

# 12 INŽENJERSKO ZNAČENJE PODZEMNE VODE

## PROPUSNOST

Podzemna voda nalazi se u propusnim materijalima. **Drenirani uvjeti:** sve pore u tlu su ispunjene zrakom, a ranije su sadržavale vodu.

**Saturirano tlo:** sve pore u tlu su ispunjene vodom; = nedrenirano tlo.

**Djelomično saturirani uvjeti:** pore u tlu su ispunjene zrakom i vodom; najčešći slučaj.

Propusnost ovisi o veličini i količini pora u tlu i o njihovoj povezanosti.

Propusnost tla se definira **koeficijentom propusnosti (k)**. Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću Darcyjevog zakona:

$$k = Q L / A h = v / i;$$

k – koeficijent propusnosti; Q – protok; A – površina protoka; L – udaljenost; h – razlika potencijala; v – brzina protoka; i – hidraulički gradijent.

Propusnost je inženjersko svojstvo materijala; vrlo ograničena primjena Darcyjevog zakona jer propusnost varira.

Koeficijent propusnosti uzorka određuje se u laboratoriju pomoću aparata s konstantnim ili padajućim potencijalom. Nepouzdanost laboratorijskih rezultata zbog odvajanja čestica, zraka ili topivih minerala.

Pouzdanije određivanje propusnosti na terenu pomoću bušotina; najčešće pokus konstantnog potencijala. Bunar se crpi konstantnom brzinom, a u susjednim bunarima se mjeri pad razine vode.

## PROTOK I HIDROSTATSKI TLAK

**Piezometar:** bušotina s ugrađenom cijevi, koja je otvorena u intervalu vodonosnog sloja, kako bi se omogućio ulazak vode u cijev. Služi za mjerenje potencijala podzemne vode u prirodnim uvjetima u vodonosnom sloju.

**Hidrostatski tlak:** porni tlak u tlu kada voda miruje. Piezometarska razina je horizontalna, jer su piezometarske visine (odnosno visine potencijalne energije) iste u svim piezometrima.

**Hidraulički gradijent:** nagib piezometarske razine; piezometarska razina se smanjuje, a voda teče u smjeru nižeg potencijala. Tečenje uzrokuje pritisak procjeđivanja.

Uzrok tečnu vode je razlika u ukupnoj energiji između dviju točaka. Ova energija se naziva **potencijal (h)**; (eng. head) – mehanička energija po jedinici težine vode.

$h = z + h_p$ , gdje je:

h – potencijal (visina potencijalne energije; piezom. visina);

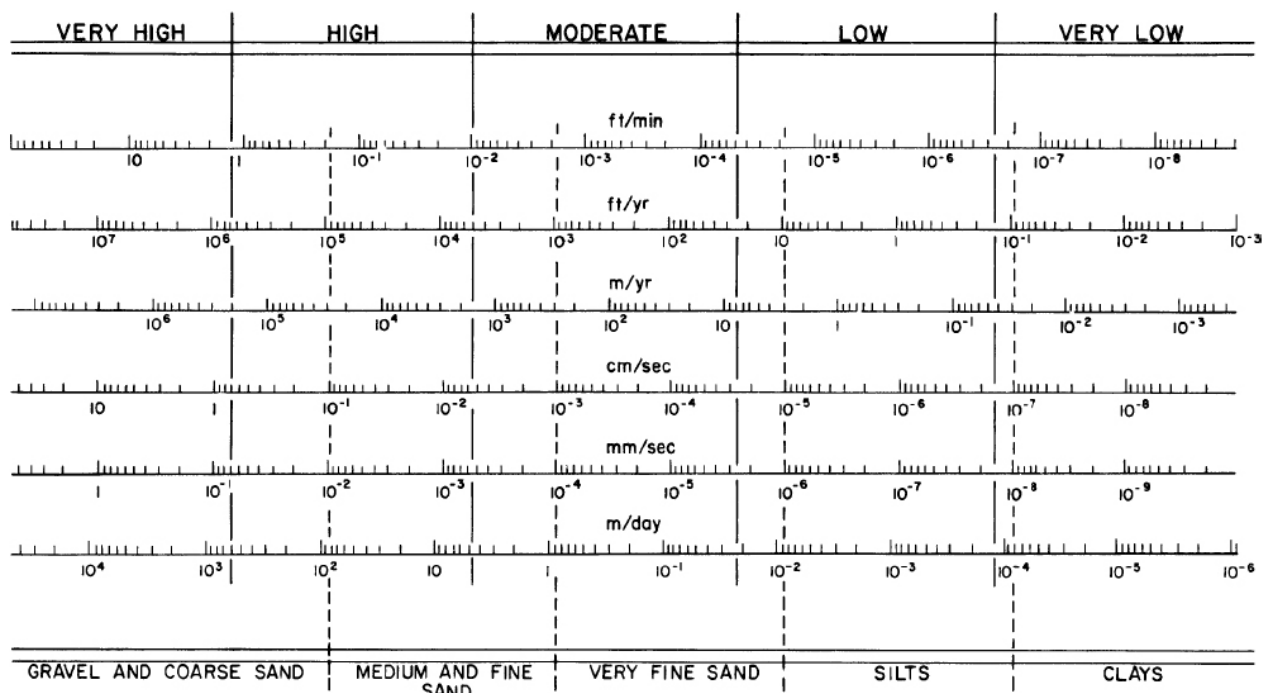
z = nadmorska (geodetska) visine točke A u kojoj se određuje potencijal;  $h_p$  – tlačna visina, tj. dubina točke A ispod razine vode u piezometru

Porni tlak  $\mu = h_p \gamma_w$  gdje je

$\mu$  – porni tlak;  $h_p$  – tlačna visina;  $\gamma_w$  – jedinična težina vode

Određivanje potencijala i pornog tlaka je neophodno da bi se predvidjele promjene pornog tlaka i njihovi mogući učinci na inženjerske radove.

Kvantifikacija tečenja vode kroz tlo pomoću Darcyjevog zakona:  $Q = kAh/L$ . Strujna mreža je grafička metoda za izračun protoka.



## RASPONI VRIJEDNOSTI PROPUSNOSTI TLA

### EFEKTIVNA I UKUPNA NAPREZANJA

U nesaturiranom tlu silama tlaka odupiru se čestice. **Međuzrnski pritisak:** otpor trenja među česticama u tlu.

U saturiranom tlu silama tlaka odupiru se čestice, ali i voda u porama, jer je nestišljiva.

Kao posljedica prisustva ili odsustva vode u porama razlikuju se efektivna i ukupna naprezanja. **Efektivno naprezanje** je otpor individualnih čestica na primijenjeno naprezanje.

U nesaturiranom tlu – međuzrnski pritisak koji se opire tlačanju predstavlja i ukupna i efektivna naprezanja.

U saturiranom tlu – ukupno naprezanje je zbroj efektivnih naprezanja (zrno na zrno) i pornog tlaka (otpor vode).

Efektivna naprezanja i porni tlak su važni jer većina opterećenja tla ima tlačnu i posmičnu komponentu. Voda nema posmičnu čvrstoću pa se odupire samo tlačnoj komponenti.

Otpor tla na smicanje ovisi o efektivnim naprezanjima. Budući da se efektivna naprezanja dobivaju tako da se od ukupnih oduzme porni tlak, promjene vezane za podzemnu vodu utječu na efektivna naprezanja. *Povećanje razine podzemne vode povećava porni tlak; efektivna naprezanja se smanjuju s povećanjem pornog tlaka; otpornost tla na smicanje je manja.*

## STRUJNI TLAK I HIDRAULIČKI SLOM TLA

Strujna mreža je grafička metoda za izračunavanje protoka. Sastoji se od strujnica i ekvipotencijala.

**Strujnice** predstavljaju putanje kojima se odvija tečenje kroz masu tla.

**Ekvipotencijale** su okomite na strunice i spajaju točke jednake energije odnosno tlaka.

Strujna mreža se crta na način da se ukupni potencijal podijeli s cijelim brojem. Ekvipotencijale su okomite na razinu podzemne vode i spajaju točke jednakog potencijala.

Protok se izračunava iz strujne mreže:

$$Q = k (n_f/n_d)H$$

Q – protok; k – propusnost materijala;  $n_f$  – broj strujnica  
H – ukupni potencijal;  $n_d$  – razlika potencijala.

**Strujni tlak** moguće je prikazati kao silu na jedinični volumen tla.

Strujni tlak može biti toliko visok da istisne individualne čestice tla. Time se mijenjaju strujnice, povećava se brzina i povećava se strujni tlak. Kao posljedica toga u tlu mogu nastati kanali, koji ozbiljno ugrožavaju integritet strukture tla.

Strujni tlak djeluje okomito na ekvipotencijalne u strujnoj mreži. Računa se množenjem hidrauličkog gradijenta i jedinične težine vode:

$$P_s = i \gamma_w$$

$P_s$  – strujni tlak;  $i$  – hidraulički gradijent, h/L;  $\gamma_w$  – jedinična težina vode

Stvaranju kanala podložnije je sitnozrnato tlo. Otvorene šupljine u tlu, slabo zbijeni nasip i pukotine u tlu mogu inicirati stvaranje kanala. Ključanje tla je pojava povezana s time.

Ključanje tla se događa kada strujni tlak koji djeluje prema gore premaši silu kojom tlo djeluje prema dolje. Ovakvi uvjeti definiraju se **kritičnim hidrauličkim gradijentom** ( $i_c$ ):

$$i_c = (\gamma_T - \gamma_w / \gamma_w) = \gamma' / \gamma_w$$

$\gamma_T$  – ukupna jedinična težina tla;  $\gamma_w$  – jedinična težina vode;  $\gamma'$  – uronjena težina tla

U praksi se kao minimalni faktor (FOS) sigurnosti uzima 2:

$$FOS = i_c / i$$

što znači da uronjena težina tla treba biti 2x veća od strujnog tlaka koji djeluje prema gore.

## INŽENJERSKI PROBLEMI S PODZEMNOM VODOM

Podzemna voda značajno utječe na inženjerske radove iz sljedećih razloga:

- (1) može prouzročiti probleme pri građenju;
  - (2) može biti agens erozije koji ugrožava građevine;
  - (3) može negativno utjecati na funkcioniranje građevina.
- Podzemna voda je medij za prenošenje zagađenja; sve značajnije u inženjerskogeološkim istraživanjima.

### Problemi pri građenju

Podzemna voda može otežati ili čak onemogućiti građenje. Gotovo svi iskopi i građevine izvode se ispod razine podzemne vode, neovisno o veličini građevine.

#### Ilustracija: gradnja male brane

Prilikom iskop za gradnju male nasute zemljane brane naišlo se na podzemnu vodu. Crpljenje podzemne vode bilo je neophodno kako bi se omogućilo iskapanje buldozerima u građevnoj jami. Međutim, crpljenje je potrebno obustaviti za potrebe kompakcije nepropusnog materijala jezgre brane. Suprotno tome, nasip brane treba ostati toliko dugo bez vode dok se ne omogući kompakcija materijala ručnim kompaktorom.

Podzemna voda nije uvijek problem sama za sebe, već može nepovoljno utjecati na tlo.

Prilikom izgradnje podvožnjaka za autocestu 94 u Fargu (Sjeverna Dakota) odvodnjavanje gradilišta bilo je potrebno zbog sniženja razine podzemne vode i stabilizacije iskopa u tlu koje u saturiranim uvjetima ima ponašanje 'brzih pijesaka'.

### Projekt kanala Tennessee-Tombigbee

(<http://www.tenntom.org/>)

Bilo je potrebno načiniti iskop volumena >11 km<sup>3</sup> u pijesku i glini. Geotehničkim istraživanjima utvrđeno da će 53 m dubok zasjek ući ispod razine podzemne vode. Da bi se omogućilo iskapanje, postavljen je sustav odvodnjavanja čija funkcija je bila snižavanje razine podzemne vode u prosjeku 15 m. On se sastojao od serija odvodnih kanala i bunara koji su izvođeni postupno po fazama iskapanja.

### Voda kao agens erozije

Voda uzrokuje strukturni slom tla na dva načina: (1) hidrauličkim slomom ('ključanjem' i stvaranjem kanala uz ispiranje čestica; (2) klizanjem, uzgonom i strujnim tlakom.

Slom brane Teton u JI Idaho-u (1976) je primjer hidrauličkog sloma po diskontinuitetu u materijalu na kojemu je započeo proces. Za 6 sati inicijalno strujanje je dovelo do potpunog sloma brane i gubitka od 40% nasipa.

[http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/welcome\\_dam.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/welcome_dam.html)

Uz obale rezervoara pokrenuta su klizišta kao posljedica brze drenaže vode iz rezervoara, zbog čega se materijal padine našao u sljedećim uvjetima: (1) visoka saturirana težina; (2) niska posmična čvrstoća; (3) porni tlakovi u neravnoteži sa saturiranom masom.

Klizišta nastaju uz rubove rezervoara zbog povećanog pornog tlaka uslijed porasta razine podzemne vode. Naime, kosine uz obale rezervoara imaju višu razinu saturacije nego u prirodnim uvjetima. Primjer je akumulacija Vaiont u Italiji.

Podzemna voda koja dovodi do klizanja ne mora biti umjetnog porijekla. Intenzivna oborina može inicirati plitka klizanja zbog povećanja vlažnosti materijala. Podzemna voda teče paralelno površini, što destabilizira kosinu. Horizontalni tok kreira strujni tlak koji djeluje paralelno kosini, što se zbraja s gravitacijom.

Podzemna voda može djelovati kao agens erozije preko uzgona. Primjer je slom Malpasset brane u JI Francuskoj (<http://simscience.org/cracks/advanced/malpasset.html>).

Porni tlak je nastao po diskontinuitetu nepropusnog bloka u lijevom upornjaku. Porast tlaka prvi put je evidentiran kada je došlo do raspucavanja betonskog preljeva brane uslijed ogromnog uzgona. Prijenos visokog pornog tlaka po frakturama inicirao je pomak klinastog bloka stijene u lijevom upornjaku, što je rezultiralo prvim totalnim slomom betonske lučne brane.

### Negativan utjecaj vode na funkcioniranje građevina

Podzemna voda može biti jedan od faktora koji utječu na na funkcioniranje građevina. Funkcioniranje tunela namijenjenih za željeznički ili automobilski promet, akumulacija vode, odlagališta otpada može biti manje učinkovito zbog podzemne vode.

Održavanje uspješnog funkcioniranja iziskuje kontrolu procjeđivanja. Kod kanala za navodnjavanje i akumulacija površinske vode, kontrola procjeđivanja reducira gubitke vode. U lagunama otpadnih voda, odlagalištima krutog otpada, kontrolom procjeđivanja nastoji se zaštititi ili umanjiti zagađenje vode.

Gline ili tla niske propusnosti koriste se kao izolatori. Međutim, potrebno je predvidjeti procurivanje, kako bi se odabrao odgovarajući izolator, njegova debljina i metoda njegova postavljanja.

Sve su značajnije građevine koje izoliraju otpad od podzemlja.

**Villa Farm odlagalište** služi za separaciju otpadnih voda u lagunama u starom površinskom kopu pijeska (promjera 50 m). Gubitak fluida iz lagune bio je infiltracijom u vodonosnik pijeska i to 7000 m<sup>3</sup>/godinu. Zagađenje se malo širilo radijalno, ali se zagađenje u podzemlju širilo u obliku lepeze duline 600 m u smjeru hidrauličkog gradijenta.