

4 Voda u tlu.

4.1 Pojavnost vode u tlu.

Zbog velike važnosti koju prisutnost vode ima na ponašanje tla, ovdje se studenta najprije podsjeća na neka poglavlja hidromehanike, koja se zatim primjenjuju na mehaniku tla.

Površinska napetost (*surface tension*) rezultat je privlačnih sila između molekula na granici različitih tvari i uzrokuje zaobljavanje površine vode (meniskus) na dodiru sa staklom, čvrstim česticama tla,... te kapilarnom podizanju vode u uskim staklenim cjevčicama, unutar pora tla i slično.

Voda u staklenoj cjevčici (za razliku od žive u staklu ili vode u masnom staklu – jer se voda “lijepi” na staklo) jednostavna je ilustracija situacije u tlu: površinska napetost uravnotežuje težinu stupca vode iznad razine vode, omogućujući tako naprezanja u vodi manje od atmosferskog tlaka – koji zovemo nultim.

Promatramo li cjevčice promjenjivog promjera, vidjet ćemo da proširenje cjevčice sprječava podizanje meniskusa, dakle smanjuje visinu do koje se podiže voda. Ipak, ukoliko se cjevčica puni odozgor, isto proširenje ne predstavlja nikakvu zapreku. Tako i u tlu, visina kapilarnog dizanja ne ovisi samo o promjeru “cjevčice”, tj. veličini pora, nego i o povijesti vlaženja određenog područja.

Kapilarno podizanje ovisi o promjeru cjevčice odnosno o veličini pora u tlu. Karakteristične veličine kapilarnog dizanja prikazuje (Holtz, Kovacz, 1981) Tablica 4 - 1:

Tablica 4 - 1 Tipične vrijednosti kapilarnog podizanja

	u rahlom stanju	u zbijenom stanju
krupni pijesak	0,03 – 0,12 m	0,04 – 0,15 m
srednji pijesak	0,12 – 0,05 m	0,35 – 1,10 m
sitni pijesak	0,3 – 2 m	0,4 – 3,5 m
prah	1,5 – 10 m	2,5 – 12 m
glina	iznad 10 m	

U tlu razlikujemo nekoliko područja, ovisno o pojavnosti vode:

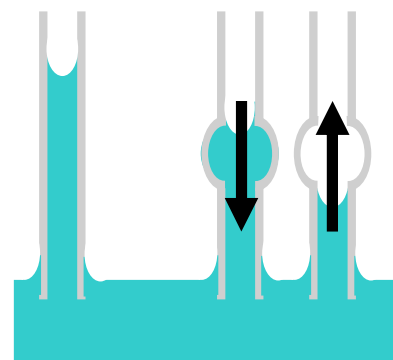
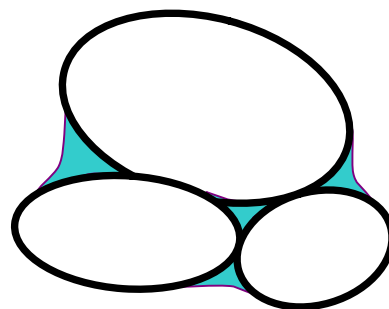
adheziona voda... voda obavija čvrste čestice tla u tankom sloju, vezana prije svega električnim silama,

otvorena kapilarna voda... voda se skuplja oko mjesta dodira čvrstih čestica, oblikuju se meniskusi i kapilarno je djelovanje bitno, ali stupanj zasićenosti je posve malen,

zatvorena kapilarna voda... tlo je zasićeno ili gotovo potpuno zasićeno, tlak vode je manji od atmosferskog tlaka,

podzemna voda... tlo je zasićeno ili gotovo potpuno zasićeno, tlak vode je veći od atmosferskog tlaka.

Razina je ime za svaku gornju granicu ovih područja: *razina otvorene kapilarne vode*, *razina zatvorene kapilarne vode*. Posebno važna je *razina podzemne vode (NPV... nivo podzemne vode; ground water table ili samo water table)*, to je ravnina na kojoj je tlak vode jednak atmosferskom tlaku.



4.2 Tlak vode. Potencijali.

Pronađimo hidrostatski tlak, tj. tlak u mirnoj vodi, u točki G.

Na površini vode, hidrostatski tlak jednak je tlaku zraka, atmosferskom tlaku. Kako možemo čuti u meteorološkim izvješćima, tlak zraka mijenja se brzo ovisno o atmosferskim prilikama. Pri tome razlike tlaka na nekom su mjestu male, pa je uobičajeno u tlak vode ne uračunati udio tlaka zraka.

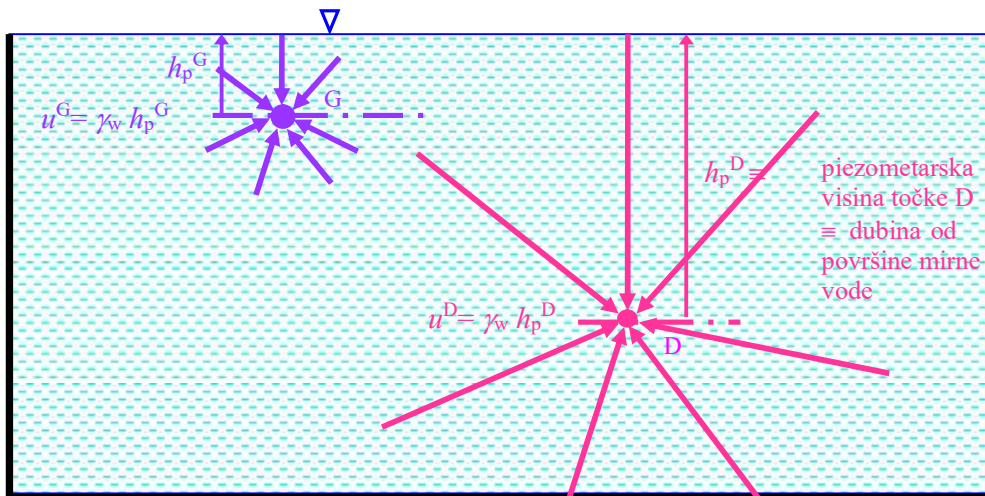
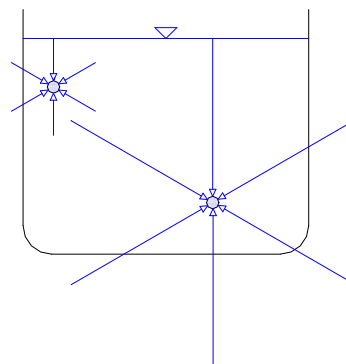
U mirnoj vodi, **tlak vode** je naprezanje okomito na površinu, tlačno, oduzimajući spomenuti tlak zraka na površini, vrijednosti jednake umnošku gustoće vode, gravitacije (akceleracije sile teže) i udaljenosti točke i razine vode,

$$u = \rho_w g h_p$$

tj. umnošku jedinične težine vode i udaljenosti od točke do razine vode, uz $\gamma_w = \rho_w g$,

$$u = \gamma_w h_p$$

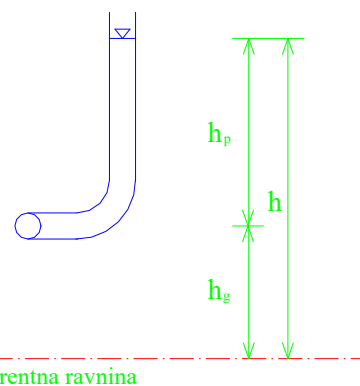
ili, drugim riječima, težini stupca (mirne) vode iznad promatrane točke, ako je stupac jedinične površine tlocrta.



Slika 4 - 1 Skica tlakova na dvije točke u mirnoj vodi.

Radi li se o vodi u mirovanju, h_p je udaljenost od točke do površine vode. Općenito, ili ako voda u promatranom području struji¹, h_p je udaljenost od točke do površine vode umirene u piezometru², tj. **piezometarska visina** ili **piezometarski potencijal (pressure head)**.

Da bismo uspoređivali različite točke, za svaki zadatak, na najpovoljnijem mjestu, biramo referentnu ravninu: horizontalnu ravninu proizvoljnog položaja, ali stalnog za jedan zadatak. Udaljenost od referentne ravnine do promatrane točke označavamo h_g i zovemo **geodetska** ili

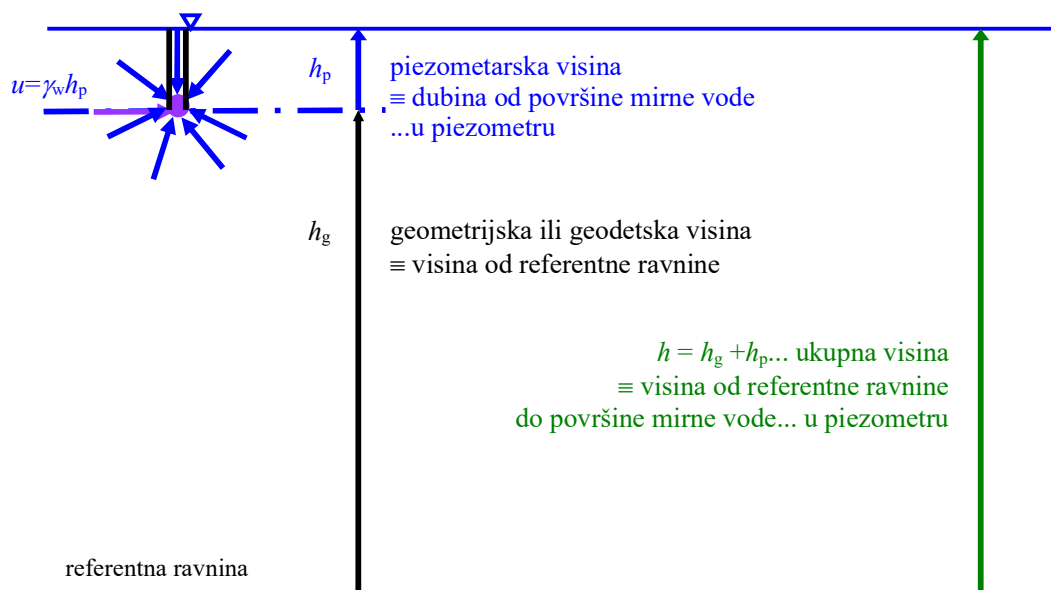


¹ strujanjem smatramo tečenje kakvo je u ne previše krupnoznom tlu

² piezometar je cijev u kojoj se voda umiri, tako da se tlak vode može odrediti kao težina stupca vode u piezometru po jediničnoj tlocrtnoj površini; piezometar ne smije biti tako uzak da bi kapilarno djelovanje bilo značajno

geometrijska visina, ili **geodetski** ili **geometrijski potencijal**, (*elevation head*) koji se može definirati i kao negativna vrijednost dubine ispod razine vode. Geodetska visina, dakle, samo određuje položaj točke – da bi se lakše uspoređivali tlakovi u raznim točkama i analiziralo strujanje vode.

Zbroj dviju visina, $h_g + h_p = h$, tj. udaljenost od referentne ravnine do površine vode umirene u piezometru čije je dno u promatranoj točki, zovemo **ukupna visina** ili **ukupni potencijal** (*total head*). Ova je visina veoma važna u situacijama gdje voda struji. Vrijednost ukupne visine ovisi o izboru referentne ravnine, ali neće nam biti važna veličina h , nego međusobni odnosi h različitih točaka

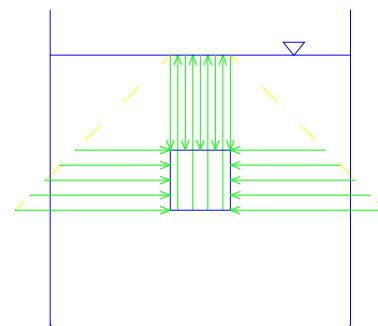


Slika 4 - 2 Definicija piezometarske, geodetske ili geometrijske, i ukupne visine.

Mjerne jedinice³ za tlak vode su [$\text{kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m} = \text{N/m}^3 \cdot \text{m} = \text{N/m}^2$], a budući da je γ_w približno jednako 10 kN/m^3 , a visine ili potencijale obično mjerimo u metrima, to najčešće tlak vode mjerimo u [$\text{kN/m}^3 \cdot \text{m} = \text{kN/m}^2 = \text{kPa}$]. Tlak vode na dubini od 1 m ispod razine mirne vode jednak je oko $10 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m} = 10 \text{ kPa}$. Tlak vode na dubini od 10 m ispod razine mirne vode jednak je oko $10 \text{ kN/m}^3 \cdot 10 \text{ m} = 100 \text{ kPa}$. Usporedbe radi: u našim krajevima tlak zraka kreće se oko $1010 \text{ hPa} = 101 \text{ kPa}$.

4.3 Rezultantno djelovanje mirne vode.

Promatramo kvadar uronjen u mirnu vodu, horizontalnih i vertikalnih stranica i odredimo tlak vode koji na njih djeluje. Tlak vode je, kao i uvijek u mirnoj vodi, okomit na promatranu površinu, te veličine $u = \gamma_w h_p$, dakle raste s dubinom ispod površine vode.



³ $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$; $1 \text{ kN} = 1000 \text{ N}$; $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$; Pa, po prezimenu Pascal, čitamo [paskal]

Posebno, u točki G, na gornjoj horizontalnoj stranici kvadra, tlak vode djeluje vertikalno prema dolje i jednak je

$$u^G = \gamma_w h_p^G = \gamma_w (h^G - h_g^G).$$

U točki D, na donjoj horizontalnoj stranici kvadra, tlak vode djeluje vertikalno prema gore i jednak je

$$u^D = \gamma_w h_p^D = \gamma_w (h^D - h_g^D).$$

Na vertikalnim stranicama, tlak vode djeluje horizontalno, okomito na stranicu, i mijenja se linearno između te dvije vrijednosti.

Posebno je zanimljiva rezultanta tlaka vode na cijelo tijelo. Što se tiče horizontalnih tlakova, oni ovise o dubini točke i očito je da će horizontalna komponenta rezultante biti nula. Dakle rezultanta tlaka ima samo vertikalnu komponentu, i to, smatrajući pozitivnim orijentaciju prema dolje, ako je površina tlocrta tijela A ,

$$\begin{aligned} F &= A [u^G - u^D] = \\ &= A [\gamma_w h_p^G - \gamma_w h_p^D] = \\ &= A [\gamma_w (h^G - h_g^G) - \gamma_w (h^D - h_g^D)] = \\ &= \gamma_w A [(h^G - h^D) - (h_g^G - h_g^D)] \end{aligned}$$

U mirnoj vodi nema razlike ukupnih potencijala, za sve točke u mirnoj vodi $h = h^G = h^D = \text{const}$.

Dakle, u mirnoj vodi $h^G - h^D = 0$

$$F = \gamma_w A [-(h_g^G - h_g^D)]$$

Pri tome $h_g^G - h_g^D$ predstavlja ustvari visinu promatranog tijela, označimo je Δl , tako da

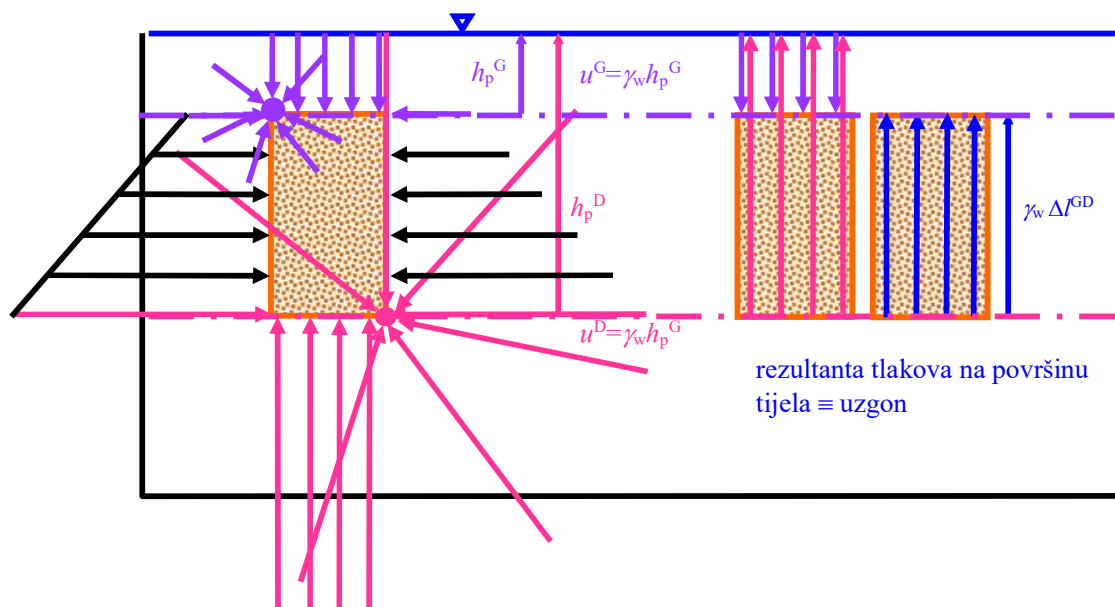
$$F = -\gamma_w A \Delta l = -\gamma_w V$$

gdje V je volumen tijela tj. onog dijela tijela koje je potopljeno, $V = A \Delta l$.

Ovu silu možemo računati i po jediničnom volumenu promatranog tijela (tj. potopljenog dijela tijela):

$$F/V = -\gamma_w V/V = -\gamma_w$$

Dakle, po jedinici volumena, djelovanje mirne vode na uronjeno tijelo jednako je $-\gamma_w$.



Slika 4 - 3 Skica tlakova na jedan kvadar uronjen u vodu u kojoj nema tečenja; rezultanta tih tlakova.

Imamo li tijelo drugog položaja ili oblika, izvod bi bio nešto dulji: možemo svako tijelo virtualno izrezati vertikalnim ravninama u posve tanke kriške ili, još dalje, u stupce), ali bi slijedilo isto: rezultanta tlaka vode na tijelo uronjeno u mirnu vodu jednaka je umnošku jedinične težine vode i volumena tijela, ili, kako mnogi pamte iz škole, težini istisnute tekućine, po Arhimedovom zakonu. Izvedenu rezultantu zovemo **uzgon** (*bouyancy force*).

Tlak vode možemo doživjeti pri ronjenju. Što dublje ronimo, to je tlak vode veći, i to osjećaju naše oči, uši, pluća... Dubina do koje možemo roniti određena je tlakom koji naše oči, uši, pluća, ... mogu izdržati.

Uzgon, rezultanta tlaka vode na cijelo tijelo, nije ovisna o dubini dubini – ukoliko se ne mijenja volumen ili jedinična težina vode. Uzgon možemo doživjeti pri svakom kupanju u kadi, moru, jezeru... kao djelovanje vode koje prividno, “efektivno”, smanjuje našu težinu. Težina, jasno, ostaje nepromijenjena, ali djelomično ili potpuno naslanjamo se na vodu.

Dakle, (1) tlak vode po cijeloj granici područja i (2) uzgon kao rezultanta tlaka predstavljaju dva moguća načina da se uračuna djelovanje vode na neko tijelo uronjeno u mirnu vodu, vodu koja miruje, ne teče. Treba uočiti i zapamtiti da se ta dva načina uzimanja u obzir djelovanja vode međusobno isključuju, tj. da nema smisla uračunati i jedno i drugo: treba uračunati ili jedno ili drugo, već prema okolnostima, prema tome sa čime je jednostavnije raditi tj. računati. Pri tome, tlak vode računamo kao naprezanje, u jedinicama sile po površini: na primjer kN/m^2 . Uzgon, pak, predstavlja silu, mjeri se na primjer u kN . Ili, u tlu, u potopljenom području, uzgon računamo po jedinici

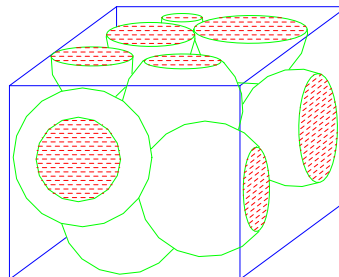
volumena (kao što i težinu tla u pravilu računamo po jedinici volumena): uzgon je jednak γ_w po jedinici volumena uronjenog dijela tla, što je približno jednako 10 kN/m^3 , točnije oko $9,81 \text{ kN/m}^3$.

4.4 Tlak porne vode.

Pri svim ovdje izvedenim razmatranjima, vrijedi zamisliti mogući trodimenzionalni raspored čvrstih čestica tla. Čestice gline koje su pločaste ili lističave obvijene su vodom. Ostale čestice više manje okruglaste su. Svakako, površina dodirnih ploha između čvrstih čestica posve je mala. Pore između čvrstih čestica čine vrlo razvedeni prostor. Ako je tlo zasićeno vodom, o tom jedinstvenom prostoru možemo govoriti kao o vrlo složenom sustavu "spojenih posuda", pa je tlak vode u tlu, bez obzira na postojanje čvrstih čestica u tlu, također jednak

$$u = \gamma_w h_p$$

Uobičajeno je tlak vode u porama tla zvati **tlak porne vode** (*pore water pressure*). Na mnogim se mjestima tlak vode u porama zove porni tlak, ali u posljednje vrijeme, kako se sve više bavimo utjecajem tlaka zraka u porama tla, prevladava naziv tlak porne vode.

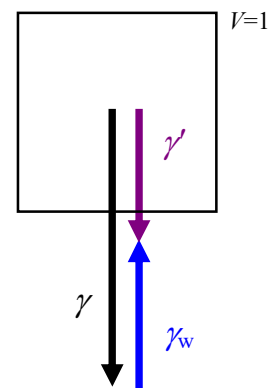


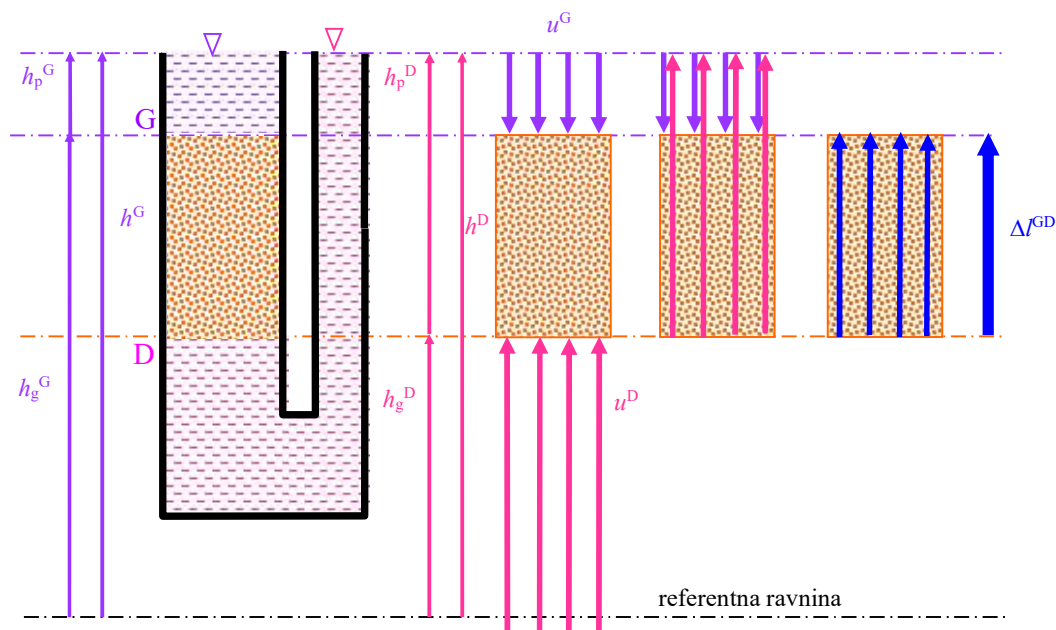
4.5 Djelovanje mirne vode na element tla. Uronjena jedinična težina.

Zanima li nas djelovanje vode na kvadar tla ispod razine mirne vode (dakle, vode u kojoj nema strujanja), možemo ga, kao je prikazano, izraziti ili kao tlak vode po površini toga kvadra, ili kao rezultantu tih tlakova, tj. uzgon. Ukupno djelovanje težine i rezultante tlakova vode na element tla jediničnog volumena koji je uronjen u mirnu vodu, zovemo **uronjena jedinična težina** i označavamo γ' (*buoyant unit weight*). To je rezultanta težine jediničnog volumena tla i uzgona na isti volumen:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

Pri tome γ je jedinična težina tla čija je vrijednost blizu 20 kN/m^3 (možda 21 ili 19 ili 16 ili slično), a γ_w je jedinična težina vode koja je jednaka 10 kN/m^3 (ustvari oko $9,81 \text{ kN/m}^3$). Dakle je γ' blizu 10 kN/m^3 (možda 11 ili 9 ili slično).





Slika 4 - 4 Skica vertikalnih tlakova na tijelo uronjeno u vodu u kojoj nema tečenja; rezultante tih tlakova.

4.6 Utjecaj jednodimenzionalnog strujanja vode. Hidraulički gradijent. D'Arcy-ev zakon.

Promatramo cijev potpuno ispunjenu vodom. U kojem slučaju voda struji kroz cijev?

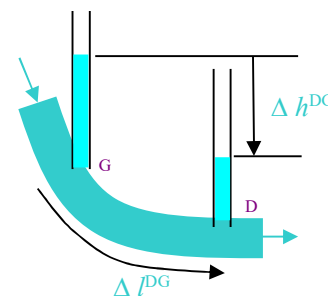
Držimo krajeve cijevi ispunjene vodom na istoj visini. Hoće li voda teći? A ako jedan kraj podignemo, hoće li onda voda teći? Kada voda prestaje teći? Niste li sigurni, pokušajte izvesti pokus. Isprobajte, i ustanovite u kojem slučaju dolazi do tečenja, te o čemu ovisi brzina istjecanja vode.

Promatramo sada cijev u koju je ugrađen uzorak tla (ne jako krupnih zrna⁴) i to tako da voda mora strujati *kroz*, ne *uz* uzorak. Voda i dalje teče ako postoji razlika ukupnog potencijala, ali je, prisutnošću tla, tečenje usporeno.

Pokazuje se da je time strujanje vode koncentrirano na onaj dio cijevi u kome je uzorak tako da u vodi izvan uzorka gotovo nema strujanja, pa su tlak vode, dakle i potencijali, h_p i h , gotovo konstantni kroz vodu izvan uzorka tla.

Za laminarno strujanje kroz poroznu sredinu kao što je tlo, D'Arcy (ili Darcy) je, sredinom XIX stoljeća, na temelju eksperimenata, ustanovio vezu između razlike potencijala, duljine puta kojim struji voda, te svojstava materijala i tekućine.

Definira se **hidraulički gradijent** (*hydraulic gradient*) između dviju točaka, G i D, kao negativna vrijednost omjera



⁴ u tlu veoma krupnih pora može doći do vrtložnja pa ovdje navedeno ne mora vrijediti

razlike potencijala i duljine puta koji voda prijeđe između tih dviju točaka:

$$i^{GD} = - \Delta h^{DG} / \Delta l^{DG}$$

Ako se mjeri u smjeru strujanja, tj. u smjeru gubljenja ukupnog potencijala, kao na skici, promjena ukupnog potencijala je negativna, hidraulički gradijent je pozitivne vrijednosti.

Približavamo li točke D i G i to tako da njihova spojnica pokazuje smjer strujanja, govorimo o hidrauličkom gradijentu u točki:

$$i = - dh/dl$$

D'Arcy-eva brzina strujanja, koja je ustvari srednja protoka po jedinici površine promatranog presjeka, pokazuje se, može se izraziti kao

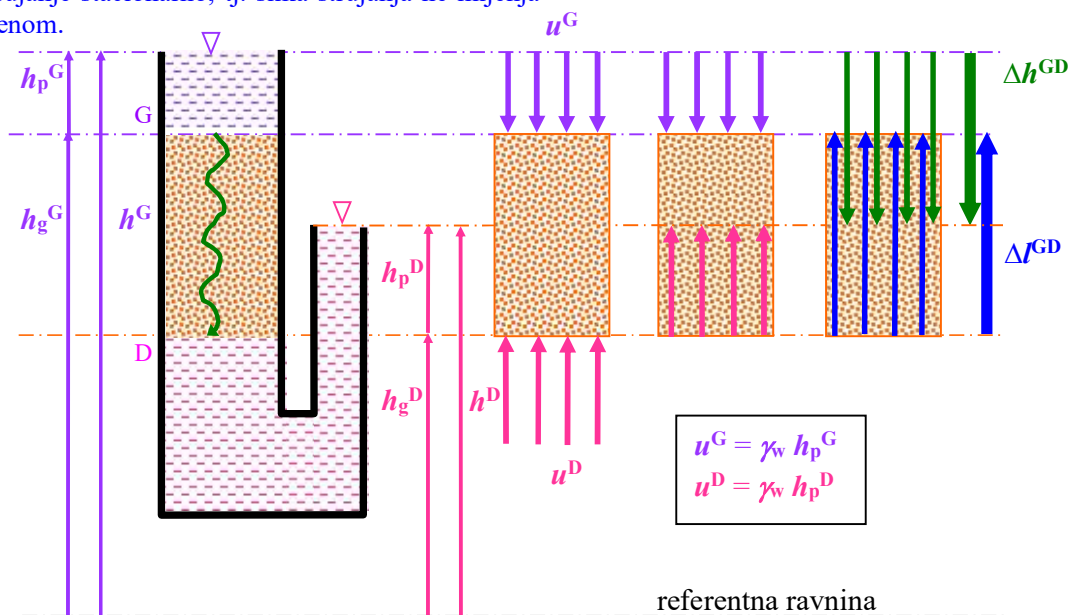
$$v = i k$$

gdje k je koeficijent propusnosti danog tla i u danim uvjetima.

Dobro je uočiti da D'Arcy-eva brzina nije stvarna brzina strujanja čestica vode, nego srednja protoka, dakle volumen vode koji u jedinici vremena proteče promatranim presjekom jedinične površine – veličina koja će nam trebati kod pripreme crpki za građevne jame i slično.

4.7 Strujni tlak.

Da bismo ispitali utjecaj strujanja vode na tlo, promatramo uzorak ugrađen (između dviju mrežica) u cijev, te tlak vode na granicama uzorka. Neka je cijev postavljena vertikalno, neka je uzorak horizontalnih rubova, a tlo homogeno. Tada je tlak u svakoj točki ovisan samo od visinskom položaju. Neka je strujanje stacionarno, tj. slika strujanja ne mijenja se sa vremenom.



Slika 4 - 5 Skica vertikalnih tlakova na tijelo uronjeno u vodu koja struji prema dolje..

U skiciranom primjeru voda struji od gornje granice uzorka, označene G, ka donjoj, označenoj D. Na gornjem i na donjem rubu uzorka tlakovi vode su

$$u^G = \gamma_w h_p^G = \gamma_w (h^G - h_g^G)$$

$$u^D = \gamma_w h_p^D = \gamma_w (h^D - h_g^D)$$

okomito na granicu uzorka.

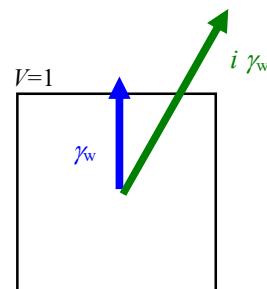
Horizontalni tlakovi i u ovakvom primjeru izjednačeni su. Dakle, rezultatno djelovanje vode na promatrani uzorak tla, smatrajući pozitivnim usmjerenje težine, jednako je

$$\begin{aligned} F &= u^G A - u^D A = \\ &= [\gamma_w h_p^G - \gamma_w h_p^D] A = \\ &= [\gamma_w (h^G - h_g^G) - \gamma_w (h^D - h_g^D)] A = \\ &= \gamma_w [(h^G - h^D) - (h_g^G - h_g^D)] A = \\ &= \gamma_w [(h^G - h^D) / (h_g^G - h_g^D) \cdot (h_g^G - h_g^D) - (h_g^G - h_g^D)] A = \\ &= \gamma_w [(\Delta h^{GD}) / (\Delta l^{GD}) \cdot (\Delta l^{GD}) - (\Delta l^{GD})] A = \\ &= \gamma_w [i^{GD} - 1] A \cdot \Delta l^{GD} = \\ &= \gamma_w [i^{GD} - 1] V \end{aligned}$$

$$F = [-\gamma_w + \gamma_w i^{GD}] V; \text{ pri čemu } i^{GD} = \Delta h^{GD} / \Delta l^{GD}$$

Rezultatno djelovanje vode na uzorak tla može se, dakle, iskazati i po jediničnom volumenu tla:

$$F / V = -\gamma_w + \gamma_w i^{GD}$$



Može se pokazati da se i u općenitom slučaju strujanja vode kroz tlo, djelovanje vode, umjesto kao rezultanta tlaka vode na granici promatranog područja, može izraziti kao zbroj dvije komponente.

Jednu komponentu čini uzgon, kao i u slučaju da nema strujanja:

- γ_w je veličina uzgona na jedinični volumen tla, tj. “težini istisnute tekućine”, gdje negativni predznak označava da uzgon djeluje uvijek vertikalno prema gore.

Drugu komponentu čini **strujni tlak** na jedinični volumen tj. **sila strujnog tlaka** (*seepage force*) na cijelo tijelo. Smjer strujnog tlaka je općenito u smjeru strujanja vode, a proporcionalan je s hidrauličkim gradijentom:

$$\vec{s} = \vec{i} \gamma_w$$

Ako niste sigurni u smjer djelovanja strujnog tlaka, prisjetite se nekog svog kupanja u rijeci: osim uzgona, u kojem smjeru doživljavate dodatno djelovanje uslijed

tečenja? Vi osobno ili kamenčići na dnu rijeke. Usporedite ga sa smjerom tečenja vode.

Općenito, djelovanje vode može se iskazati po jediničnom volumenu kao zbroj uzgona i strujnog tlaka. Ili kao tlak vode po oplošju cijelog promatranog tijela.

4.8 Efektivna jedinična težina.

Ukupno djelovanje težine i vode na element tla jediničnog volumena tla koji je uronjen u vodu zovemo **efektivna jedinična težina** (*effective unit weight*) i označavamo γ'' . To je rezultanta težine jediničnog volumena tla, te uzgona i strujnog tlaka na isti volumen u istoj točki.

$$\vec{\gamma}'' = \vec{\gamma}' + \vec{i} \gamma_w = (\gamma - \gamma_w) \vec{j} + \vec{i} \gamma_w$$

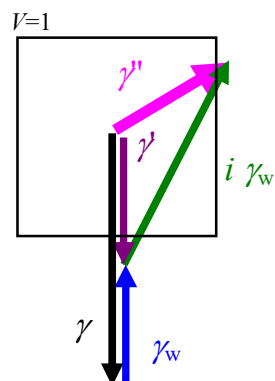
Težina djeluje prema dolje, uzgon prema gore, a strujni tlak u smjeru strujanja.

U slučaju strujanja vode prema dolje, kao u prethodnom primjeru, efektivna jedinična težina postaje veća od uronjene jedinične težine.

$$\gamma'' = \gamma - \gamma_w + |i| \gamma_w = \gamma' + |i| \gamma_w$$

U slučaju strujanja vode prema gore, strujni tlak djeluje prema gore i smanjuje jediničnu efektivnu težinu na vrijednost manju od jedinične uronjene težine (samo težina i uzgon)

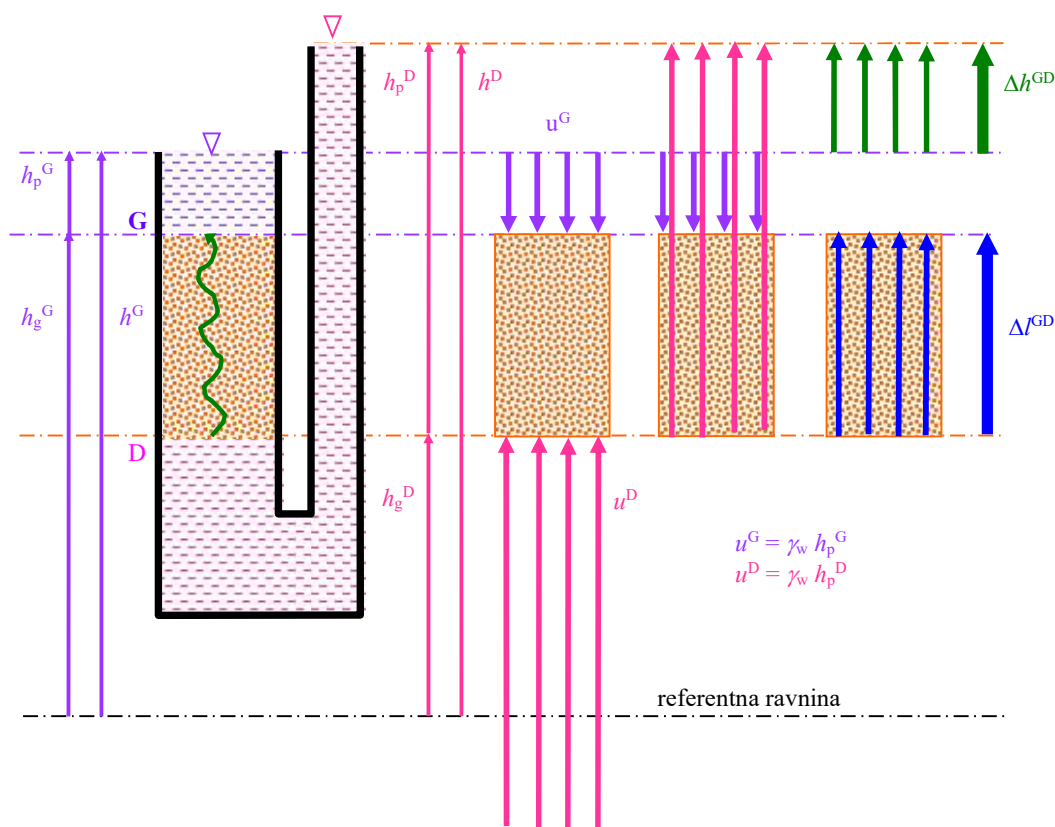
$$\gamma'' = \gamma - \gamma_w - |i| \gamma_w = \gamma' - |i| \gamma_w$$



4.9 Primjer strujanja vode prema gore.

U slučaju da voda struji prema gore, strujni tlak smanjuje efektivnu jediničnu težinu tla na vrijednost manju od uronjene jedinične težine.

S rastom hidrauličkog gradijenta, može doći i do situacije u kojoj efektivna jedinična težina bude negativne vrijednosti, što znači da je rezultanta težine elementa tla i djelovanja vode usmjerena vertikalno prema gore.



Slika 4 - 6 Skica vertikalnih tlakova na tijelo uronjeno u vodu koja struji prema gore..

Hidraulički slom dna građevne jame moguća je – i vrlo opasna – posljedica ovakve situacije, u kojemu tlo gubi stabilnost i strojevi i ljudi tonu u tlo, što je praćeno uglavnom ključanjem tla tako da se temeljno tlo poremećuje i gubi poznata svojstva. Zato se kod dubokih građevnih jama ispod razine podzemne vode posebna pažnja daje mogućoj vrijednosti hidrauličkog gradijenta, a pri izvedbi mjerenju tlaka porne vode pod dnom jame, tako da bi se mogla prepoznati odstupanja od pretpostavljenoga. Posebne poteškoće čini nehomogenost tla, kako se vidi iz nastavka.

4.10 Jednodimenzionalno strujanje vode kroz jedan ili dva sloja tla.

Promatramo horizontalno uslojeno tlo, bez izvora i bez ponora, te jednodimenzionalno strujanje kroz tlo, prema gore ili prema dolje. Prema zakonu održanja mase, u svakom presjeku, tj. po dubini z ,

$$v(z) = \text{const.}$$

Primjena D'Arcy'evog zakona daje:

$$v(z) = i(z) k(z) = \text{const.}$$

tako da za homogeni sloj konstantne propusnosti ($k(z) = \text{const.}$) vrijedi:

$$i(z) = -dh(z)/dz = \text{const.}$$

a, budući da se piezometarska visina može izraziti kao

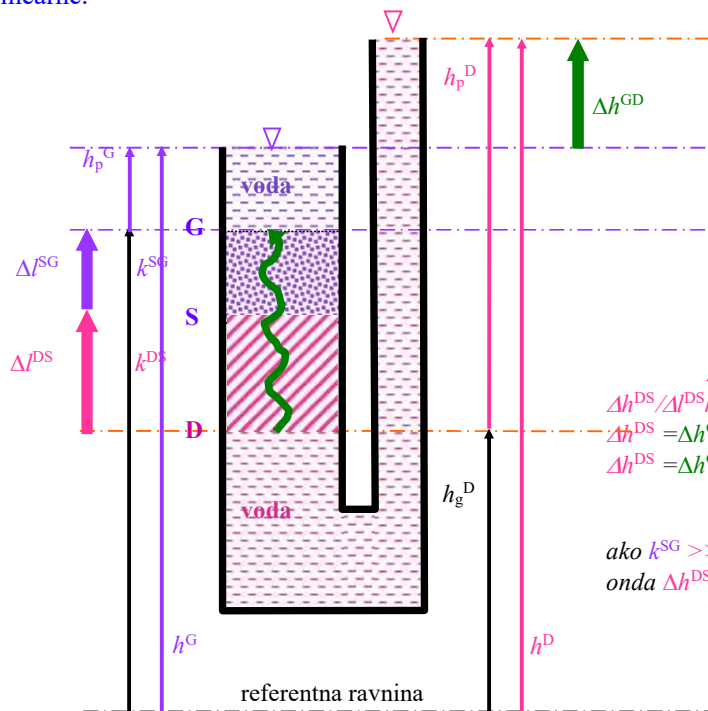
$$h_p(z) = h(z) - h_g(z)$$

onda i

$$dh_p(z)/dz = \text{const.}$$

$$du(z)/dz = \gamma_w dh_p(z)/dz = \text{const.}$$

tj. u području u kome nema promjene propusnosti, promjene ukupne visine ili potencijala, piezometarske visine ili potencijala i tlaka vode su linearne.



poznajemo $u^G = \gamma_w h_p^G$
 poznajemo $u^D = \gamma_w h_p^D$
 zakon o održanju mase:

$$v^{DS} = v^{SG}$$

$$i^{DS} k^{DS} = i^{SG} k^{SG}$$

$$\Delta h^{DS} / \Delta l^{DS} k^{DS} = \Delta h^{SG} / \Delta l^{SG} k^{SG}$$

$$\Delta h^{DS} / \Delta l^{DS} k^{DS} = (\Delta h^{GD} - \Delta h^{DS}) / \Delta l^{SG} k^{SG}$$

$$\Delta h^{DS} = \Delta h^{GD} [k^{SG} / \Delta l^{SG}] / [k^{SG} / \Delta l^{SG} + k^{DS} / \Delta l^{DS}]$$

$$\Delta h^{DS} = \Delta h^{GD} [k^{SG}] / [k^{SG} + k^{DS} \Delta l^{SG} / \Delta l^{DS}]$$

ako $k^{SG} \gg k^{DS}$
 onda $\Delta h^{DS} = \Delta h^{GD}$, $\Delta h^{SG} = 0$

Znači, poznajemo li h i h_p na granici nekog sloja (područja konstantnih svojstava), poznajemo ih i unutar toga područja – kao linearnu interpolaciju.

Međutim, imamo li dva sloja međusobno različitih propusnosti, i poznajemo li h i h_p na vanjskim granicama, da bismo ih upoznali po cijeloj visini, valja prvo pronaći i h i h_p na zajedničkoj granici.

Zakon održanja mase primijenjen na volumen vode koja struji kroz dva promatrana sloja ili uzorka, (1) i (2), koeficijena propusnosti k_1 i k_2 , te hidrauličkih gradijenata i_1 i i_2 , znači i jednakost protoka kroz ta dva sloja ili uzorka

$$v_1 = v_2$$

tj.

$$i_1 k_1 = i_2 k_2$$

$$(\Delta h_1 / \Delta l_1) k_1 = (\Delta h_2 / \Delta l_2) k_2.$$

Pri tome poznajemo ukupnu razliku potencijala, koja se odnosi na vanjske granice uzorka, Δh , i znamo da

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$$

dakle

$$\Delta h_2 = \Delta h - \Delta h_1$$

odakle

$$(\Delta h_1 / \Delta l_1) k_1 = [(\Delta h - \Delta h_1) / \Delta l_2] k_2$$

$$\Delta h_1 = (\Delta h - \Delta h_1) (\Delta l_1 / \Delta l_2) (k_2 / k_1)$$

$$\Delta h_1 + (\Delta l_1 / \Delta l_2) (k_2 / k_1) (\Delta h_1) = (\Delta h) (\Delta l_1 / \Delta l_2) (k_2 / k_1)$$

$$\Delta h_1 [1 + (\Delta l_1 / \Delta l_2) (k_2 / k_1)] = (\Delta h) (\Delta l_1 / \Delta l_2) (k_2 / k_1)$$

$$\Delta h_1 = \Delta h [k_2 (\Delta l_1 / \Delta l_2)] / [k_1 + k_2 (\Delta l_1 / \Delta l_2)]$$

$$\Delta h_2 = \Delta h [k_1 (\Delta l_2 / \Delta l_1)] / [k_2 + k_1 (\Delta l_2 / \Delta l_1)]$$

Posebno je zanimljiv slučaj u kojemu su dva susjedna sloja vrlo različitih propusnosti, a debljine slojeva su istog reda veličine.

Uzmimo slučaj sloja gline, na primjer $k_1 \approx 10^{-7}$ cm/s, uz sloj pijeska, na primjer $k_2 \approx 10^{-2}$ cm/s:

$$\Delta h_1 = \Delta h [10^{-2} (\Delta l_1 / \Delta l_2)] / [10^{-7} + 10^{-2} (\Delta l_1 / \Delta l_2)] = [10^{-2} / 10^{-2}] \Delta h \approx \Delta h$$

$$\Delta h_2 = \Delta h [10^{-7} (\Delta l_2 / \Delta l_1)] / [10^{-2} + 10^{-7} (\Delta l_2 / \Delta l_1)] = [10^{-7} / 10^{-2}] \Delta h \approx 10^{-5} \Delta h \approx 0$$

jer, mjerimo li Δh metrima, Δh_2 će biti mjeren desecima mikrona.

To znači da je razlika ukupnog potencijala ostvarena u sloju gline, odnosno da je strujanje koncentrirano na sloj gline, dok u susjednom sloju pijeska ukupni potencijal ostaje konstantan – kao u mirnoj vodi.

Općenito,

iz $k_1 \ll k_2$ slijedi $\Delta h_1 \approx \Delta h$, $\Delta h_2 \approx 0$.

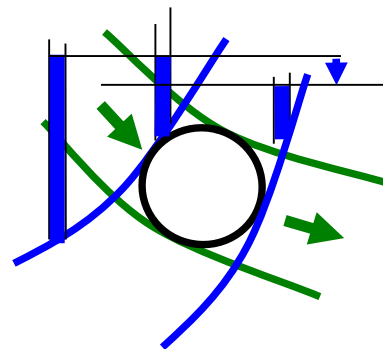
Velike razlike u propusnosti tla pod građevnom jamom ili slično imaju za posljedicu koncentriranje strujanja na slabo propusne slojeve. Hidraulički gradijent može tako biti bitno veće apsolutne vrijednosti nego da je tlo homogeno, a efektivna jedinična težina, ili efektivna napreznja, mogu biti smanjene čak i do nule ili negativnih vrijednosti, što znači da je rezultanta sila usmjerena vertikalno prema gore, te da prijete hidraulički slom: izbacivanje tla i tonjenje ljudi i opreme, kao i poremećivanje tla. Odatle važnost prepoznavanja slojeva velike propusnosti u tlu i poznavanja slike tlaka porne vode.

Veoma neugodne posljedice za veće područje može imati hidraulički slom nasipa u zaštiti od poplava: u slučaju da dođe do prebrzog strujanja vode kroz nasip ili ispod nasipa, može doći do iznošenja čvrstih čestica, sve bržeg i bržeg, te do rušenja nasipa. Dovoljno je da se hidraulički slom dogodi na jednom mjestu u nasipu, pa da nasip izgubi svoju funkciju. Zato će pri gradnji nasipa biti veoma važno na vrijeme dobro upoznati temeljno tlo, te osigurati nasip od hidrauličkog sloma.

4.11 Strujnice, ekvipotencijale, strujna mreža.

Mnogi problemi strujanja daju se svesti na dvodimenzionalno strujanje, u ravnini, čime se također bavi hidromehanika. Ovdje se izabiru samo elementi potrebni za osnovno bavljenje mehanikom tla.

Strujnice – su krivulje kojima su tangente vektori brzina u svakoj točki. Slika 4 - 7 ih prikazuje dvije strujnice, obojene zeleno. Strujnice se nigdje ne sijeku (nema li u promatranom području ni izvora ni ponora) i područje između dviju izabranih strujnica zovemo strujnom cijevi. Ako nema ni izvora ni ponora – budući da su brzine strujanja uvijek tangentne na rubne strujnice – protoka duž strujne cijevi je konstantna.



Slika 4 - 7 Skica dvije ekvipotencijale, na slici plave, i dvije strujnice, na slici zelene.

Ekvipotencijale su krivulje koje čine točke istog ukupnog potencijala. Drugim riječima, zbroj geodetskog i piezometarskog potencijala konstantan je duž neke ekvipotencijale. Ekvipotencijale se također nigdje ne sijeku nema li u promatranom području ni izvora ni ponora.

Strujna mreža je skupina izabranih strujnica i ekvipotencijala. U izotropnim homogenim sredinama strujnice i ekvipotencijale su međusobno okomite, te se često se radi sa *kvadratnom strujnom mrežom*, takvom da se, u svako "polje" omeđeno dvjema susjednim ekvipotencijalama i dvjema susjednim strujnicama može upisati kružnica. Za takve mreže vrijedi (1) Protoka kroz svake dvije strujne cijevi jednaka je. (2) Pad potencijala između svake dvije susjedne ekvipotencijale jednak je. U ortotropnim homogenim sredinama, gdje su propusnosti konstantne u horizontalnom smjeru te u vertikalnom smjeru, $k_h \neq k_v$, može se raditi također sa kvadratnom strujnom mrežom, ali takovom da su geometrijska mjerila različita u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Danas postoje računalni programi koji omogućavaju brzo određivanje strujne mreže.

Vrlo jednostavni primjer strujanja kroz homogeno i izotropno tlo oko zagatne stijene prikazuje skicom Slika 4 - 8. Pri iskopu građevne jame ispod razine podzemne vode korisno je održavati razinu vode u građevnoj jami pri dnu građevne jame. Razlika ukupnih potencijala jednaka je udaljenosti dviju razina vode: podzemne vode oko građevne jame i razine na dnu (ili ispod dna) građevne jame. Uslijed postojanja razlike ukupnih potencijala dolazi do strujanja. U jednostavnom slučaju, ukoliko je tlo homogeno i izotropno, strujna mreža može izgledati otprilike kao na skici. Da bismo procijenili protoku (i potrebni kapacitet crpki za održavanje konstantne razlike potencijala) te opasnost od hidrauličkog sloma, odredimo

broj strujnih cijevi, n_s

broj ekvipotencijala, n_e+1 , tj. broj jednakih padova potencijala n_e

pri čemu je onda pad potencijala između susjednih ekvipotencijala jednak $\Delta h/n_e$

U skiciranom primjeru, $n_s = 5$, $n_e = 10$.

Protoka u ovom dvodimenzionalnom problemu može se izračunati na slijedeći način:

Promatramo „kvadrat“ koji čine x-ta strujna cijev i y-ti pad potencijala. Na promatranom mjestu širina strujne cijevi je a_{xy} . Darcy'eva brzina, tj. protoka kroz jediničnu površinu presjeka x-te strujne cijevi jednaka je

$$v_{xy} = i_{xy} k_{xy} = \Delta h_{xy} k_{xy} = \Delta h/n_e k_{xy}$$

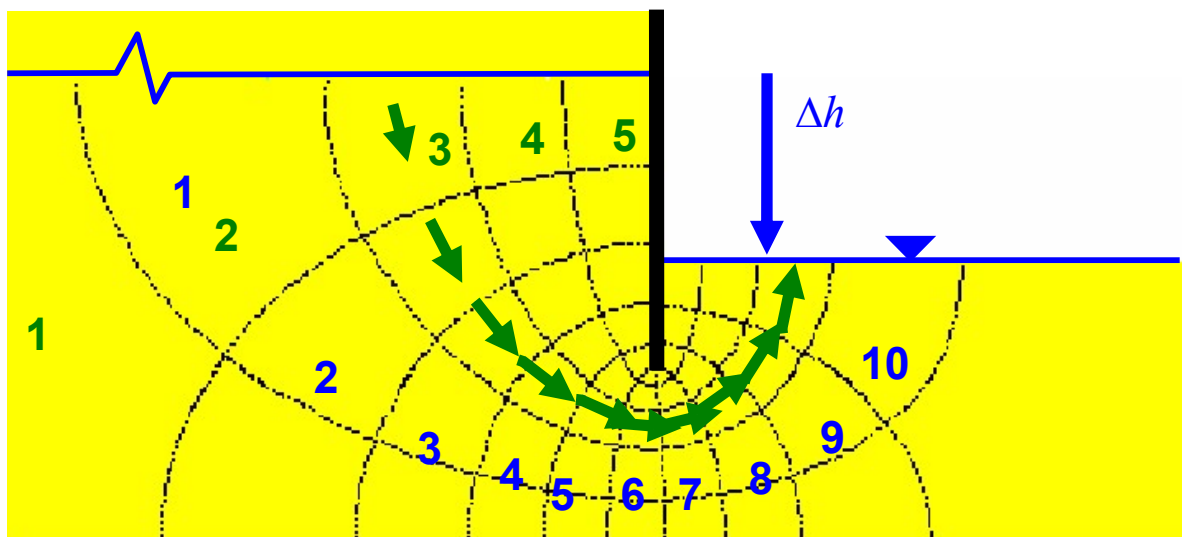
Dakle protoka kroz cijelu x-tu strujnu cijev jednaka je $v_{xy} a_{xy}$,

a ukupna protoka jednaka je zbroju protoka kroz sve strujne cijevi:

$$Q = \sum v_{xy} a_{xy} = k \Delta h/n_e \sum a_{xy} / \Delta l_{xy} = k \Delta h/n_e n_s$$

$$Q = k \Delta h n_s/n_e$$

gdje je Δh ukupni pad potencijala, n_s je broj strujnih cijevi i n_e je broj jednakih padova potencijala, sve u jedinstvenoj kvadratnoj strujnoj mreži.



Slika 4 - 8 Skica jedne strujne mreže. Strujne cijevi pobrojane su zeleno, jednaki padovi ukupnog potencijala plavo.

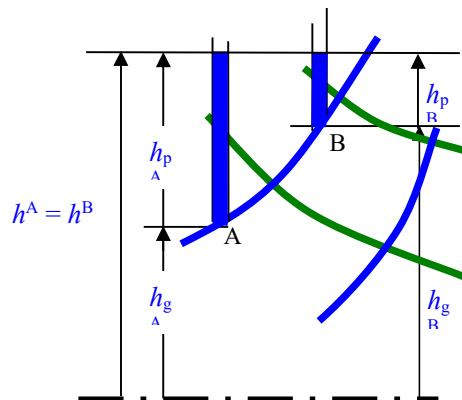
Poznajemo li strujnu mrežu, možemo doći i do podataka o tlaku u svakoj točki ekvipotencijale. Ekvipotencijala je geometrijsko mjesto ili krivulja na kojoj je ukupni potencijal jednak za sve točke, dakle, od izabrane referentne ravnine, za sve točke neke ekvipotencijale vrijedi: $h = h_g + h_p = \text{const.}$

Pa tako vrijedi

$$h^A = h_g^A + h_p^A = h^B = h_g^B + h_p^B$$

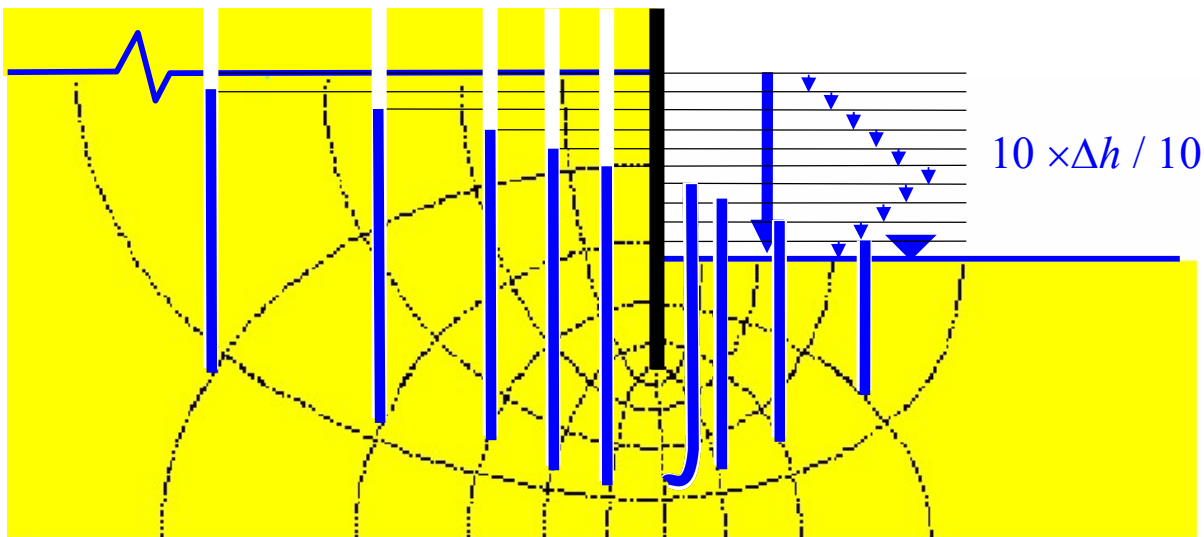
ili, na primjer, tražimo li tlak u točki A, a poznajemo tlak u točki B, i položaj obje točke,

$$h_p^A = h^A - h_g^A = h^B - h_g^A = h_g^B + h_p^B - h_g^A$$

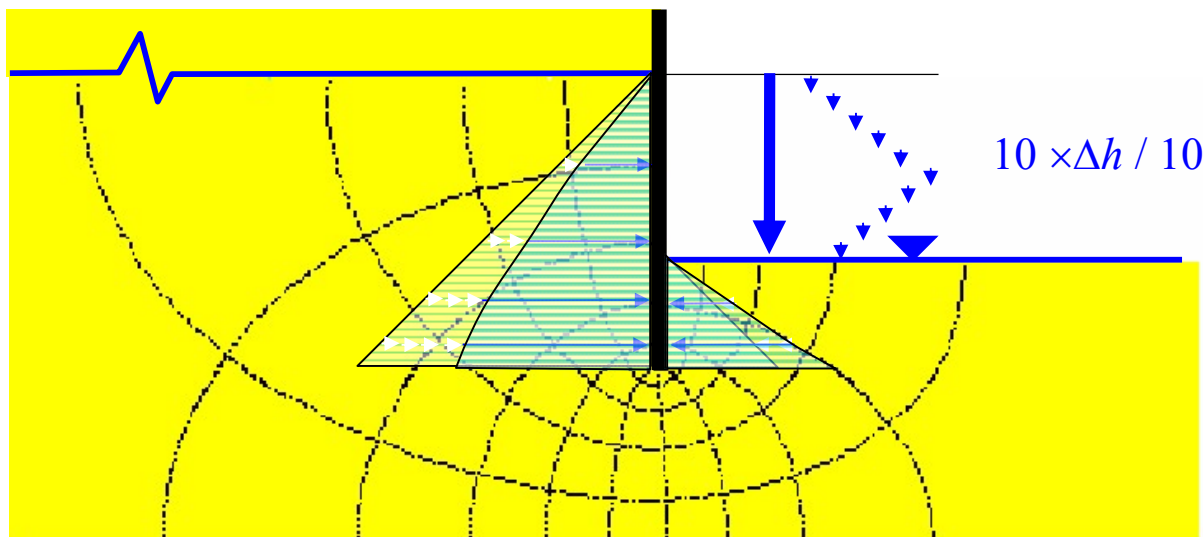


Pozabavimo li se zagatnom stijenom i jednostavnim

strujanjem kroz homogeno i izotropno tlo oko stijene, za iscrtanu kvadratnu strujnu mrežu sa 11 ekvipotencijala tj. $n_e = 10$ jednakih padova potencijala, pojedini pad potencijala između dvije ekvipotencijale jednak je $\Delta h/n_e = \Delta h/10$. Na sljedećoj skici prikazan je po jedan piezometar spušten u svaku ekvipotencijalu i podizanje vode.



Pokazuje se da je važno poznavati i djelovanje vode u tlu i veličinu tlaka porne vode na zagatnu stijenu. Tlak vode jednostavno odredimo za svaku točku u kojoj je iscrtana ekvipotencijala, te umijemo odrediti h_p . Tlak vode je $u = h_p \gamma_w = (h - h_g) \gamma_w$. Na skici sa lijeve strane voda struji prema dolje i prema dolje se smanjuje ukupni potencijal. Smanjuje se i tlak porne vode u odnosu na situaciju u kojoj ne bi bilo strujanja. Sa desne strane skice tlak porne vode veći je nego da nema strujanja.



4.12 Skupljanje i bujanje tla.

Promjene vlažnosti u sitnoznom tlu izazivaju promjenu volumena koja može biti značajna i uzrokovati ozbiljne štete.

Skupljanje tla sitnozrog tla (*shrinking*) uzrokovano je sušenjem, pri čemu mogu rasti kapilarne sile i stvarati pukotine u tlu. Bujanje sitnozrog tla (*swelling*) uzrokovano je vlaženjem, to značajnijim što je veća aktivnost gline, posebno ako je vlažnost bliska granici plastičnosti. Tlakovi izazvani bujanjem budu 100 ili 200 kPa, pa sve do 1000 kPa, što su golema opterećenja za malene i lagane kuće.

Zato valja ispitati osjetljivost temeljnog tla na skupljanje i bujanje i zamijeniti tlo ako je potrebno ili drugačije spriječiti otvaranje pukotina u građevini ili slično, te se pozabaviti mehanizmima sušenja i vlaženja tla – uslijed kišenja, rasta stabala i slično.

4.13 Smrzavanje tla.

Povećanje volumena vode pri smrzavanju – za oko 10 % – jedan je od uzroka podizanja površine tla. U našim uvjetima, gdje je zona smrzavanja tla oko 0,5 m dubine, a vlažnost bude oko 30 %, to bi značilo podizanje za nekoliko centimetara. Pokazuje se, međutim, da u sitnozrim tlima podizanje tla pri snižavanju temperature može biti bitno veće, za čime slijedi veliko povećanje vlažnosti pri zatopljenju.

U sitnozrim tlima, ako je moguće podizanje vode iz podzemlja, kapilarnost omogućava privlačenje vode na već zamrznutu vodu, što vodi do stvaranja leća leda u tlu, to većih što je sniženje temperature brže, što su čvrste čestice i pore tla sitnije.

Sprečavanje šteta od smrzavanja tla moguće je izvesti

1. izvedbom temelja ispod zone smrzavanja,
2. zamjenom sitnozrog tla (sa kapilarnim efektima) slojem šljunka ili sl.
3. izoliranjem podloge od vode u podzemlju.

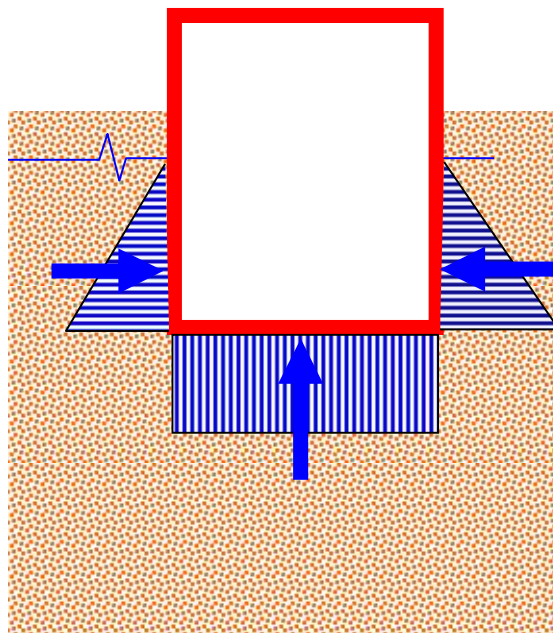
4.14 Preporučljiva i citirana literatura:

1. ... literatura iz područja hidromehanike
2. Nonveiller,E., 1990, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, 823 str
3. Holtz, R.D., Kovacs,W.D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 733 str.

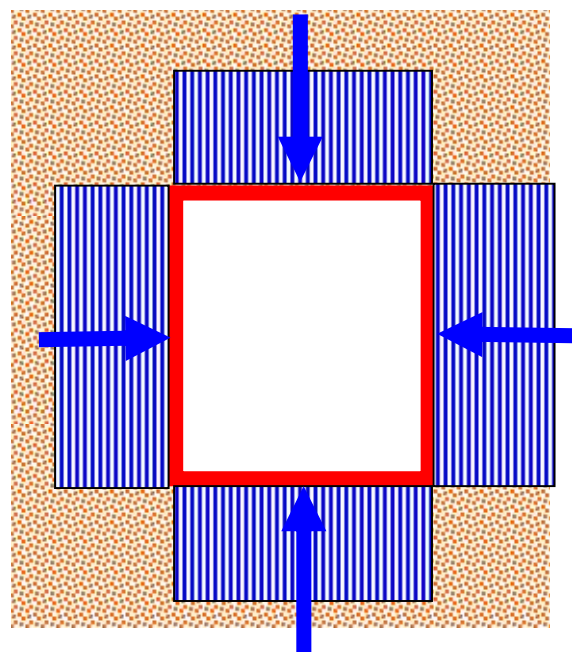
4.15 Zadaci

1. Uzgon. Porni tlak i tlak vode na ukopani objekt.

Prelagani kutijasti ili cjevasti objekti u potopljenom tlu uslijed uzgona mogu isplivati. Tlak vode na ukopani objekt jednak je pornom tlaku tj. tlačnom naprezanju u pornoj vodi. U sljedećem zadatku tlo se na lokaciji smatra homogenim, a voda mirnom. Porni tlakovi rastu sa dubinom, od razine podzemne vode, i jednaki su $u = \gamma_w h_p$. Uz skicu profila tla sa označenom razinom podzemne vode prikazani su grafovi h_g , h_p i h u ovisnosti o dubini. Referentna ravnina je proizvoljno izabrana: neka je to ovdje donja granica promatranog sloja tla. Na usporednom dijagramu prikazan je graf pornog tlaka, u . Desno je skiciran i položaj kutijaste crpne stanice koja se gradi na lokaciji, u vertikalnom presjeku i u tlocrtu, te porni tlakovi, tj. tlak vode koji djeluje na objekt. Računa se i rezultanta tlaka podzemne vode na ukopani objekt: na svaku stijenku posebno, te rezultanta u dva horizontalna smjera i vertikalno.



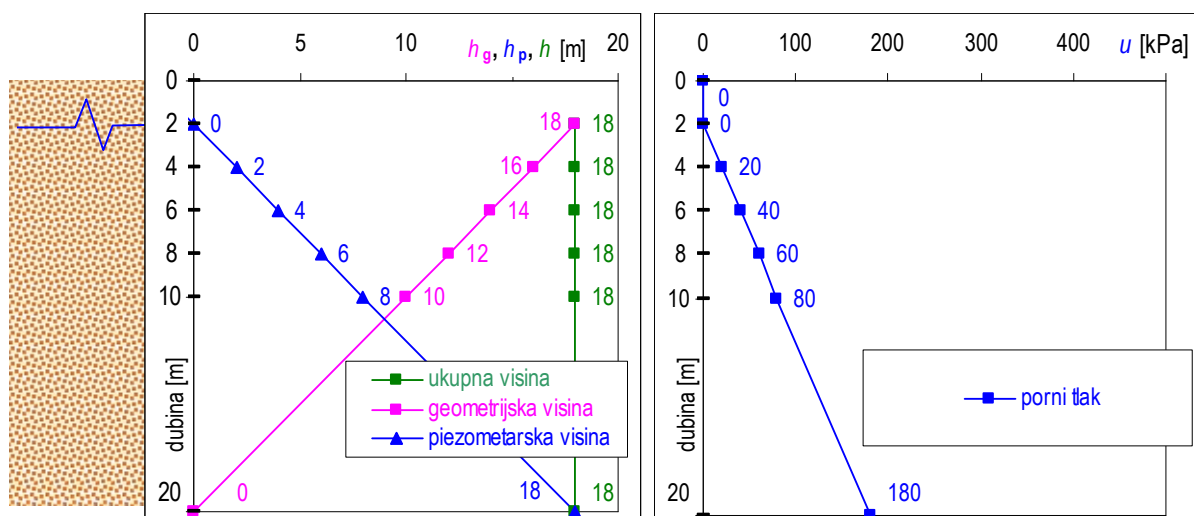
Na lokaciji do dubine od 20 m tlo se može smatrati homogenim dobro graduiranim šljunkom. Razina podzemne vode nalazi se na 2 m dubine. Promatramo tlak vode u tlu. Trodimenzionalni raspored čvrstih čestica teško je nacrtati u dvije dimenzije, ali za ovu priliku dovoljno je zamisliti neki mogući raspored čvrstih čestica šljunka koje se naslanjaju jedna na drugu i tvore trodimenzionalnu strukturu. Usredotočite se sada na pore toga tla: na prostor između čvrstih čestica. Za razliku od međusobno odvojenih mjehura zraka tj. rupa u ementaleru, pore u tlu uglavnom su spojene i tvore vrlo razvedenu posudu. Mi se sada bavimo sa gomijih par desetaka metara te posude. Još se ne bavimo naprezanjima u čvrstim česticama, samo vodom u tlu.



Ako je razina podzemne vode na 2 m dubine, to znači da su sve pore u tlu ispod te razine ispunjene vodom – barem do donje granice ispitnog područja. Na razini podzemne vode, kao i na drugoj otvorenoj površini vode, tlak vode jednak je nuli – što ustvari znači da je jednak atmosferskom tlaku – koji kod nas iznosi uglavnom oko 1000 hPa, kako se izražava u meteorologiji, odnosno, u jedinicama koje odgovaraju geotehnici, oko 100 kPa, što odgovara težini stupca vode (jediničnog horizontalnog presjeka) visine oko 10 m. Ispod razine podzemne vode – ako nema strujanja – tlak vode raste linearno sa dubinom i jednak je $u = \gamma_w h_p$, gdje h_p je ta dubina «mirne» vode.

U promatranom zadatku, kako je razina vode horizontalna ravnina i tlo je homogeno, tlak vode i h_p rastu samo sa dubinom. Zato se dijagram h_p najzgodnije može nacrtati prema dubini. Pišimo dubinu oznakom z , a h_p je upravo jednak dubini ispod razine podzemne vode, pa tako na primjer: za dubinu 2 m, na razini podzemne vode, h_p je jednak 0 m, $h_p(2m) = 0$ m, za dubinu 4 m, 2 m ispod razine podzemne vode, $h_p(4m) = 2$ m, za dubinu 10 m, 8 m ispod razine podzemne vode, $h_p(10m) = 8$ m; za bilo koju drugu dubinu, sve do donje granice promatranog

područja, h_p jednak je isto tako dubini samoj, te h_p možemo prikazati pravcem koji se od razine podzemne vode spušta sa promatranom dubinom u tlu, dakle nagiba je 1:1.



Za slučajeve gdje će se pojaviti strujanje u tlu, zanimjive su i vrijednosti h_g i h . Geodetska ili geometrijska visina, h_g , koja predstavlja položaj točke od izabrane horizontalne referentne ravnine, također ovisi samo o dubini promatrane točke. Ako je referentna ravnina na dubini $z_{\text{referentno}}$ (mjereno od površine terena prema dolje), onda h_g (mjereno od referentne ravnine prema točki) je za dubinu z , jednako $h_g = z_{\text{referentno}} - z$. Tako na referentnoj ravnini $h_g = 0$, a od referentne ravnine prema gore h_g raste linearno sa dubinom. Ako želimo da brojevi budu pozitivni, a grafovi svi sa iste strane osi, možemo izabrati za referentnu ravninu donju granicu promatranog područja. Ovdje neka je $z_{\text{referentno}} = 20\text{m}$.

Tako za dubinu 2 m, na razini podzemne vode, h_g je jednak $h_g(2\text{m}) = 20\text{ m} - 2\text{ m} = 18\text{ m}$.

Za dubinu 4 m, h_g je jednak $h_g(4\text{ m}) = 20\text{ m} - 4\text{ m} = 16\text{ m}$.

Za dubinu 10 m, h_g je jednak $h_g(10\text{ m}) = 20\text{ m} - 10\text{ m} = 10\text{ m}$.

Za bilo koju drugu dubinu, sve do donje granice promatranog područja, h_g jednak je isto tako $h_g = z_{\text{referentno}} - z$, pa, budući da se z mijenja linearno sa dubinom, a $z_{\text{referentno}}$ je konstantno, i h_g se mijenja linearno sa dubinom i može se prikazati pravcem koji se od razine podzemne vode smanjuje sa promatranom dubinom u tlu, dakle nagiba je -1:1.

Ukupna visina, h , može se prikazati kao zbroj h_g i h_p . U dijelovima gdje h_g i h_p su linearne, i h je linearno. U ovom primjeru, gdje je tlo homogeno, to vrijedi po cijelom promatranom području. Dapače, u ovom primjeru gdje nema strujanja vode h je konstantno.

Za dubinu 2 m, na razini podzemne vode, h je jednako $h(2\text{m}) = h_g(2\text{m}) + h_p(2\text{m}) = 18\text{m} + 0\text{m} = 18\text{m}$.

Za dubinu 4 m, h je jednako $h(4\text{m}) = h_g(4\text{m}) + h_p(4\text{m}) = 16\text{m} + 2\text{m} = 18\text{m}$.

Za dubinu 10 m, h je jednako $h(10\text{m}) = h_g(10\text{m}) + h_p(10\text{m}) = 10\text{m} + 8\text{m} = 18\text{m}$.

Grafove h_g , h_p i h vrijedi crtati u istom dijagramu da se jasno vidi njihov međusobni odnos. Sve su te vrijednosti visine (ili potencijali) koje izrazimo u metrima, pa ih vrijedi crtati u istom mjerilu u kome se crtaju dubine.

Treba nam crpna stanica kutijastog oblika, tlocrta 7 m puta 9 m, dubine 10 m i visine iznad tla 4 m.

Zbrojimo sve tlakove porne vode na kutiju.

Na istočnu stranu prema zapadu djeluje srednja vrijednost tlaka porne vode po visini $0,5 \cdot 80\text{ kN/m}^2 = 40\text{ kN/m}^2$; dakle po cijeloj visini rezultanta tlaka vode jednaka je $= 40\text{ kN/m}^2 \cdot (10\text{ m} - 2\text{ m}) = 320\text{ kN/m}$ uzduž 7 m = 2240 kN; na zapadnu stranu prema istoku djeluje 320 kN/m uzduž 7 m = 2240 kN; ukupno u smjeru istok-zapad rezultanta je 0 kN;

na sjevernu stranu prema jugu djeluje 320 kN/m uzduž 9 m 2880 kN;
 na južnu stranu prema sjeveru djeluje 320 kN/m uzduž 9 m 2880 kN;
 ukupno u smjeru sjever jug rezultanta je 0 kN;
 ukupno horizontalno djelovanje 0 kN

vertikalno po dnu 80 kN/m³ po tlocrtu 7 m puta 9 m = 63 m²,

80 kN/m² puta 63 m² = 5040 kN

ili: uzgon na dio crpne stanice koji je uronjen u mirnu vodu:
 volumen = 7 m puta 9 m puta (10 minus 2,0 m) = 504 m³

uzgon = 504 m³ puta 10 kN/m³ = 5040 kN

Ako su stijenke crpne stanice debljine 0,5 m izrađene od armiranog betona jedinične težine 25 kN/m³, onda je po metru visine crpna stanica težine 691 kN/m visine, i temeljna ploča debljine 0,7m teška je 1102,5 kN
 što čini ukupno 10771 kN

Rezultanta težine i djelovanja vode, usmjereno vertikalno prema dolje je 5731 kN

Međutim, da je debljina stijenki jednaka 0,25 m, tako da je crpna stanica težine 345 kN po metru visine, te da je visina stijenki samo do površine tla...

težina bi bila 4556 kN

Rezultanta težine i djelovanja vode je - 484 kN

usmjereno vertikalno - prema gore, što bi značilo da bi došlo do isplivavanja ovako zatvorene kutije!!!!

Ova je pojava relativno česta tijekom građenja, kad je podrum ili druga kutijasta građevina zatvorena s donje strane, a nije dosegnuta konačna težina. Na žalost, pri hidrauličkom slomu ovakvog oblika (*uplift, UPL*), dolazi do poremećivanja tla ispod i oko objekta, tako da je u pravilu nemoguće vratiti ga u prvotni željeni položaj.

Slične pojave mogu se dogoditi u tlu, da dođe do izbacivanja dijela tla u slučaju da voda struji prema gore sa prevelikim gradijentom, tj. ako je strujni tlak prevelik. O tome više u poglavlju o naprezanjima u tlu.

Kad je, jednom, građevina završena,

te je, dakle vlastita težina 10771 kN,

oprema i krovšte 10000 kN,

ukupno 20771 kN,

ako je površina dna 63 m², onda je kontaktno naprezanje na dnu temelja crpne stanice

330 kN/m².

Od toga tlak porne vode, dakle ono što nosi voda je 80 kN/m².

Dakle skelet tla, čvrste čestice, nose 250 kN/m².