

STRUJANJE VODE KROZ ANIZOTROPNO I NEHOMOGENO TLO

Rijetko kada tlo možemo smatrati homogenim i izotropnim. Geotehničkim terenskim istražnim radovima iz bušotina se vade uzorci za određivanje profila tla. Između bušotina uslojenost se tla linearno aproksimira, što ne mora odgovarati stvarnom stanju. U analizama se najčešće pretpostavlja da su pojedini slojevi tla homogeni i izotropni, prvenstveno zato što nije jednostavno u tlu ni stijeni utvrditi stupanj anizotropnosti, a pogotovo nije jednostavno odrediti parametre tla koji nisu jednaki u svim smjerovima. Što se tiče homogenosti, iz bušotina i laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla (i stijene) dobijemo diskretne podatke o tlu, a u analizama sudjeluje cijela masa tla obuhvaćena geotehničkim zahvatom, tako da, osim uslojenosti tla, nije moguće obuhvatiti neke druge pretpostavke osim da je svaki sloj tla homogen. Za numeričko modeliranje još treba uzeti u obzir dovoljnu udaljenost granica modela od geotehničkog zahvata, pa se u ovakvim proračunima modelira još veća masa tla od one koja se analizira pri projektiranju zahvata, što također treba uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata.

Ovdje ćemo, teoretski i na ilustrativnim primjerima, razmatrati utjecaj anizotropnosti i uslojenosti tla na strujanje vode kroz tlo. Kao što je rečeno, uslojenost tla i odgovarajuće parametre tla za svaki sloj možemo grubo odrediti terenskim i laboratorijskim istražnim radovima, dok je poznato da koeficijent propusnosti ima veću vrijednost u smjeru uslojenosti tla (horizontalnom) nego u vertikalnom smjeru, ali to nije moguće jednostavno odrediti istražnim radovima. Zato je korisno, za pojedini geotehnički problem, analizirati utjecaj anizotropnosti koeficijenta propusnosti na režim vode u tlu, kako bismo stekli što bolju sliku o onome što nas u realnosti očekuje.

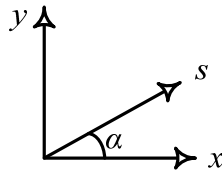
I. Anizotropni uvjeti u tlu

Promatramo homogeno anizotropno tlo za koje su zadane vrijednosti koeficijenta propusnosti u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Budući da je za tlo tipično da mu je propusnost veća u horizontalnom nego u vertikalnom smjeru, onda je

$$k_x = k_{\max}$$

$$k_y = k_{\min}$$

Prvo ćemo promatrati vezu između koeficijenata k_x i k_y i koeficijenta propusnosti k_s za općeniti slučaj anizotropnosti pod kutom α u odnosu na horizontalu, kao što je prikazano na slici I-1.



Slika I-1. Smjer anizotropije s pod kutom α

Pretpostavljamo da voda kroz tlo struji u smjeru s . Koordinate x i y povezane su sa smjerom s izrazima

$$x = s \cos \alpha$$

$$y = s \sin \alpha$$

Budući da hidraulički potencijal H pada u smjeru strujanja vode, Iz Darcyevog zakona slijedi

$$v_s = -k_s \frac{\partial H}{\partial s} = -k_s \left(\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \right)$$

$$\Rightarrow v_s = -k_s \left(-\frac{v_x}{k_x} \cos \alpha - \frac{v_y}{k_y} \sin \alpha \right)$$

$$\Rightarrow \frac{v_s}{k_s} = \frac{v_x}{k_x} \cos \alpha + \frac{v_y}{k_y} \sin \alpha$$

Budući da je

$$v_x = v_s \cos \alpha$$

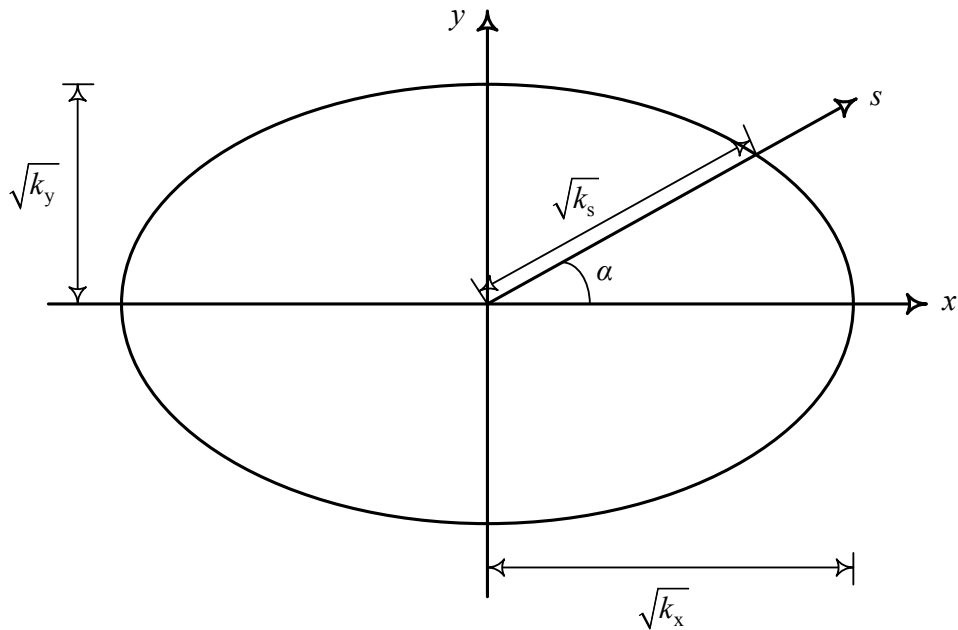
$$v_y = v_s \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_x} \cos^2 \alpha + \frac{1}{k_y} \sin^2 \alpha$$

odnosno

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_x} \frac{x^2}{s^2} + \frac{1}{k_y} \frac{y^2}{s^2} \Rightarrow \frac{s^2}{k_s} = \frac{x^2}{k_x} + \frac{y^2}{k_y}$$

Time smo dobili jednadžbu elipse, koja je prikazana na slici I-2.



Slika I-2. Elipsa definirana gornjom jednađbom

Dalje promatramo strujanje vode kroz tlo sa zadanim konstantnim koeficijentima propusnosti k_x i k_y , što tlo čini anizotropnim. Transformacijom horizontalne koordinate, homogeno anizotropno moći ćemo promatrati kao homogeno izotropno, s odgovarajućim izotropnim koeficijentom propusnosti. U slučaju anizotropnoga tla, jednađba kontinuiteta za dvodimenzionalno stacionarno strujanje vode kroz tlo glasi

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \Rightarrow k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

odnosno

$$\frac{1}{(k_y/k_x)} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

Sada uvodimo sljedeću transformaciju koordinate x

$$\boxed{x_t = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} \quad (1)$$

pa dobivamo

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x_t} \frac{dx_t}{dx} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \frac{\partial}{\partial x_t} \Rightarrow \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \left(k_y/k_x\right) \frac{\partial^2 H}{\partial x_t^2}$$

iz čega proizlazi jednadžba kontinuiteta za izotropno tlo u transformiranom koordinatnom sustavu (x_t, y):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

Označimo s k' koeficijent propusnosti ovog izotropnog tla. Tada je, prema Darcyevom zakonu

$$v_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x} = -k' \frac{\partial H}{\partial x_t}$$

$$\Rightarrow -k_x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \frac{\partial H}{\partial x_t} = -k' \frac{\partial H}{\partial x_t}$$

iz čega slijedi da je ekvivalentni koeficijent propusnosti za homogeno izotropno tlo

$$\boxed{k' = \sqrt{k_x k_y}} \quad (2)$$

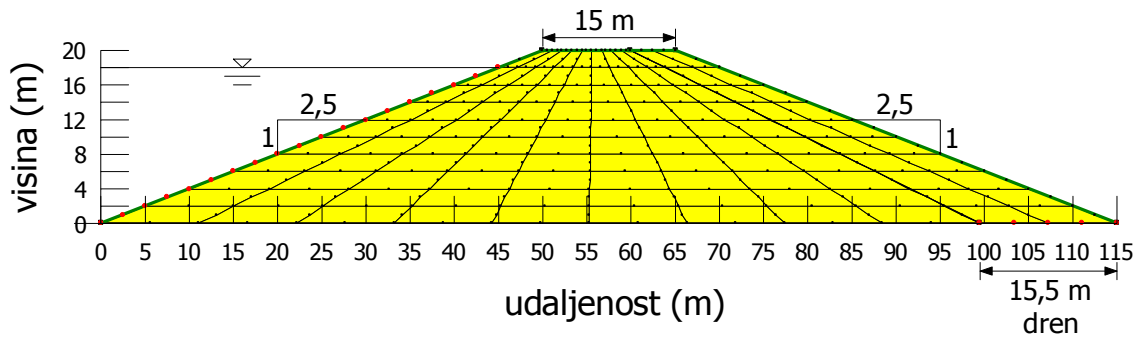
Dakle, krenuli smo od homogenog anizotropnog tla s konstantnim koeficijentima propusnosti k_x i k_y i, uz transformaciju x koordinate prema izrazu (1), dobili smo ekvivalentni koeficijent propusnosti k' definiran izrazom (2) za odgovarajuće homogeno izotropno tlo.

U nastavku ćemo prikazati primjer analize strujanja vode kroz anizotropno tlo i nakon toga transformaciju x koordinate i uporabu ekvivalentnog koeficijenta propusnosti. Na slici I-3 prikazan je nasip homogenog tla. Visina nasipa je 20 m, a širina krune je 15 m. Nagibi kosina nasipa su 1:2,5. Na uzvodnoj strani nasipa voda je na razini 2 m ispod krune nasipa. Na nizvodnoj strani nasipa u njegovoj se nožici postavlja dren duljine 15,5 m. Koeficijent propusnosti nasipa u horizontalnom smjeru $k_x = 4,5 \times 10^{-8}$ m/s, a u vertikalnom smjeru $k_y = 1,6 \times 10^{-8}$ m/s.

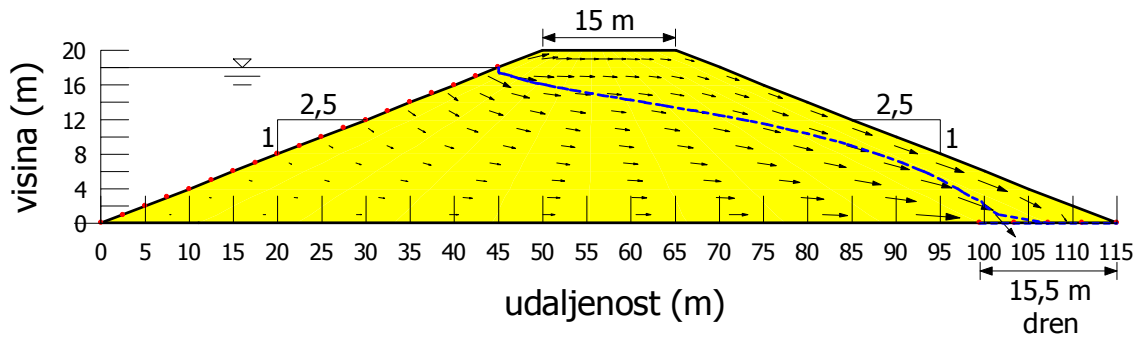
Ovaj ćemo primjer modelirati programom SEEP/W. Anizotropni koeficijent propusnosti zadaje se tako da se pod *KeyIn – Hydraulic Functions – Hydraulic Conductivity* unese konstantna vrijednost k_x . Zatim se pod *KeyIn – Material Properties* odabere broj funkcije (1) za k_x (*K-Fn*) i omjer $k_y / k_x = 0,356$ (*K-Ratio*).

Na uzvodnoj strani kosine nasipa, od razine vode pa na niže, u rubnim se čvorovima zadaje konstantan potencijal $H = 18$ m. U čvorovima drena se zadaje piezometarska visina $P = 0$.

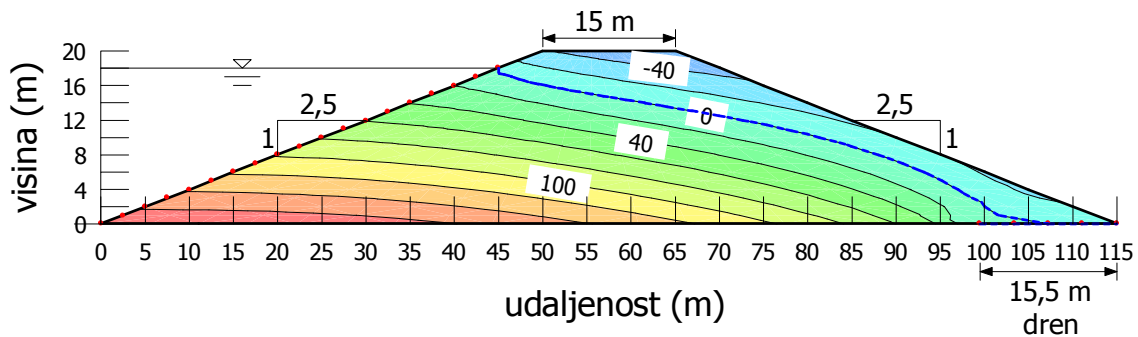
Rezultati proračuna prikazani su na slikama I-4 do I-6. Na slici I-4 plavom je bojom označeno vodno lice duž kojega je tlak vode 0. Vodno lice ne izlazi na nizvodnu kosinu nasipa (što bi bilo nepovoljno radi erozije tla), zahvaljujući drenu. U okolici drena najveće su brzine strujanja vode.



Slika I-3. Model homogenog anizotropnog nasipa

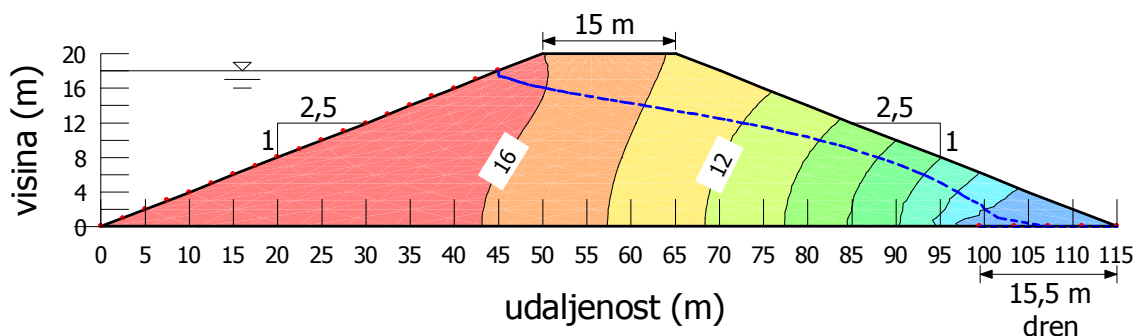


Slika I-4. Vodno lice i vektori strujanja vode



Slika I-5. Izolinije tlaka vode (kPa)

Na slici I-6 prikazane su ekvipotencijale. Strujnu mrežu nema smisla crtati u anizotropnom tlu.



Slika I-6. Ekvipotencijale (m)

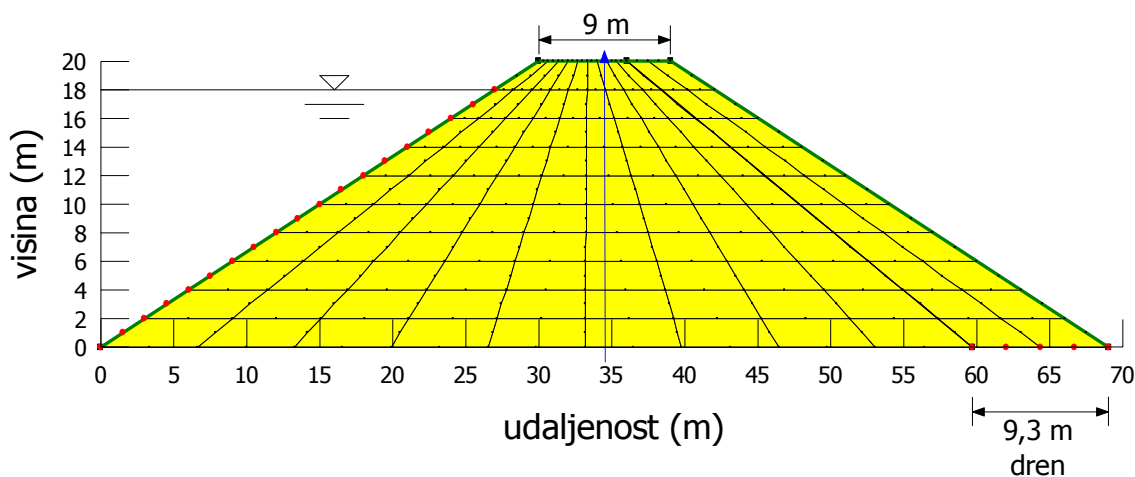
Sada ćemo transformirati x koordinatu prema izrazu (1) kako bismo dobili novu geometriju nasipa s izotropnim svojstvima:

$$x_t = x \sqrt{\frac{1,6}{4,5}} = 0,6 x$$

Nova širina osnovice nasipa je $0,6 \times 115 = 69$ m, nova širina krune je $0,6 \times 15 = 9$ m, a nova duljina drena $0,6 \times 15,5 = 9,3$ m. Visina nasipa nije se promijenila. Model nasipa novih horizontalnih dimenzija prikazana je na slici I-7.

Ekvivalentni koeficijent propusnosti za izotropno tlo računamo iz izraza (2):

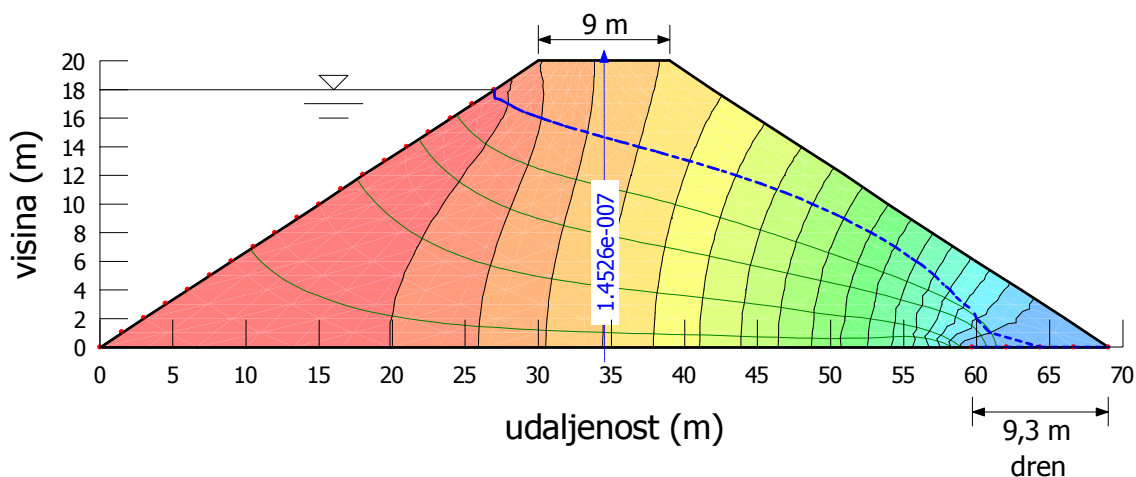
$$k' = \sqrt{(4,5 \times 1,6)} \times 10^{-8} \text{ m/s} = 2,7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$



Slika I-7. Model homogenog izotropnog nasipa

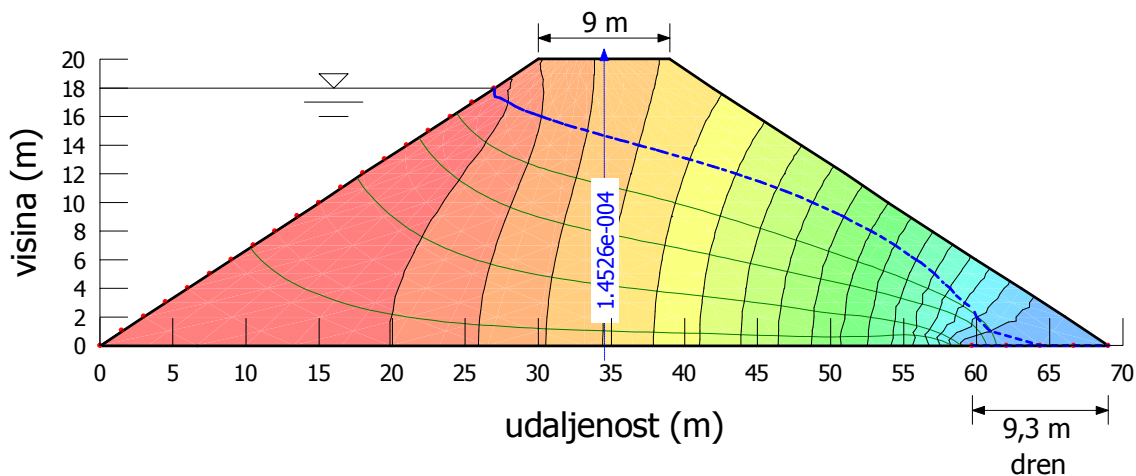
Na slici I-8 prikazana je strujna mreža. Iz nje možemo izračunati protok:

$$Q = \frac{4,4}{18} 2,7 \times 10^{-8} \times 18 = 1,2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m}'$$



Slika I-8. Strujna mreža i protok

Za ilustraciju ćemo u novom primjeru s istim modelom tla, koeficijent propusnosti povećati za tri reda veličine tako da je sada $k' = 2,7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Rezultati ovog proračuna prikazani su na slici I-9. Dobili smo jednaku strujnu mrežu kao na slici I-8, jedino se, očekivano, promijenila veličina protoka (točno za tri reda veličine), jer on ovisi o koeficijentu propusnosti. Ostale komponente stacionarnog strujanja vode, kao što su ekvipotencijale, strujnice i tlak vode u tlu, ne ovise o veličini koeficijenta propusnosti.

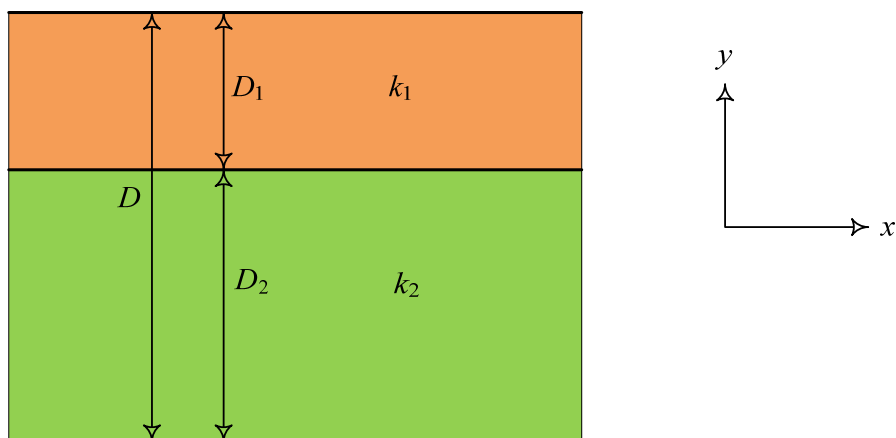


Slika I-9. Strujna mreža i protok za 1000 puta veći koeficijent propusnosti

II. Nehomogeni uvjeti u tlu

Ovdje se radi o uslojenom tlu, tako da svaki sloj možemo smatrati homogenim. Ako su slojevi anizotropni, primijenimo opisani postupak za anizotropno tlo i odredimo ekvivalentni koeficijent propusnosti za izotropno tlo.

Promatramo uslojeno tlo sa slike II-1 od dva homogena izotropna sloja tla debljine D_1 i koeficijenta propusnosti k_1 , odnosno debljine D_2 i koeficijenta propusnosti k_2 . Ukupna debljina tla je D . Odredit ćemo koeficijente propusnosti \bar{k}_x i \bar{k}_y , koji će vrijediti za cijeli sloj debljine D , kao da je homogen, ali anizotropan.



Slika II-1. Uslojeno tlo

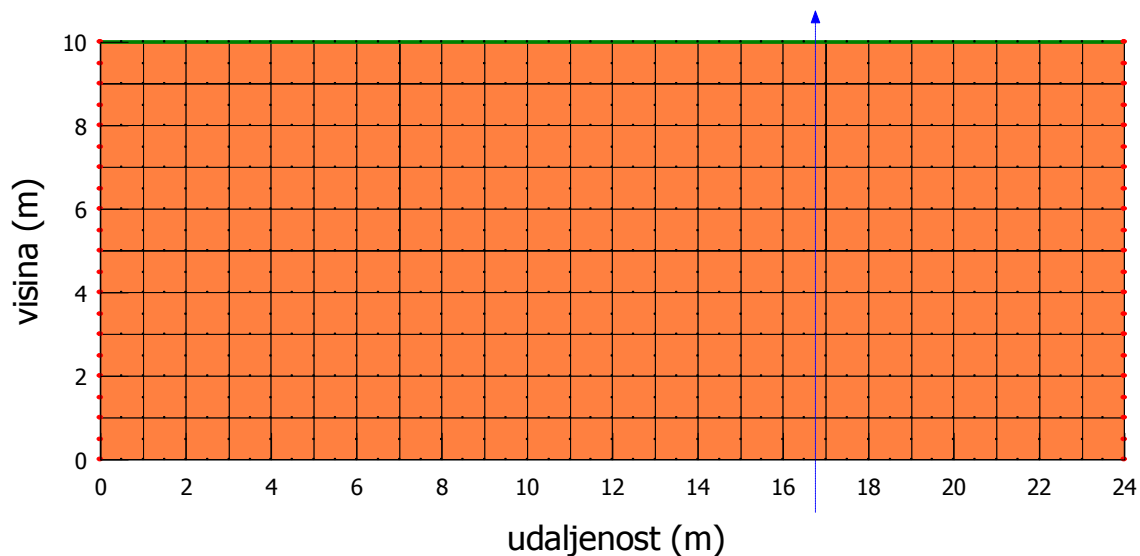
Prvo ćemo analizirati jednodimenzionalno strujanje vode u horizontalnom smjeru kroz homogenu izotropno tlo. Na slici II-2 prikazan je model tla kojemu su na vertikalnim rubovima zadani rubni uvjeti. Na lijevom je rubu modela hidraulički potencijal $H = 15$ m, što određuje hidrostatski tlak vode u tim točkama, s vodom 5 m iznad površine terena. Na desnom je rubu modela hidraulički potencijal $H = 10$ m, što znači da je voda ovdje zadana na površini terena. Time su zadani rubni uvjeti za jednodimenzionalno strujanje vode kroz tlo u horizontalnom smjeru. Koeficijent propusnosti $k = 2 \times 10^{-6}$ m/s.

Rezultati proračuna prikazani su na slikama II-3 do II-5. Na slici II-3 vide se vektori strujanja istih duljina, što znači da je brzina strujanja vode kroz tlo konstantna, pa je i hidraulički gradijent u horizontalnom smjeru konstantan:

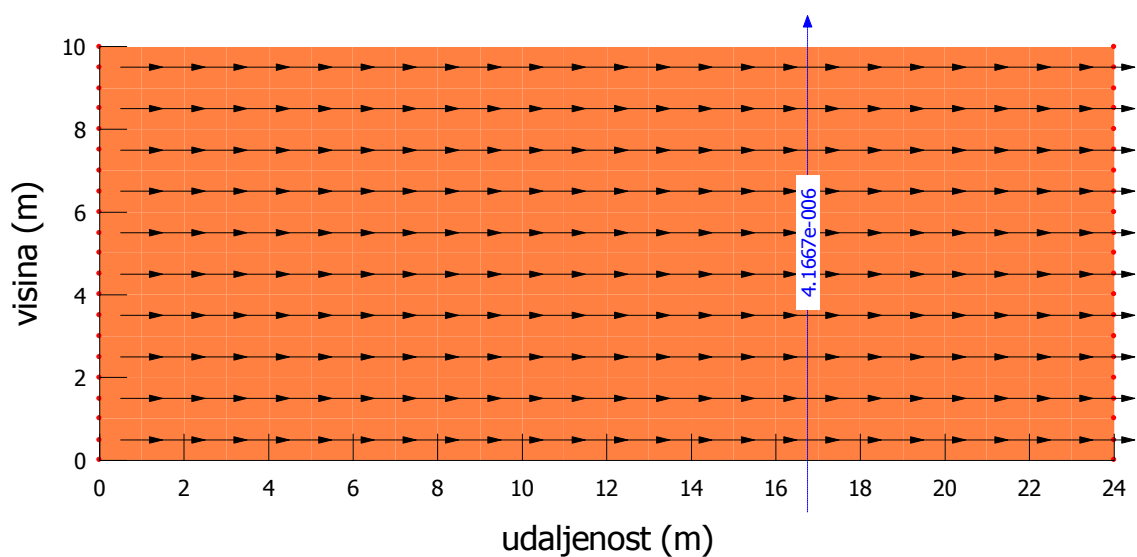
$$i_x = \frac{\Delta H}{\Delta s} = \frac{5}{24} = 0,21$$

Na slici II-3 prikazan je i protok:

$$Q_x = A v_x = 10 \times 1 \times 2 \times 10^{-6} \times 0,21 = 4,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

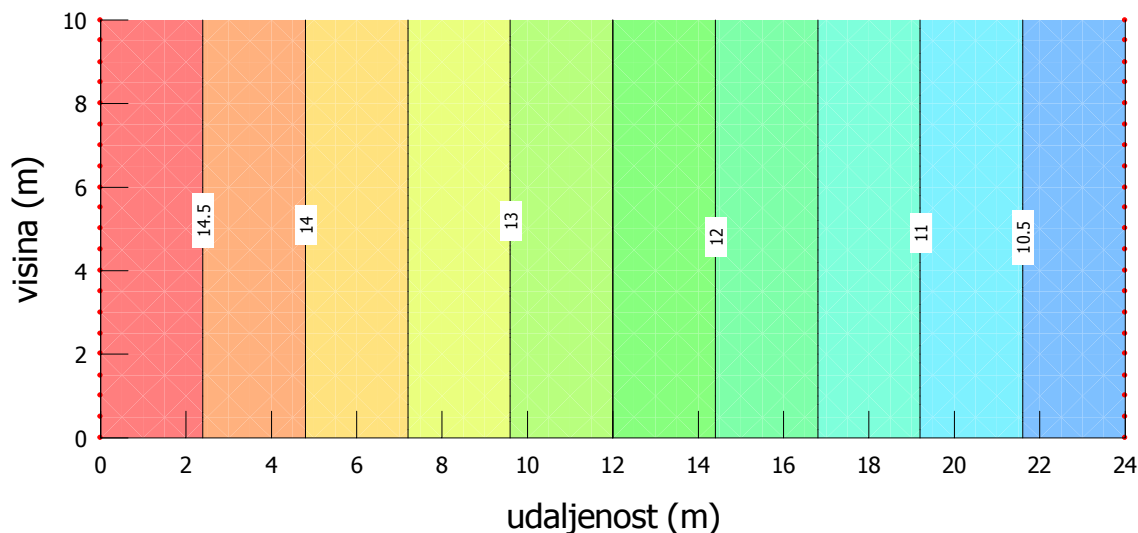


Slika II-2. Model tla za strujanje vode u horizontalnom smjeru

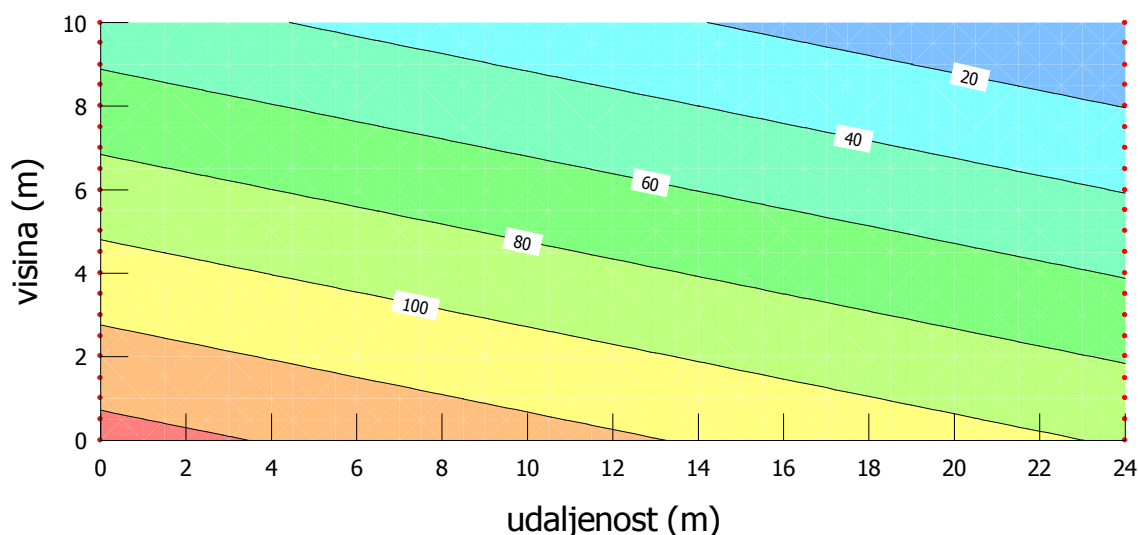


Slika II-3. Vektori strujanja vode kroz tlo i protok (m^3/s)

Na slici II-4 prikazane su ekvipotencijale, koje su vertikalne, okomite na gornju i donju nepropusnu granicu. Raspodjela tlaka vode prikazana je na slici II-5. Kose izolinije tlaka vode rezultat su takvih istih izolinija piezometarske visine za strujanje vode u horizontalnom smjeru.



Slika II-4. Ekvipotencijale (m)



Slika II-5. Izolinije tlaka vode (kPa)

Na slici II-6 prikazan je model uslojenoga tla s istim rubnim uvjetima kao u prethodnom primjeru. Gornji je sloj debljine $D_1 = 4$ m i ima koeficijent propusnosti $k_1 = 2 \times 10^{-6}$ m/s, a donji je sloj debljine $D_2 = 6$ m i ima koeficijent propusnosti $k_2 = 1,6 \times 10^{-5}$ m/s.

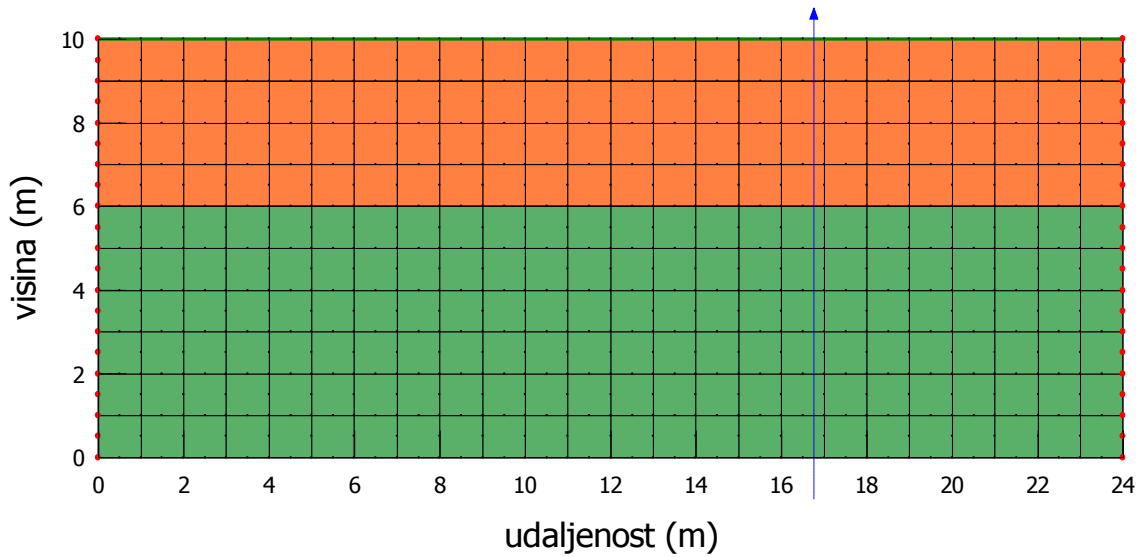
Rezultati ovog proračuna prikazani su na slikama II-7 do II-11. Na slici II-7 prikazani su vektori strujanja. Oni su u oba sloja jednakih duljina, ali međusobno različitih. Budući da je donji sloj propusniji od gornjega, kroz njega su veće brzine strujanja vode. Hidraulički gradijent nije se, međutim, promijenio u odnosu na homogeno tlo te i dalje iznosi $i_x = 0,21$, kao što je prikazano na slici II-8.

Specifične protoke kroz dva sloja tla dobijemo iz Darcyevog zakona:

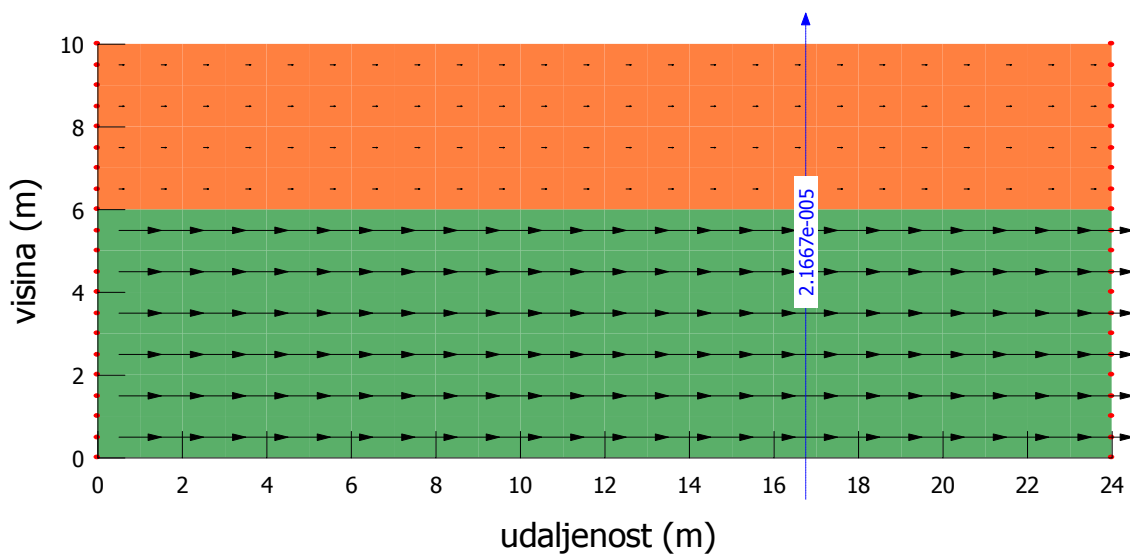
$$v_{x1} = k_1 i_x = 2,0 \times 10^{-6} \times 0,21 = 4,2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$v_{x2} = k_2 i_x = 1,6 \times 10^{-5} \times 0,21 = 3,4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Ove su veličine konstantne kroz svaki sloj i međusobno različite, a raspodjela specifičnog protoka po visini tla prikazana je na slici II-9. U programu SEEP/W za ovaj dijagram, pod *Draw – Graph*, na apscisi treba odabrati *X-Velocity*.



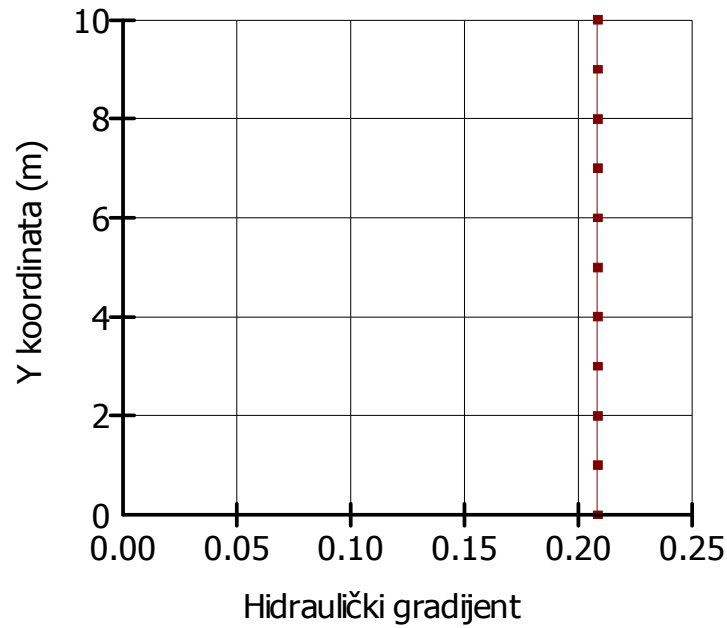
Slika II-6. Model uslojenog (nehomogenog) tla



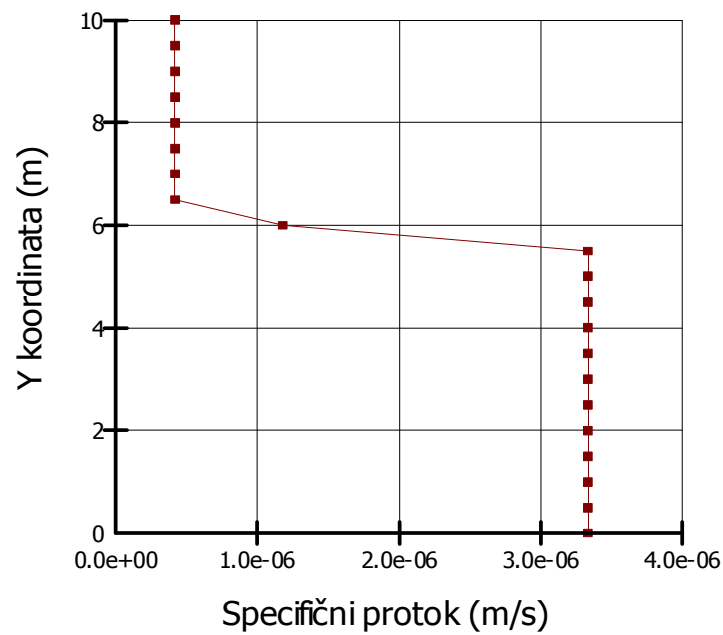
Slika II-7. Vektori strujanja kroz uslojeno tlo i protok (m^3/s)

Sada je protok (slika II-7):

$$Q_x = A_1 v_{x1} + A_2 v_{x2} = 4 \times 1 \times 4,2 \times 10^{-7} + 6 \times 1 \times 3,4 \times 10^{-6} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

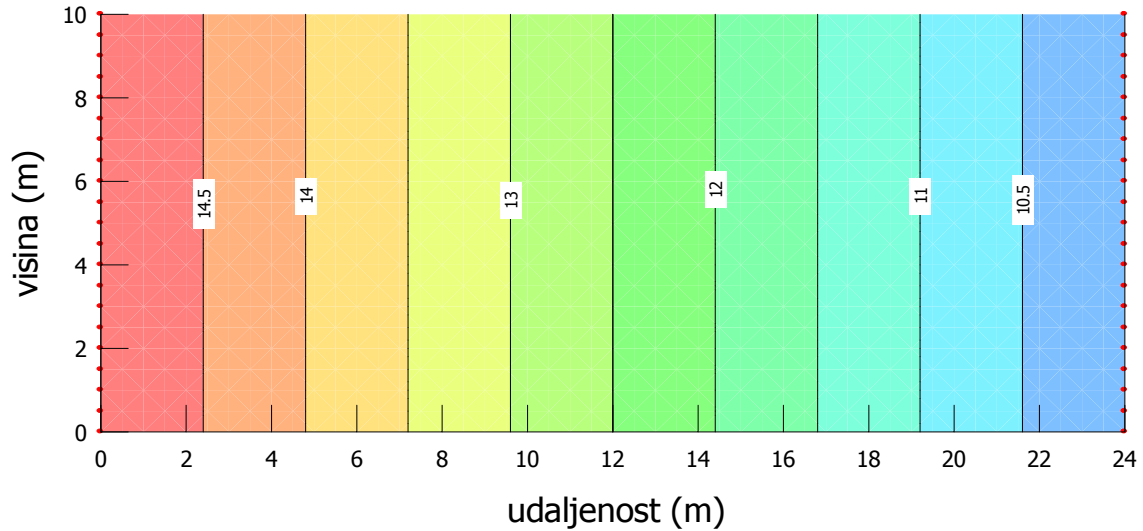


Slika II-8. Hidraulički gradijent i_x za strujanje vode kroz uslojeno tlo u horizontalnom smjeru

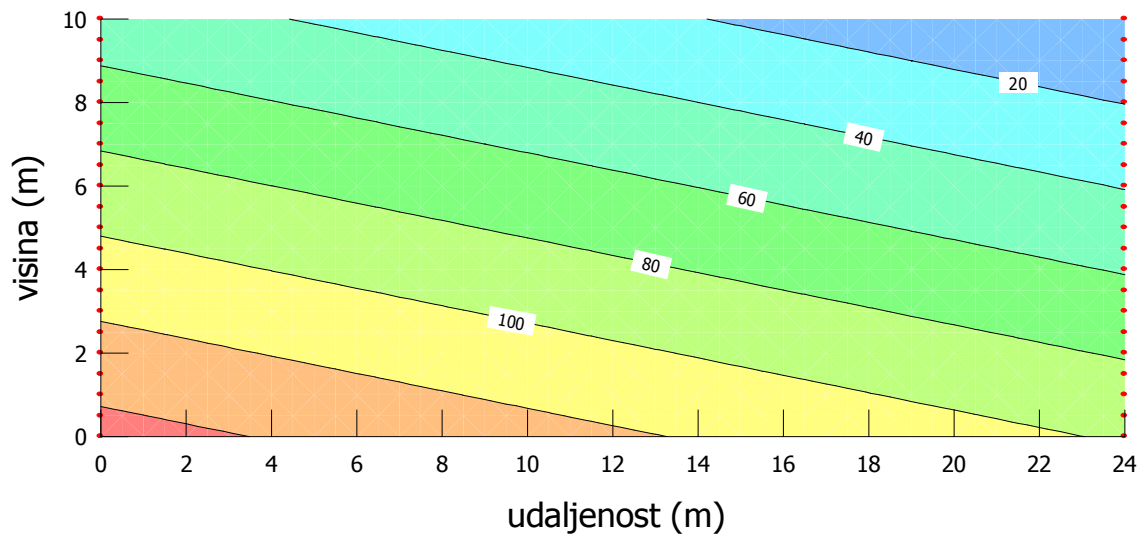


Slika II-9. Specifični protok v_x kroz uslojeno tlo

Na slici II-10 prikazane su ekvipotencijale, koje se u uslojenom tlu nisu promijenile u odnosu na homogeno tlo (slika II-4), kao ni raspodjela tlaka vode u tlu (slika II-11), koja je ista kao za homogeno tlo sa slike II-5.



Slika II-10. Ekvipotencijale (m) za uslojeno tlo



Slika II-11. Izolinije tlaka vode (kPa) za uslojeno tlo

Ako uvedemo koeficijent propusnosti \bar{k}_x za homogeno tlo debljine D umjesto uslojenoga tla iste ukupne debljine, trebali bismo dobiti isti protok kao za uslojeno tlo, pa slijedi da je

$$Q_x = D \times 1 \times \bar{k}_x i_x = (D_1 \times 1 \times k_1 + D_2 \times 1 \times k_2) i_x$$

iz čega slijedi izraz za koeficijent propusnosti \bar{k}_x :

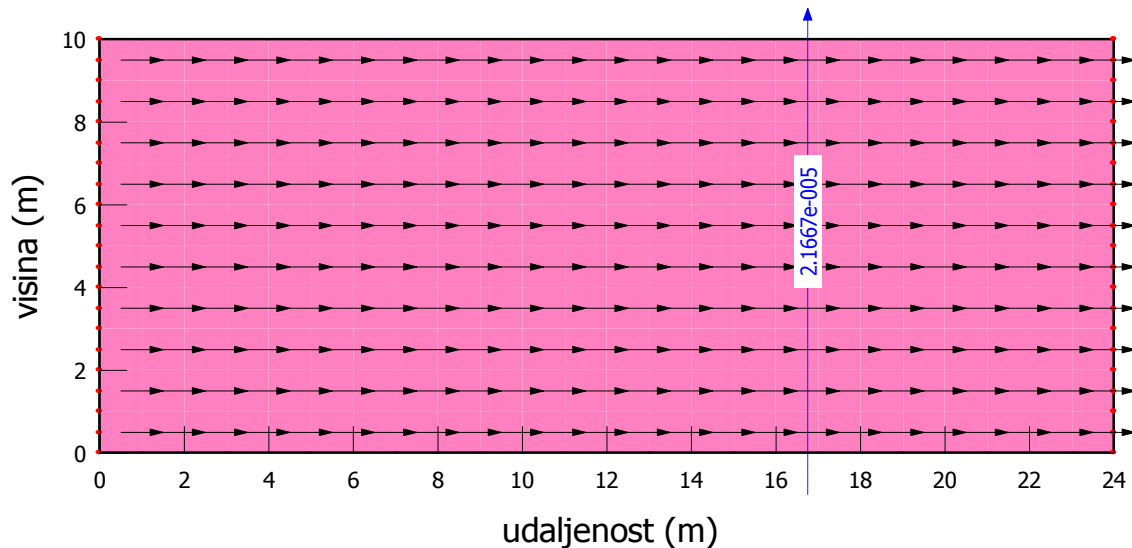
$$\boxed{\bar{k}_x = \frac{D_1 k_1 + D_2 k_2}{D_1 + D_2}} \quad (3)$$

Za više od dva sloja, izraz (3) se analogno proširi na više debljina pojedinih slojeva i odgovarajućih koeficijenata propusnosti.

U gornjem je primjeru uslojenoga tla:

$$\bar{k}_x = \frac{4 \times 2 \times 10^{-6} + 6 \times 1,6 \times 10^{-5}}{10} = 1,04 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Na slici II-12 prikazani su vektori strujanja i protok za homogeno tlo sa zadanim \bar{k}_x . Dobili smo isti protok kao za uslojeno tlo (slika II-7).

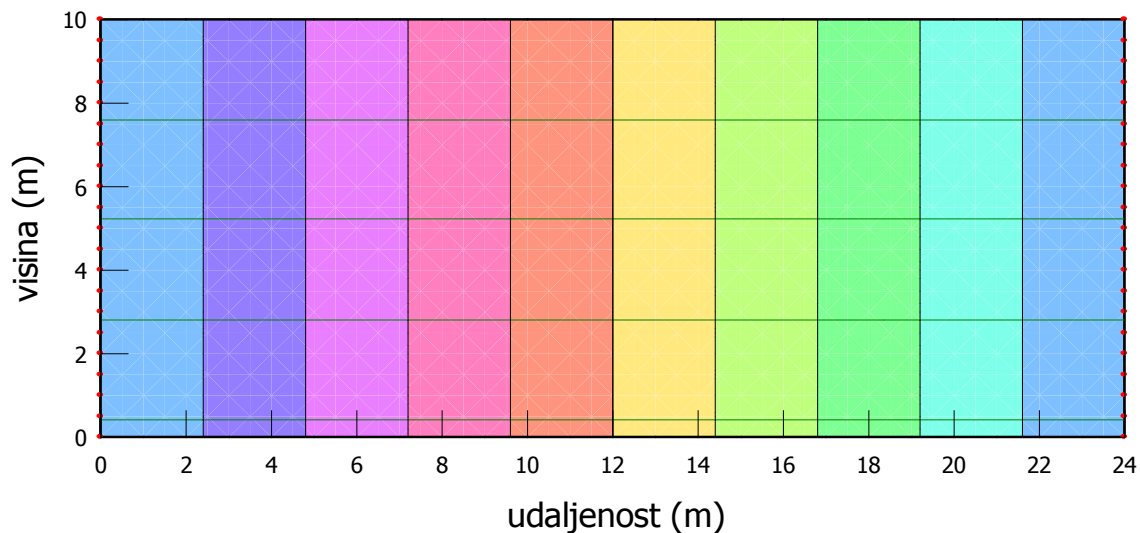


Slika II-12. Vektori strujanja kroz homogeno tlo s \bar{k}_x i protok (m^3/s)

Na slici II-13 prikazana je strujna mreža za homogeno tlo. Iz nje računamo protok:

$$Q_x = \frac{4,167}{10} 1,04 \times 10^{-5} \times 5 = 2,167 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$$

što je ista vrijednost kao na slici II-12.



Slika II-13. Strujna mreža

U sljedećem ćemo primjeru promatrati jednodimenzionalno strujanje vode kroz homogeno izotropno tlo u vertikalnom smjeru. Model tla za ovaj proračun prikazan je na slici II-14. Na gornjem je rubu modela zadan hidraulički potencijal $H = 15$ m, što znači da je iznad gornjeg ruba 5 m vode. Na donjem je rubu modela zadan hidraulički potencijal $H = 4$ m, odnosno visina vode 4 m iznad donjeg ruba. Koeficijent propusnosti $k = 2 \times 10^{-6}$ m/s.

Konstantni vektori strujanja vode kroz tlo prikazani su na slici II-15. Sada je hidraulički gradijent

$$i_y = \frac{11}{10} = 1,1$$

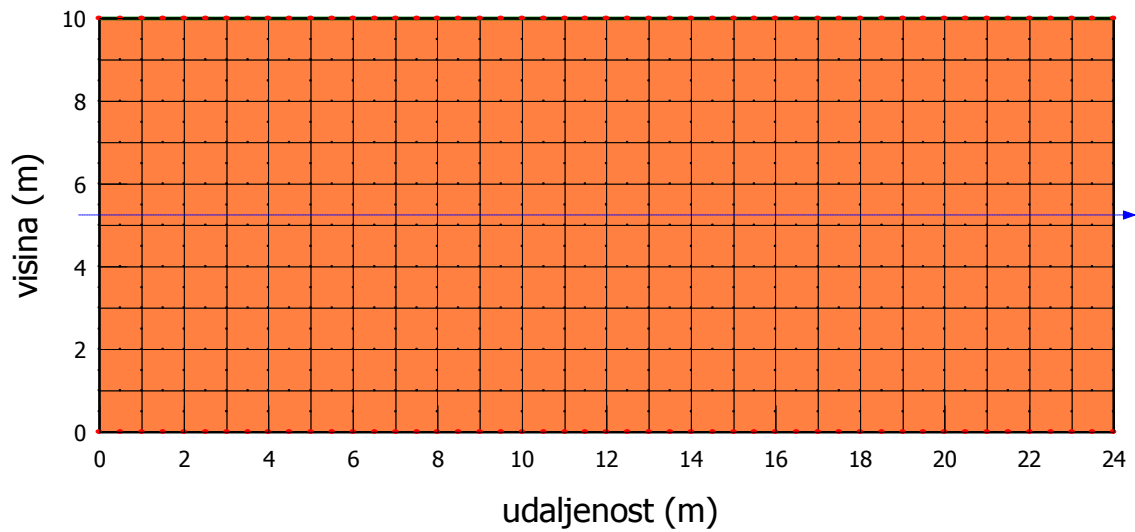
a specifični protok

$$v_y = 2 \times 10^{-6} \times 1,1 = 2,2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

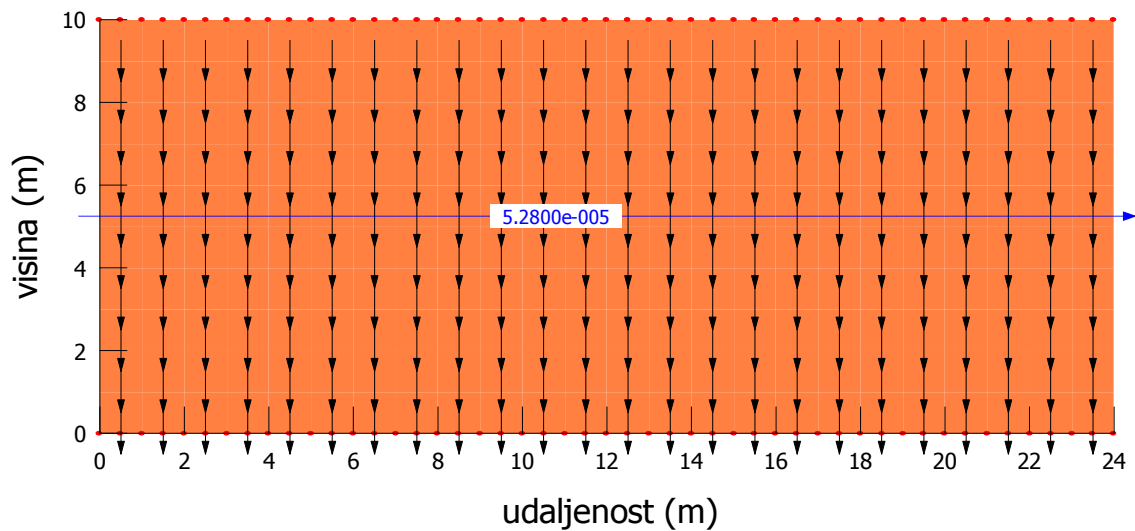
Protok je (slika II-15)

$$Q_y = 24 \times 1 \times 2,2 \times 10^{-6} = 5,28 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

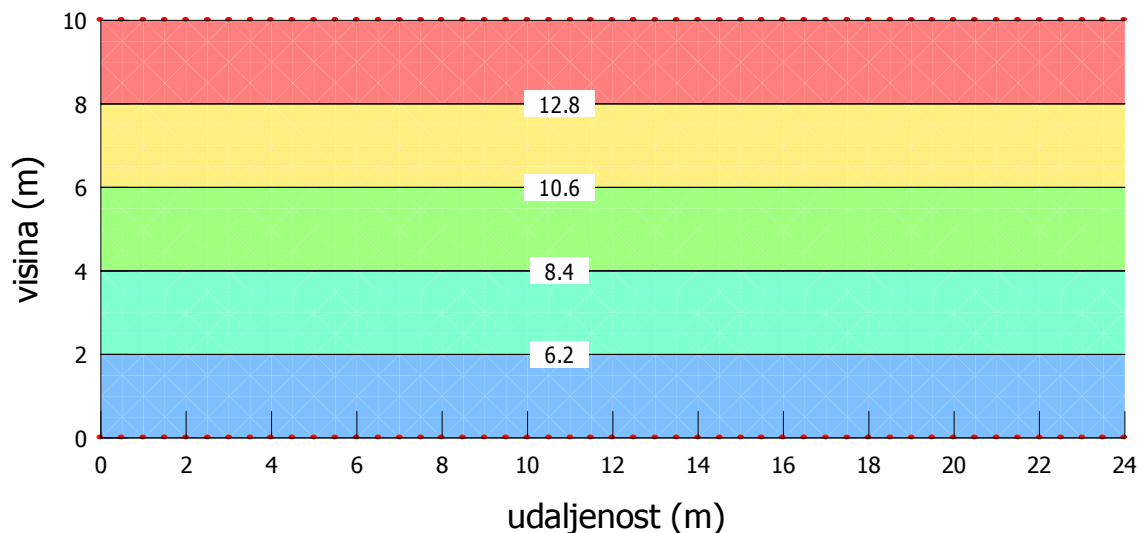
Ekvipotencijale su prikazane na slici II-16, a izolinije tlaka vode na slici II-17.



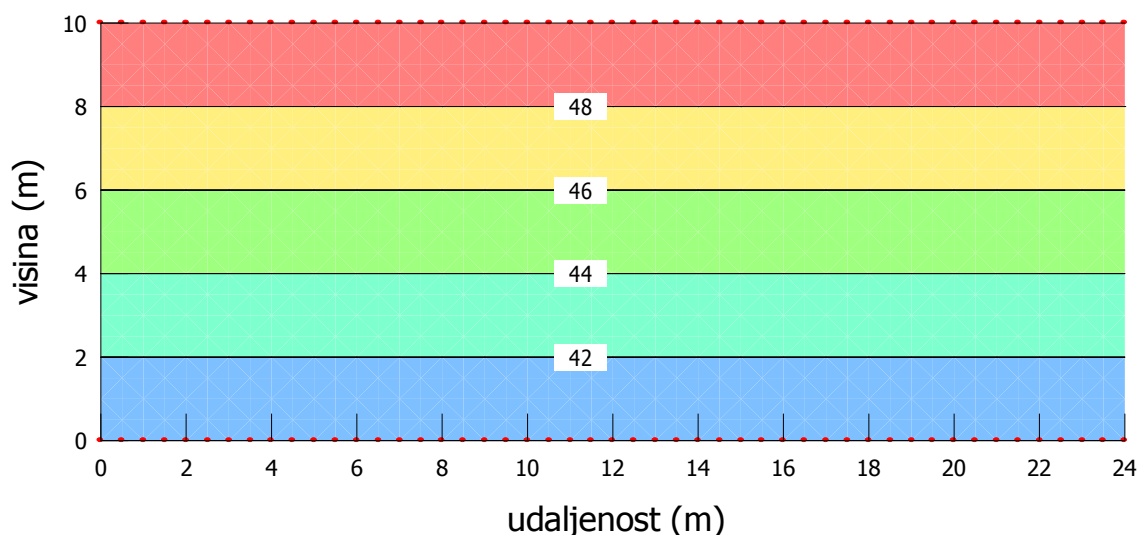
Slika II-14. Model homogenog izotropnog tla



Slika II-15. Vektori strujanja kroz homogeno tlo i protok (m^3/s)



Slika II-16. Ekvipotencijale (m)



Slika II-17. Izolinije tlaka vode (kPa)

Sada ćemo promatrati strujanje vode kroz uslojeno (nehomogeno) tlo u vertikalnom smjeru. Model tla prikazan je na slici II-18, a rubni su uvjeti isti kao u prethodnom primjeru. Gornji je sloj opet debljine $D_1 = 4$ m i ima koeficijent propusnosti $k_1 = 2 \times 10^{-6}$ m/s, a donji je sloj debljine $D_2 = 6$ m i ima koeficijent propusnosti $k_2 = 1,6 \times 10^{-5}$ m/s.

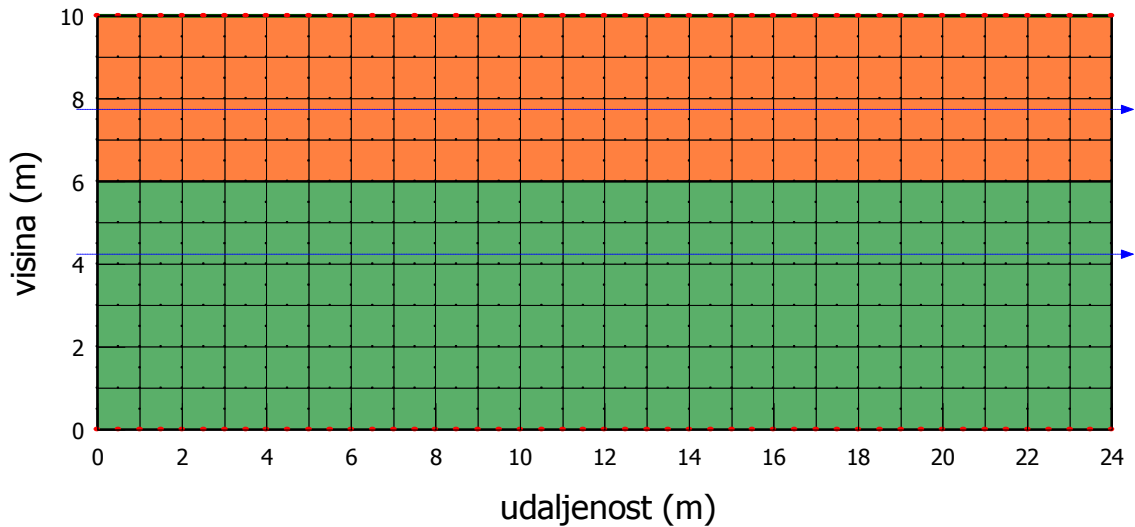
Vektori strujanja i protok za ovaj su proračun prikazani na slici II-19. Specifični protok kroz uslojeno tlo u vertikalnom smjeru je konstantan (kao što se vidi na slici II-20), a kroz oba su sloja protoci isti, što je rezultat istih specifičnih protoka i istih površina poprečnih presjeka obaju slojeva. Kako su koeficijenti propusnosti različiti u dva sloja

tla, a specifični su protoci isti, očito su u njima različiti hidraulički gradijenti. Njihova je raspodjela po visini uslojenog tla prikazana na slici II-21. Znači, za strujanje vode kroz uslojeno tlo u vertikalnom smjeru, vrijedi jednakost

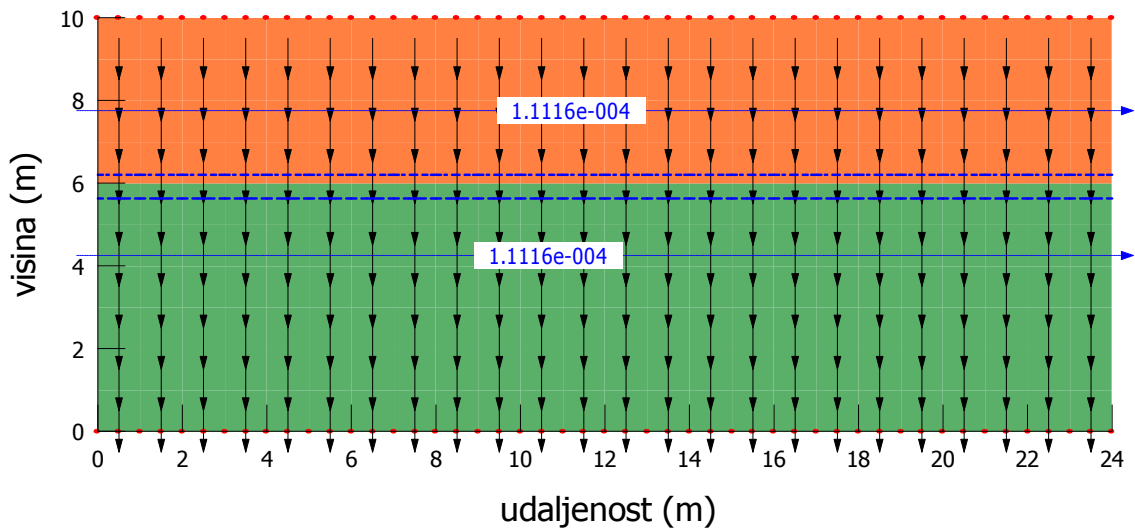
$$k_1 i_1 = k_2 i_2$$

$$2 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_1}{4} = 1,6 \times 10^{-5} \frac{\Delta H_2}{6} \Rightarrow \Delta H_1 = 5,33 \Delta H_2$$

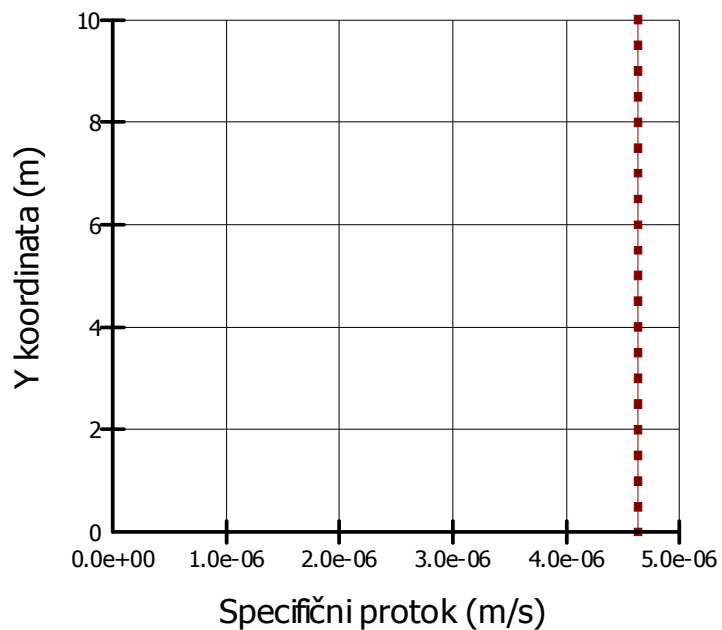
To znači da je u gornjem sloju 5,33 puta veći pad hidrauličkog potencijala nego u donjem sloju, koji ima veći koeficijent propusnosti. Ovo je ilustrirano na slici II-22, gdje su prikazane ekvipotencijale i na slici II-23, gdje se vidi raspodjela hidrauličkog potencijala po visini tla.



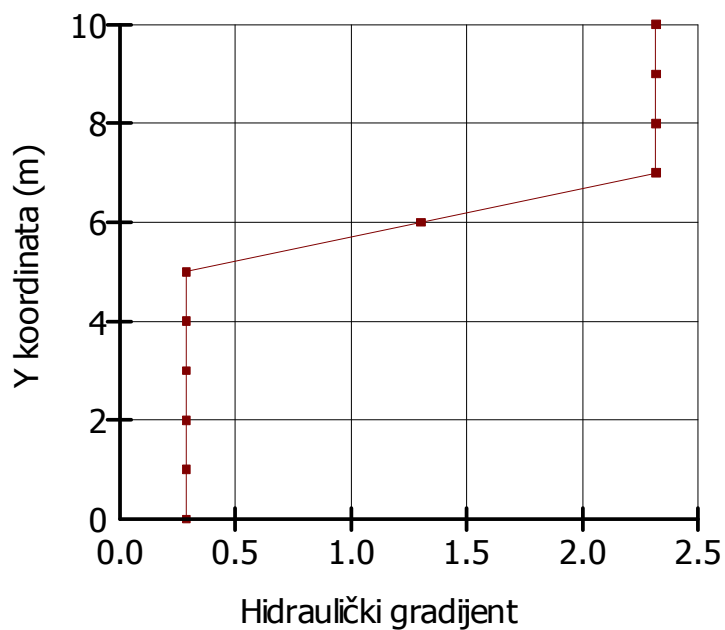
Slika II-18. Model uslojenog tla



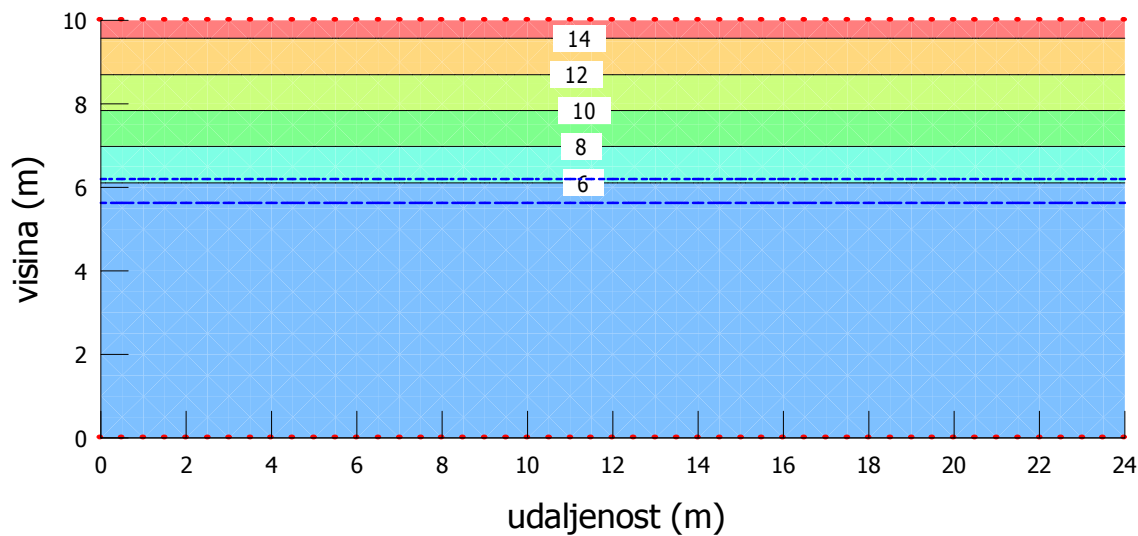
Slika II-19. Vektori strujanja kroz uslojeno tlo i protok (m^3/s)



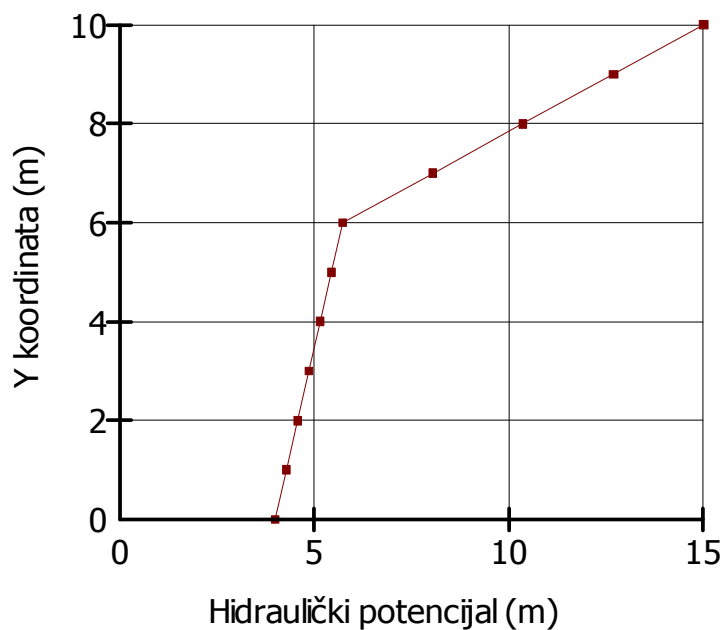
Slika II-20. Specifični protok v_y po visini uslojenog tla



Slika II-21. Hidraulički gradijent i_y po visini uslojenog tla



Slika II-22. Ekvipotencijale (m) u uslojenom tlu



Slika II-23. Hidraulički potencijal po visini uslojenog tla

Kako je ukupan pad potencijala kroz oba sloja tla $\Delta H = 11$ m, mora vrijediti da je

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$\Delta H = 5,33\Delta H_2 + \Delta H_2 \Rightarrow \Delta H_2 = \frac{11}{6,33} = 1,74 \text{ m i } \Delta H_1 = 5,33 \times 1,74 = 9,27 \text{ m}$$

Onda je

$$i_1 = \frac{9,27}{4} = 2,3$$

$$i_2 = \frac{1,74}{6} = 0,3$$

kao što je prikazano na slici II-21.

Specifični je protok

$$v_y = k_1 i_1 = 2 \times 10^{-6} \times 2,3 = 4,6 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (= k_2 i_2)$$

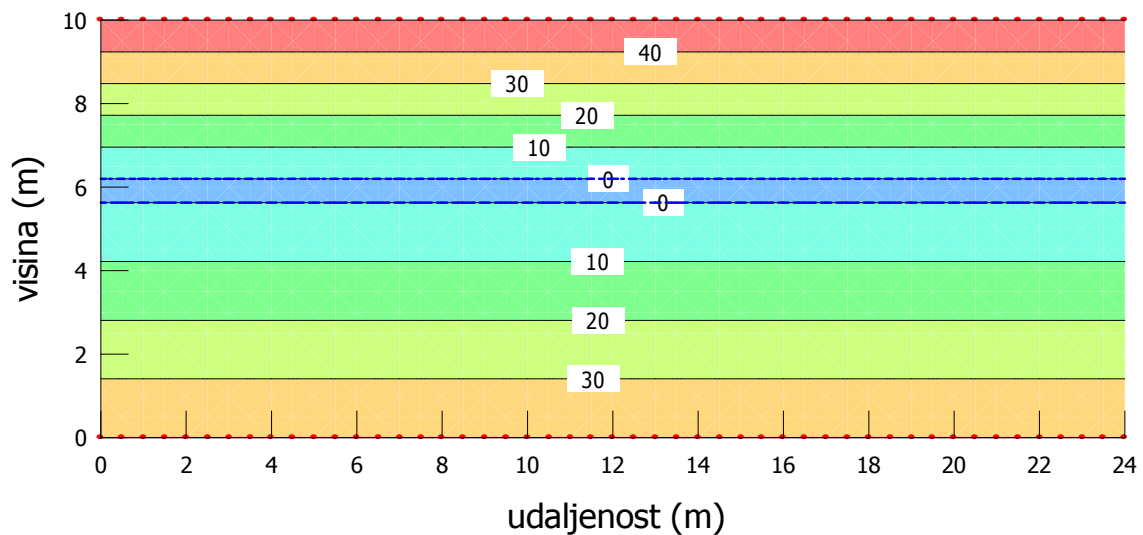
kao što je prikazano na slici II-20.

Protok je

$$Q_y = 24 \times 4,6 \times 10^{-6} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

kao što je prikazano na slici II-19.

Na slici II-19 još treba uočiti da su na njoj ucrtane dvije razine podzemne vode, a to se vidi i na slici II-24, gdje je prikazana raspodjela tlaka vode po visini uslojenog tla.



Slika II-24. Izolinije tlaka vode (kPa)

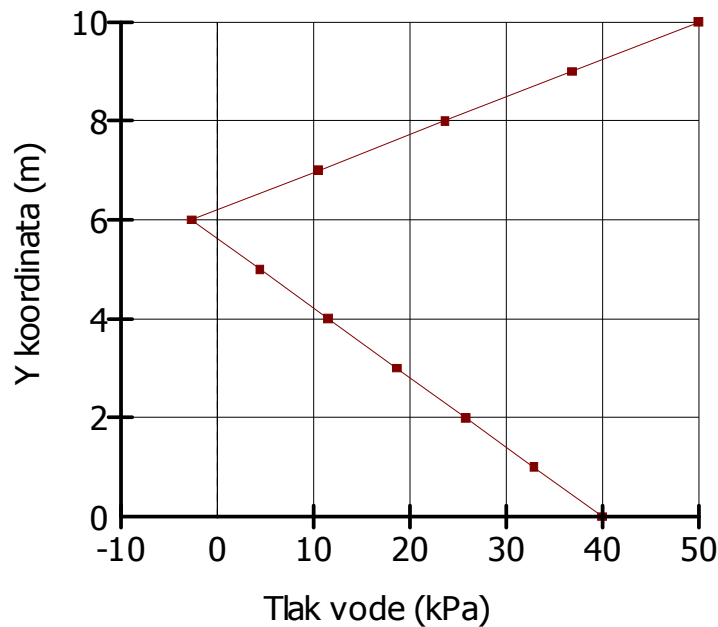
Naime, na granici dvaju slojeva ($y = 6$ m), hidraulički je potencijal

$$H = 15 - 9,27 = 5,73 \text{ m}$$

pa je piezometarska visina za $z_g = 6$ m

$$P = 5,73 - 6 = -0,27 \text{ m}$$

tako da je tlak vode negativan i iznosi -2,7 kPa. U gornjem sloju tlak vode od granice dvaju slojeva prema gore raste od -2,7 kPa do 50 kPa, a u donjem sloju od granice dvaju slojeva prema dolje raste od -2,7 kPa do 40 kPa, kao što je prikazano na slici II-25. Ovo objašnjava dvije razine podzemne vode u ovom primjeru, koje spajaju točke u kojima je tlak vode nula.



Slika II-25. Tlak vode po visini uslojenog tla

Sada ćemo uvesti koeficijent propusnosti \bar{k}_y za homogeno tlo debljine D umjesto uslojenoga tla iste ukupne debljine. Ovdje očekujemo dobiti istu vrijednost specifičnog protoka kao za uslojeno tlo, dakle

$$v_y = \bar{k}_y \bar{i}_y = k_1 i_1 = k_2 i_2$$

$$\Rightarrow i_1 = \frac{\bar{k}_y}{k_1} \bar{i}_y \quad \text{i} \quad i_2 = \frac{\bar{k}_y}{k_2} \bar{i}_y$$

Kako je

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$\Rightarrow \bar{i}_y D = i_1 D_1 + i_2 D_2 = \frac{\bar{k}_y}{k_1} \bar{i}_y D_1 + \frac{\bar{k}_y}{k_2} \bar{i}_y D_2$$

Iz ovoga dobijemo izraz za koeficijent propusnosti \bar{k}_y :

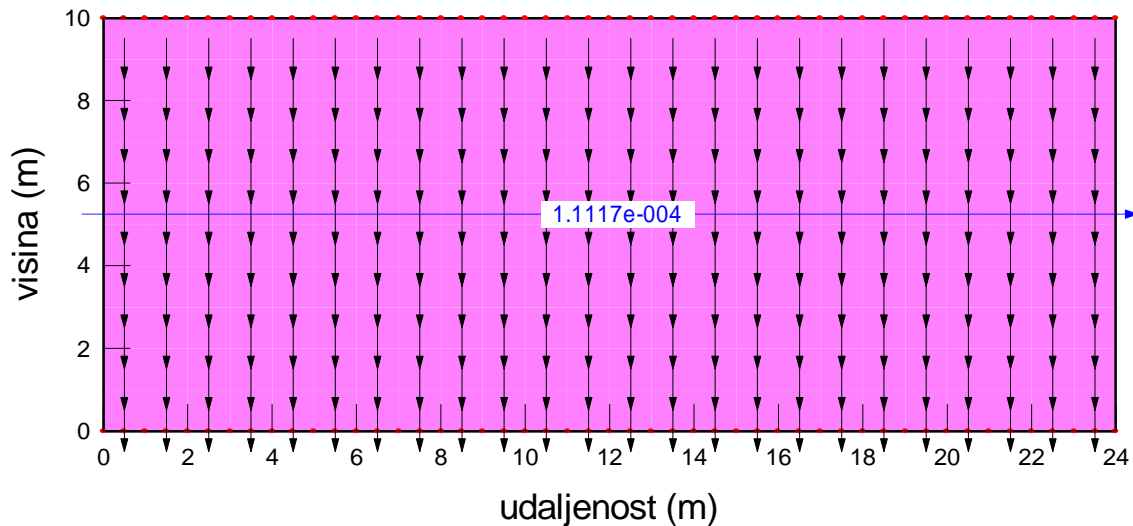
$$\boxed{\bar{k}_y = \frac{D_1 + D_2}{\left(\frac{D_1}{k_1}\right) + \left(\frac{D_2}{k_2}\right)}} \quad (4)$$

Za više od dva sloja, izraz (4) se analogno proširi na više debljina pojedinih slojeva i odgovarajućih koeficijenata propusnosti.

U gornjem je primjeru uslojenoga tla:

$$\bar{k}_y = \frac{10}{\left(\frac{4}{2 \times 10^{-6}}\right) + \left(\frac{6}{1,6 \times 10^{-5}}\right)} = 4,211 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Na slici II-26 prikazani su vektori strujanja i protok za homogeno tlo sa zadanim \bar{k}_y . Dobili smo isti protok kao za uslojeno tlo (slika II-19).



Slika II-26. Vektori strujanja kroz homogeno tlo i protok (m^3/s)

Hidraulički gradijent za homogeno tlo je

$$\bar{i}_y = \frac{11}{10} = 1,1$$

specifični protok je

$$v_y = 4,211 \times 10^{-6} \times 1,1 = 4,6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

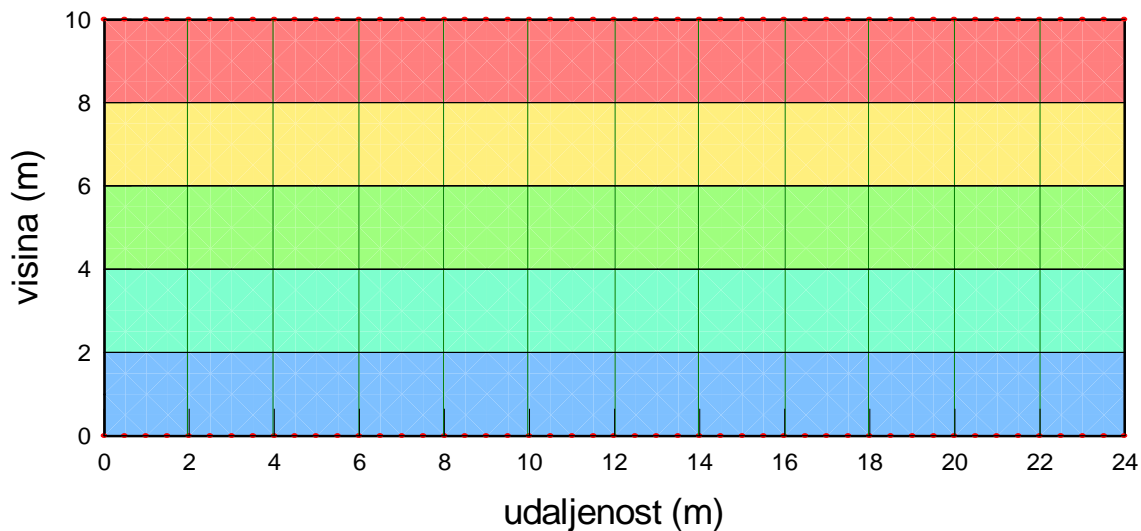
a protok

$$Q_y = 24 \times 1 \times 4,6 \times 10^{-6} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

isto kao za uslojeno tlo.

Strujna je mreža prikazana na slici II-27. Iz nje je protok također

$$Q_y = \frac{12}{5} 4,211 \times 10^{-6} \times 11 = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}'$$



Slika II-27. Strujna mreža