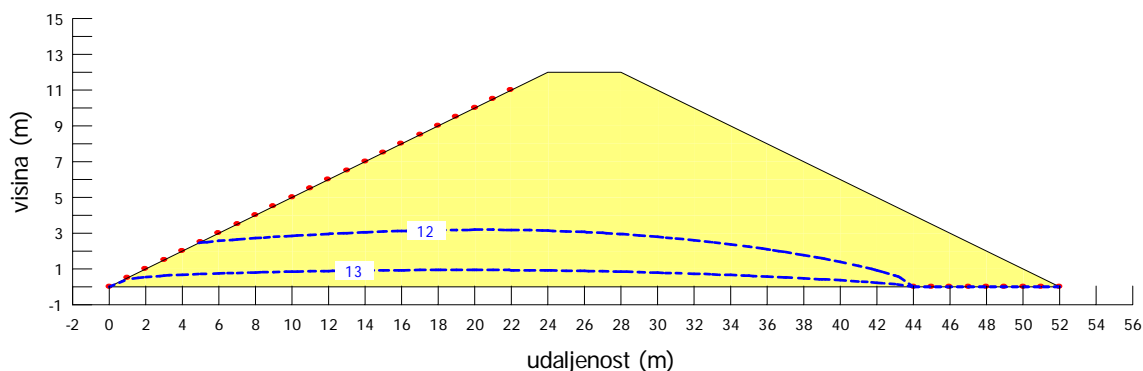


Slika III-11. Vodno lice nakon 1 godine (4), 3 godine (5) i 5,5 godina (7)
za konstantan koeficijent propusnosti

Na slici III-12 prikazano je vodno lice na početku (broj 7) i na kraju pražnjenja akumulacijskog jezera (broj 10). Voda opet sporo teče kroz nesaturirano tlo, što se vidi na slici III-13, gdje je brojem 12 prikazano vodno lice nakon ukupno 10 godina (4 godine praznog akumulacijskog jezera), a brojem 13 nakon 30 godina. Još uvijek se voda nije spustila do površine temeljnoga tla.

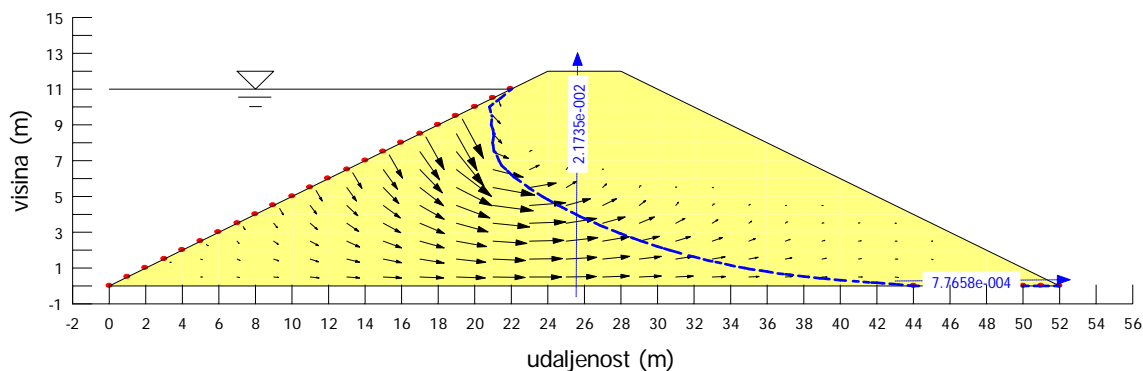


Slika III-12. Vodno lice na početku (7) i na kraju (10) pražnjenja akumulacijskog jezera

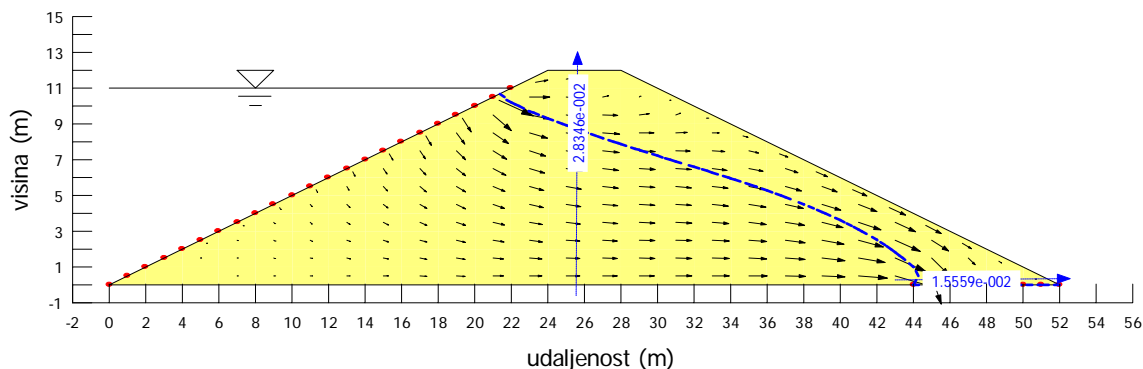


Slika III-13. Vodno lice 10 godina nakon početka punjenja akumulacijskog jezera (12) i 30 godina nakon toga (13)

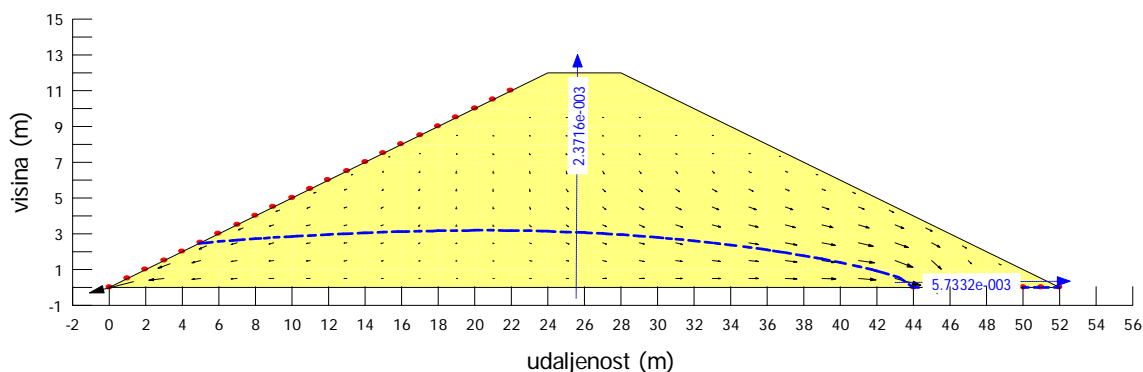
Na slikama III-14 do III-16 prikazani su vektori strujanja i protoci kroz branu i dren godinu dana nakon početka punjenja akumulacijskog jezera, sa 6 mjeseci konstantne razine jezera (slika III-14), nakon 5,5 godina, kada je akumulacijsko jezero puno 5 godina (slika III-15) i 10 godina nakon početka punjenja jezera (slika III-16). Na slikama III-14 i III-15 se vidi da se protok kroz branu vrlo malo promijenio tijekom perioda konstantne razine jezera, dok se tijekom ovog perioda bitno promijenio kroz dren. Četiri godine nakon što je jezero prazno (slika III-16), protoci su se smanjili kroz branu i kroz dren.



Slika III-14. Vektori strujanja i protoci 6 mjeseci nakon što se akumulacijsko jezero napunilo



Slika III-15. Vektori strujanja i protoci 5 godina nakon što se akumulacijsko jezero napunilo

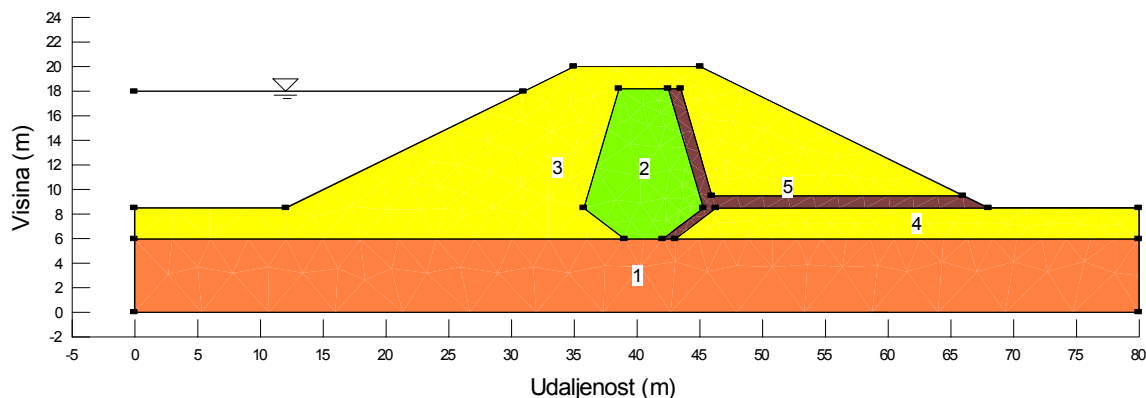


Slika III-16. Vektori strujanja i protoci 4 godine nakon pražnjenja akumulacijskog jezera

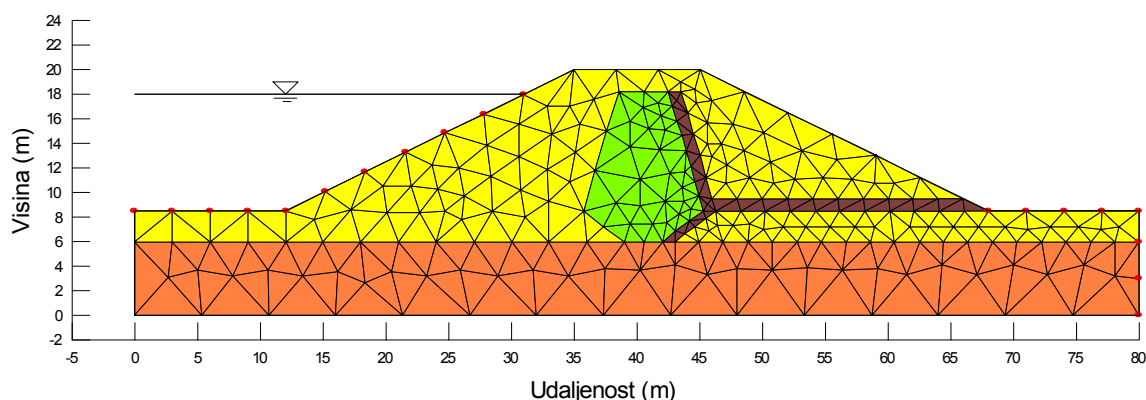
III.2. Drugi primjer

U prethodnom se primjeru vidi kako voda struji kroz branu, ne samo ispod nego i iznad vodnog lica u nesaturiranom području s negativnim tlakom vode u tlu. To se događa i u branama s glinenom jezgrom, gdje voda struji iznad jezgre. Promotrimo primjer brane od prašinastoga pijeska s glinenom jezgrom, na uslojenom tlu s površinskim slojem pijeska i slojem saturirane gline. Visina brane je 11,5 m, širina krune je 10 m, a nagibi kosina su 1:2. Dubina akumulacijskog jezera je 9,5 m. Uz glinenu jezgru, na nizvodnoj strani brane, ugrađen je pješčani dren, koji izlazi iz brane u njenoj nožici. Na nizvodnoj strani brane voda je na površini terena.

Model brane s regijama prikazan je na slici III-17, a mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti na slici III-18. Od razine jezera na niže, na uzvodnoj je strani brane zadan hidraulički potencijal $H = 18$ m, a na nizvodnoj strani, na površini terena i na desnom rubu, hidraulički potencijal $H = 8,5$ m.

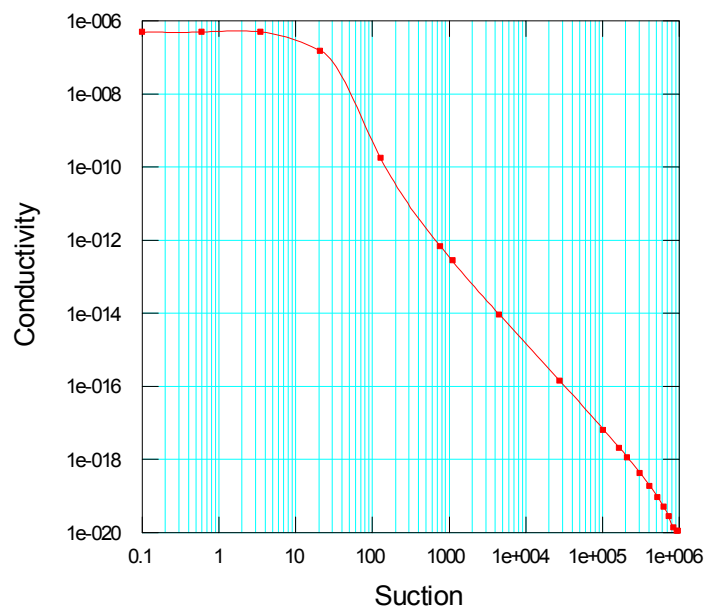


Slika III-17. Model brane s regijama

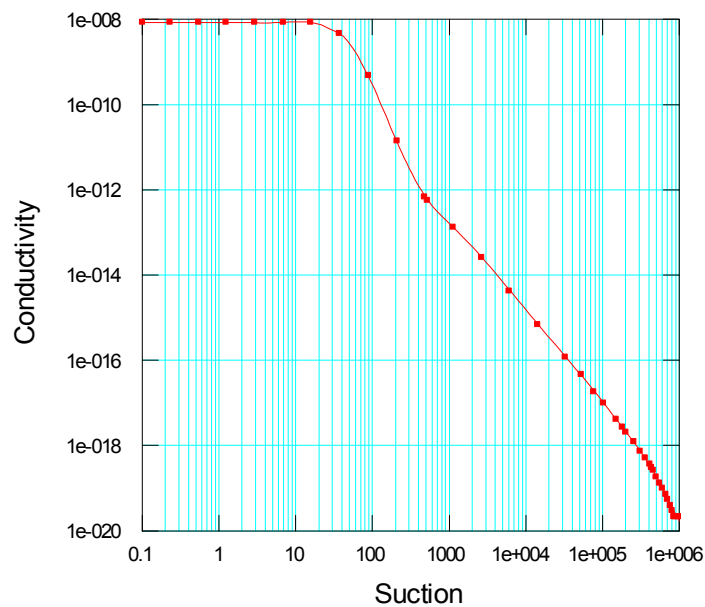


Slika III-18. Model brane s mrežom konačnih elemenata i rubnim uvjetima

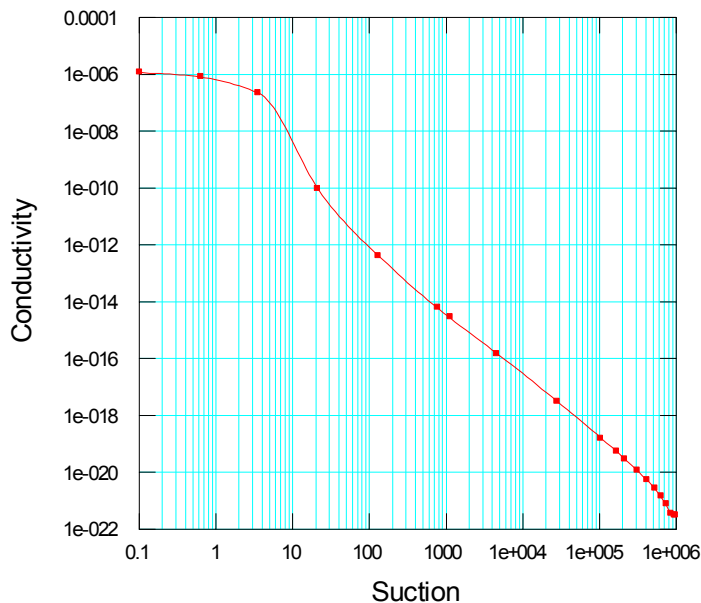
Na slici III-19 prikazana je funkcija propusnosti u ovisnosti o kapilarnom usisu (negativnom tlaku vode) za prašinski pijesak. Pri tlaku vode nula, na vodnom licu, ispod kojega je stupanj saturacije 100 %, $k = 5 \times 10^{-7}$ m/s. Funkcija propusnosti za glinenu jezgru prikazana je na slici III-20, a za pješčani dren na slici III-21. Pri tlaku vode nula, koeficijent propusnosti glinene jezgre $k = 8,4 \times 10^{-9}$ m/s, a pješčanog drena $k = 1,13 \times 10^{-6}$ m/s. Ove su funkcije preuzete iz baze podataka programa SEEP/W.



Slika III-19. Funkcija propusnosti (m/s) u ovisnosti o kapilarnom usisu (kPa) za prašinski pijesak

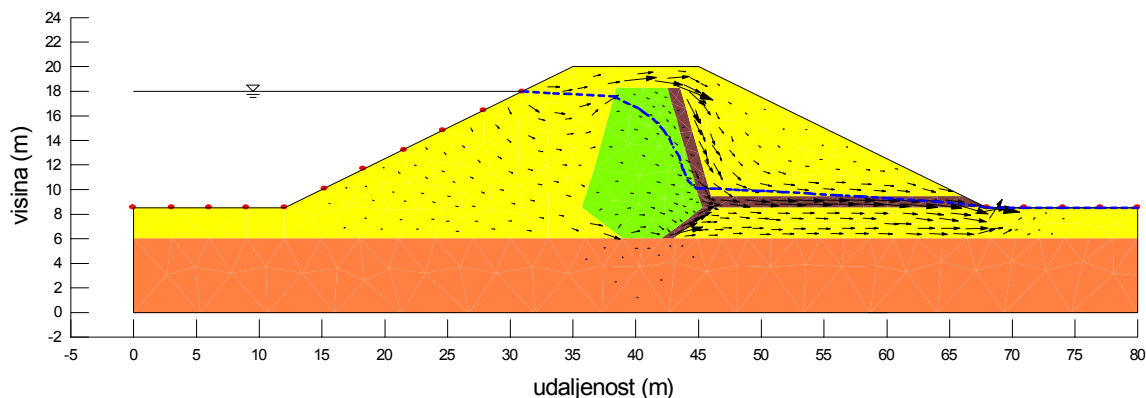


Slika III-20. Funkcija propusnosti (m/s) u ovisnosti o kapilarnom usisu (kPa) za glinenu jezgru

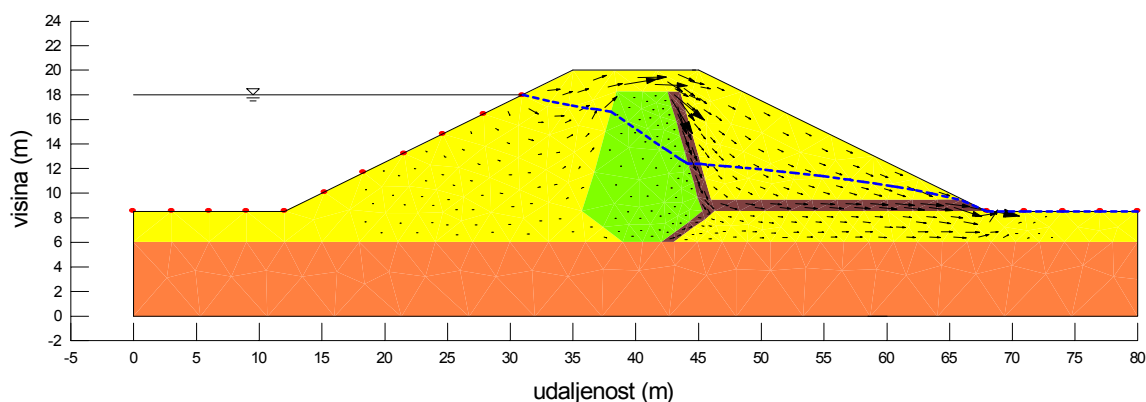


Slika III-21. Funkcija propusnosti (m/s) u ovisnosti o kapilarnom usisu (kPa) za pješčani dren

Na slici III-22 prikazani su rezultati proračuna stacionarnog strujanja vode kroz branu programom SEEP/W. Vide se vodno lice i vektori strujanja vode. Najveće su brzine strujanja iznad jezgre. Za usporedbu su na slici III-23 prikazani rezultati proračuna s konstantnim koeficijentima propusnosti za sve materijale, onima pri tlaku vode u tlu jednakom nuli (gore navedene vrijednosti), pri čemu se ne uzima u obzir smanjenje koeficijenta propusnosti s porastom apsolutne vrijednosti negativnog tlaka vode. Prvo treba uočiti da voda struji iznad jezgre u oba slučaja zbog prisutnosti vode u tlu, iako pore nisu u potpunosti ispunjene vodom. Zatim, vodno je lice bitno drukčije u slučaju konstantnih koeficijenata propusnosti u odnosu na proračun sa smanjenjem koeficijenta propusnosti s porastom kapilarnog usisa. U potonjem je slučaju vodno lice na uzvodnoj strani brane gotovo horizontalno do glinene jezgre, jer ga vjerojatno „povuče“ kapilarno dizanje vode. Na nizvodnoj je strani brane, uz horizontalni dren, vodno lice bitno niže nego u proračunu s konstantnim koeficijentima propusnosti, jer u prašinastom pijesku pada vrijednost koeficijenta propusnosti s porastom kapilarnog usisa, pa više vode prolazi kroz dren nego kroz ovaj materijal, a veće su brzine strujanja u ovom materijalu ispod drene i vodnog lica, gdje je tlo potpuno saturirano. U svakom slučaju, izlazni su hidraulički gradijenti zadovoljavajući te se može zaključiti da je brana stabilna sa stanovišta strujanja vode.



Slika III-22. Vodno lice i vektori strujanja vode kroz branu



Slika III-23. Vodno lice i vektori strujanja vode kroz branu za konstantan koeficijent propusnosti za sve materijale

IV. Ukupan usis

Ukupan usis ψ (kPa) definiran je izrazom:

$$\psi = (u_a - u) + \pi$$

gdje je $(u_a - u)$ kapilarni usis (ili samo usis), a π je osmotski usis.

Ukupan usis je stanje slobodne energije vode iz tla, odnosno predstavlja termodinamički potencijal vode iz tla u odnosu na referentni potencijal slobodne vode. Slobodna voda ne sadrži nikakve otopljene tvari, nije u doticaju ni sa čime osim sa zrakom, a jedina sila koja na nju djeluje je sila gravitacije. Potencijal vode iz tla manji je od potencijala slobodne vode.

Relativna vlažnost opisuje stanje termodinamičke ravnoteže između zraka i vode. Ona je važna za razumijevanje ukupnoga usisa u nesaturiranom tlu. Definira se kao omjer apsolutne vlažnosti, koja je u ravnoteži sa svim otopinama, i apsolutne vlažnosti, koja je u ravnoteži sa slobodnom vodom, pri istoj temperaturi. Može se pokazati da je ovaj omjer

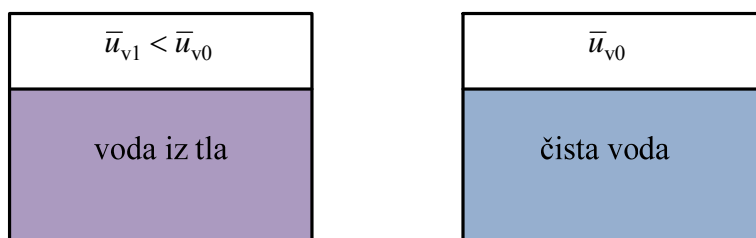
jednak omjeru tlaka vodene pare u ravnoteži s otopinama \bar{u}_v i tlaka saturirane vodene pare u ravnoteži sa slobodnom vodom \bar{u}_{v0}

Pri temperaturi 20° C, ukupan se usis može izračunati iz izraza

$$\psi = -135022 \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right)$$

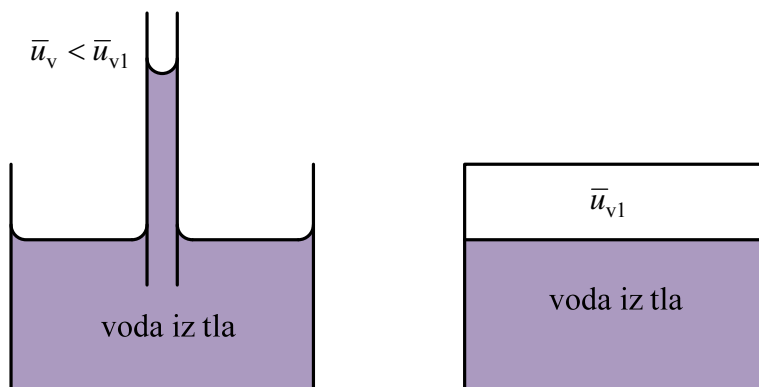
Ako je relativna vlažnost 100 %, ukupan je usis nula. Ukupan je usis različit od nule za relativnu vlažnost manju od 100 %. Primjerice, ako je pri temperaturi 20° C, relativna vlažnost 94,24 %, ukupan usis iznosi 8 MPa.

Promotrimo sliku IV-1. Površina vode u oba je slučaja ravna. Tlak vodene pare iznad vode iz tla \bar{u}_{v1} manji je od \bar{u}_{v0} zato što voda iz tla sadrži otopljene soli. Relativna vlažnost pada s porastom koncentracije soli. Pad relativne vlažnosti zbog prisutnosti soli u vodi iz tla naziva se osmotskim usisom.



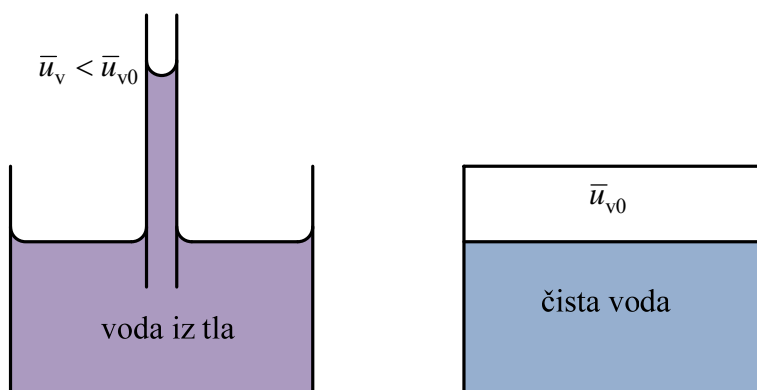
Slika IV-1. Ilustracija osmotskog usisa

Promotrimo sada (slika IV-2) kapilarno dizanje vode iz tla u staklenoj cijevi, gdje se stvara površinska napetost i odgovarajući meniskus. Tlak vodene pare iznad meniskusa \bar{u}_v manji je od tlaka vodene pare iznad ravne površine vode iz tla \bar{u}_{v1} . To znači da relativna vlažnost pada uslijed kapilarnosti. Što je manji radijus zakrivljenosti meniskusa, to je manja relativna vlažnost, a kapilarni usis veći.



Slika IV-2. Ilustracija kapilarnog usisa

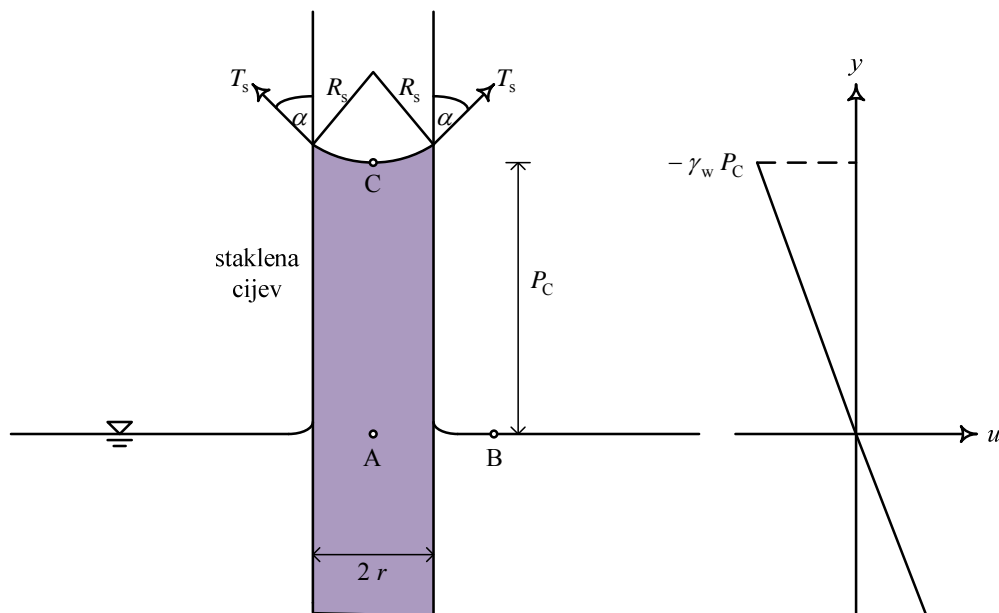
Sada možemo ilustrirati ukupni usis, kao što je prikazano na slici IV-3.



Slika IV-3. Ilustracija ukupnog usisa

Primjerice, Regina glina iz Kanade ima kapilarni usis $u_a - u = 273 \text{ kPa}$ i osmotski usis $\pi = 187 \text{ kPa}$, pa joj je ukupni usis $\psi = 460 \text{ kPa}$.

Kapilarni usis zaslužuje dodatno objašnjenje, a ilustriran je na slici IV-4. Voda iz tla se u staklenoj cijevi promjera $2r$ digla do visine P_C (visina kapilarnog dizanja vode). Na kontaktu između vode iz tla i zraka, u cijevi se stvara elastična membrana (meniskus) radijusa zakrivljenosti R_s . Vlačne sile T_s (površinska napetost) djeluju tangencijalno na meniskus. Kut α je kontaktni kut koji ovisi o adheziji molekula kontaktne površine meniskusa i stakla.



Slika IV-4. Kapilarno dizanje vode u staklenoj cijevi

Iz ravnoteže vertikalnih sila sa slike IV-4 proizlazi da je

$$2 \pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 P_C \gamma_w$$

a

$$\cos \alpha = \frac{r}{R_s}$$

tako da dobijemo

$$P_C = \frac{2 T_s}{\gamma_w R_s}$$

U točkama A i B tlak vode je nula, a u točki C:

$$u = -\gamma_w P_C$$

Za atmosferski tlak zraka $u_a = 0$, pa dobijemo Kelvinovu jednadžbu kapilarosti:

$$u_a - u = \frac{2 T_s}{R_s}$$

V. Posmična čvrstoća nesaturiranog tla

Posmična čvrstoća za potpuno saturirano tlo najčešće je definirana poznatim Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće

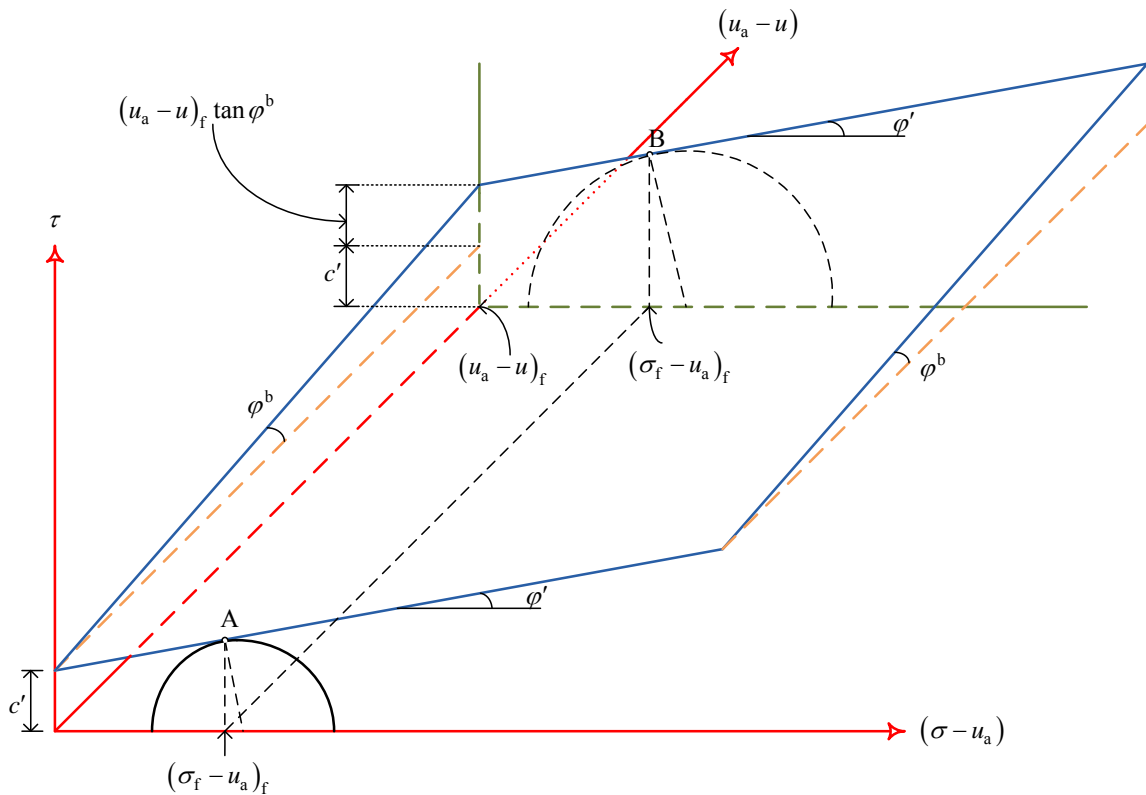
$$\tau_f = c' + (\sigma - u)_f \tan \varphi'$$

Za nesaturirano tlo posmična se čvrstoća definira sa:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u)_f \tan \varphi^b$$

Kut φ^b je kut povećanja posmične čvrstoće s kapilarnim usisom, s tim da je $\varphi^b \leq \varphi'$.

Sada se Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće za nesaturirano tlo, posmična čvrstoća definira u trodimenzionalnom prostoru s koordinatama $(\sigma - u_a)$, $(u_a - u)$ i τ , kao što je prikazano na slici V-1.



Slika V-1. Dvodimenzionalna anvelopa sloma za Mohr-Coulombov zakon čvrstoće za nesaturirano tlo

Sada je kohezija c' definirana kao vrijednost na osi τ , gdje su $(\sigma - u_a) = 0$ i $(u_a - u) = 0$. U točki A je $(u_a - u) = 0$, a u točki B je kapilarni usis pri slomu $(u_a - u)_f$. Nadalje je u točki A:

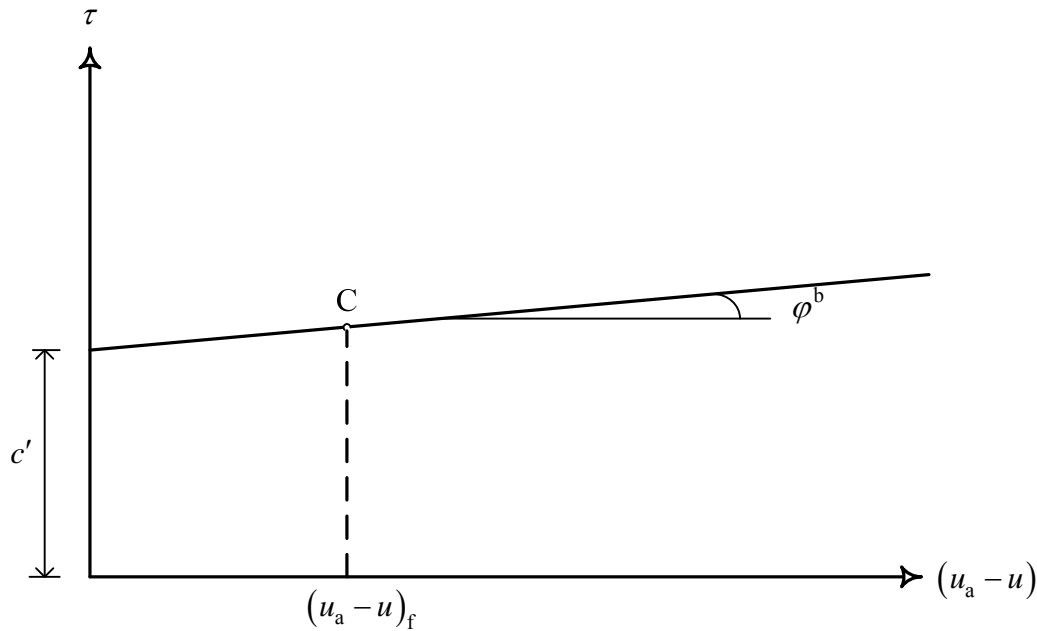
$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi'$$

a u točki B je:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u)_f \tan \varphi^b$$

Promotrimo ravninu $(\tau, (u_a - u))$, za koju je $(\sigma - u_a) = 0$ (slika V-2). U točki C je:

$$\tau_f = c' + (u_a - u)_f \tan \varphi^b$$



Slika V-2. Ravnina $(\tau, (u_a - u))$, za koju je $(\sigma - u_a) = 0$

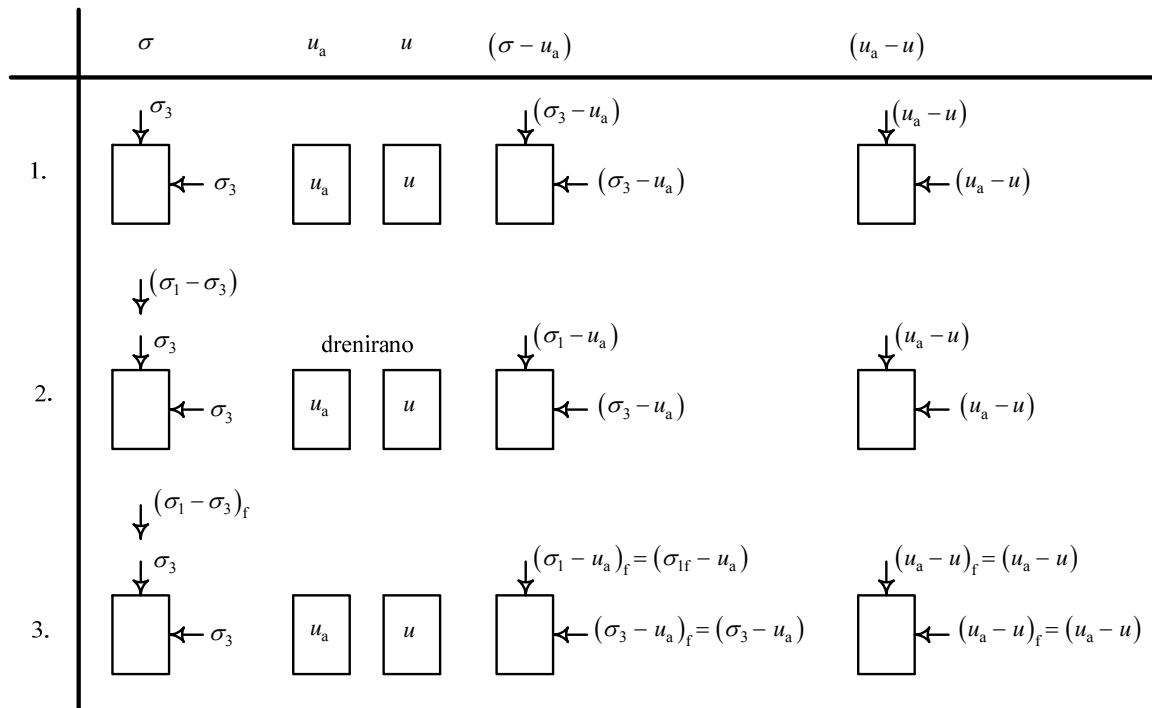
Parametri čvrstoće za nesaturirano tlo c' , φ' i φ^b mogu se odrediti u troosnim pokusima ili u pokusima direktnog smicanja.

Prvo ćemo promotriti troosne pokuse za nesaturirano tlo. Osim pokusa CID (izotropno konsolidirani, drenirani), CIU (izotropno konsolidirani, nedrenirani) i UU (nekonsolidirani, nedrenirani), s uzorcima nesaturiranog tla još se provode CIW troosni pokus (izotropno konsolidirani s konstantnom vlažnošću) i UC pokus (nekonsolidirani, drenirani), pri čemu UC označava *Unconfined Compression*, a pokus se odvija bez

ćelijskog pritiska, pod atmosferskim tlakom zraka ($u_a = 0$), pa je kapilarni usis jednak negativnom tlaku vode.

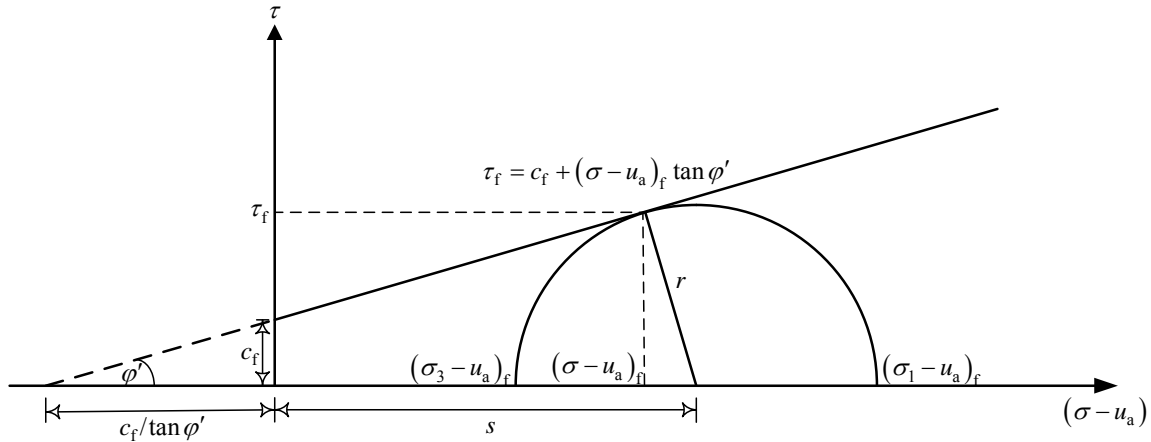
Slijed odvijanja CID pokusa prikazan je na slici V-3. Na početku je pokusa tlak zraka atmosferski ($u_a = 0$), a u nesaturiranom je uzorku negativan tlak vode. Budući da u standardnom troosnom uređaju za saturirano tlo nije moguće mjeriti negativan tlak vode, potrebno je primijeniti takav izotropni tlak zraka koji će kapilarni usis ($u_a - u$) učiniti pozitivnim. Ovaj tlak zraka ostaje konstantnim tijekom cijelog CID pokusa. Brojem 1. na slici V-3 označen je kraj prve faze pokusa u kojoj je uzorak izotropno konsolidirao pod ćelijskim tlakom σ_3 i sav je višak tlaka vode disipirao ($u_e = 0$), tako da je tlak vode jednak njegovoj početnoj vrijednosti. U drugoj se fazi pokusa, označenoj brojem 2. na slici V-3, na uzorak primjenjuje inkrement vertikalnog opterećenja $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ (smicanje) u dreniranim uvjetima, dakle, dok ne disipira sav višak tlaka vode.

Pri slomu (broj 3. na slici V-3) sve varijable dobivaju indeks f , pri čemu se samo vertikalno naprezanje povećava do sloma $\sigma_{1f} = \sigma_3 + \Delta\sigma_{1f}$, a sve ostale varijable (σ_3 , u_a i u) ostaju konstantnima.



Slika V-3. Troosni CID pokus na uzorku nesaturiranog tla

Za prikaz rezultata CID pokusa koristimo dvodimenzionalne prikaze glavnih naprezanja pri slomu i odgovarajuće Mohrove kružnice (slika V-4).



Slika V-4. Glavna naprezanja pri slomu i odgovarajuća Mohrova kružnica za nesaturirano tlo

Za saturirano tlo imamo sljedeći odnos glavnih efektivnih naprezanja pri slomu:

$$\sigma_{1f}' = \sigma_{3f}' \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) + 2 c' \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

Za nesaturirano su tlo glavna naprezanja $(\sigma_1 - u_a)_f$ i $(\sigma_3 - u_a)_f$. Za $(u_a - u) \neq 0$ ćemo označiti

$$c_f = c' + (u_a - u)_f \tan \varphi^b$$

kao što je prikazano na slici V-4.

Analogni odnos glavnih naprezanja za nesaturirano tlo glasi:

$$(\sigma_1 - u_a)_f = (\sigma_3 - u_a)_f \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) + 2 c_f \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

Slijedi primjer četiriju CID pokusa iz kojih treba odrediti parametre čvrstoće c' , φ' i φ^b .

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1. | $(\sigma_3 - u_a)_f = 14 \text{ kPa}$ | 2. | $(\sigma_3 - u_a)_f = 14 \text{ kPa}$ |
| | $(u_a - u)_f = 10 \text{ kPa}$ | | $(u_a - u)_f = 70 \text{ kPa}$ |
| | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 46 \text{ kPa}$ | | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 101 \text{ kPa}$ |
| 3. | $(\sigma_3 - u_a)_f = 28 \text{ kPa}$ | 4. | $(\sigma_3 - u_a)_f = 28 \text{ kPa}$ |
| | $(u_a - u)_f = 10 \text{ kPa}$ | | $(u_a - u)_f = 70 \text{ kPa}$ |
| | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 80 \text{ kPa}$ | | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 113 \text{ kPa}$ |

U 1. i 3. pokusu su isti $(u_a - u)_f = 10$ kPa, pa je za ta dva pokusa ista vrijednost c_f . Nadalje je

$$(\sigma_1 - u_a)_f = 46 + 14 = 60 \text{ kPa} \quad (1. \text{ pokus})$$

$$(\sigma_1 - u_a)_f = 80 + 28 = 108 \text{ kPa} \quad (3. \text{ pokus})$$

tako da dobijemo

$$60 = 14 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) + 2 c_f \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (1. \text{ pokus})$$

$$108 = 28 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) + 2 c_f \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (3. \text{ pokus})$$

Prvu jednadžbu odbijemo od druge, pa je

$$48 = 14 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \Rightarrow \varphi'_{(1;3)} = 33,3^\circ$$

Uvrštavanjem ove vrijednosti $\varphi'_{(1;3)}$ u gornju jednadžbu s c_f za 1. pokus, dobijemo

$$c_{f(1;3)} = 3,2 \text{ kPa}$$

Analogno su u 2. i 4. pokusu isti $(u_a - u)_f = 70$ kPa, pa istim postupkom dobijemo

$$\varphi'_{(2;4)} = 31,7 \quad \text{i} \quad c_{f(2;4)} = 19,5 \text{ kPa}$$

Sada je

$$3,2 = c' + 10 \tan \varphi^b \quad (1. \text{ i } 3. \text{ pokus})$$

$$19,5 = c' + 70 \tan \varphi^b \quad (2. \text{ i } 4. \text{ pokus})$$

Prva se jednadžba odbije od druge, pa je

$$16,3 = 60 \tan \varphi^b \Rightarrow \varphi^b = 15,2^\circ$$

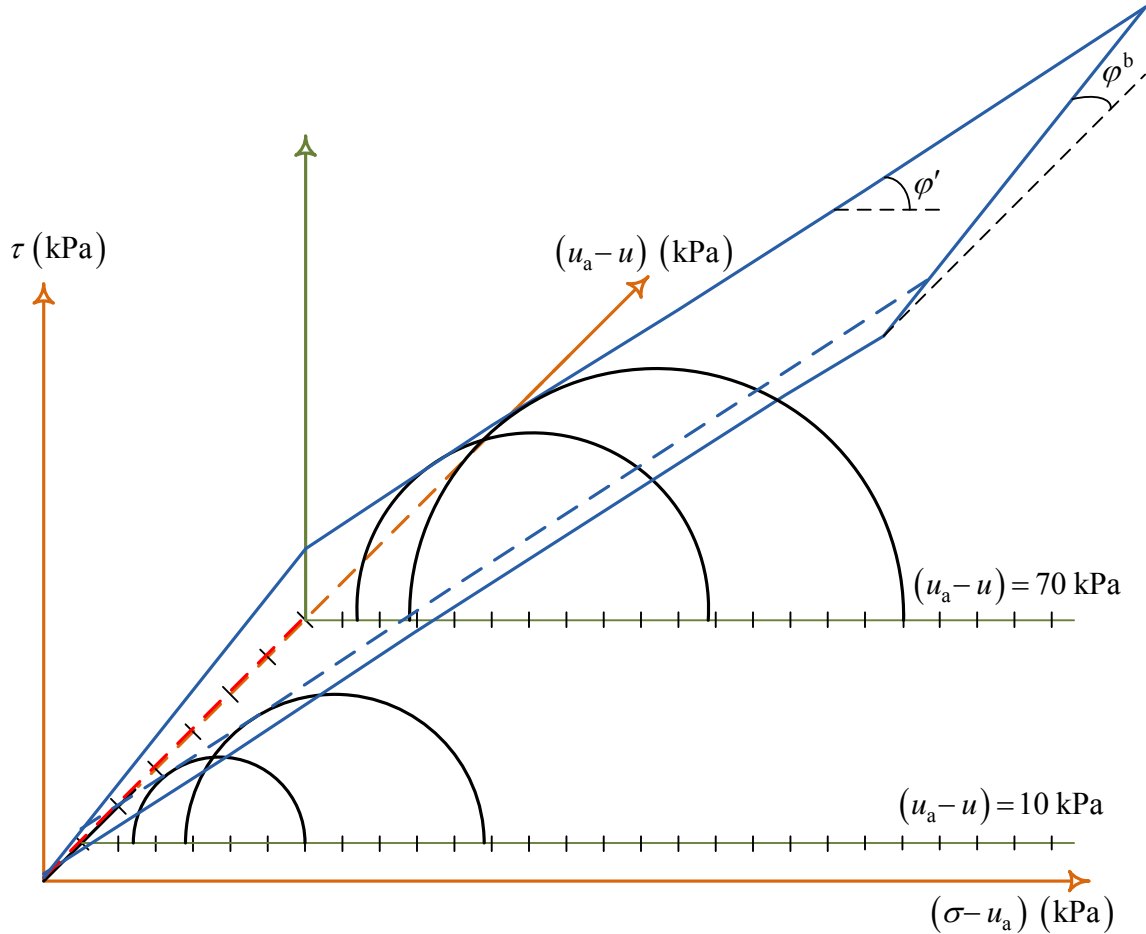
Dobivena vrijednost φ^b se uvrsti u jednadžbu s c' za 1. i 3. pokus, iz čega slijedi

$$c' = 0,5 \text{ kPa}$$

Konačno je

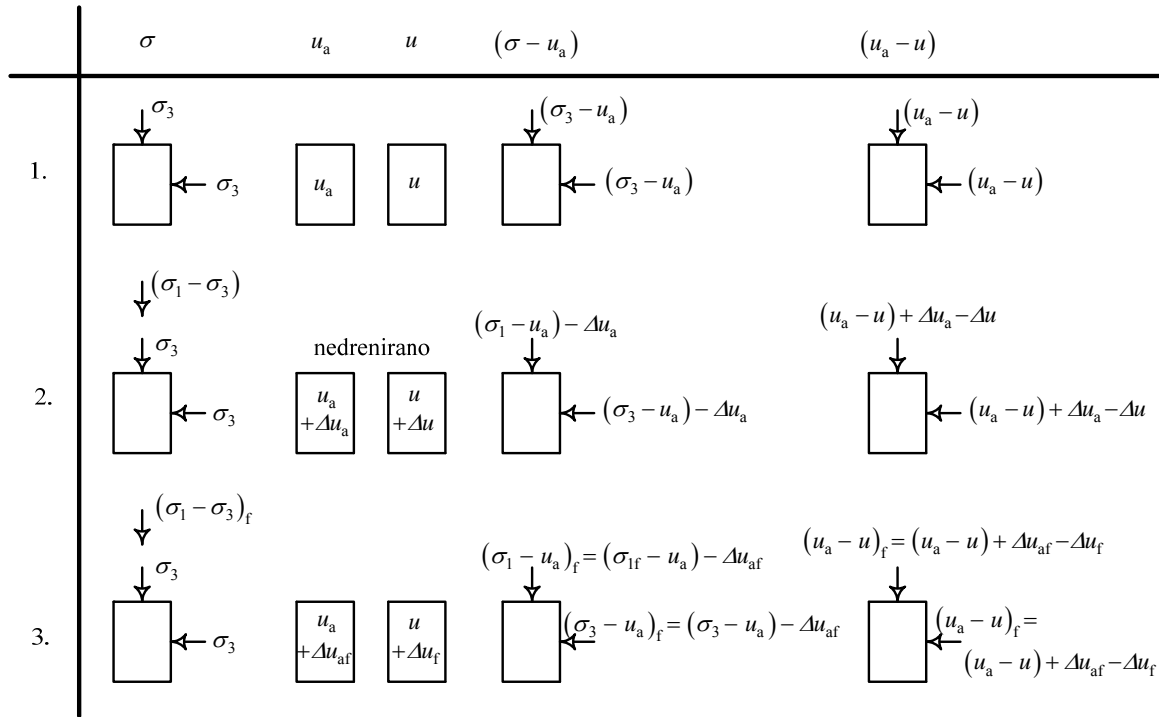
$$\varphi' = \frac{\varphi'_{(1;3)} + \varphi'_{(2;4)}}{2} = \frac{33,3^\circ + 31,7^\circ}{2} = 32,5^\circ$$

Ovi su rezultati prikazani na slici V-5.



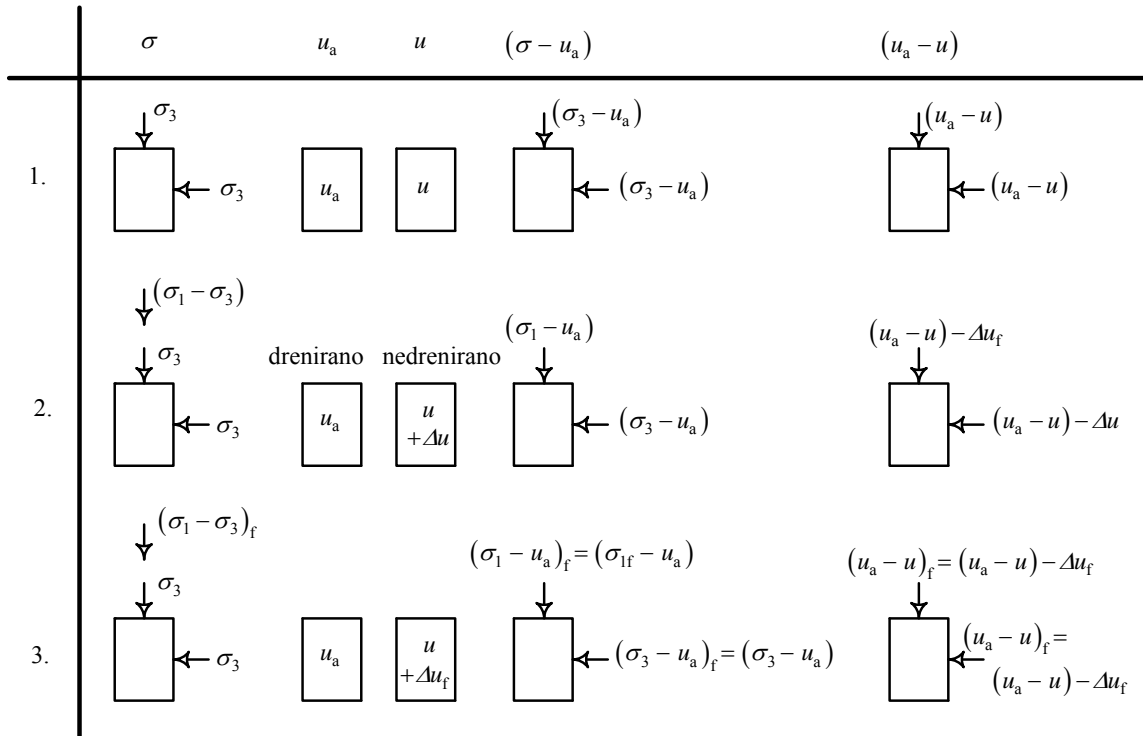
Slika V-5. Rezultati četiriju CID pokusa

U troosnom CIU pokusu na uzorku nesaturiranog tla (slika V-6), primjena tlaka zraka i prva faza pokusa (broj 1. na slici V-6) iste su kao u CID pokusu. Uzorak izotropno konsolidira pod ćelijskim tlakom σ_3 . U drugoj se fazi (broj 2. na slici V-6) primjenjuje smicanje u nedreniranim uvjetima, dakle, zatvara se dren za zrak i za vodu. Pri tome tlak zraka naraste za Δu_a , a tlak vode za $\Delta u = B A \Delta \sigma_1$, pri čemu su A i B Skemptonovi parametri. Smicanje se primjenjuje do sloma (broj 3. na slici V-6), kada je tlak zraka narastao za Δu_{af} , a tlak vode za Δu_f . Pri slomu samo σ_3 ostaje isti kao na početku pokusa. Vertikalno opterećenje na uzorak pri slomu je σ_{1f} , a i kapilarni se usis pri slomu mijenja za razliku inkrementa tlaka zraka pri slomu i inkrementa tlaka vode pri slomu.



Slika V-6. Troosni CIU pokus na uzorku nesaturiranog tla

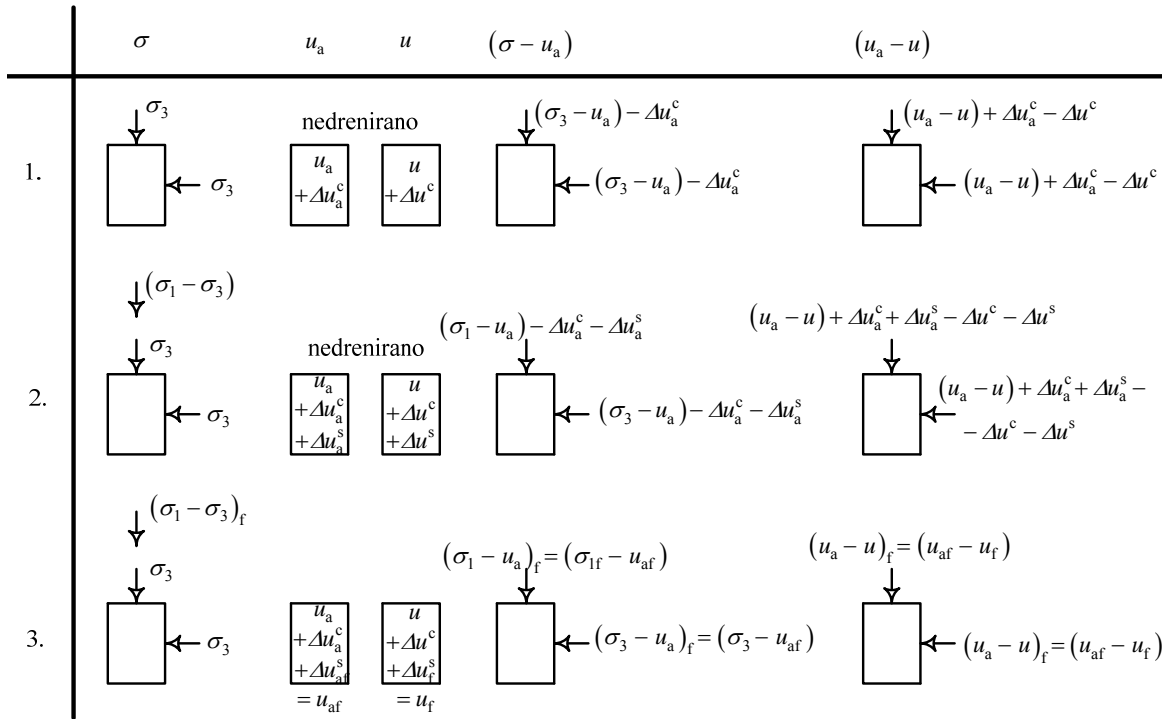
Troosni CIW pokus sličan je CIU pokusu, osim što se u fazi smicanja dopušta dreniranje zraka (slika V-7). Budući da je smicanje nedrenirano za vodu, uzorku se tijekom ove faze pokusa ne mijenja vlažnost. Nakon što se, na početku pokusa, na uzorak primijeni tlak zraka u_a , on ostaje konstantnim tijekom cijelog pokusa. Uzorak izotropno konsolidira pod ćelijskim tlakom σ_3 . Zatim se, pri nedreniranom smicanju, povećava vertikalno opterećenje do sloma, kada je povećanje tlaka vode $\Delta u_f = B A \Delta \sigma_{1f}$. Budući da je tlak zraka konstantan, kapilarni usis pada s povećanjem tlaka vode.



Slika V-7. Troosni CIW pokus na uzorku nesaturiranog tla

Prva faza troosnog UU pokusa nije konsolidirana (slika V-8). Pri nedreniranom izotropnom opterećenju nesaturiranog uzorka ćelijskim tlakom, tlak zraka naraste za Δu_a^c , a tlak vode za $\Delta u^c = B \sigma_3$. Pri nedreniranom smicanju dolazi do novog porasta tlaka zraka za Δu_a^s i tlaka vode za $\Delta u^s = B A \Delta \sigma_1$. Pri slomu je vertikalno opterećenje na uzorak $\sigma_{1f} = \sigma_3 + \Delta \sigma_{1f}$, ukupni je tlak zraka $u_{af} = u_a + \Delta u_a^c + \Delta u_{af}^s$, a ukupni tlak vode $u_f = u + \Delta u^c + \Delta u_f^s$. Kapilarni je usis pri slomu $u_{af} - u_f$.

U UC pokusu, na uzorak se ne primjenjuje ćelijski tlak, tako da je $\sigma_3 = 0$. Zatim se uzorak brzo vertikalno opterećuje do sloma, pri čemu se može odrediti jednoosna tlačna čvrstoća tla q_u . Za slabo propusna tla brzo opterećenje uzorka odgovara nedreniranim uvjetima.

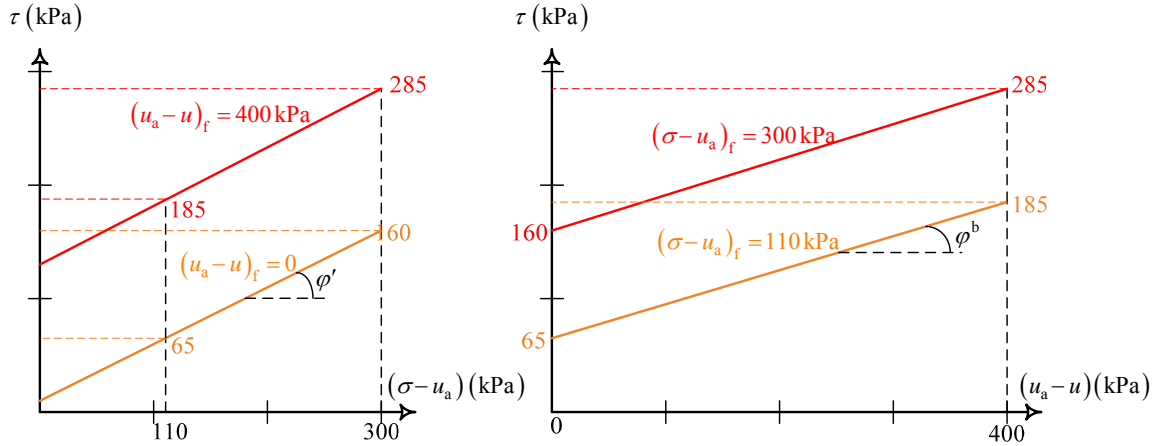


Slika V-8. Troosni UU pokus na uzorku nesaturiranog tla

Posmična čvrstoća nesaturiranoga tla određuje se i pokusom direktnog smicanja. Uzorak se na početku obično saturira i pusti ga se konsolidirati pod vertikalnim opterećenjem. Prije smicanja poveća se kapilarni usis do tražene vrijednosti. Ovaj ćemo pokus ilustrirati na primjeru ispitivanja četiriju uzoraka.

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1. | $(\sigma - u_a)_f = 110 \text{ kPa}$
$(u_a - u)_f = 0$
$\tau_f = 65 \text{ kPa}$ | 2. | $(\sigma - u_a)_f = 110 \text{ kPa}$
$(u_a - u)_f = 400 \text{ kPa}$
$\tau_f = 185 \text{ kPa}$ |
| 3. | $(\sigma - u_a)_f = 300 \text{ kPa}$
$(u_a - u)_f = 0$
$\tau_f = 160 \text{ kPa}$ | 4. | $(\sigma - u_a)_f = 300 \text{ kPa}$
$(u_a - u)_f = 400 \text{ kPa}$
$\tau_f = 285 \text{ kPa}$ |

Rezultati ovih pokusa direktnog smicanja prikazani su na slici V-9. Treba odrediti parametre čvrstoće c' , ϕ' i ϕ^b .



Slika V-9. Rezultati četiriju pokusa direktnog smicanja

Iz 1. i 3. pokusa s $(u_a - u)_f = 0$ je

$$\tan \varphi'_{(1;3)} = \frac{160 - 65}{300 - 110} = 0,50 \Rightarrow \varphi'_{(1;3)} = 26,6^\circ$$

Nadalje je za 1. pokus

$$65 = c_{f(1;3)} + 110 \tan 26,6^\circ \Rightarrow c_{f(1;3)} = 9,9 \text{ kPa}$$

Iz 2. i 4. pokusa s $(u_a - u)_f = 400$ kPa je

$$\tan \varphi'_{(2;4)} = \frac{285 - 185}{300 - 110} = 0,53 \Rightarrow \varphi'_{(2;4)} = 27,8^\circ$$

a iz 2. pokusa je

$$185 = c_{f(2;4)} + 110 \tan 27,8^\circ \Rightarrow c_{f(2;4)} = 127 \text{ kPa}$$

Sada je

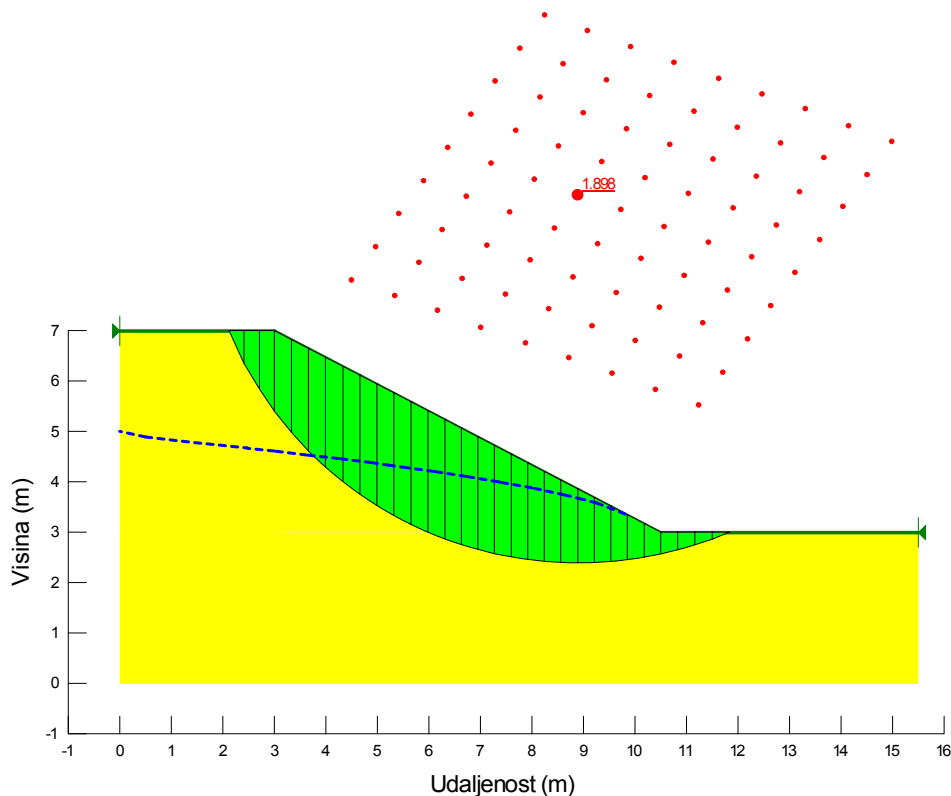
$$9,9 = c' + 0 \tan \varphi^b \Rightarrow c' = 9,9 \text{ kPa}$$

$$127 = c' + 400 \tan \varphi^b \Rightarrow \tan \varphi^b = \frac{127 - 9,9}{400} \Rightarrow \varphi^b = 16,3^\circ$$

a

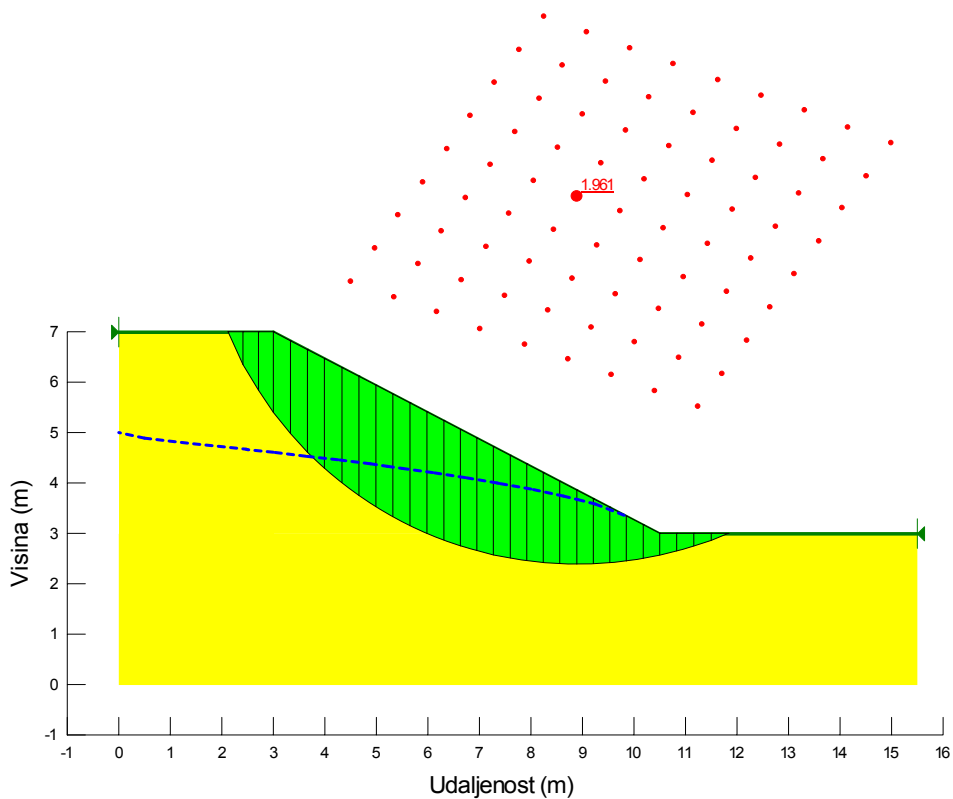
$$\varphi' = \frac{\varphi'_{(1;3)} + \varphi'_{(2;4)}}{2} = \frac{26,6^\circ + 27,8^\circ}{2} = 27,2^\circ$$

Povećanje posmične čvrstoće u nesaturiranom tlu u odnosu na potpuno saturirano tlo ilustrirat ćemo proračunom stabilnosti kosine. Promotrimo primjer iz Uvoda, u kojem je pokazano kako dobijemo manji faktor sigurnosti za kosinu sa stacionarnim strujanjem vode kroz tlo, nego za onu sa zadanim hidrostatskim tlakom vode. U ovom su primjeru parametri čvrstoće tla bili kohezija $c' = 5$ kPa i kut unutarnjeg trenja $\varphi' = 35^\circ$ za Mohr-Coulombov kriterij sloma. Zapreminska težina tla bila je $\gamma = 19$ kN/m³. Rezultati proračuna stabilnosti kosine sa strujanjem vode kroz tlo ponovo su prikazani na slici V-10. Faktor sigurnosti je 1,898.

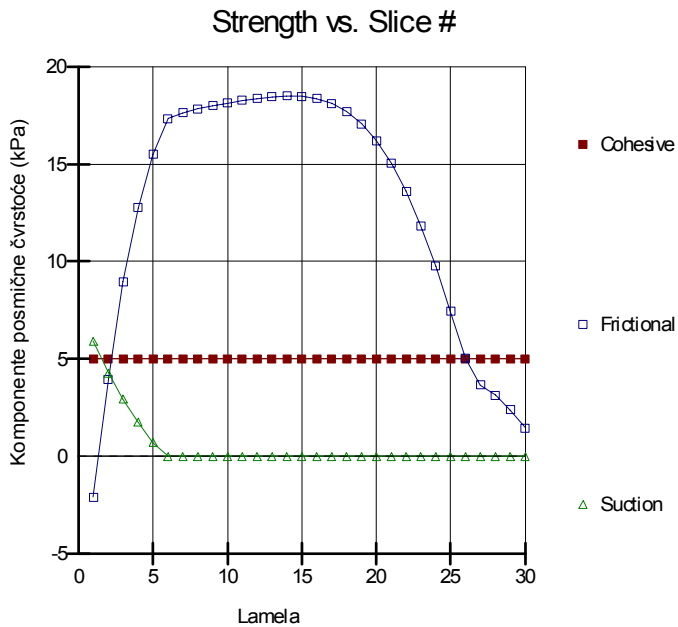


Slika V-10. Rezultati proračuna stabilnosti kosine sa strujanjem vode kroz tlo

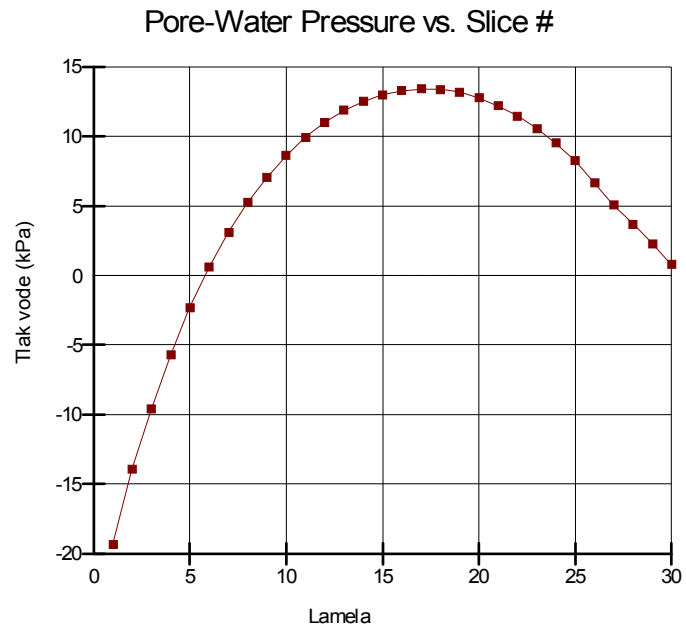
U sljedećem ćemo proračunu zadati još i vrijednost kuta $\varphi^b = 17^\circ$, pod *KeyIn – Material Properties – Advanced Parameters – Phi B*. Za zapreminsku težinu vode iznad vodnog lica (*Unit Weight above Water Table*) zadat ćemo također 19 kN/m³. Rezultati ovog proračuna prikazani su na slici V-11. Sada je dobiven veći faktor sigurnosti 1,961 zbog povećanja posmične čvrstoće u nesaturiranom tlu s kapilarnim usisom i kutom φ^b , kao što je prikazano na slici V-12 za osnovice lamela. Na ovoj se slici vidi komponenta posmične čvrstoće od kohezije $c' = 5$ kPa (*Cohesive*), komponenta $(\sigma - u_a) \tan \varphi'$ (*Frictional*) i komponenta od kapilarnog usisa $(u_a - u) \tan \varphi^b$ (*Suction*). Tlak zraka $u_a = 0$. Komponenta od kapilarnog usisa je nula u saturiranom području tla, a raste s kapilarnim usisom za prvih 6 lamela kliznoga tijela. Tlak vode na osnovicama lamela prikazan je na slici V-13, gdje se vidi da je za prvih 6 lamela negativan.



Slika V-11. Rezultati proračuna stabilnosti kosine sa strujanjem vode kroz tlo i zadanim kutom ϕ^b



Slika V-12. Komponente posmične čvrstoće tla na osnovicama lamela



Slika V-13. Tlak vode na osnovicama lamela