

5.1 Zadaci

1 Iskop u horizontalno uslojenom tlu.

Na lokaciji tlo se može smatrati horizontalno uslojenim: površina terena je horizontalna i granice između slojeva su horizontalne ravnine. Površinski sloj je pijesak dobre graduiranosti ($\gamma=18\text{kN/m}^3$), slijedi sloj gline srednje plastičnosti ($\gamma=19\text{kN/m}^3$), te sloj šljunka jednolike graduiranosti ($\gamma=20\text{kN/m}^3$). Razina podzemne vode je u površinskom sloju pijeska. Tijekom iskopa ispod razine podzemne vode treba crpiti podzemnu vodu da bi se radilo u suhom. Promatra se prvo početna situacija prije iskopa, a potom široka građevna jama i široki iskop dubine 2 m, 4 m, 6 m, 8 m. Provjerava se može li se **iskop** raditi bez opasnosti ili treba poduzeti mjere zaštite obzirom na opasnost od hidrauličkog sloma.

Prije iskopa

Razina vode je na 2 m dubine.

Izaberemo li za referentnu ravninu horizontalu na dubini od 20 m, ukupni potencijal prije iskopa jednak je $h=20\text{m}-2\text{m}=18\text{m}$ u svim slojevima.

Geodetski potencijal jednostavno odredimo kao udaljenost od referentne ravnine, npr. na razini podzemne vode, za dubinu od 2 m, $h_g(2\text{m})=20\text{m}-2\text{m}=18\text{m}$.

Tlak porne vode je na razini podzemne vode jednak 0, ali na svakoj drugoj dubini možemo izračunati

$$h_p = h - h_g \quad \text{ili} \quad u = \gamma_w h_p.$$

Ovdje se kapilarno dizanje smatra zanemarivim.

Totalna naprezanja na neopterećenoj površini jednaka su nuli, a s dubinom rastu s prirastom jedinične težine odgovarajućeg tla:

$$\sigma_v(0\text{m}) = 0\text{kPa}$$

$$\sigma_v(2\text{m}) = \sigma_v(0\text{m}) + \gamma(2\text{m}-0\text{m}) \times (2\text{m} - 0\text{m}) = 0\text{kPa} + 18\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 36\text{kPa}$$

$$\sigma_v(4\text{m}) = 36\text{kPa} + 18\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 72\text{kPa}$$

$$\sigma_v(6\text{m}) = 72\text{kPa} + 19\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 110\text{kPa}$$

$$\sigma_v(8\text{m}) = 110\text{kPa} + 19\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 148\text{kPa}$$

$$\sigma_v(10\text{m}) = 148\text{kPa} + 19\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 186\text{kPa}$$

$$\sigma_v(20\text{m}) = 186\text{kPa} + 20\text{kN/m}^3 \times 10\text{m} = 386\text{kPa}$$

Efektivna naprezanja možemo naći na dva načina: kao razliku totalnih naprezanja i tlaka porne vode:

$$\sigma'_v(0\text{m}) = \sigma_v(0\text{m}) - u(0\text{m}) = 0\text{kPa} - 0\text{kPa} = 0\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(2\text{m}) = \sigma_v(2\text{m}) - u(2\text{m}) = 36\text{kPa} - 0\text{kPa} = 36\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(4\text{m}) = \sigma_v(4\text{m}) - u(4\text{m}) = 72\text{kPa} - 20\text{kPa} = 52\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(6\text{m}) = \sigma_v(6\text{m}) - u(6\text{m}) = 110\text{kPa} - 40\text{kPa} = 70\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(8\text{m}) = \sigma_v(8\text{m}) - u(8\text{m}) = 148\text{kPa} - 60\text{kPa} = 88\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(10\text{m}) = \sigma_v(10\text{m}) - u(10\text{m}) = 186\text{kPa} - 80\text{kPa} = 106\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(20\text{m}) = \sigma_v(20\text{m}) - u(20\text{m}) = 386\text{kPa} - 180\text{kPa} = 206\text{kPa}$$

ili zbrajanjem efektivnih jediničnih težina

$$\sigma'_v(0\text{m}) = 0\text{kPa}$$

od 0m do 2m tlak porne vode je 0, ako možemo zanemariti kapilarno djelovanje, dodajemo jediničnu težinu tla:

$$\sigma'_v(2\text{m}) = \sigma'_v(0\text{m}) + \gamma(2\text{m}-0\text{m}) \times (2\text{m} - 0\text{m}) = 0\text{kPa} + 18\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 36\text{kPa}$$

ispod 2m imamo podzemnu vodu ali nema strujanja, dodajemo uronjenu jediničnu težinu tla

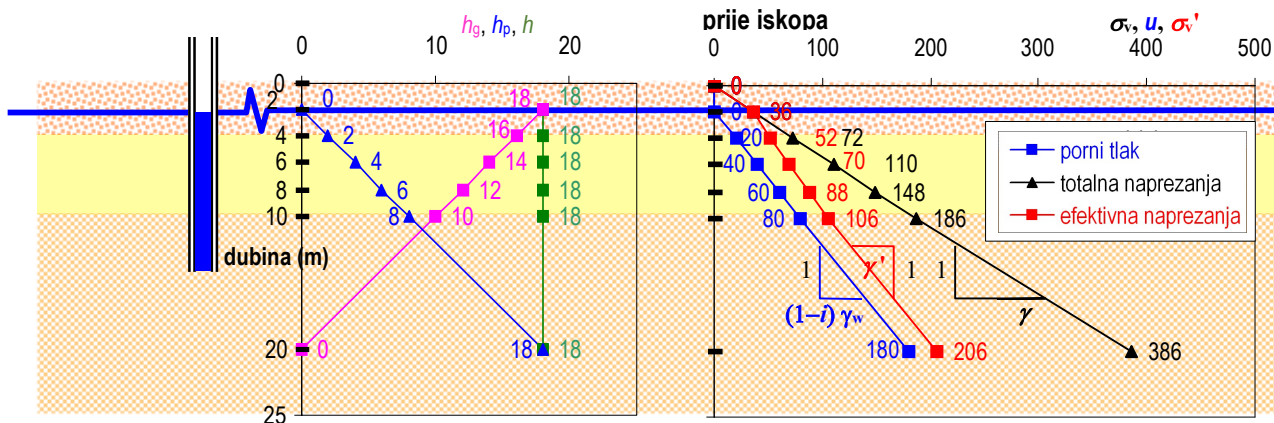
$$\sigma'_v(4\text{m}) = 36\text{kPa} + (18-10)\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 52\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(6\text{m}) = 52\text{kPa} + (19-10)\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 70\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(8\text{m}) = 70\text{kPa} + (19-10)\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 88\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(10\text{m}) = 88\text{kPa} + (19-10)\text{kN/m}^3 \times 2\text{m} = 106\text{kPa}$$

$$\sigma'_v(20\text{m}) = 106\text{kPa} + (20-10)\text{kN/m}^3 \times 10\text{m} = 206\text{kPa}$$



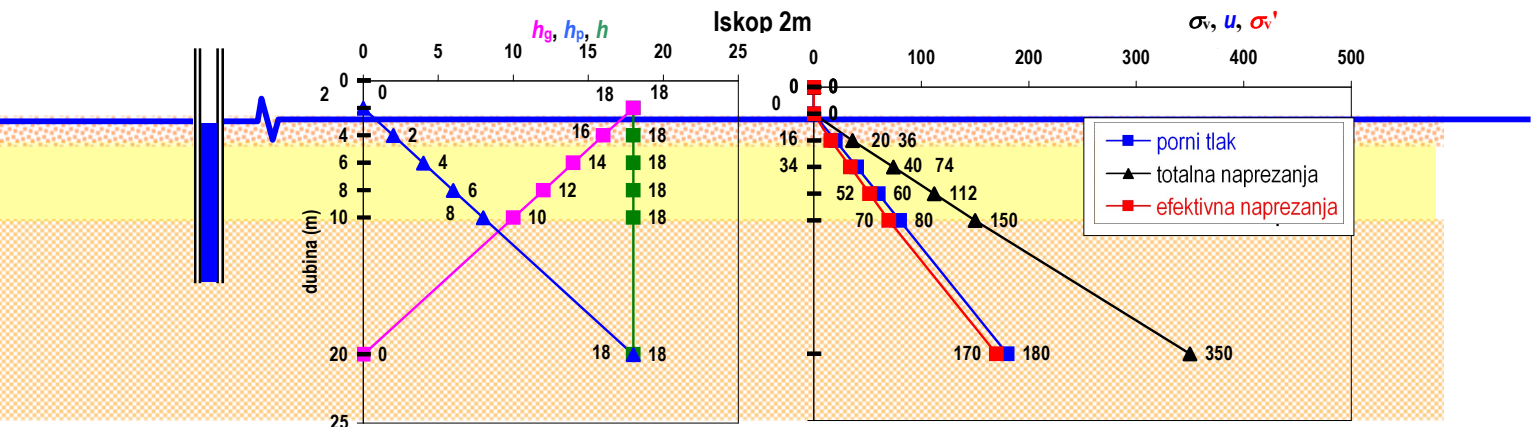
Iskop 2 m

Dubina se mjeri i dalje od početne površine terena. Ne mijenjamo li referentnu ravninu, ne mijenjaju se ni h_g . Razina vode je na 2 m od početne površine terena, sada na površini terena. Nema promjena u h , h_g , h_p . Totalna naprezanja na novoj površini jednaka su nuli, a sa dubinom rastu s prirastom jedinične težine odgovarajućeg tla, ali iskopom rasterećeni su svi slojevi za početno $\sigma_v(2m) = 36kPa$. U novoj situaciji

$\sigma_v(2m) = 0kPa$
 $\sigma_v(4m) = 0kPa + 18kN/m^3 \times 2m = 36kPa$
 ili $\sigma_v(4m) = 72kPa - 36kPa = 36kPa$
 $\sigma_v(6m) = 36kPa + 19kN/m^3 \times 2m = 74kPa$

ili $\sigma_v(6m) = 10kPa - 36kPa = 74kPa$
 $\sigma_v(8m) = 74kPa + 19kN/m^3 \times 2m = 112kPa$
 ili $\sigma_v(8m) = 148kPa - 36kPa = 112kPa$
 $\sigma_v(10m) = 112kPa + 19kN/m^3 \times 2m = 150kPa$
 ili $\sigma_v(10m) = 186kPa - 36kPa = 150kPa$
 $\sigma_v(20m) = 150kPa + 20kN/m^3 \times 10m = 350kPa$
 ili $\sigma_v(20m) = 386kPa - 36kPa = 350kPa$

Tlak porne vode se ne mijenja iskopom do 2 m. Efektivna naprezanja promijene se zbog rasterećenja i smanjenja totalnih naprezanja.



Iskop 4 m

Iskopom se dolazi do slabo propusnog sloja. Razina vode spušta se za dva metra crpljenjem. Ukupni potencijal tako se smanjuje za 2 m na površini terena. Budući da se ispod slabo propusnog sloja nalazi jako propusni sloj koji se prihranjuje iz rijeke, ukupni potencijal u donjem sloju ostaje nepromijenjen. Na novoj površini terena $h(4m) = 20m - 4m = 16m$. U donjem sloju $h(10m) = 18m$ kao i prije iskopa. Zbog razlike ukupnih potencijala, $\Delta h = 18m - 16m = 2m$, ostvaruje se strujanje i to prema manjem potencijalu, dakle vertikalno prema gore. Duljina strujanja je $\Delta l = 10m - 4m = 6m$. Ako je slabo propusni sloj homogen, hidraulički gradijent jednak je $i = -\Delta h / \Delta l = -2m / 6m = -0,33$. Piezometarski potencijal možemo dobiti kao razliku $h_p = h - h_g$ iz čega dobijemo tlak porne vode, $u = \gamma_w h_p$. Na primjer $h_p(6m) = h(6m) - h_g(6m) = (18m - 0,33 \times (6m - 2m)) - 14m = 2,7m \Rightarrow u(6m) = 27kPa$.

Totalna naprezanja smanje se za slijedećih 36kPa, tj. za početnih $\sigma_v(4m) = 72kPa$ po cijeloj dubini.

Efektivna naprezanja možemo opet naći na dva načina:

kao razliku totalnih naprezanja i tlaka porne vode:
 $\sigma'_v(6m) = \sigma_v(6m) - u(6m) = 38kPa - 27kPa = 11kPa$
 $\sigma'_v(10m) = \sigma_v(10m) - u(10m) = 114kPa - 80kPa = 34kPa$
 $\sigma'_v(20m) = \sigma_v(20m) - u(20m) = 314kPa - 180kPa = 134kPa$
 ili zbrajanjem efektivnih jediničnih težina
 $\sigma'_v(4m) = 0kPa$
 od 4m do 10m zbog strujanja, dodajemo jediničnu efektivnu težinu tla,
 $\gamma'' = \gamma - \gamma_w + i\gamma_w = (19 - 10 - 0,33 \times 10)kN/m^3 = 5,7kN/m^3$
 $\sigma'_v(6m) = 0kPa + (19 - 10 - 0,33 \times 10)kN/m^3 \times (6m - 4m) = 11kPa$
 $\sigma'_v(10m) = 11kPa + 5,7kN/m^3 \times 4m = 34kPa$
 ispod 10m imamo podzemnu vodu, ali nema strujanja, pa dodajemo uronjenu jediničnu težinu tla
 $\sigma'_v(10m) = 34kPa + (20 - 10)kN/m^3 \times (20 - 10)m = 134kPa$

Iskop 6 m

Iskopom se stanjuje slabo propusni sloj. Razina vode spušta se za još dva metra crpljenjem. Ukupni potencijal tako se na površini terena smanjuje za još 2m. Budući da se ispod slabo propusnog sloja nalazi

jako propusni sloj koji se prihranjuje iz rijeke, ukupni potencijal u donjem sloju ostaje nepromijenjen. Na novoj površini terena $h(6m) = 18m - 4m = 14m$. U donjem sloju $h(10m) = 18m$ kao i prije iskopa. $\Delta h = 18m - 14m = 4m$, $\Delta l = 10m - 6m = 4m$.

Naprezanja u tlu.

5-9

Hidraulički gradijent jednak je $i = -\Delta h / \Delta l = -4\text{m}/4\text{m} = -1$.
 Totalna naprezanja smanje se za početna naprezanja na toj dubini, $\sigma_v(6\text{m}) = 110\text{kPa}$, po cijeloj dubini.

Efektivna naprezanja možemo opet naći na dva načina: kao razliku totalnih naprezanja i tlaka pome vode ili zbrajanjem efektivnih jediničnih težina. Od 6m do 10m zbog strujanja jedinična efektivna težina tla bila bi:

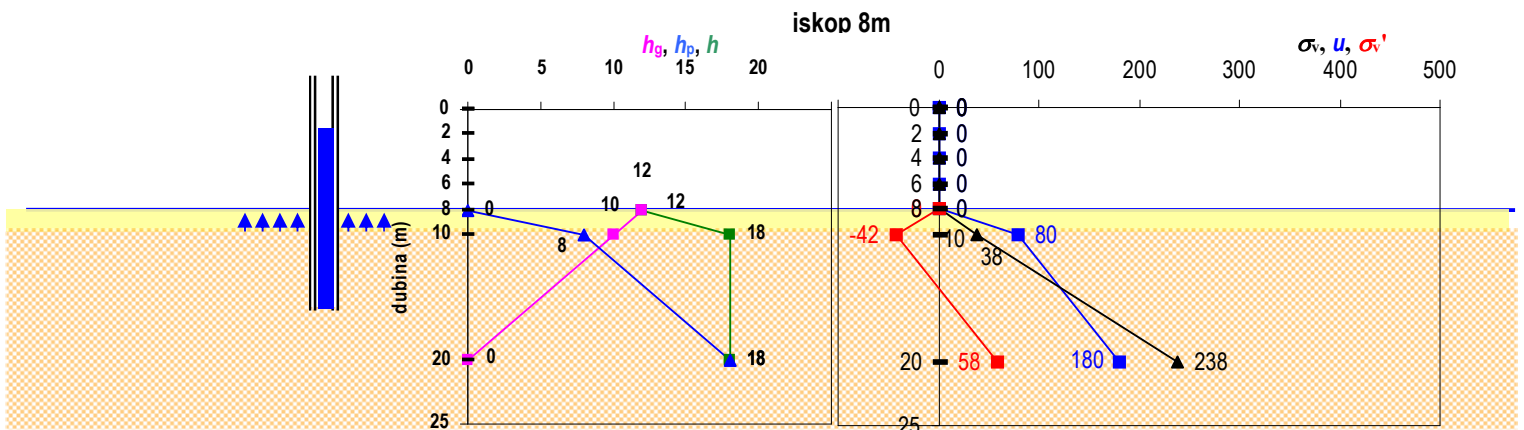
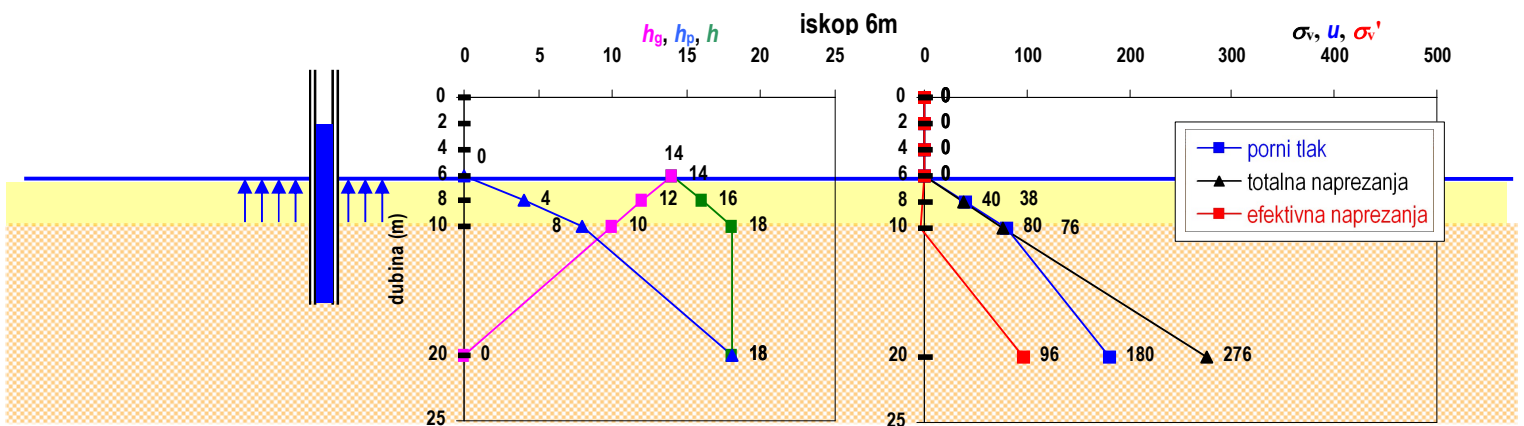
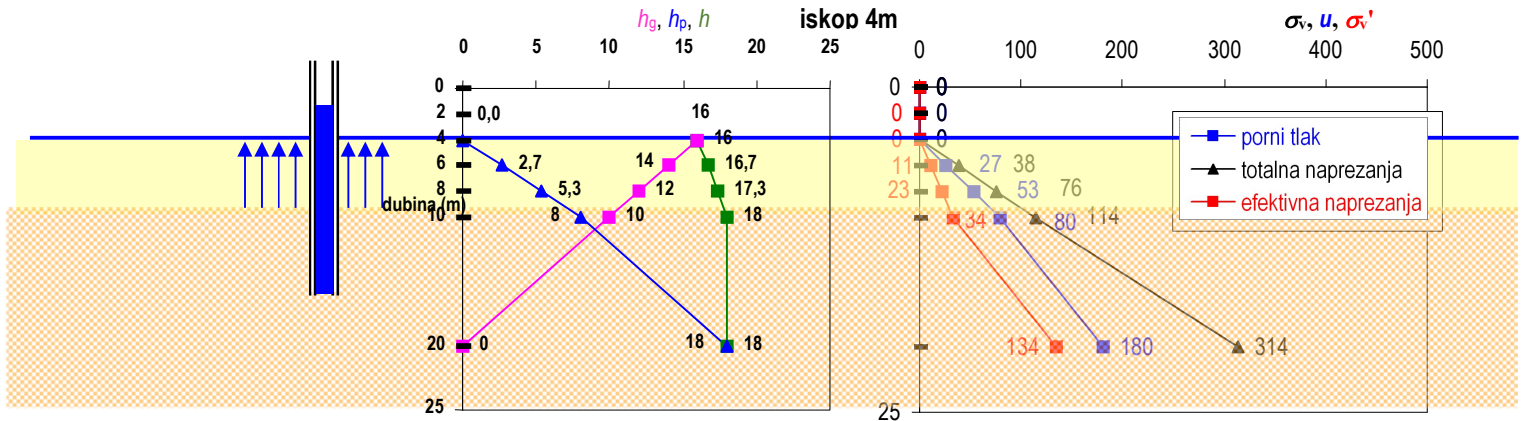
$$\gamma'' = \gamma - \gamma_w + i\gamma_w = (19 - 10 - 1 \times 10)\text{kN/m}^3 = -1\text{ kN/m}^3 < 0$$

dakle, rezultanta težine i djelovanja vode u površinskom sloju usmjerena je vertikalno prema gore.

$$\sigma'_v(6\text{m}) = 0\text{kPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_v(10\text{m}) &= \sigma_v(10\text{m}) - u(10\text{m}) = \\ &= 19\text{kN/m}^3 \times (10\text{m} - 6\text{m}) - 80\text{kPa} = \\ &= 76\text{kPa} - 80\text{kPa} = -4\text{kPa} < 0\text{kPa}. \end{aligned}$$

Kako je površina neopterećena, efektivna naprezanja postaju negativna, dakle rezultanta sila na površinski sloj tla usmjeren je vertikalno gore, što predstavlja hidraulički slom dna građevne jame.



Kako se može izbjeći hidraulički slom? Koje veličine bi trebalo promijeniti da se dovoljno smanji jedinična efektivna težina tla odnosno vertikalno efektivno naprezanje? Zaštita građevnih jama predstavlja zanimljivo područje geotehnike gdje se primjenjuju ovakva znanja iz mehanike tla.

Pri promjeni razine podzemne vode u tlu crpljenjem dolazi do razlike potencijala i strujanja. Budući da je sloj gline bitno manje propustan, strujanje kroz pijesak i šljunak zanemarivo je brzine, te tom strujanju odgovara zanemarivo mala promjena ukupnog potencijala kroz jako propusno tlo. Drugačije rečeno, strujanje i promjena ukupnih visina tj. potencijala odvija se kroz sloj posve male propusnosti između dva jako propusna sloja. Strujanje se odvija prema manjem ukupnom potencijalu, dakle u ovom primjeru: prema gore.

Tako tijekom iskopa ukupni potencijal u donjem sloju šljunka ostaje jednak, ako se dotok vode može smatrati stalnim (zbog prihranjivanja, recimo, vodom iz rijeke Save). Ukupni potencijal u gornjem sloju određen je crpljenjem vode iz građevne jame. Hidraulički gradijent kroz promatrani sloj gline tako je određen razlikom ukupnih visina, Δh , između gornjeg sloja i sloja šljunka, kao i duljinom puta, Δl , tj. debljinom slabo propusnog sloja gline. U stvarnosti slojevi se mogu izmjenjivati na različite načine, pa slika strujanja može biti bitno složenijom.

Tijekom iskopa u ovom primjeru, razlika visina Δh se povećava, a debljina sloja Δl se smanjuje, pa hidraulički gradijent po apsolutnoj vrijednosti raste. Time raste i strujni tlak koji na tlo djeluje u smjeru strujanja, ovdje usmjeren prema gore. Time se efektivna težina tla smanjuje, a smanjuju se i efektivna naprezanja.

Postanu li efektivna naprezanja negativna, dakle vlačna, neće biti moguća ravnoteža u tlu, jer se ne može računati na vlak između sloja šljunka i sloja gline, te će doći do hidrauličkog sloma dna građevne jame, tj. nestabilnosti površinskog sloja.

Čak i približavanje izračunatih efektivnih naprezanja negativnoj vrijednosti odnosno nuli, predstavlja opasnost, jer ni jedan od elemenata proračuna nije posve pouzdan. Pri tome dovoljno je da na jednom mjestu debljina slabo propusnog sloja tla bude manja nego očekujemo, pa da na tom jednom mjestu dođe do hidrauličkog sloma.

Da bi se provjerila veličina efektivnih vertikalnih naprezanja, treba poznavati razinu podzemne vode, tj. ukupni potencijal u donjem sloju, a ta je vrijednost ovisna o meteorološkim prilikama u širokom području oko lokacije i o seriji različitih utjecaja. Treba poznavati i debljinu slabo propusnog sloja, što je također ne posve pouzdani podatak dobiven ekstrapolacijom vrijednosti izmjerenih na konačno mnogo mjesta. Nije rijetka pojava da se u slabo propusnom sloju nađe jako propusne leća tla u kojoj potencijal ovisi o prihrani vodom iz nekog vodotoka i slično. Zbog nepouzdanosti svih ovih parametara, valja osigurati dovoljno veliki faktor sigurnosti, te tijekom izvedbe mjerenjima provjeravati ostvarene vrijednosti potencijala i moguću opasnost od hidrauličkog sloma.