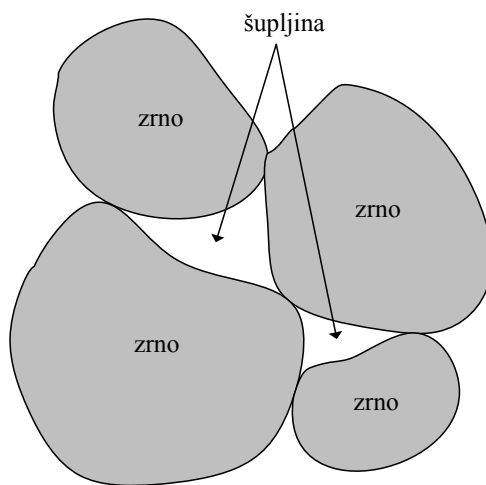


VODA U TLU

I. Uvod

Kada ne bi bilo vode u tlu, geotehničko bi inženjerstvo bila puno jednostavnija grana građevinarstva. Koliko opterećenje na tlo, tolika promjena ukupnih napreznja i, kao rezultat, odgovarajuća deformacija tla prema konstitucijskom odnosu za danu vrstu tla. Međutim, s vodom u tlu, deformacije ne ovise o promjeni ukupnih, već efektivnih napreznja, koja čine razliku između ukupnih napreznja i tlaka vode u tlu. Efektivna se napreznja ne mogu izravno odrediti. Ona su rezultat djelovanja sila na kontaktima između zrna i/ili čestica tla. Zrna i čestice tla tvore skelet tla. Između njih su šupljine (pore), kao što je prikazano na slici I-1. Pore tla mogu biti suhe (ispunjene zrakom), potpuno ispunjene vodom ili ispunjene vodom i zrakom. Zato kažemo da se tlo sastoji od tri faze: zrna i/ili čestica tla, vode i zraka. Ni za jednu se od ovih faza, u klasičnoj mehanici tla, ne pretpostavlja da je stišljiva. Odakle, onda, deformacija? Ako je tlo suho, zrna i čestice tla će nakon opterećenja tla zauzeti gušći složaj, što znači da će se smanjiti volumen pora. Volumen zrna i čestica ostaje nepromijenjen. To znači, da se deformacija u tlu ostvaruje smanjenjem veličina pora. Ako su pore potpuno ispunjene vodom, one se mogu smanjiti samo ako voda prethodno iz njih „izade“. Time dolazi do strujanja vode kroz tlo, koje se odvija toliko brzo koliko su veliki „prolazi“ između zrna i čestica. U krupnozrnatom tlu (pijesak i šljunak), pore su relativno velike, pa se ovaj proces vrlo brzo, gotovo trenutačno, odvija. U sitnozrnatom su tlu pore sasvim male, pa treba puno vremena za deblji sloj takvoga tla da voda iz njega isteče i da se stvore uvjeti za realizaciju deformacije tla (slijeganje). Kako se slijeganje tla postepeno odvija u vremenu, tako se postepeno povećavaju i efektivna napreznja u tlu, dok su ukupna napreznja cijelo vrijeme konstantna. Ovaj se proces naziva konsolidacijom tla. Proces konsolidacije tla završava kada skelet tla preuzme cijelo vanjsko opterećenje, odnosno kada efektivna napreznja u tlu narastu za ukupnu veličinu opterećenja.



Slika I-1. Zrna i šupljine (pore) među njima

Nadalje, razmatramo drenirane i nedrenirane uvjete u tlu. Ako potpuno saturirano sitnozrnato tlo (prah i glina) naglo opteretimo, voda iz njega ne može odmah „izaći“. Neposredno nakon takvog opterećenja kažemo da se tlo nalazi u nedreniranim uvjetima, što znači da mu se volumen ne mijenja. Što onda u tlu preuzima vanjsko opterećenje? Ako element potpuno saturiranoga tla izotropno naglo opteretimo, u njemu će voda preuzeti ukupno opterećenje te će tlak vode narasti upravo za veličinu izotropnog opterećenja. Ako ga, pak, naglo smičemo (različito vertikalno i horizontalno opterećenje), volumen mu se neće promijeniti, ali će doći do njegove distorzije, dakle deformacije i odgovarajuće promjene efektivnog naprezanja, a i do promjene tlaka vode. U laboratoriju se provode troosna nedrenirana ispitivanja tla, gdje se vodi ne dopušta istjecanje iz uzorka tla. U takvim je uvjetima moguće odrediti nedreniranu posmičnu čvrstoću tla, kako bismo znali koliko smijemo tlo opteretiti u nedreniranim uvjetima.

Konsolidacija tla primjer je dreniranih uvjeta, gdje voda slobodno istječe iz tla. Konsolidacija tla ne odvija se u tlu samo nakon njegova opterećenja. Dovoljno je sniziti razinu podzemne vode, crpljenjem, pa će se, za jednaka ukupna naprezanja, smanjiti tlak vode i time povećati efektivna naprezanja. Rezultat je slijeganje tla. Poznat je slučaj slijeganja tla od preko 1 m u Mexico Cityu zbog crpljenja vode za vodoopskrbu, što je prouzročilo velike građevinske probleme. Kako tijekom konsolidacije efektivna naprezanja u tlu rastu, tako raste i drenirana posmična čvrstoća tla. Parametri drenirane posmične čvrstoće tla određuju se pokusom direktnog smicanja i troosnim dreniranim ispitivanjima.

Strujanje vode kroz tlo važan je aspekt mehanike tla. Ono se ne ostvaruje samo tijekom konsolidacije tla, već naprotiv, u raznim geotehničkim situacijama i onim hidrotehničkim koje uključuju tlo. Uzmimo primjer iskopa građevne jame. Ako se jama kopa ispod razine podzemne vode, vodu iz jame treba crpiti, a zbog snižavanja razine vode u jami u odnosu na okolno tlo, dolazi do strujanja vode kroz tlo, prema dnu jame. Pri tome je moguće da se ovo strujanje odvija pod tako velikim brzinama, da dođe do izbijanja dna jame. Hidrotehnički nasipi i nasute brane sljedeći su primjer strujanja vode kroz tlo, iz akumulacijskog jezera, kroz nasip ili branu i kroz temeljno tlo. Pri tome je moguće da u nasipu ili brani, zbog strujanja vode, dođe do stvaranja erozivnih kanala, koji konačno mogu dovesti do rušenja takve građevine. Zato je potrebno razumjeti sve pojmove i principe vezane uz vodu u tlu i strujanje vode kroz tlo.

Voda se u tlu pojavljuje i iznad razine podzemne vode, u kapilarnom obliku. Ovdje je tlak vode negativan i govorimo o takozvanom usisu (razlika tlaka zraka i negativnog tlaka vode), koji je relevantan u nesaturiranom tlu. O ponašanju nesaturiranoga tla će također biti riječi tijekom ovog kolegija.

Neke su vrste tla, posebno one koje sadrže glinoviti materijal montmorilonit, jako sklone bujanju, ako su u doticaju s vodom. Bujanje tla suprotni je fenomen slijeganju tla. Montmorilonita ima puno u Sjevernoj Americi i tamo su štete na obiteljskim zgradama od bujanja tla veće od posljedica svih drugih elementarnih nepogoda, uključujući potres. Ovo je još jedan aspekt ponašanja vode u tlu, kao što je i smrzavanje vode u tlu u

površinskim slojevima, pri čemu se volumen vode povećava i opet dolazi do šteta na građevinskim objektima, posebno na prometnicama.

II. Osnovne definicije

Za označavanje volumena tla koristit ćemo simbol V . Za označavanje volumena jedne od triju faza koristit ćemo oznaku V s odgovarajućim indeksom. Za zrna i čestice tla indeks je s (*solids*), za vodu w (*water*), a za zrak a (*air*). Analogno tome, masu označavamo simbolom M . Volumen pora označavamo s V_v (oznaka v za *voids*):

$$V_v = V_w + V_a \quad (\text{m}^3) \quad (1)$$

Volumen tla:

$$V = V_s + V_v \quad (\text{m}^3) \quad (2)$$

Koeficijent pora:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

Relativni porozitet:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Između koeficijenta pora i relativnog poroziteta postoji jednakost:

$$n = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

Stupanj zasićenosti (saturacije) tla:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

Stupanj zasićenosti tla varira od 0 do 100 %. Ako je $S_r = 0$, tlo je suho, a ako je $S_r = 100$ %, tlo je potpuno zasićeno (saturirano) vodom. Ako je $0 < S_r < 100$ %, kažemo da je tlo djelomično (parcijalno) saturirano ili da je nesaturirano.

Nijedna od gore definiranih varijabli, osim volumena tla, ne određuje se izravno u laboratoriju. Volumen tla odredi se tako da se tlo naspe u posudu poznatoga volumena.

Vrlo je važno za svaku vrstu tla odrediti njegovu vlažnost. Ponašanje sitnozrnatoga tla u velikoj mjeri ovisi upravo o veličini njegove prirodne vlažnosti, odnosno o promjenama koje ona može imati uslijed oborina i isparavanja vode iz tla. Vlažnost tla definira se kao:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 = \frac{M - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

U izrazu (7) se podrazumijeva da masu zraka u tlu zanemarujemo, jer je mala u odnosu na mase ostalih dviju faza. Vlažnost tla u laboratoriju se određuje tako što se izvaže uzorak tla, nakon čega se on suši u peći 24 sata pod temperaturom od oko 105° C i vaganjem se odredi masa suhih zrna i čestica tla M_s . Treba naglasiti da vlažnost tla može poprimiti bitno veće vrijednosti od 100 %.

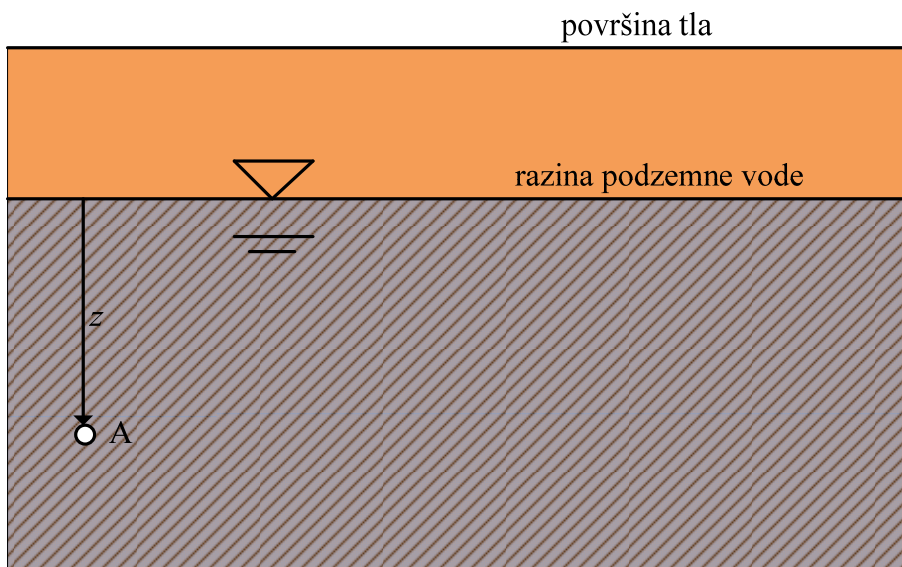
Iz gornjih se definicija može izvući koristan izraz:

$$S_r e = \frac{\rho_s}{\rho_w} w \quad (8)$$

gdje je ρ_s gustoća zrna i čestica tla (omjer volumena i mase), a u laboratoriju se određuje pokusom pomoću posebne posude zvane piknometrom, dok je ρ_w gustoća vode, koja pri temperaturi od 20° C iznosi 1 Mg/m³.

III. Tlak vode u tlu

Na slici 2 prikazano je tlo s razinom podzemne vode i točkom A koja je na dubini z od površine vode.



Slika III-1. Voda u tlu

Tlak vode u_0 u točki A u tlu definiran je izrazom:

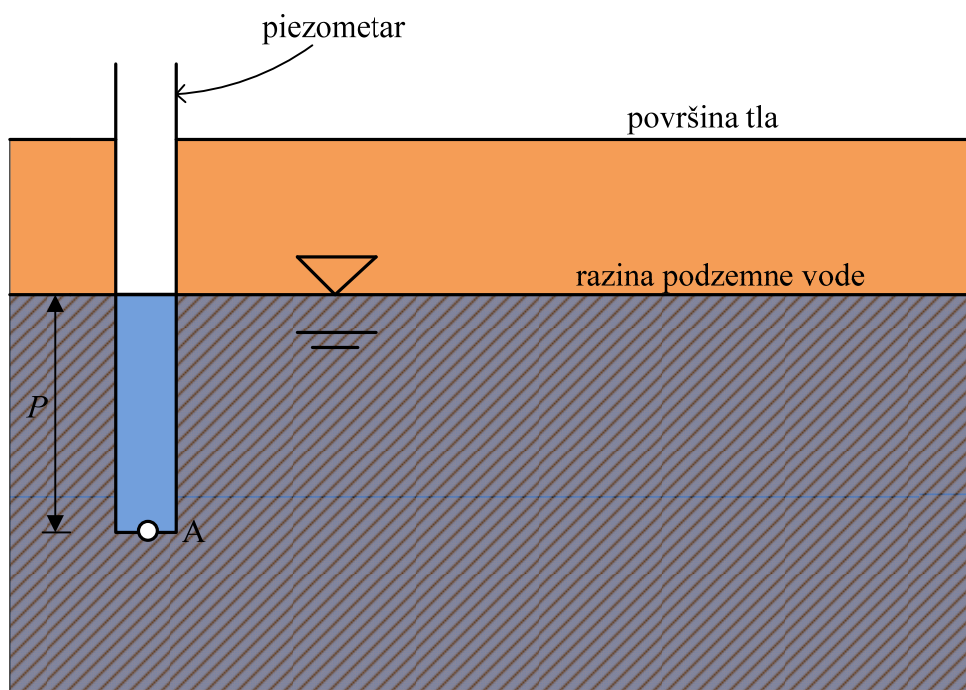
$$u_0 = \gamma_w z \quad (9)$$

gdje je γ_w zapreminska težina vode (omjer težine i volumena) i iznosi $9,81 \text{ kN/m}^3$.

Tlak vode jednakim intenzitetom djeluje u svim smjerovima. Izrazom (9) definiran je hidrostatski tlak vode. Sa stacionarnim strujanjem vode u tlu, mijenja se vrijednost tlaka vode u odnosu na hidrostatski tlak. U oba ćemo slučaja koristiti simbol u_0 za tlak vode u tlu.

IV. Hidraulički potencijal i hidraulički gradijent

Tlak vode u tlu mjerimo piezometrom. Za krupnozrnato se tlo koriste otvorene cijevi, koje na dnu imaju filter za sprječavanje ulaska zrna tla. Voda slobodno ulazi u piezometar i očitava se piezometarska visina (slika IV-1) P (m). Za sitnozrnato se tlo koriste piezometri opremljeni posebnim elektronskim uređajima na dnu za mjerenje tlaka vode, jer bi, inače, trebalo puno vremena da se u piezometru voda podigne do razine podzemne vode. Za piezometarsku se visinu obično koristi simbol h_p , a ovdje ćemo koristiti oznaku P , jer je tako piezometarska visina označena u programu SEEP/W.



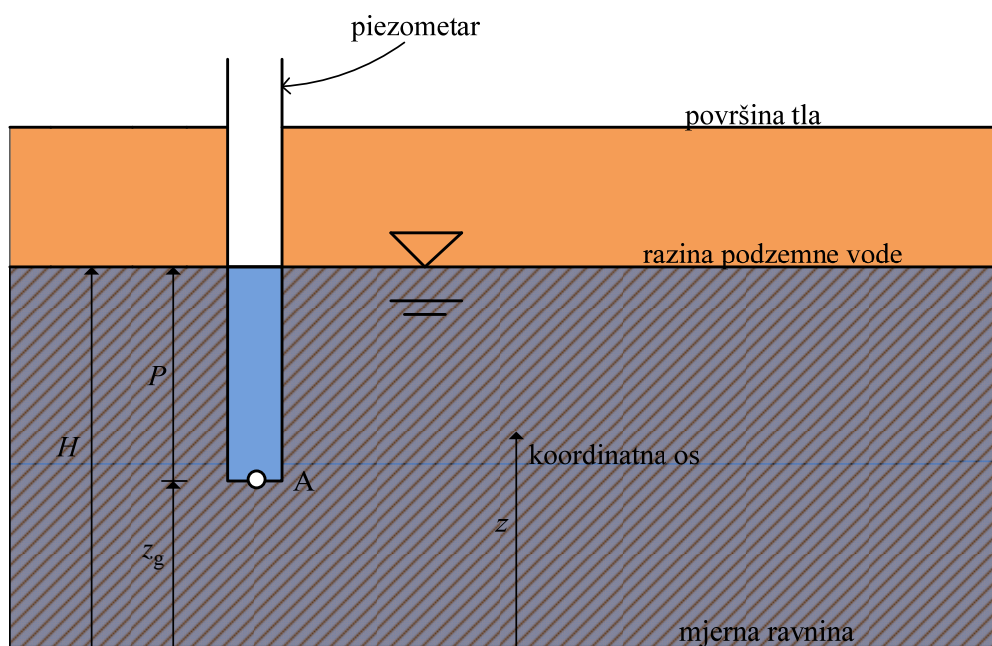
Slika IV-1. Piezometar i piezometarska visina P (m)

Piezometarska visina u točki A u tlu, visina je vodenog stupca iznad ove točke. Iz nje se dobije tlak vode u točki A, analogno izrazu (9), iz:

$$u_0 = \gamma_w P \quad (10)$$

Hidraulički potencijal H (m) jednak je zbroju piezometarske visine i geodetske visine z_g (m). Hidraulički se potencijal obično označava simbolom h , ali se ovdje koristi oznaka H , opet jer je to oznaka koju koristi SEEP/W. Geodetska visina je udaljenost promatrane točke od zadane mjerne ravnine ili referentne ravnine (slika IV-2). Pri definiranju vrijednosti hidrauličkog potencijala treba voditi računa o položaju mjerne ravnine (zbog predznaka).

$$H = P + z_g \quad (11)$$



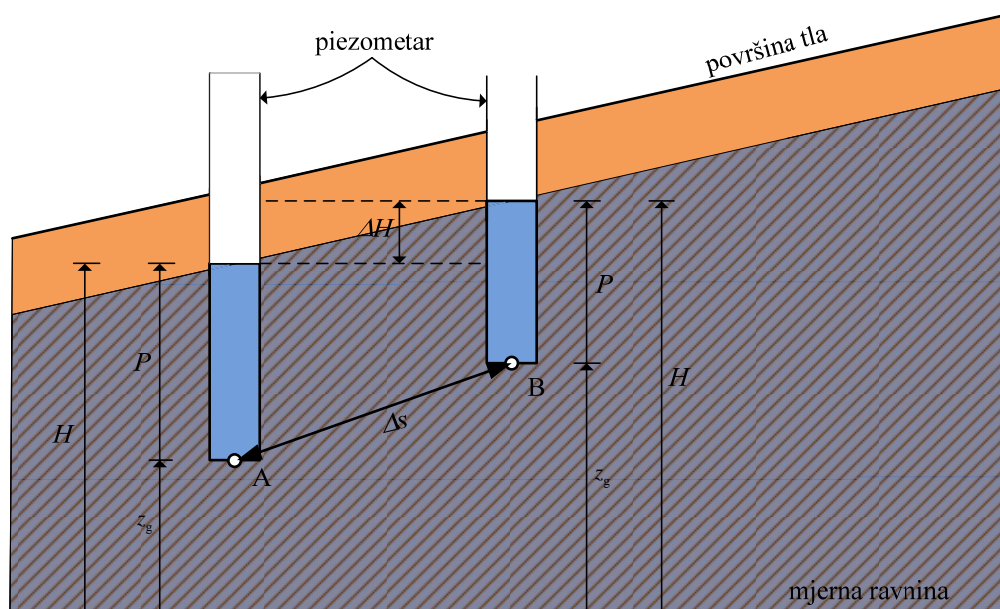
Slika IV-2. Hidraulički potencijal H (m) i geodetska visina z_g (m)

U programu SEEP/W mjerna je ravnina na vertikalnoj koordinati $y = 0$, a z_g je jednak odgovarajućoj koordinati y .

Na slici IV-3 prikazana su dva piezometra u točkama A i B, različitih geodetskih visina i s različitim piezometarskim visinama. Hidraulički potencijal veći je u točki B nego u točki A. Razlika potencijala između točaka B i A označena je s ΔH , a njihova međusobna udaljenost s Δs . Hidraulički je gradijent definiran sa:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta s} \quad (12)$$

Hidraulički je gradijent vektor, koji je pozitivan u smjeru strujanja vode. Voda struji kroz tlo od mjesta većeg k mjestu manjeg hidrauličkog potencijala, dakle od točke B prema točki A. Ako je hidraulički gradijent 0, nema strujanja vode kroz tlo. Budući da je za strujanje vode kroz tlo bitna razlika hidrauličkih potencijala između dviju točaka, a ne njihove vrijednosti, svejedno je gdje se postavi mjerna ravnina. Ako je hidraulički potencijal (odnosno tlak vode) u tlu konstantan u vremenu, radi se o stacionarnom strujanju vode kroz tlo. Ako to nije slučaj, kao, primjerice, u slučaju konsolidacije tla, radi se o nestacionarnom strujanju vode kroz tlo.



Slika IV-3. Razlika hidrauličkih potencijala ΔH

V. Darcyev zakon i koeficijent propusnosti

Darcyev zakon povezuje brzinu strujanja vode kroz tlo i hidraulički gradijent te pri tom definira koeficijent propusnosti tla. Koeficijent propusnosti k osnovni je parametar tla za strujanje vode kroz tlo, saturirano ili nesaturirano, a varira u rasponu od čak preko 10 redova veličina, ovisno o vrsti tla. Darcyev zakon glasi:

$$v = k i \quad (13)$$

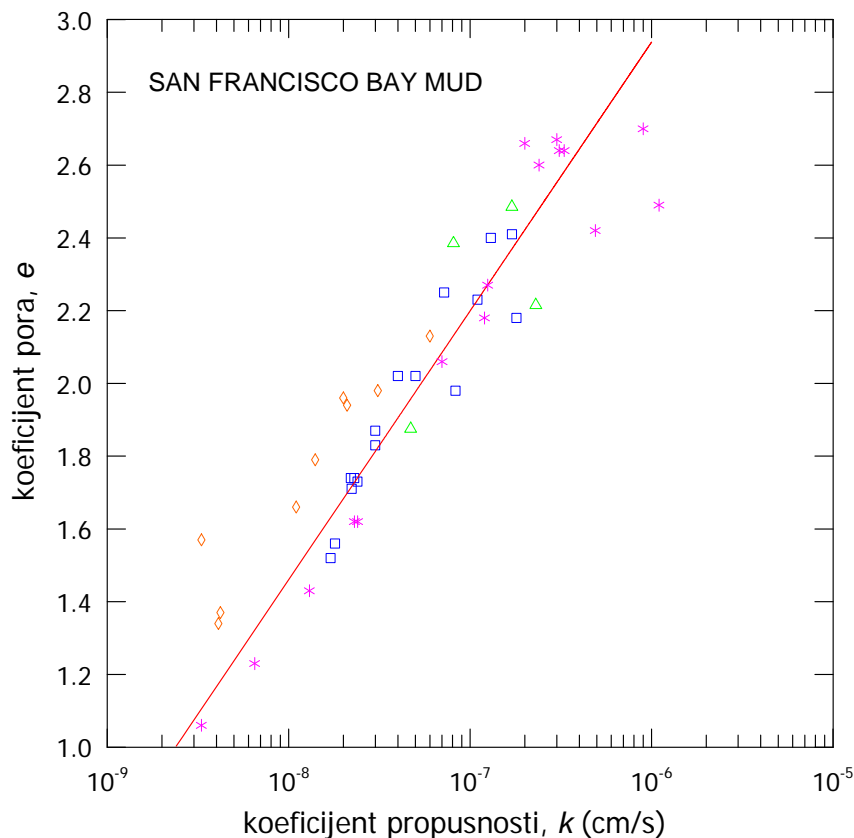
gdje je v (m/s) specifični protok (protok po jedinici površine okomito na smjer strujanja vode, odnosno volumen vode u jedinici vremena po jedinici površine okomito na smjer strujanja vode). Koeficijent propusnosti također ima jedinicu m/s.

Kako voda struji kroz tlo, tako je moguće mjeriti volumen vode koja istječe iz tla. Ovaj volumen vode, podijeljen s vremenom mjerenja, definira protok Q (m^3/s). Kada se Q podijeli s površinom tla okomito na smjer strujanja, dobije se specifični protok.

Voda teče kroz vijugave pore tla. Osim protoka, može se mjeriti brzina strujanja vode kroz tlo, primjerice, tako što se kroz uzorak tla pusti da uz vodu prolazi i boja, te se mjeri vrijeme potrebno da boja izađe iz uzorka. Visina uzorka podijeljena s ovim vremenom daje brzinu strujanja vode v_w . Veza između ove brzine i specifičnog protoka je:

$$v = n v_w \quad (14)$$

Prema Darcyevom zakonu, specifični je protok proporcionalan hidrauličkom gradijentu, a konstantom proporcionalnosti se definira koeficijent propusnosti. On, međutim, nije konstantan za danu vrstu tla, već se u saturiranom tlu mijenja s promjenom veličine pora, primjerice, nakon opterećenja ili rasterećenja tla, posebno tijekom konsolidacije sitnozrnatog tla. U nesaturiranom se tlu još mijenja s usisom. Za saturirano tlo kažemo da je koeficijent propusnosti funkcija koeficijenta pora. Opće je prihvaćeno da se za sitnozrnato saturirano tlo koeficijent propusnosti mijenja s koeficijentom pora linearno u polulogaritamskom mjerilu, kao što je na slici V-1 prikazano za *San Francisco Bay Mud* iz niza pokusa. Radi se o vrlo mekoj glini u zaljevu San Francisca.



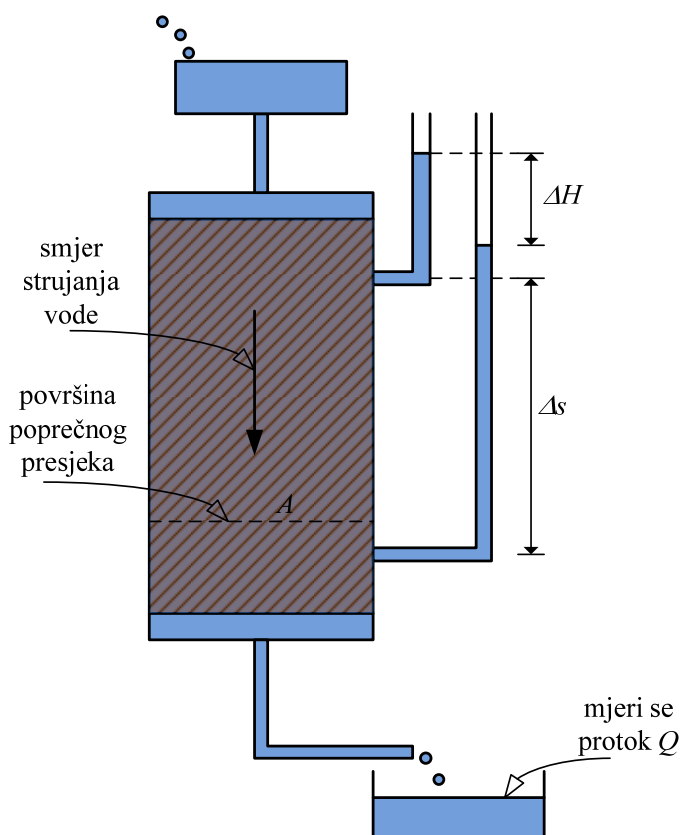
Slika V-1. Odnos koeficijenta propusnosti i koeficijenta pora za saturirano tlo

Tipične vrijednosti koeficijenta propusnosti za pojedine vrste saturiranoga tla su kako slijedi:

- gline i prašinate gline (> 20 % gline): $< 10^{-10}$ (m/s) – 2×10^{-7} (m/s)
- vrlo fini pijesci, prahovi i laminati gline i praha: 2×10^{-7} (m/s) – 9×10^{-5} (m/s)
- čisti pijesci i mješavine pijeska i šljunka: 9×10^{-5} (m/s) – 6×10^{-2} (m/s)
- čisti šljunci: 6×10^{-2} (m/s) – 1 (m/s)

Koeficijent propusnosti u laboratoriju se određuje na dva načina, ovisno o vrsti tla. Za krupnozrnato se tlo koristi metoda s konstantnom razlikom hidrauličkih potencijala, a za sitnozrnato tlo metoda s promjenljivom razlikom hidrauličkih potencijala. Na slici V-2 prikazan je uređaj za određivanje koeficijenta propusnosti prvom metodom. Konstantna razlika potencijala kroz uzorak tla osigurava se stalnim dolijevanjem vode, koja nadoknađuje vodu koja istječe iz uzorka u posudu, gdje se mjeri protok Q . Ovaj je postupak moguć samo za krupnozrnata tla, kroz koja voda brzo protječe. Koeficijent propusnosti određuje se iz jednostavnog izraza:

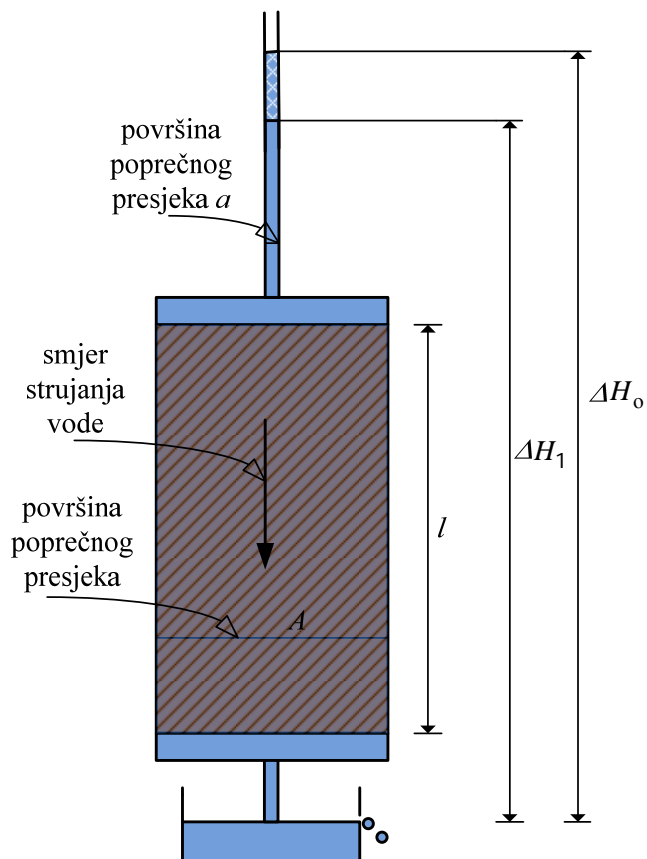
$$Q = Av = Ak i = Ak \frac{\Delta H}{\Delta s} \Rightarrow k = \frac{Q \Delta s}{A \Delta H}$$



Slika V-2. Određivanje koeficijenta propusnosti konstantnom razlikom hidrauličkih potencijala

Na slici V-3 prikazan je uređaj za određivanje koeficijenta propusnosti promjenljivom razlikom hidrauličkih potencijala za sitnozrnata tla. Kako voda kroz njih sporo protječe, mjeri se vrijeme t_1 potrebno da od početne razlike potencijala ΔH_0 ona padne na ΔH_1 . Tada je

$$k = \frac{al}{At_1} \ln \frac{\Delta H_0}{\Delta H_1} \quad \text{odnosno} \quad k = 2,3 \frac{al}{At_1} \log \frac{\Delta H_0}{\Delta H_1}$$



Slika V-3. Određivanje koeficijenta propusnosti promjenljivom razlikom hidrauličkih potencijala

VI. Efektivna naprezanja u tlu

Princip efektivnih naprezanja postavio je Terzaghi 1925. godine za saturirano tlo. Ovaj princip efektivna naprezanja u svim smjerovima u tlu definira kao razliku ukupnih naprezanja i tlaka vode:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (15)$$

Ovo vrijedi za sve točke u tlu. U izrazu (15) treba obratiti pozornost na simbol u , koji označava ukupni tlak vode, o kojem će biti riječi naknadno. Za sada će u označavati u_0 .

Pretpostavimo da je voda na površini tla, kao što je prikazano na slici VI-1 i da je u tlu hidrostatsko stanje vode. Promatramo vertikalno i horizontalno ukupno naprezanje (σ_v , odnosno σ_h), vertikalno i horizontalno efektivno naprezanje (σ'_v , odnosno σ'_h) i tlak vode u_0 u točki A. Koeficijent bočnog naprezanja tla u mirovanju je K_0 (omjer horizontalnog efektivnog i vertikalnog efektivnog naprezanja za horizontalnu površinu tla). Tada je

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma z \\ u_0 &= \gamma_w z \\ \sigma'_v &= \sigma_v - u_0 = (\gamma - \gamma_w) z \\ \sigma'_h &= K_0 \sigma'_v \\ \sigma_h &= \sigma'_h + u_0 \end{aligned}$$

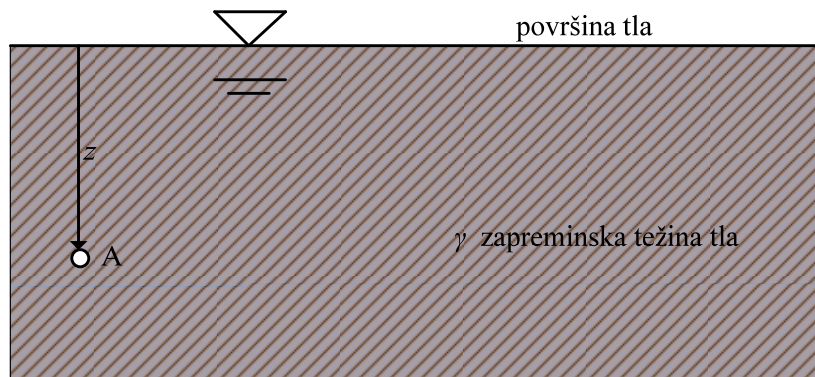
U ovom slučaju, kada je voda na površini tla (i kada je iznad tla), za vertikalno efektivno naprezanje pišemo

$$\sigma'_v = \gamma' z$$

gdje je

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (16)$$

uronjena zapreminska težina tla.



Slika VI-1. Voda na površini tla

Ako voda struji kroz tlo, trenje između vode i skeleta tla prouzrokuje silu

$$F = i \gamma_w V$$

odnosno naprezanje

$$\frac{F}{A} = i \gamma_w z$$

Time se efektivna naprezanja, u smjeru strujanja vode, mijenjaju za $i \gamma_w z$. Primjerice, ako voda struji vertikalno prema dolje, vektor hidrauličkog gradijenta usmjeren je u istom smjeru kao gravitacija, pa je

$$\sigma'_v = (\gamma' + i \gamma_w) z$$

Međutim, ako voda struji vertikalno prema gore, tada je

$$\sigma'_v = (\gamma' - i \gamma_w) z$$

Kako hidraulički gradijent ovisi o razlici hidrauličkih potencijala, očito za danu razliku hidrauličkih potencijala, vertikalno efektivno naprezanje može pasti na nulu. U tom slučaju tlo potpuno gubi posmičnu čvrstoću i kažemo da je došlo do hidrauličkog sloma tla. Vrijednost kritičnog hidrauličkog gradijenta i_c pri kojem dolazi do hidrauličkog sloma, možemo dobiti ako gornji izraz za vertikalno efektivno naprezanje izjednačimo s nulom. Tada je

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \tag{17}$$

Kao što se vidi iz izraza (17), kritični hidraulički gradijent ovisi o zapreminskoj težini tla.

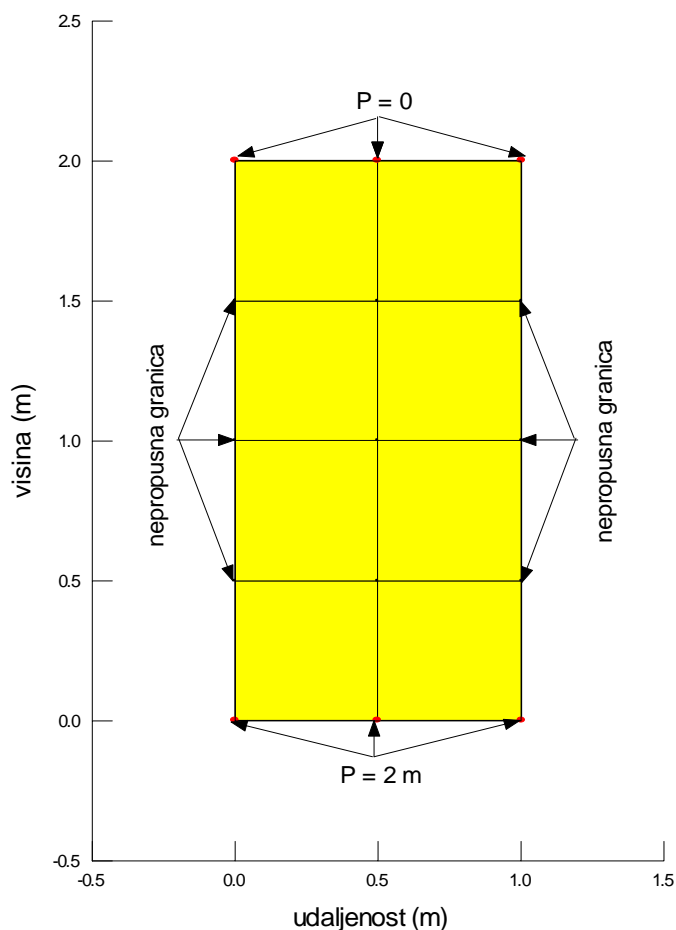
VII. Jednostavni primjeri

Pomoću programa SEEP/W i SIGMA/W modelirat ćemo jednostavne primjere za ilustraciju navedenih definicija i principa.

Iz definicije hidrauličkog potencijala izrazom (11) proizlazi da je, s poznatim geodetskim visinama z_g , koje u programu SEEP/W odgovaraju y koordinatama čvorova mreže konačnih elemenata, svejedno zadaje li se u rubnim čvorovima modela s ovim programom hidraulički potencijal H ili piezometarska visina P . H je jednostavno zbroj odgovarajuće y koordinate rubnog čvora i visine vode iznad ovog čvora.

VII.1. Hidrostatski tlak vode u tlu

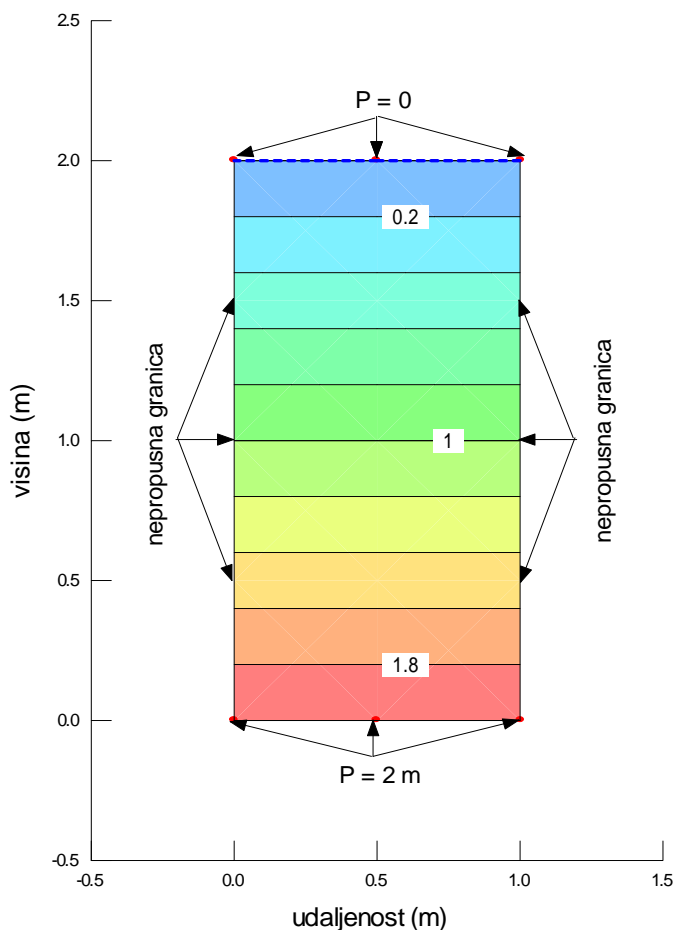
Na slici VII-1 prikazan je model tla visine 2 m za program SEEP/W. Voda je na površini tla. Radi jednostavnosti zadajemo $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$. Koeficijent propusnosti je $k = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Na gornjem je rubu modela piezometarska visina $P = 0$ (*Pressure Head* (P)), a na donjem je rubu $P = 2 \text{ m}$, što odgovara hidrostatskom tlaku vode. U ovom je primjeru u cijelom modelu konstantan hidraulički potencijal $H = 2 \text{ m}$.



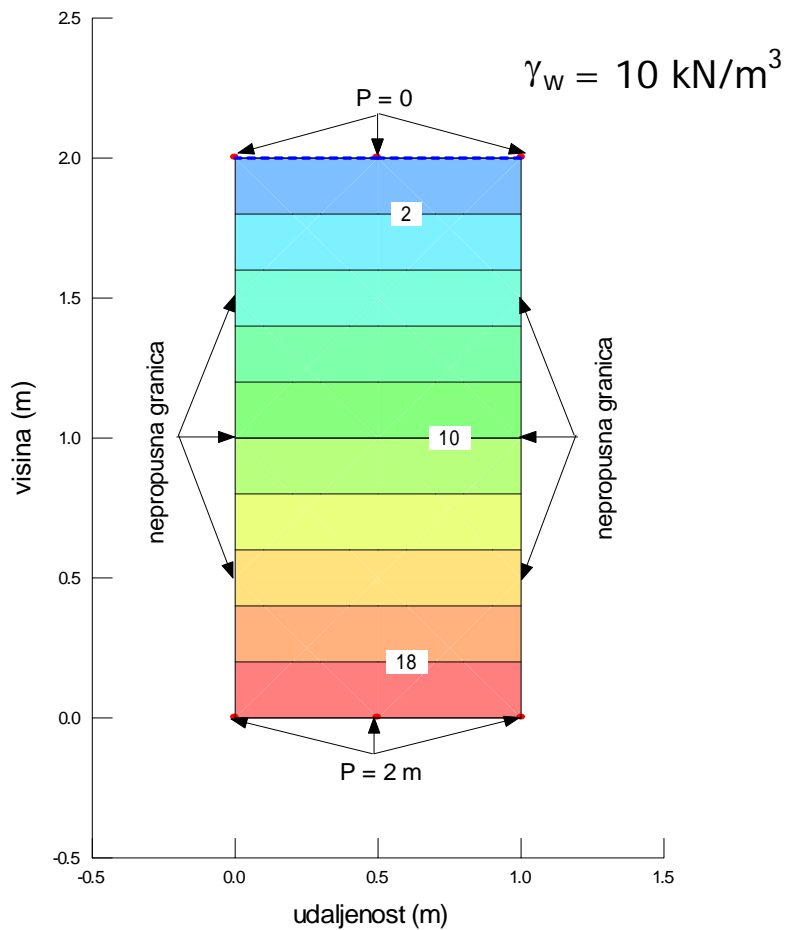
Slika VII-1. Hidrostatski tlak vode

Na slici VII-2 prikazana je raspodjela piezometarskih visina, koje su na svakoj visini modela tla konstantne i linearno rastu od vrha modela, gdje je razina vode, do njegova donjeg ruba, isto kao i tlak vode (slika VII-3), koji je jednak umnošku piezometarske visine i 10. Linearnu raspodjelu tlaka vode kroz model možemo prikazati i na dijagramu (slika VII-4), gdje točke predstavljaju vrijednosti tlaka vode u odgovarajućim čvorovima.

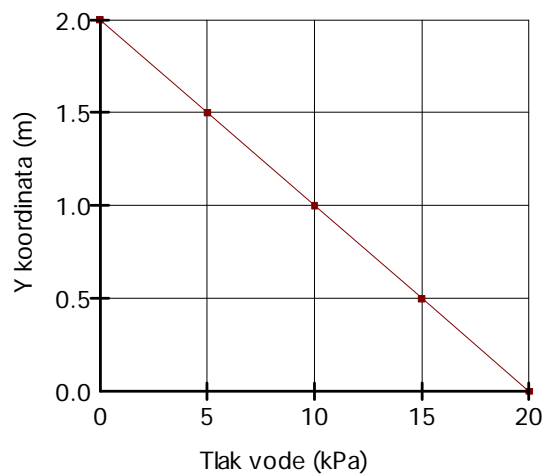
Svi se dijagrami u programima *GeoStudia* crtaju pomoću *Draw – Graph* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Graph*). Nakon što se izaberu odgovarajuće veličine na osima, na modelu se označe čvorovi (u ovom slučaju bilo koja vertikalna čvorova) za prikaz vrijednosti u dijagramu. Vrijednosti iz dijagrama modu se vidjeti pod *Data*.



Slika VII-2. Izolinije piezometarske visine (m)



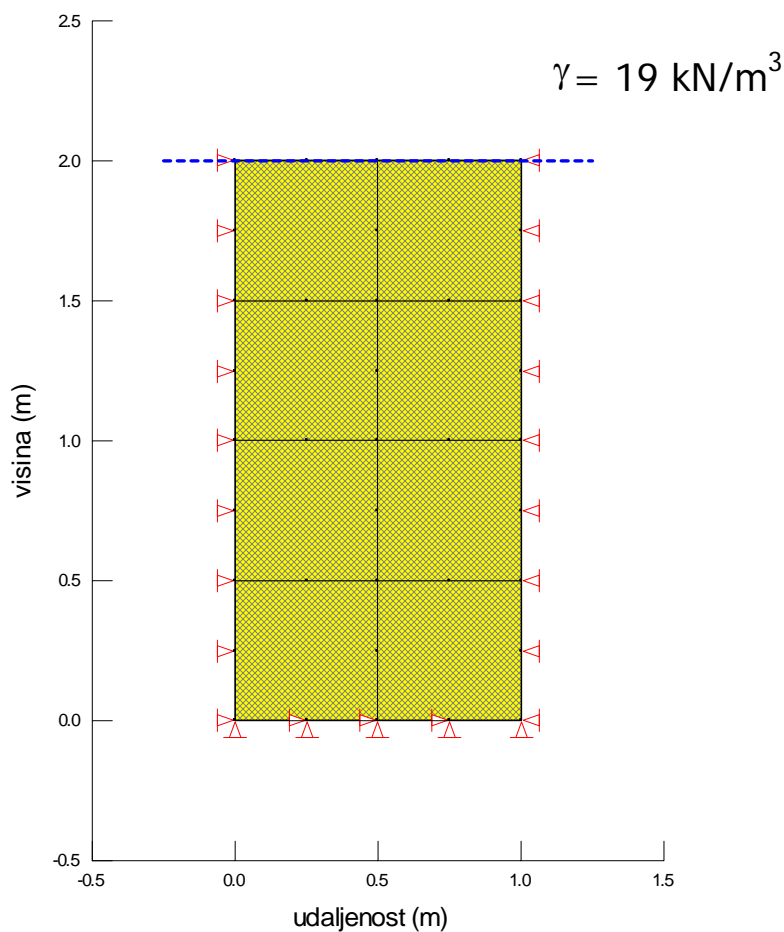
Slika VII-3. Izolinije tlaka vode (kPa)



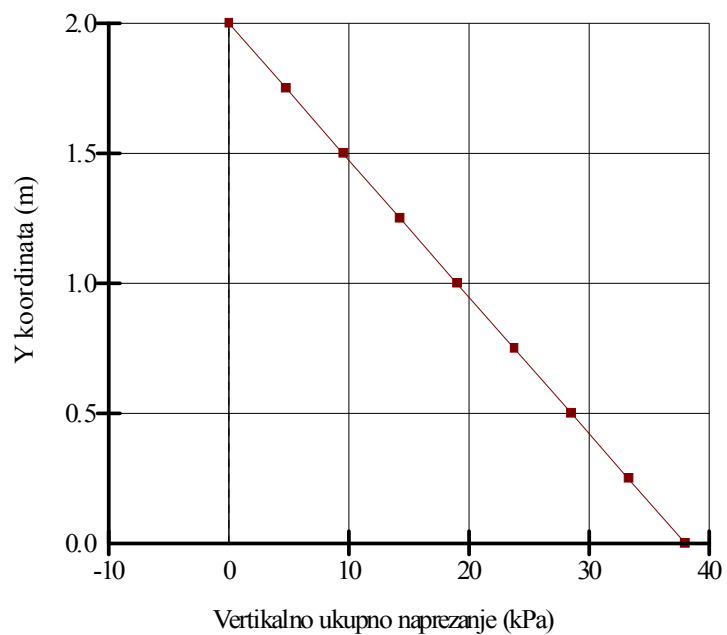
Slika VII-4. Tlak vode po visini modela tla

Sada ćemo programom SIGMA/W proračunati ukupna i efektivna naprežanja za zadani hidrostatski tlak vode, s vodom na površini tla. Za zapreminsku težinu tla zadajemo $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, a za koeficijent bočnog naprežanja tla u mirovanju (radi jednostavnosti) $K_0 = 0,5$. Koristimo analizu *InSitu 1*. Model mora imati sekundarne čvorove i treba zadati konstitucijski odnos za tlo (linearno-elastičan) s proizvoljnim Youngovim modulom elastičnosti. Model za ovaj proračun prikazan je na slici VII-5.

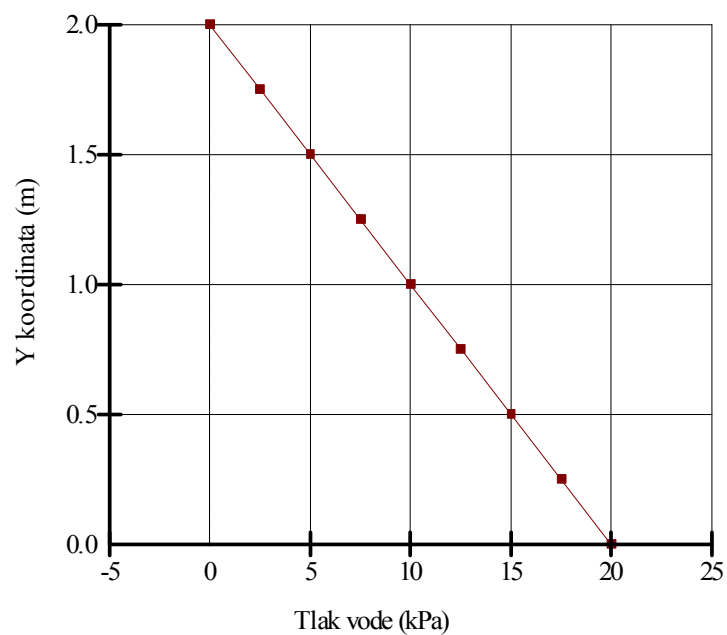
Rezultati proračuna prikazani su na slikama VII-6 do VII-10. Vertikalna ukupna naprežanja rastu od 0 do 38 kPa (19×2). Tlak vode isti je kao u programu SEEP/W (od 0 do 20 kPa). Vertikalna efektivna naprežanja rastu od 0 do 18 kPa ($(19 - 10) \times 2$). Horizontalna efektivna naprežanja rastu od 0 do 9 kPa ($0,5 \times 18$), a horizontalna ukupna naprežanja od 0 do 29 kPa ($9 + 20$).



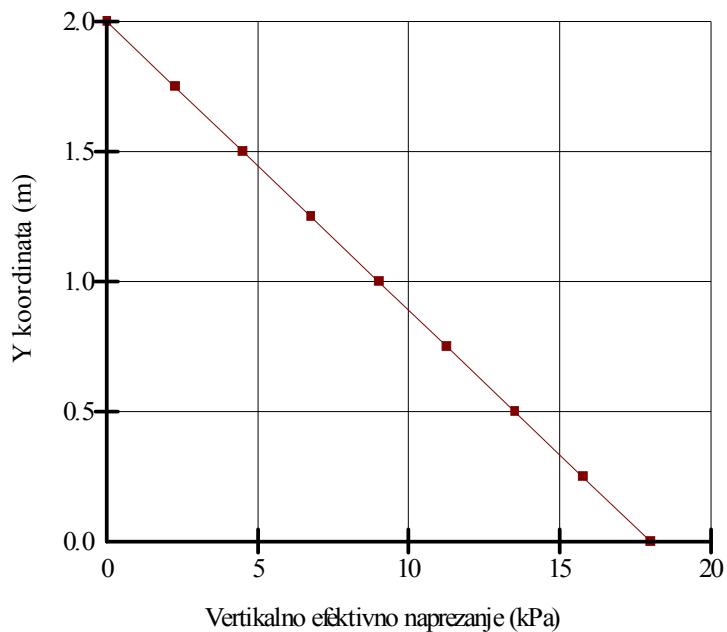
Slika VII-5. Model tla za program SIGMA/W



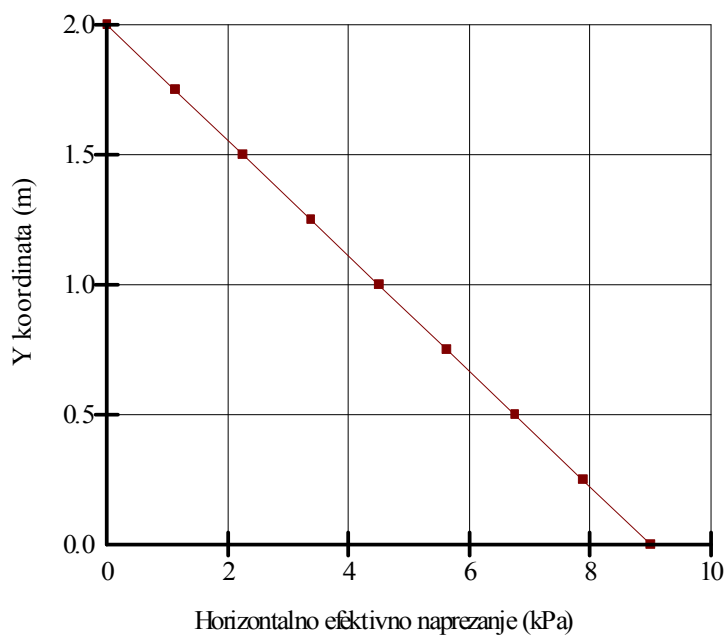
Slika VII-6. Vertikalno ukupno naprezanje po visini modela tla



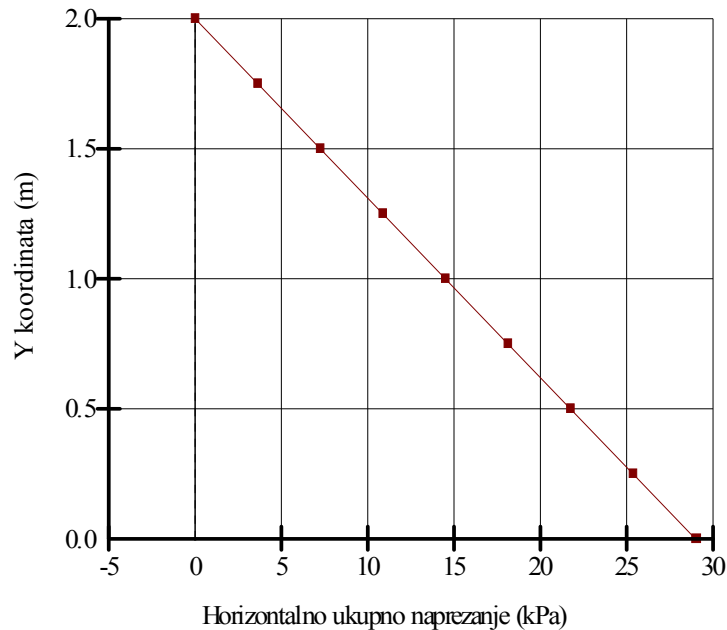
Slika VII-7. Tlak vode po visini modela tla



Slika VII-8. Vertikalno efektivno naprežanje po visini modela tla



Slika VII-9. Horizontalno efektivno naprežanje po visini modela tla



Slika VII-10. Horizontalno ukupno naprezanje po visini modela tla

VII.2. Stacionarno strujanje vode kroz tlo

Na slici VII-11 prikazan je isti model tla za program SEEP/W kao na slici VII-1, ali s drukčijim rubnim uvjetima. Na donjem je rubu modela zadana piezometarska visina $P=0$, što znači da je voda u razini donjeg ruba modela. Na gornjem je rubu piezometarska visina $P=2$ m, a to znači da je iznad gornjeg ruba modela 2 m vode. Na donjem je rubu, dakle, hidraulički potencijal $H=0$, a na gornjem rubu je $H=4$ m, što daje razliku potencijala $\Delta H=4$ m. Ovako bi zadani rubni uvjeti odgovarali onima iz pokusa za određivanje koeficijenta propusnosti s konstantnom razlikom hidrauličkih potencijala.

Plavim strjelicama na slici VII-11 označeni su presjeci modela u kojima želimo vidjeti vrijednosti protoka. Njih se označava pod *Draw – Flux Sections* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Flux Sections*). Pri tome treba voditi računa da ovi presjeci ne prolaze kroz čvorove mreže konačnih elemenata.

Rezultati proračuna prikazani su na slici VII-12. Vide se raspodjela tlaka vode po visini modela tla, vektori strujanja vode i veličine protoka, upisane plavom bojom.

Hidraulički gradijent ovdje je

$$i = \frac{4}{2} = 2$$

i konstantan je po visini cijeloga modela. Time je i brzina strujanja vode konstantna, što je na slici VII-12 označeno jednakim duljinama vektora strujanja.

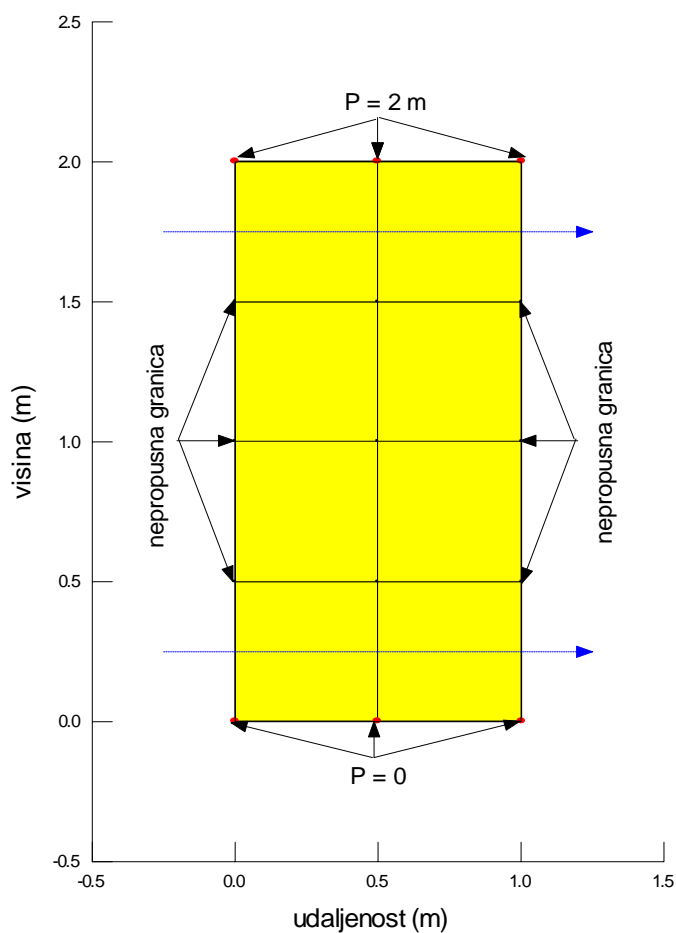
Specifični protok

$$v = 1 \times 10^{-3} \times 2 = 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

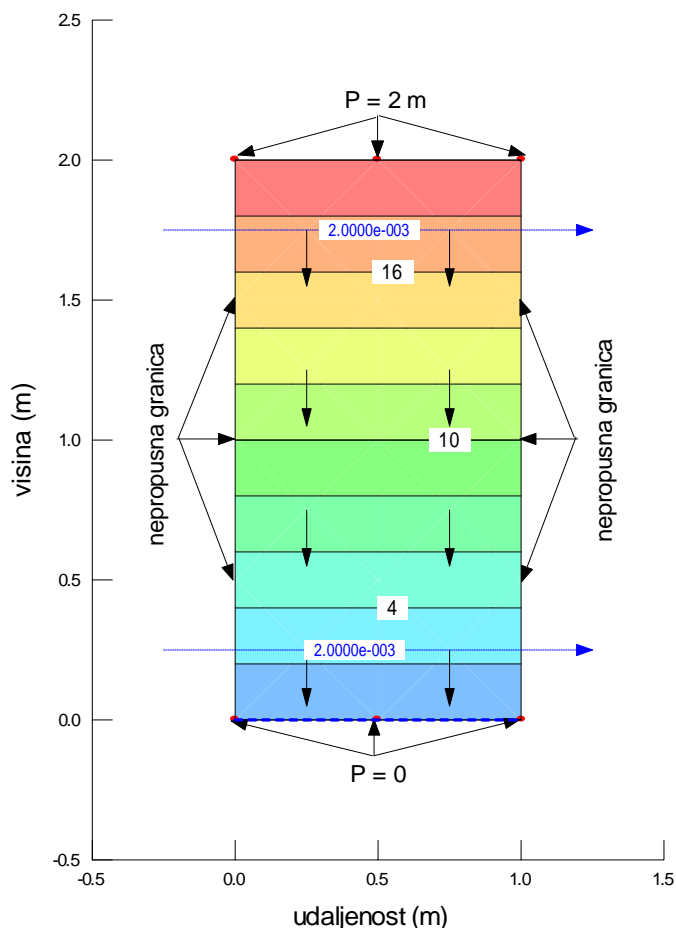
Površina poprečnog presjeka modela tla, okomito na smjer strujanja vode, $A = 1 \times 1 = 1 \text{ m}^2$, a protok je

$$Q = 2 \times 10^{-3} \times 1 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Protok je također konstantan po visini modela tla. Vrijednosti protoka na plave se strjelice upisuju pod *Draw – Flux Labels* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Flux Labels*).



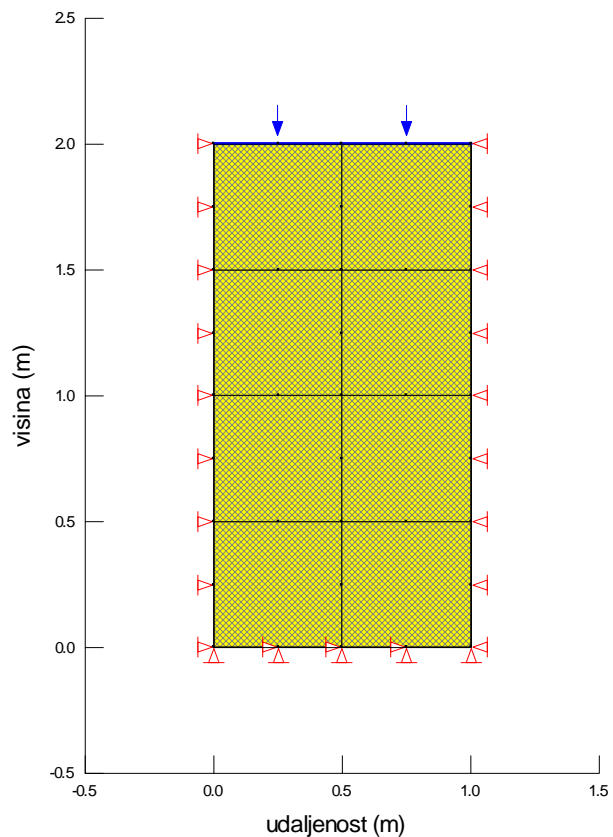
Slika VII-11. Modela tla za stacionarno strujanje vode



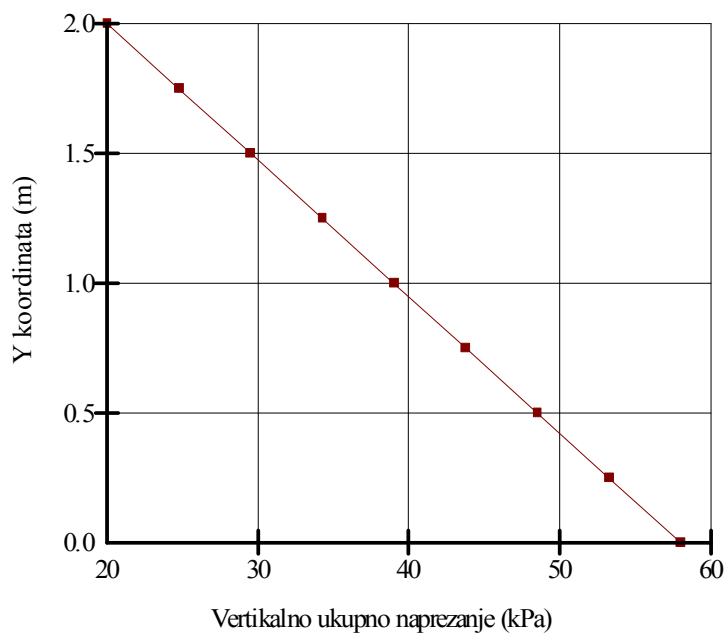
Slika VII-12. Rezultati proračuna za stacionarno strujanje vode; izolinije prikazuju tlak vode (kPa)

Sada ćemo programom SIGMA/W vidjeti kako strujanje vode kroz tlo utječe na efektivna naprezanja. Preuzimamo tlak vode iz programa SEEP/W, što nije dovoljno za korektni proračun vertikalnih efektivnih naprezanja, jer će se vertikalna ukupna naprezanja proračunati bez 2 m vode iznad gornjeg ruba modela. Zato na gornjem rubu modela treba po rubnim stranicama elemenata zadati odgovarajući tlak vode (*Fluid Pressure*), kao što je prikazano na slici VII-13.

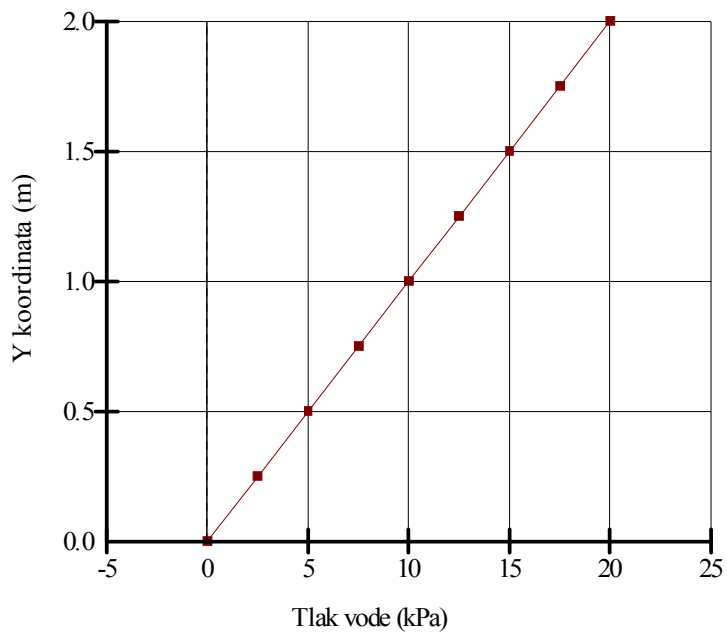
Rezultati proračuna za analizu *InSitu1* prikazani su na slikama VII-14 do VII-18. Vertikalna ukupna naprezanja rastu od 20 do 58 kPa ($19 \times 2 + 10 \times 2$). Tlak vode sada pada od 20 kPa do 0. U slučaju hidrostatskog tlaka vode, s razinom vode 2 m iznad površine tla, vertikalna efektivna naprezanja bila bi ista kao u prethodnom primjeru (od 0 do 18 kPa), jer razina vode iznad površine tla ne utječe na efektivna naprezanja. U slučaju strujanja vode kroz tlo, vertikalna efektivna naprezanja rastu od 0 do 58 kPa ($9 \times 2 + 2 \times 10 \times 2$). Horizontalna efektivna naprezanja rastu od 0 do 29 kPa ($0,5 \times 58$), a horizontalna ukupna naprezanja od 20 kPa ($0 + 20$) do 29 kPa ($29 + 0$).



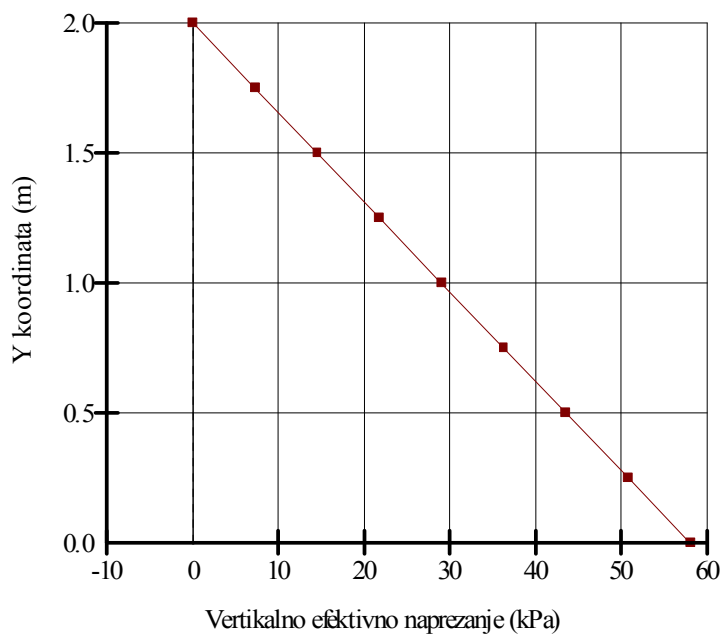
Slika VII-13. Modela tla za proračun napreznja uz stacionarno strujanje vode



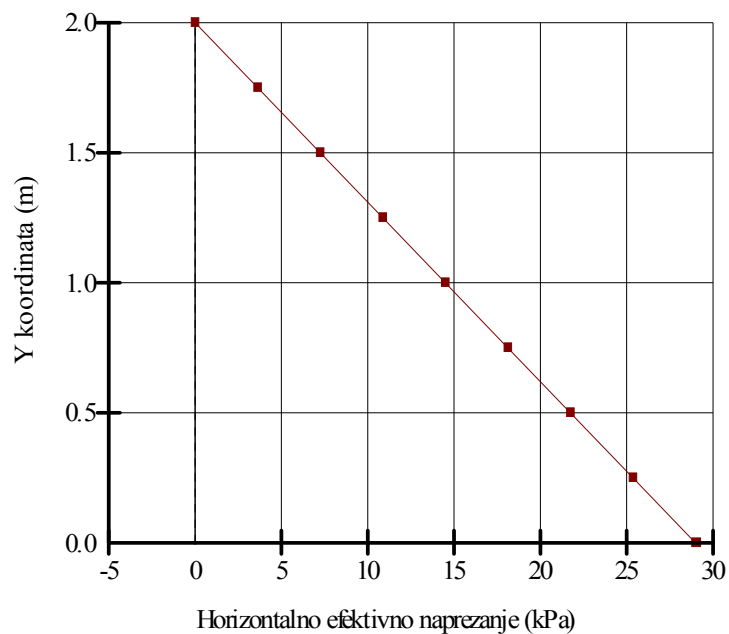
Slika VII-14. Vertikalno ukupno napreznje po visini modela sa strujanjem vode kroz tlo



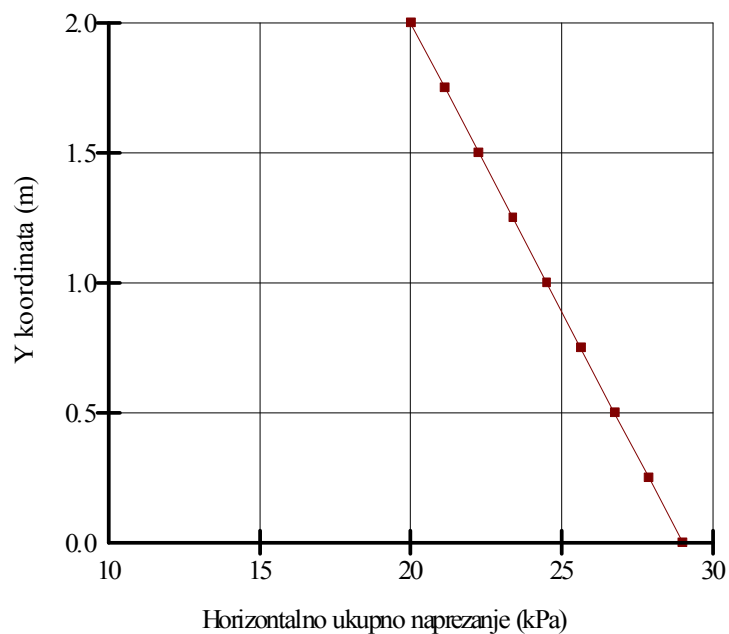
Slika VII-15. Tlak vode po visini modela sa strujanjem vode kroz tlo



Slika VII-16. Vertikalno efektivno naprezanje po visini modela sa strujanjem vode kroz tlo

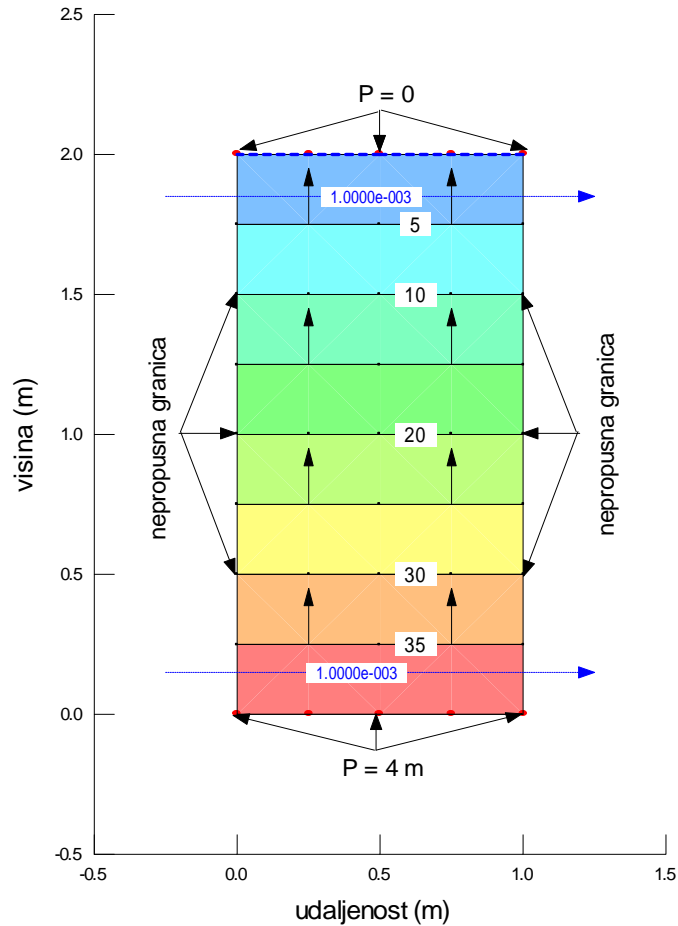


Slika VII-17. Horizontalno efektivno naprežanje po visini modela sa strujanjem vode kroz tlo



Slika VII-18. Horizontalno ukupno naprežanje po visini modela sa strujanjem vode kroz tlo

Ako, za isti model tla, sada rubne uvjete postavimo tako da je piezometarska visina na gornjem rubu $P = 0$ ($H = 2$ m), a na donjem rubu $P = 4$ m ($H = 4$ m) dobit ćemo vertikalno strujanje prema gore, kao što je prikazano na slici VII-19 s izolinijama tlaka vode (kPa). Razlika hidrauličkih potencijala $\Delta H = 2$ m, pa je hidraulički gradijent $i = 1$, a protok je $Q = 1 \times 10^{-3}$ m³/s.

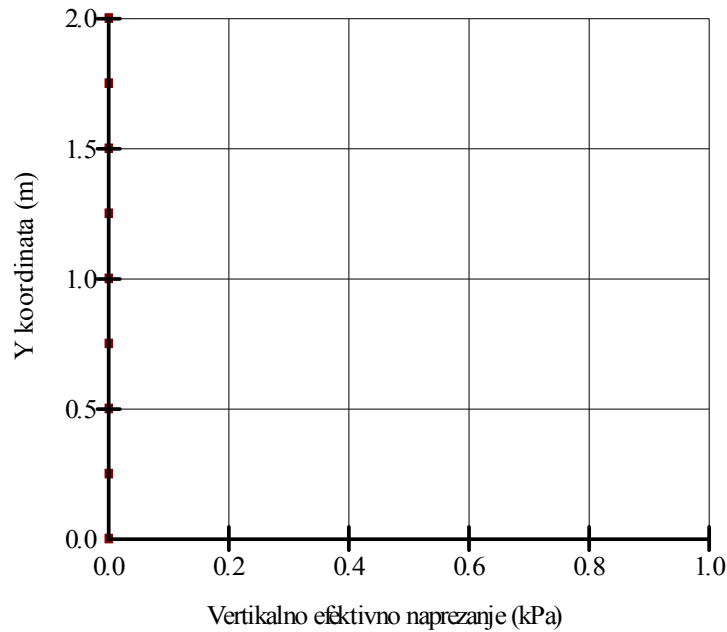


Slika VII-19. Vertikalno strujanje vode prema gore; izolinije tlaka vode (kPa)

Ako u programu SIGMA/W preuzmemo ove rezultate proračuna programom SEEP/W i za zapreminsku težinu tla zadamo $\gamma = 20$ kN/m³, dobit ćemo da kritični hidraulički gradijent ima istu vrijednost kao i gradijent pod kojim se odvija strujanje vode kroz tlo sa slike VII-19:

$$i_c = \frac{20 - 10}{10} = 1$$

To znači, da u ovom slučaju dolazi do hidrauličkog sloma tla, a vertikalna su efektivna naprezanja po cijeloj visini modela 0, kao što je prikazano na slici VII-20. Horizontalna su efektivna naprezanja također 0.

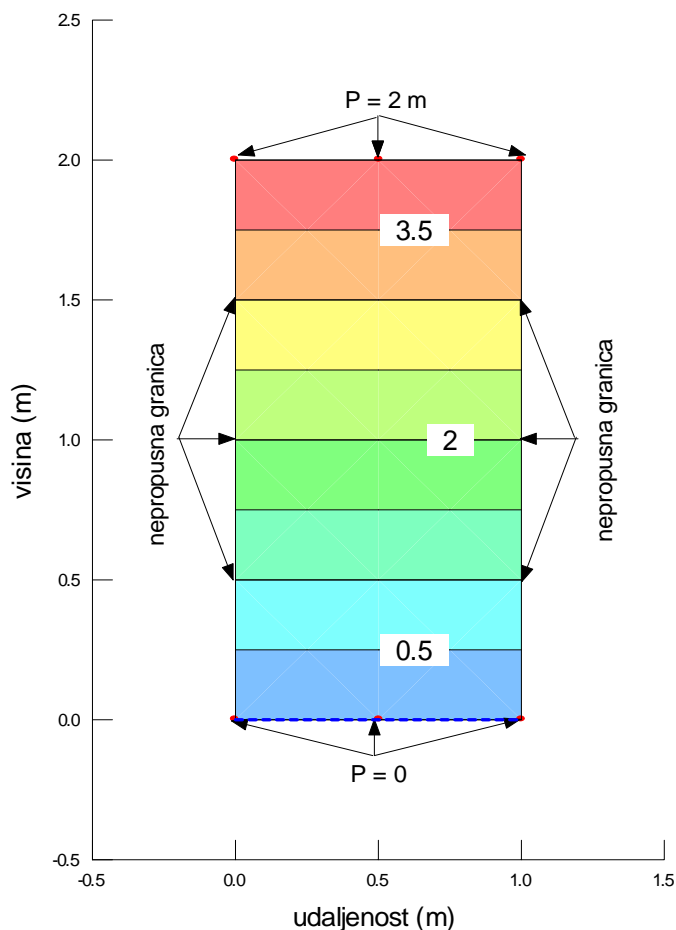


Slika VII-20. Vertikalno efektivno naprezanje jednako je nuli u svakoj točki po visini modela tla; hidraulički slom

VIII. Strujne mreže

Na slici VIII-1 prikazane su ekvipotencijale za primjer strujanja vode kroz tlo sa slike VII-11. Ekvipotencijale su krivulje koje spajaju točke jednakih hidrauličkih potencijala. U slučaju vertikalnog strujanja kroz tlo s konstantnom brzinom strujanja, ekvipotencijale su ekvidistantne horizontalne linije. Između dviju linija, razlika hidrauličkog potencijala uvijek je konstantna, a ovdje iznosi 0,5 m.

Ekvipotencijale su sastavni dio strujne mreže, kao jedna familija krivulja, koja predstavlja rješenje Laplaceove diferencijalne jednačine. Druga familija krivulja strujne mreže, koja također proizlazi iz rješenja Laplaceove diferencijalne jednačine, sastoji se od strujnica. Strujnice su krivulje koje svojim tijekom slijede smjer strujanja vode kroz tlo. Ekvipotencijale i strujnice sijeku se pod pravim kutom. Ekvipotencijale su okomite na nepropusne granice. Elementi strujne mreže omeđeni su s dvije susjedne ekvipotencijale i dvije susjedne strujnice. Svaka bi strujna mreža morala imati „kvadratične“ elemente, to jest takve da se u njih može upisati kružnica.



Slika VIII-1. Ekvipotencijale (m)

Strujna mreža s ekvipotencijalama sa slike VIII-1 prikazana je na slici VIII-2. Korisnik programa SEEP/W sam ucrtava strujnice pomoću opcije *Draw – Flow Paths* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Flow Paths*).

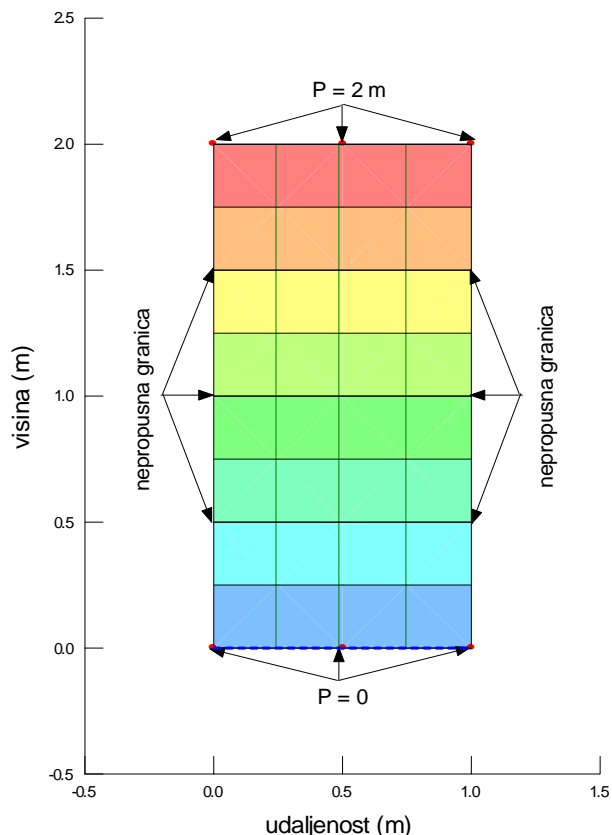
Iz korektno nacrtane strujne mreže može se odrediti vrijednost protoka po dužnom metru u smjeru okomito na ravnini crtanja. Ako s N_f označimo broj strujnih kanala strujne mreže, pri čemu je svaki strujni kanal omeđen s dvije susjedne strujnice ($N_f = 4$ na slici VIII-2), a s N_d broj padova potencijala (ukupan broj potencijala – 1), onda je

$$Q = \frac{N_f}{N_d} k \Delta H \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}') \quad (18)$$

Za strujnu mrežu sa slike VIII-2,

$$Q = \frac{4}{8} 1 \times 10^{-3} \times 4 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$$

Ovo je isti rezultat koji smo prethodno dobili proračunom programom SEEP/W.

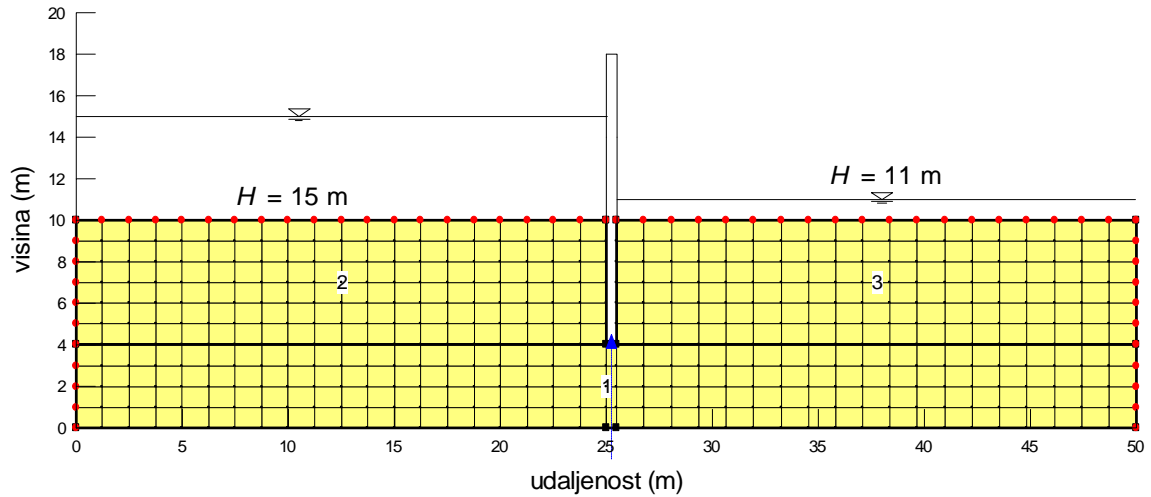


Slika VIII-2. Strujna mreža

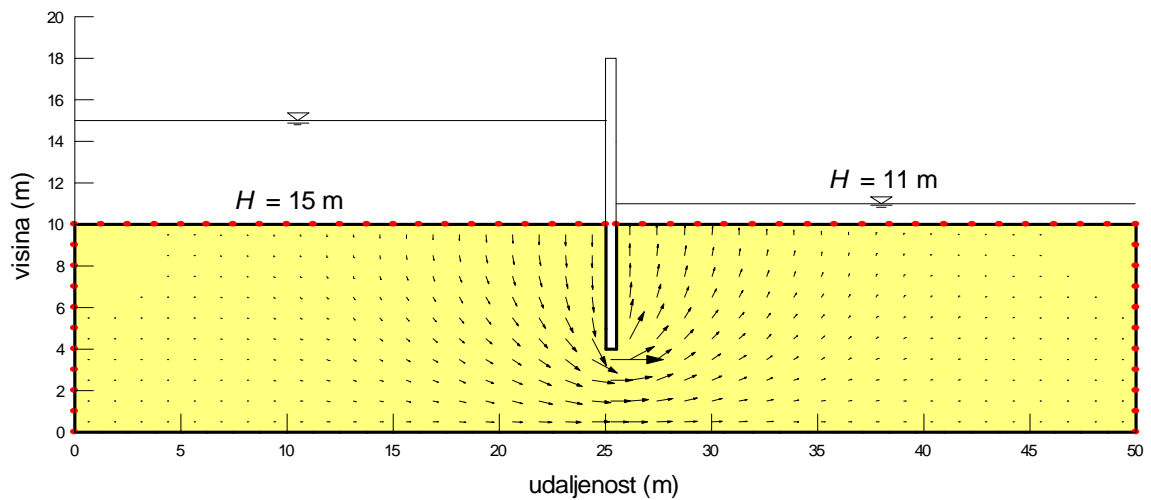
Za prikaz općenite strujne mreže, slika VIII-3 prikazuje zagatnu stijenu zabijenu 6 m u korito rijeke. Voda je na uzvodnoj strani 5 m iznad površine tla, a na nizvodnoj se strani crpi tako da je visina vode 1 m iznad površine tla. Koeficijent propusnosti tla je 4×10^{-3} m/s. Na uzvodnoj strani površine terena zadan je hidraulički potencijal $H = 15$ m, isto kao i na lijevom vertikalnom rubu modela. Na nizvodnoj strani površine terena zadan je hidraulički potencijal $H = 11$ m, isto kao i na desnom vertikalnom rubu modela. Razlika hidrauličkih potencijala $\Delta H = 4$ m.

Zagatna je stijena nepropusna, a na slici VIII-3 treba uočiti da na mjestu zagatne stijene u koritu rijeke nema konačnih elemenata. To je zbog toga što se rubni uvjet za nepropusnu granicu u SEEP/W ne može zadavati unutar modela. Unutar modela može se u pojedinim čvorovima zadavati samo hidraulički potencijal (ili piezometarska visina).

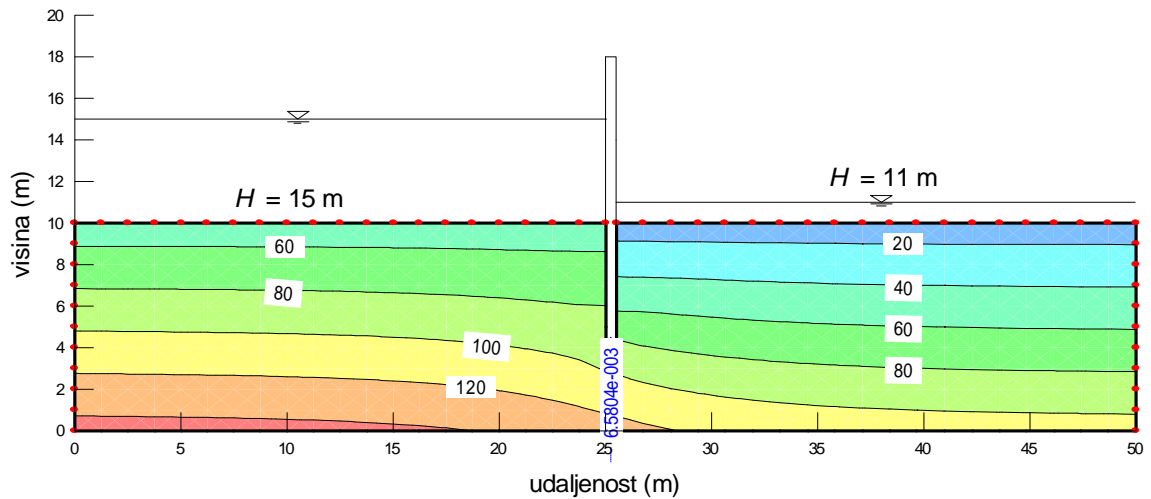
Na slici VIII-4 prikazani su vektori strujanja vode. Voda struji oko „zagatne stijene“, a najveća je brzina strujanja vode u blizini dna „zagatne stijene“. Raspodjela tlaka vode u tlu i veličina protoka ispod „zagatne stijene“ prikazani su na slici VIII-5. Proračunati protok je $Q = 6,58 \times 10^{-3}$ m³/s/m'.



Slika VIII-3. Model tla sa „zagatnom stijenom“



Slika VIII-4. Vektori strujanja vode

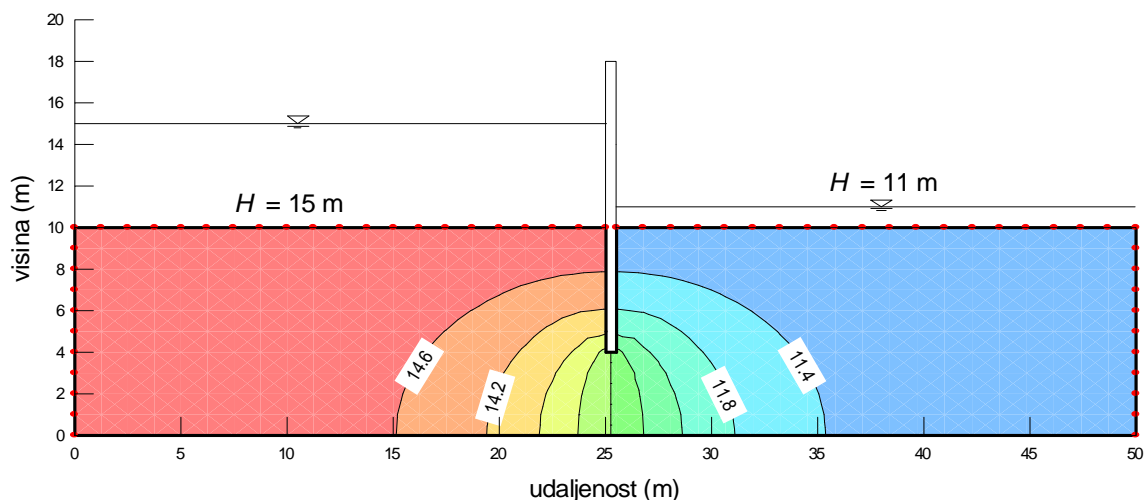


Slika VIII-5. Izolinije tlaka vode (kPa) i protok ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}'$)

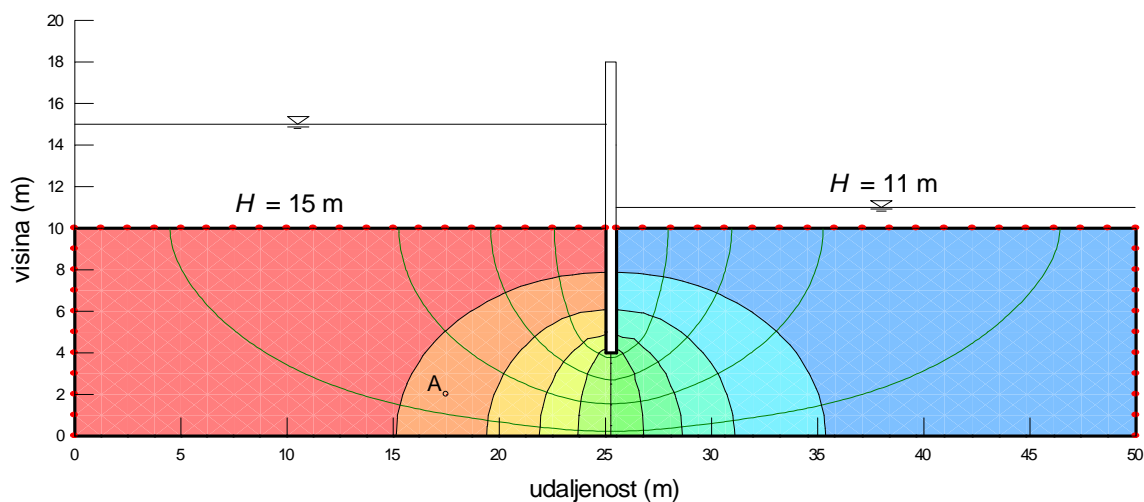
Ekvipotencijale su prikazane na slici VIII-6. Ukupno ima 11 ekvipotencijala, a razlika hidrauličkih potencijala između dviju ekvipotencijala iznosi 0,4 m. Strujna je mreža prikazana na slici VIII-7 s 4,125 strujna kanala. Ovaj je broj rezultat procjene da su dva elementa strujne mreže ispod „zgatne stijene“, uz donji rub modela, takvog oblika da im je omjer stranica 1:8. Iz strujne je mreže protok

$$Q = \frac{4,125}{10} 4 \times 10^{-3} \times 4 = 6,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$$

što odgovara vrijednosti proračunatoj programom SEEP/W.



Slika VIII-6. Ekvipotencijale (m)



Slika VIII-7. Strujna mreža

Iz strujne mreže može se u svakoj točki tla izračunati tlak vode. Na slici VIII-7 označena je točka A, u kojoj ćemo iz strujne mreže odrediti tlak vode. Padova potencijala je $N_d = 10$. Točka A nalazi se između 8. i 9. pada potencijala (0,6 razlike susjednih ekvipotencijala), pa je u toj točki hidraulički potencijal

$$H = \frac{\Delta H}{N_d} 8,6 + 11 = \frac{4}{10} 8,6 + 11 = 14,44 \text{ m}$$

Geodetska visina točke A odgovara njenoj y koordinati, koja je 2 m, pa je piezometarska visina

$$P = 14,44 - 2 = 12,44 \text{ m}$$

a tlak vode u točki A

$$u_0 = 10 \times 12,44 = 124,4 \text{ kPa}$$