

Poglavlje 2

OBJEKTI U PODZEMLJU

Uvod

Projektiranje i izgradnja objekata u podzemlju usko je vezana za vodoopskrbu, navodnjavanje i zaštitu od podzemne vode. U ovom poglavlju aspekti izgradnje podzemnih hidrotehničkih objekata biti će predstavljeni zajedno s osnovnim tehnikama i metodama analize procesa koji su sastavni dio projektiranja i izvođenja objekata u podzemlju.

Pri gornjem dijelu zemljine kore nalaze se velike količine vode pohranjene u poroznom i raspucanom materijalu. Premda se samo manji dio vode iz oborina probije do podzemlja, kroz geološko vrijeme ovakav proces rezultirao je velikim zalihama podzemne vode. Volumen podzemne vode u svijetu predstavlja najveći volumen nezaslanjene vode raspoložive za uporabu. Tablica 1.1 pokazuje raspodjelu vodnih resursa na Zemlji.

Lokacija	Volumen ($\text{km}^3 \cdot 10^6$)	Postotak (%)
Oceani i mora	1370	93,77
Jezera i rijeke	0,18	0,01
Vlažnost zemlje	0,12	0,01
Podzemne vode	60	4
Ledeni pokrivač	30	2
Voda u atmosferi	0,01	<0,01
Voda u biosferi	0,01	<0,01

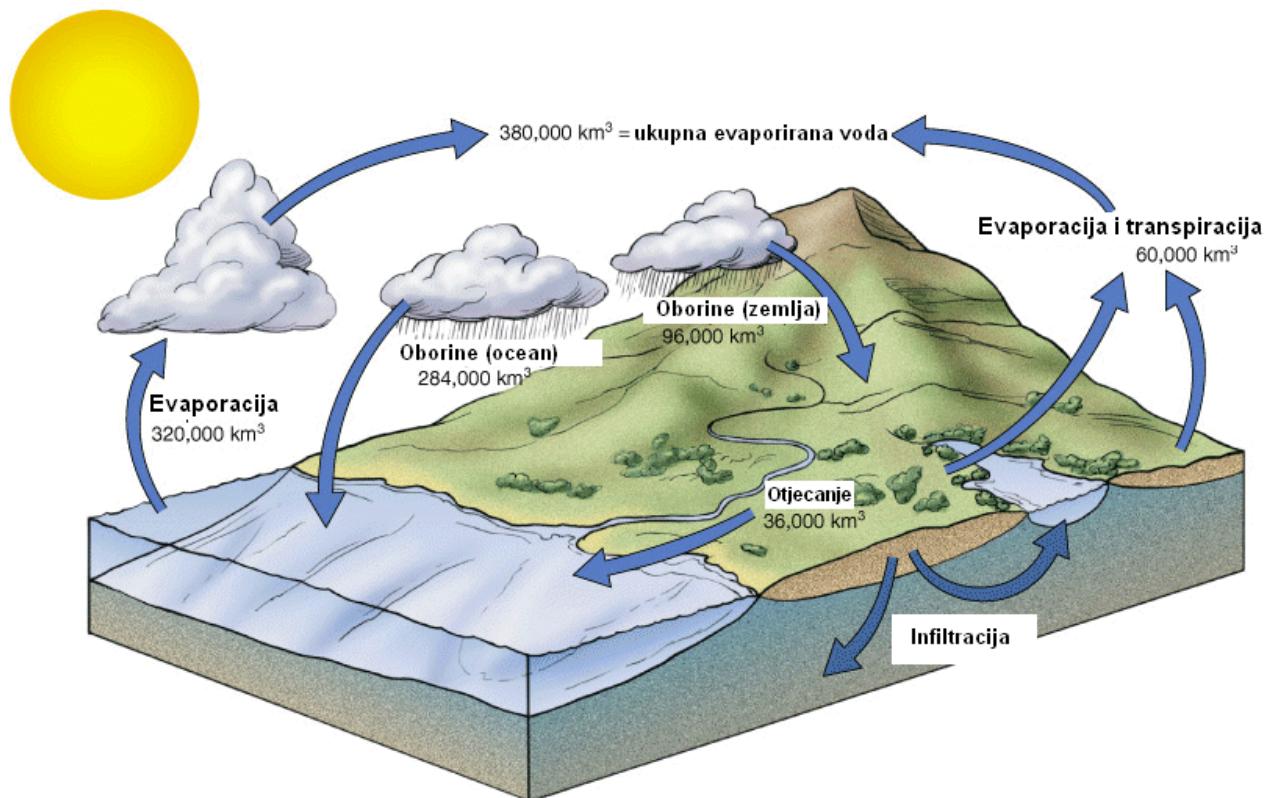
Tablica 1.1 Procjena vodnih resursa Zemlje

Korištenje podzemne vode za vodoopskrbu postaje vitalni dio razvoja većine zemalja u svijetu. U SAD je procijenjeno da pumpanje podzemne vode za vodoopskrbu i navodnjavanje doseže 73 milijarde galona ili $277 \times 10^6 \text{m}^3$ dnevno, što čini otprilike 1/5 ukupne upotrebe voda u SAD. Izgradnja objekata za korištenje podzemnih voda ili za

zaštitu od podzemnih voda, predstavlja svakodnevnu zadaću građevinskih inženjera u današnjoj praksi. Ti objekti su skupi i traže detaljno poznavanje osnovnih fizikalnih procesa i metoda istraživanja u podzemlju. U prošlom poglavlju osnovni principi i metode podzemnih istraživanja su prikazani dok je ovo poglavlje posvećeno prvenstveno objektima u podzemlju te njihovoj izgradnji.

1. Voda u podzemlju

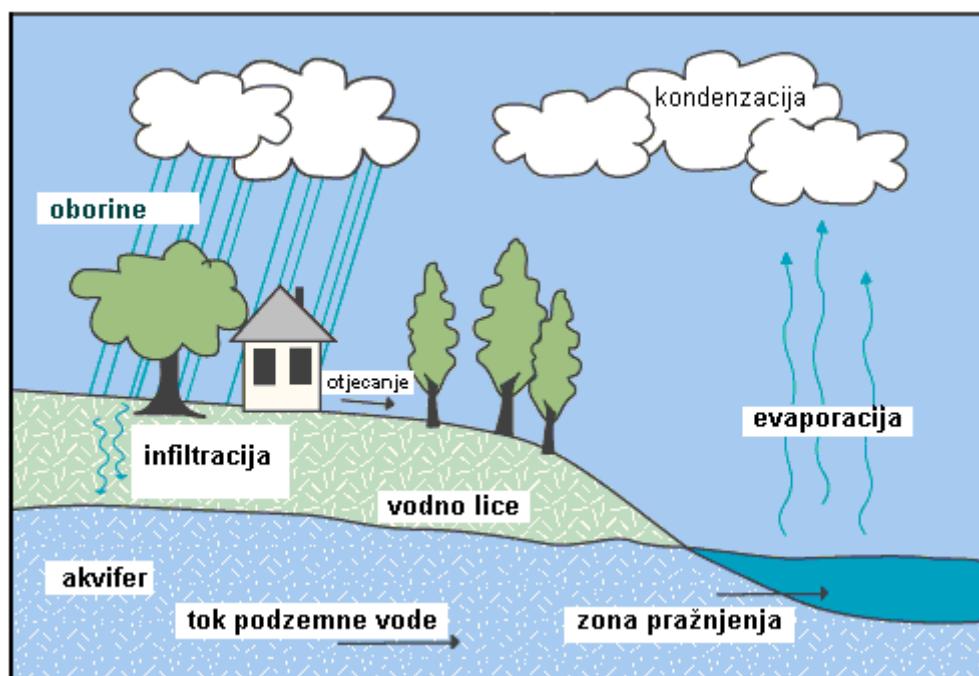
Upoznavanje s podzemnom vodom i principima njenog korištenja teško je odvojiti od površinske vode obzirom da su ta dva izvora vode povezani kako fizikalnim procesima tako i metodama iskorištavanja. Oni su zajedno sastavni dio bilanca vode na zemlji. Slika 1.1a prikazuje klasičan primjer hidrološkog bilanca vode na zemlji, dok slika 1.1 b prikazuje primjer voda u podzemlju.



Slika 1.1 a Hidrološki ciklus vode na Zemlji

Voda u podzemlje dolazi prvenstveno iz oborina procesima infiltracije i perkolacije kroz poroznu sredinu. Vrsta geološke sredine sistema te stupanj heterogenosti određuje brzinu i količinu vode koja će se infiltrirati u zasićenu zonu i postati sastavni dio podzemne vode.

Ova nestacionarnost razine podzemne vode vrlo je važna karakteristika na koju treba obratiti posebnu pozornost pri projektiranju objekata čiji temelji mogu zadirati u područje oscilacija razine podzemne vode.



Slika 1.1 b Voda u podzemlju

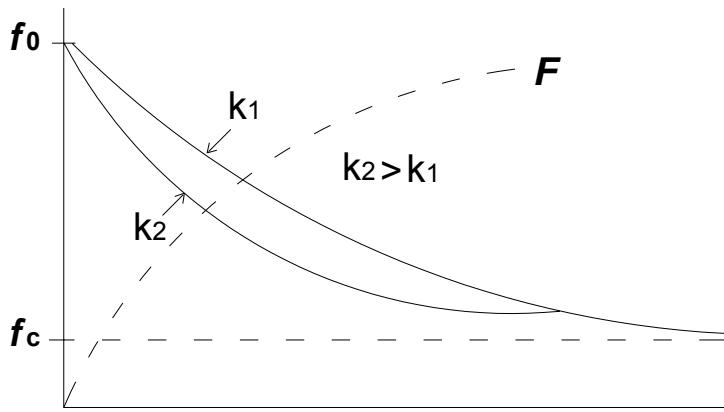
1.1 Teorija infiltracije

Nakon oborina dio vode se infiltrira u podzemlje i time prihranjuje podzemnu vodu. Jedan dio infiltrirane vode ostaje u nezasićenoj zoni vezan kapilarnim silama za zrnatim materijal dok preostali dio doprinosi prihranjivanju zasićene sredine. Granica između nezasićenog i zasićenog dijela podzemne sredine zove se vodno lice i predstavlja pjezometarski nivo nultog pritiska. Neposredno iznad razine podzemne vode nalazi se zona kapilarnog izdizanja. U tom dijelu prostora pora ispunjen je dijelom s vodom, ali kapilarne i molekularne sile su značajne i tlak vode je manji od atmosferskog.

Infiltracija je proces penetriranja u poroznu formaciju. Taj proces su detaljno proučavali hidrolozi i pedolozi, a ovdje ćemo spomenuti samo neke od najvažnijih:

Horton (1993) je pokazao da se brzina infiltracije padalina kroz površinski sloj tla smanjuje s vremenom.

Nadalje, Horton je dokazao da za bilo koje tlo postoji granična krivulja koja definira najveću moguću brzinu infiltracije kroz vrijeme.



Slika 1.3

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} = \frac{dF}{dt} \quad (1.1)$$

k = konstantno opadanje [T^{-1}]

- jednadžba se dobije iz Richard's uz uvjet D i $k = \text{konst.}$

primjer 1: Inkrementalna dubina infiltracije između 1 i 2 h:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$$

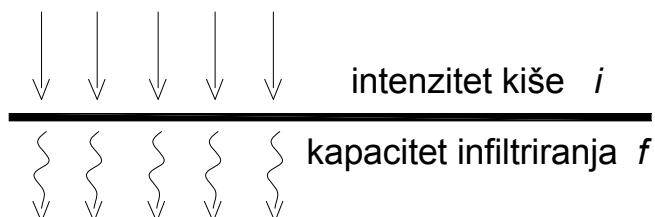
$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = f_c t + (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt}) \frac{1}{k} \quad (1.2)$$

$$f_c = 0.53 \text{ cm/h}$$

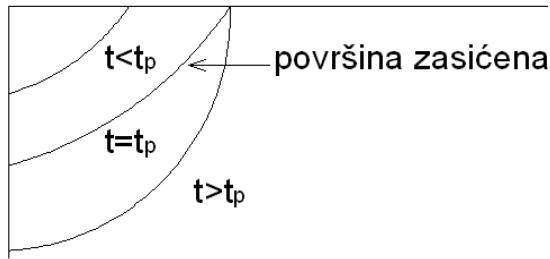
$$f_0 = 6 \text{ cm/h} \quad \Rightarrow 0.53 + (0.53 - 6)(1 - e^{-4.182}) \frac{1}{4.182}$$

$$k = 4.182 \text{ h}^{-1}$$

$F(2) - F(1) = \text{dubina infiltracije za drugi sat kontinuirane kiše}$



$i > f \Rightarrow \text{voda se akumulira na površini } t_p$



Slika 1.4

Philip je razvio teoriju za jednodimenzionalnu infiltraciju te izveo jednadžbe koje opisuju infiltraciju i za kratkoročne i dugoročne procjene, otkrivši da se kumulativna infiltracija u homogenom tlu približava saturiranoj hidrauličkoj vodljivosti:

$$F(t) = \underbrace{S\sqrt{t}}_{\substack{\text{usisno} \\ \text{djelovanje}}} + \underbrace{kt}_{\substack{\text{gravitacijsko} \\ \text{djelovanje}}} \quad (1.3)$$

S = parametar sorpcije (funkcija usisnog djelovanja)

k = konduktivitet

Diferencijacijom dobivamo:

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} S\sqrt{t} + k \quad t \rightarrow \infty \quad (1.4)$$

$$f(t) \rightarrow k$$

Za horizontalnu kolonu samo usisno djelovanje uvlači vodu, tada je:

$$F(t) = S\sqrt{t} \quad (1.5)$$

Primjer 2:

$$A = 40 \text{ cm}^2$$

$$K = 0.4 \text{ cm}^2$$

$$V = 100 \text{ cm}^3$$

$$F(t) = ? \text{ za } t = 30 \text{ min}$$

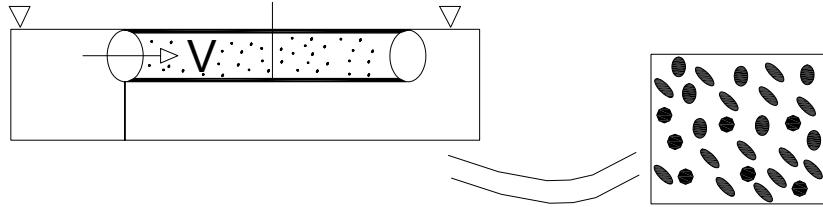
$$F = \frac{100}{4} = 2.5 \text{ cm} \text{ (infiltracijska dubina)}$$

$$F(t) = S\sqrt{t}$$

$$2.5 = S(\sqrt{0.25})$$

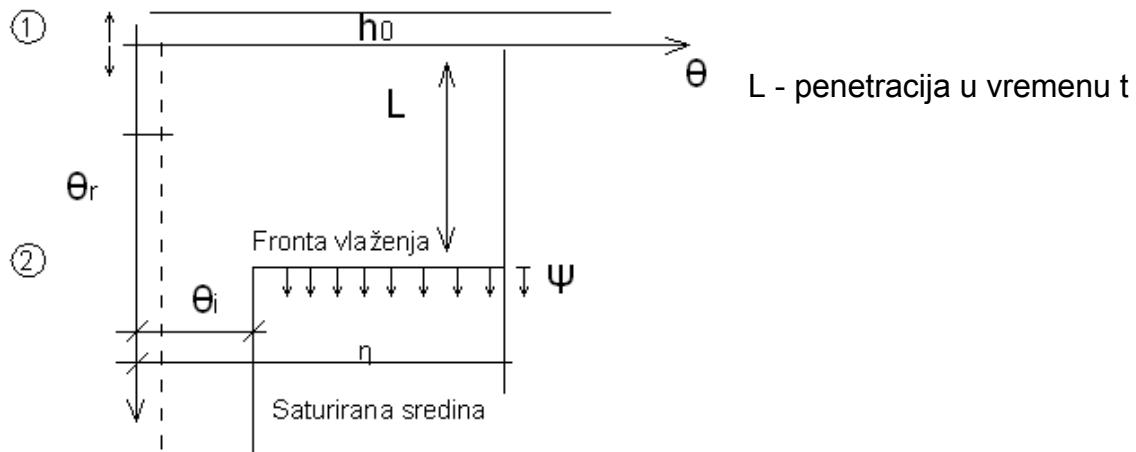
$$S = 5 \text{ cm } h^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow F(t) = S\sqrt{t} + kt$$

$$F(t) = 5\sqrt{0.5} + 0.4(0.5) = 3.74 \text{ cm}$$



Green i Ampt model

Osnovna prepostavka Green i Ampt jednadžbe je da voda infiltrira u (relativno) suho tlo kao prodorna fronta vlaženja.



Slika 1.5

Za jediničnu površinu, voda u zračnoj zoni je:

$$L(\eta - \theta_i) \quad (1.6)$$

Po definiciji to je kumulativna infiltracija F :

$$F(t) = L(\eta - \theta_i) = L \Delta \theta \quad \Delta \theta = \eta - \theta_i \quad (1.7)$$

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad f = K \left(\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right) \quad h_1 = h_0$$

$$h_2 = -\psi - L$$

$$f = K \left[\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L} \right] \approx K \left(\frac{\psi + L}{L} \right) \quad (\text{h}_0 \text{ je zanemarivo mali}) \quad (1.8)$$

Kako je:

$$L = \frac{F}{\Delta\theta} \quad (1.9)$$

slijedi:

$$\Rightarrow f = k \left[\frac{\psi \Delta\theta + F}{F} \right] \quad (1.10)$$

$$f(t) = k \left[\frac{\psi \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (1.11)$$

↓

$$F(t) = kt + \psi \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta\theta} \right) \quad (1.12)$$

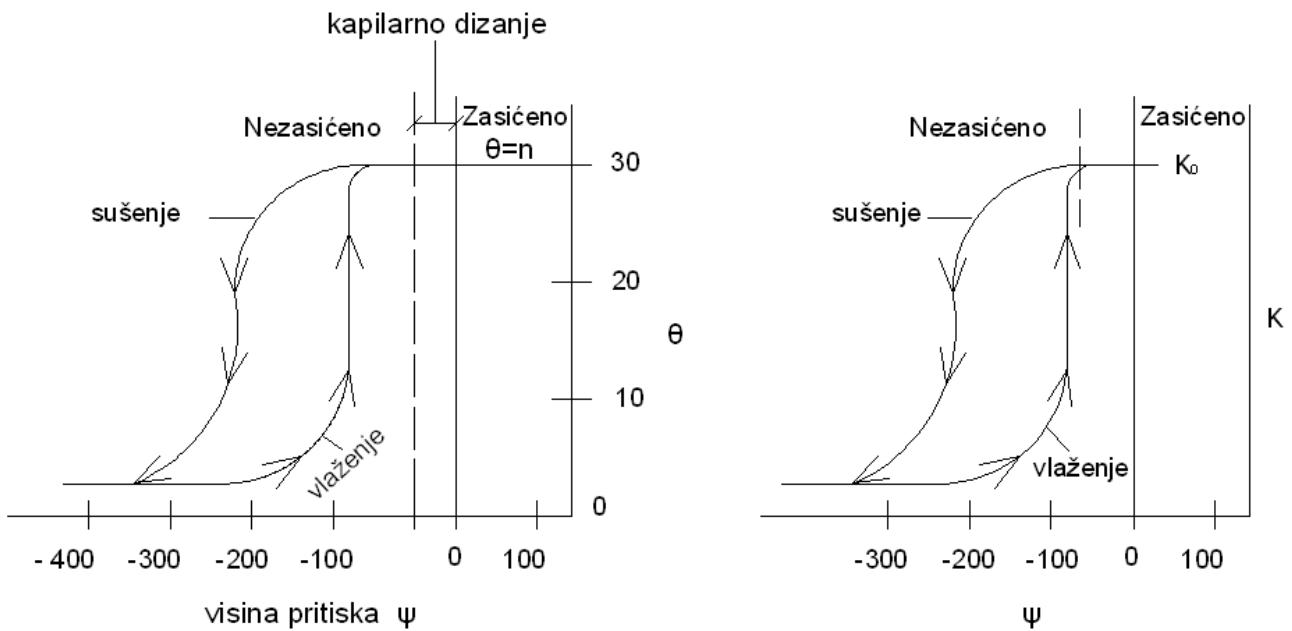
2. Vodonosni i vodonepropusni slojevi: stupanj zasićenosti

2.1 Nezasićena sredina

U prošlom poglavljtu dat je opis Darcyevog eksperimenta za zasićenu sredinu kada voda ispunjava sve povezane pore u podzemnoj formaciji. Jasno je da dijelovi podzemlja nisu uvijek ispunjeni vodom, a to se prvenstveno odnosi na one dijelove podzemlja koji su blizu površine zemlje. Prostor pora u tom slučaju samo je parcijalno ispunjen vodom i stoga se taj dio zove nezasićena zona. Osnovna fizikalna karakteristika nezasićene sredine je stupanj vlažnosti koji je prisutan u formaciji. Ako podijelimo ukupni volumen poroznog uzorka V_U , na volumen čvrste faze V_s , volumen vode prisutan u uzorku V_v i volumen zraka prisutnog u uzorku V_z , tada je stupanj vlažnosti definiran kao:

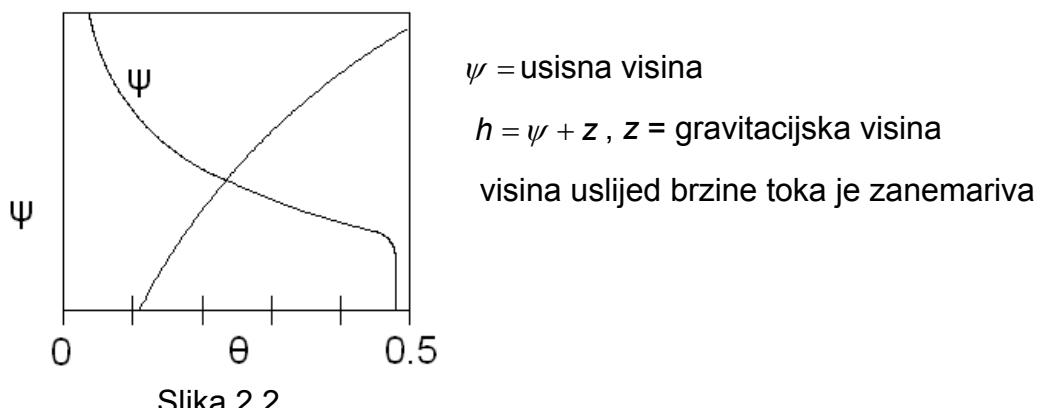
$$\theta = \frac{V_v}{V_U} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

Kao i porozitet, vlažnost se definira u postotku i u slučaju zasićene sredine, $\theta = n$, dok kod nezasićene sredine vrijedi $\theta < n$.



Slika 2.1

Vrlo često se uzima da vodno lice u podzemlju predstavlja granicu između zasićene i nezasićene sredine. Međutim također neposredno iznad vodnog lica nalazi se zona kapilarnog izdizanja. To je zona gdje je voda privučena uz površinu čestica materijala sa elektrostatičkim silama. Ta površinska adhezija izdiže vodu iznad vodnog lica i kod šljunčanih materijala može iznositi nekoliko centimetara dok kod gline kapilarno izdizanje može doseći i do metra. Voda se drži čestica porozne formacije kroz elektrostatičke sile između molekula vode i površine čestica. Kapilarno izdizanje ide do momenta kada je usisno djelovanje zrna jednako gravitacijskim silama.



Slika 2.2

Darcy-ev zakon:

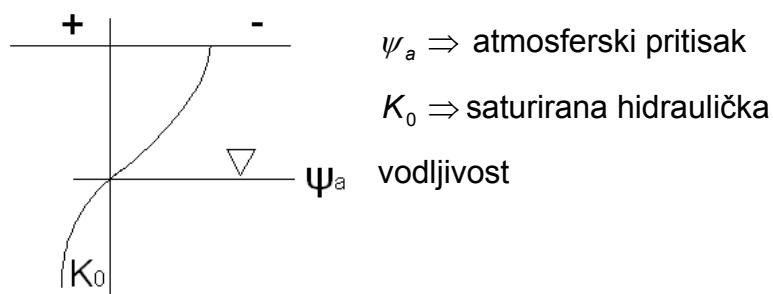
$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \Rightarrow q = -K \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z} = -\left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} + K\right) = -\left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K\right) \quad (2.2)$$

D = difuzni koeficijent u poroznoj nezasićenoj formaciji:

$$D = K \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad [L^2/T] \quad (2.3)$$

Jednadžba kontinuiteta:

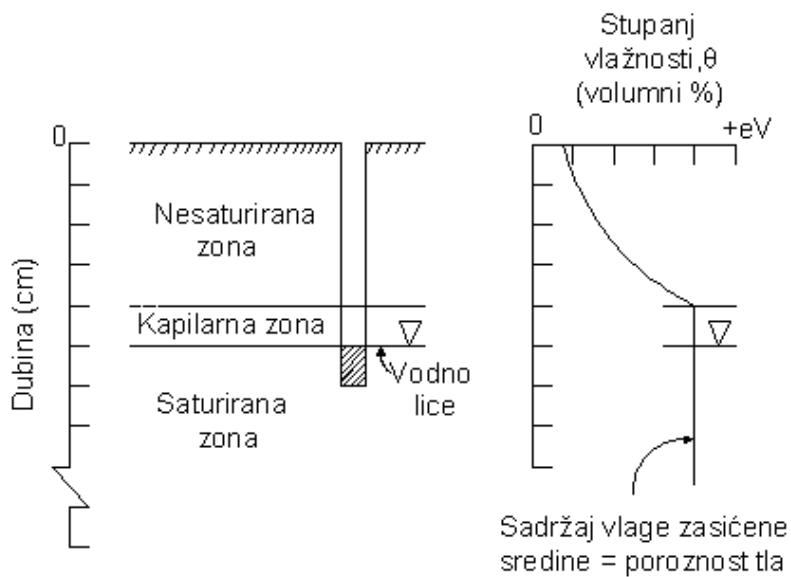
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right) \quad \text{Richard-ova jednadžba} \quad (2.4)$$



Darcy-ev zakon za nezasićenu sredinu:

$$v_z = -k(\psi) \frac{\partial h}{\partial z}$$

Vodno lice u podzemlju se definira kao ravnina pri kojoj je tlak vode jednak atmosferskom tlaku, a mjeri se određivanjem razine vode u zdencu. Ako s p označimo mjereni tlak, onda je na vodnom licu $p = 0$, poviše vodnog lica $p < 0$, dok je u zasićenoj sredini $p > 0$. Slika 2.3 prikazuje osnovne odnose između zasićene i nezasićene porozne sredine.



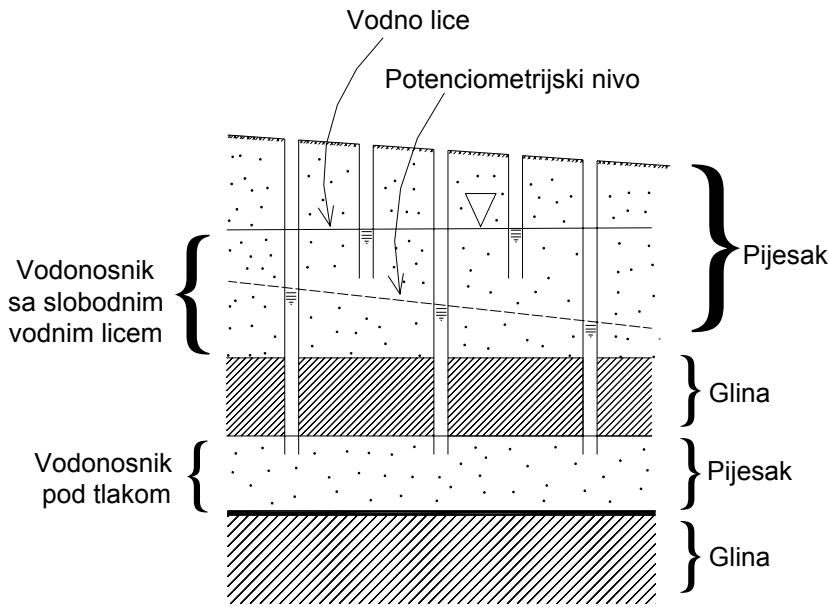
Slika 2.3 Raspodjela tlaka između zasićene i nezasićene sredine

2.2 Zasićena sredina

Osnovna karakteristika zasićene sredine je da se nalazi ispod vodnog lica u podzemlju. Voda ispunjava sve povezane pore i vlažnost je jednaka efektivnom porozitetu. Pritisak vode je veći od atmosferskog tako je mjereni tlak veći od nule. Hidraulička visina se mjeri u piezometrima.

Svaka geološka formacija koja je porozna, zasićena vodom i može prinositi značajne količine vode pod utjecajem hidrauličkog gradijenta, zove se vodonosni sloj ili vodonosnik (riječ akvifer, koja se često susreće u stranoj literaturi, ima puno šire značenje). Vodonepropusni slojevi (ili akvitardi) su formacije koje nemaju sposobnost provođenja vode zbog slabe hidrauličke provodljivosti, bez obzira da li u sebi sadrže vodu u prostoru pora. Eksplotiranje tih slojeva u cilju kaptiranja podzemne vode je vrlo minimalno.

Najčešći primjeri vodonosnih slojeva su geološke formacije dobre hidrauličke vodljivosti (npr. $> 10^{-5} \text{ [m/s]}$). Tu prvenstveno spadaju aluvijalne formacije pijeska, šljunka te ostale provodljive sedimentne stijene (pješčenjaci, vapnenci itd.). Vodonosni sloj može biti pod tlakom ili sa slobodnim vodnim licem (sl. 2.4)



Slika 2.4 Primjer tečenja u vodonosniku

Kod vodonosnih slojeva pod tlakom vodno lice u zdencu je više od gornjeg nivoa vodonosnog sloja, a kod slučaja kada je tlak vode iznad površine zemlje tada se formiraju arteški uvjeti. Vodonosni slojevi pod tlakom često se definiraju s tzv. potenciometarskim nivoom mjeranim u piezometrima koji prodiru u vodonosni sloj. Cijeli koncept korištenja potenciometarske površine je temeljen na prepostavci horizontalnog toka u horizontalnom akviferu. U protivnom, potenciometarska površina predstavlja hidrauličku visinu na dvodimenzionalnoj plohi i ne može pokazati vrlo česte vertikalne gradijente. Naročito je važno u praksi razlikovati informaciju preko potenciometarske površine i vodnog lica. Slika 2.4 predstavlja tu razliku između dva prikaza vodnog stanja.

2.3 Fizikalne karakteristike vodonosnih slojeva

Postoji nekoliko osnovnih fizikalnih karakteristika vode i porozne sredine koje treba poznavati da bi se opisali hidrauličke karakteristike podzemlja koje služe kao podloga inženjeru pri projektiranju i izvođenju podzemnih hidrotehničkih objekata. To su:

- gustoća vode ρ [kg / m^3]
- hidraulička vodljivost, K [m/s] definirana Darcyevim zakonom
- stišljivost vode

Stišljivost i efektivni tlak

Stišljivost je karakteristika materijala koja opisuje promjenu volumena ili napona u materijalu pod djelovanjem tlaka. Standardni pristup u čvrstoći materijala je koncept modula elastičnosti koji je definiran kao odnos promjene pritiska, $d\sigma$, prema rezultirajućoj promjeni relativne deformacije, $d\varepsilon$. Stišljivost je upravo inverzna modulu elastičnosti. Ona je definirana kao relativna deformacija/narezanje, odnosno, $d\varepsilon/d\sigma$. Kod toka vode u poroznoj sredini trebamo poznavati stišljivost vode i stišljivost poroznog materijala. Čvrstoća materijala u poroznoj sredini se također mjeri modulom elastičnosti:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.5)$$

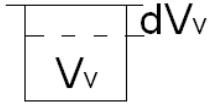
gdje je $d\sigma$ rezanje, a $d\varepsilon$ deformacija.

Stišljivost je obrnuto proporcionalna modulu elastičnosti:

$$\text{stišljivost} = \frac{1}{E} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \quad (2.6)$$

Povećanje tlaka (p) vode može rezultirati smanjenju određenog volumena vode, V_V .

Stišljivost vode je tada definirana kao:

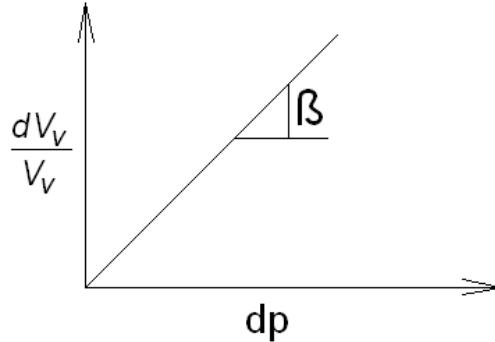
$$\beta = \frac{-dV_V/V_V}{dp} \quad (2.7)$$


pri čemu je negativni znak potreban da se dobije pozitivna vrijednost za β . dV_V/V_V predstavlja relativnu deformaciju u volumenu, a dp predstavlja promjenu tlaka. Gornji izraz prikazuje linearnu elastičnu relaciju između volumetrijske deformacije i tlaka induciranih u vodi sa promjenom tlaka dp . Dakle stišljivost vode β , predstavlja nagib linearog odnosa relativne deformacije prema tlaku. β ima jedinice kao i inverzni tlak:

$$\left(\frac{N}{m^2}, \text{Pa} \right) \text{tj.}$$

$$\left[\frac{m^2}{N}, \text{Pa}^{-1} \right]$$

$$\beta \approx 4.4 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$



Za poznatu masu vode $\left(\rho = \frac{M}{V}\right)$ gornji se izraz (2.7) može pisati:

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (2.8)$$

gdje ρ označava gustoću vode, $d\rho/\rho$ je relativna deformacija volumena izražena kao relativna promjena gustoće.

Integracijom izraza β definiranim s gustoćom vode dobiva se jednadžba stanja vode:

$$\rho = \rho_0 \exp[\beta(p - p_0)] \quad (2.9)$$

s tim da je ρ_0 gustoća pri p_0 . Ako se uzme za p_0 = atmosferski, dobiva se:

$$\rho = \rho_0 \exp[\beta p] = \rho_0 e^{\beta p} \quad (2.10)$$

Za nestišljivu tekućinu vrijedi:

$$\beta = 0 \quad \rho = \rho_0 = \text{konstanta} \quad (2.11)$$

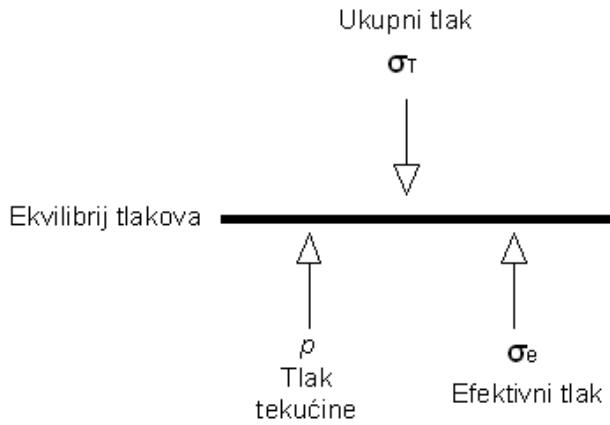
Temperatura koja se uglavnom susreće u podzemlju ima zanemariv utjecaj na β tako da u praksi uglavnom uzimamo $\beta = \text{const}$.

Pretpostavimo da je jedinična masa porozne sredine stavljenja pod pritisak. Postoje tri načina kako može doći do smanjenja volumena u poroznoj sredini:

- 1) kompresijom vode u porama – kontroliran stišljivošću vode (β)
- 2) kompresijom individualnih zrna materijala - stišljivost individualnih zrna, taj mehanizam je zanemariv pod pretpostavkom da su zrna materijala nestišljiva
- 3) preraspodjelom porognog materijala u gušće pakiranu sredinu - taj mehanizam predstavlja stišljivost porozne sredine koji je bitan u izgradnji podzemnih objekata.

Pođimo od koncepta efektivnog tlaka predloženog od Terzaghi-a (1925). Uzmimo za primjer tlak u ravnoteži na proizvoljnoj plohi (Sl.2.5). σ_T je ukupni tlak koji djeluje prema dolje na plohu. On može biti rezultat težine same porozne sredine s vodom, a može biti

rezultat građevnog objekta. Ravnotežu ukupnom tlaku daje tlak tekućine p i efektivni tlak σ_e . Upravo ovaj efektivni tlak djeluje na skelet porozne sredine i uzrokuje preraspodjelu zrna porognog materijala koja konačno rezultira kompresijom skeleta porozne sredine. U ravnotežnom stanju možemo pisati $\sigma_T = \sigma_e + p$ odnosno u obliku promjene (diferencijalnom obliku) $d\sigma_T = d\sigma_e + dp$.



Slika 2.5 Ravnoteža tlakova

Kako je u većini slučajeva težina porozne formacije ili težina objekta konstantna u vremenu $d\sigma_T = 0$ što rezultira jednakosti, $d\sigma_e = -dp$ (porast tlaka tekućine prati pad efektivnog tlaka). Dakle efektivni tlak u bilo kojoj točci porognog sistema kontroliran je tlakom tekućine u toj točci. Kako je $p = \rho g(h - z)$ u bilo kojoj točci tj. $z = \text{konst.}$, svaka promjena efektivnog tlaka je kontrolirana promjenom hidrauličke visine, $d\sigma_e = -\rho g dh$.

Ova kratka analiza efektivnog pritiska omogućava definiciju stišljivosti porozne sredine u obliku:

$$\alpha = \frac{-dV_U / V_U}{d\sigma_e} \quad (2.12)$$

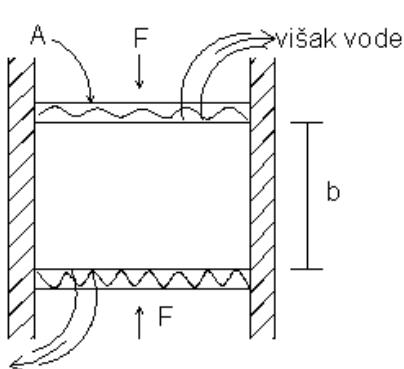
gdje je V_U ukupni volumen porozne mase, definiran kao $V_U = V_s + V_v$, pri čemu V_s označava volumen krute faze dok V_v označava volumen tekućine. Povećanje efektivnog napona $d\sigma_e$ rezultira smanjenjem dV_U ukupnog volumena porozne sredine. Ovo smanjenje volumena nastaje kao rezultat reorganizacije zrnatog materijala porozne sredine. Kako se općenito može pisati, $dV_U = dV_s + dV_v$, tada pod pretpostavkom da je kruta faza nestišljiva (npr. $dV_s = 0$) pišemo $dV_U = dV_v$. Na istom principu odnosa efektivnog napona i promjene volumena temeljeni su i instrumenti za mjerjenje stišljivosti porozne sredine odnosno

procesa konsolidacije koji ima važnu primjenu u analizi i projektiranju hidrotehničkih objekata.

Povećanje u $d\sigma_e$ (efektivni tlak) rezultira smanjenjem dV_U koje rezultira preraspodjelom poroznog materijala. Dakle:

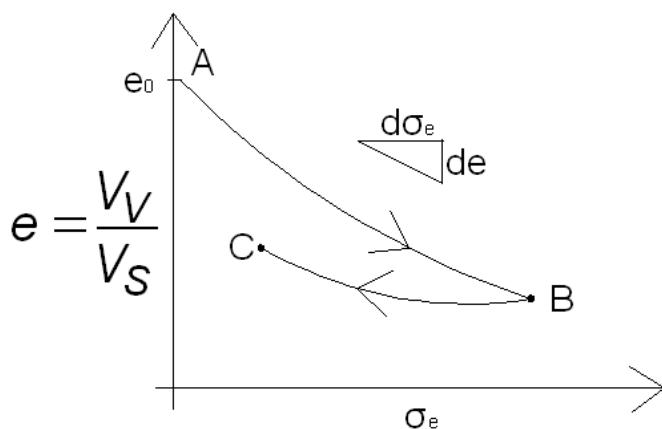
$$dV_U = dV_S + dV_V \quad (2.15)$$

Eksperiment:



$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad d\sigma_T = \frac{dF}{A}$$

Promjena volumena u uzorku se mjeri za postepeno povećanje sile F . Dreniranje vode iz uzorka preraspodjeljuje tlak sa vode na skeleton čvrste faze. To se zove konsolidacija.



Slika 2.6

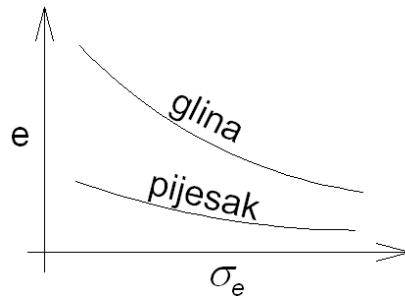
Kada se uspostavi ekvilibrij onda je $dp = 0 \Rightarrow d\sigma_T = d\sigma_e = dF/A$.

Odnos volumena vode prema čvrstoj fazi:

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad e_0 = \text{početni}$$

$$\alpha = \frac{-db/b}{d\sigma_e} = \frac{-de/(1+e_0)}{d\sigma_e} \quad (2.16)$$

Stišljivost (sl.2.6) α se određuje preko odnosa (e vs. σ_e). Krivulja \overline{AB} je za povećanje opterećenja, dok je krivulja \overline{BC} za smanjenje σ_e . Različitost krivulja naziva se histereza.



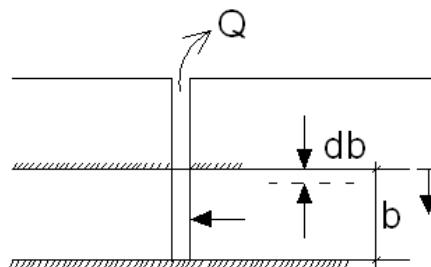
α za razliku od β nije konstanta već funkcija tlaka $\left(\frac{F}{A}\right)$ te prijašnje opterećenje.

Sredina	$\alpha \left[\frac{m^2}{N}, Pa^{-1} \right]$
Glina	$10^{-6} - 10^{-8}$
Pijesak	$10^{-7} - 10^{-9}$
Šljunak	$10^{-8} - 10^{-10}$
Čvrsta stijena	$10^{-9} - 10^{-11}$
Voda (β)	4.4×10^{-10}

Tablica 2.1

Za vodonosnik α je samo jednodimenzionalna. Ako je tlak samo vertikalni onda b postaje debljina vodonosnika i α postaje vertikalna stišljivost. U stvarnosti je $\alpha = \alpha(x,y)$ iako se smatra da je vertikalni najvažniji.

Deformacija vodonosnika i zbijanje



Ako je σ_T konstanto (težina objekta ista) smanjenje hidrauličke visine $-dh$ rezultira povećanje σ_e ($d\sigma_e = -\rho g dh$). Dakle:

$$db = -\alpha b d\sigma_e = -\alpha b \rho g dh \quad (2.17)$$

negativni znak pokazuje da se radi o smanjenju debljine vodonosnika. Dakle, prekomjerno pumpanje prouzrokuje horizontalne gradiente, h opada, σ_e raste i vodonosnik se zbija. Ako se ovo zbijanje propagira sve do površine zemlje tada dolazi do pojave ("land subsidence") spuštanja tla.

Specifična zapremina vodonosnika se definira kao volumen vode kojeg jedinični volumen vodonosnika ispusti uslijed jediničnog spuštanja hidrauličke visine (potencijala). Padom hidrauličkog potencijala opada tlak tekućine i raste efektivni napon σ_e . Ispuštena voda iz zapremine vodonosnika rezultat je dva mehanizma:

- 1) zbijanja vodonosnika uslijed povećanja σ_e i
- 2) uslijed opadanja tlaka tekućine p

U prvom slučaju, rezultat promjene volumena je ispuštanje vode, pa se korištenjem izraz (2.12) dobiva:

$$dV_v = -dV_U = \alpha V_U d\sigma_e = \alpha \rho g \quad (2.17)$$

pri čemu je zadnja jednakost dobivena uzimanjem jediničnog volumena, $V_T=1$, te činjenicom da je promjena efektivnog tlaka $d\sigma_e$ kontrolirana promjenom hidrauličke visine, $d\sigma_e = -\rho g dh$ (jedinično opadanje hidrauličke visine rezultira sa $dh = -1$). Voda koja se izluči opadanjem tlaka može se pisati korištenjem (2):

$$dV_v = \beta n \rho g \quad (2.18)$$

pri čemu smo koristili $V_v = nV_U$ (n je porozitet) i $dp = \rho g d(h - z)$, uz jedinični volumen, $V_U = 1$ i jedinično opadanje hidrauličkog tlaka, $dh = -1$.

Specifični volumen je zbroj gornja dva mehanizma koji opisuju način ispuštanja vode iz jedinične zapremine vodonosnika:

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (2.19)$$

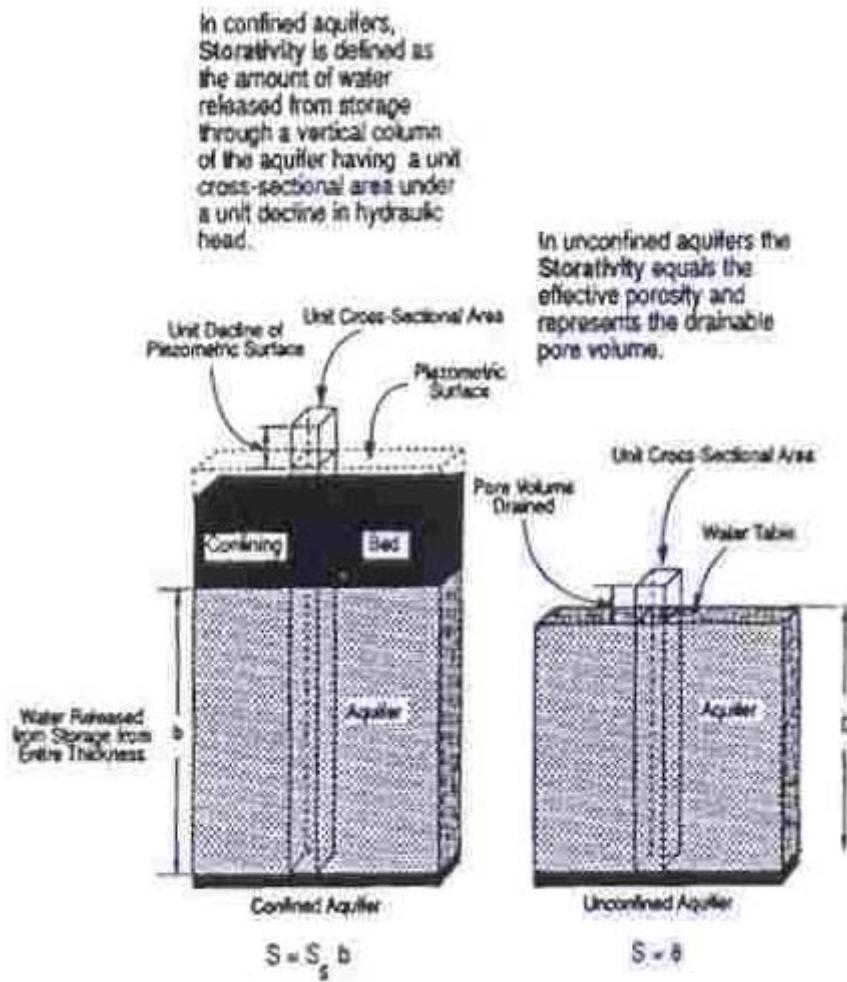
Jedinica gornjeg izraza je [dužina⁻¹] što i proizlazi iz definicije S_s koja kaže da je volumen vode iz jediničnog volumena vodonosnika ispušten pod djelovanjem jediničnog pada hidrauličke visine.

U vodonosniku koji je pod tlakom (npr., hidraulička visina iznad gornjeg nivoa vodonosnika) i koji ima visinu b , definiramo koeficijent zapremine sa:

$$S = S_s b = \rho g b (\alpha + n\beta) \quad (2.20)$$

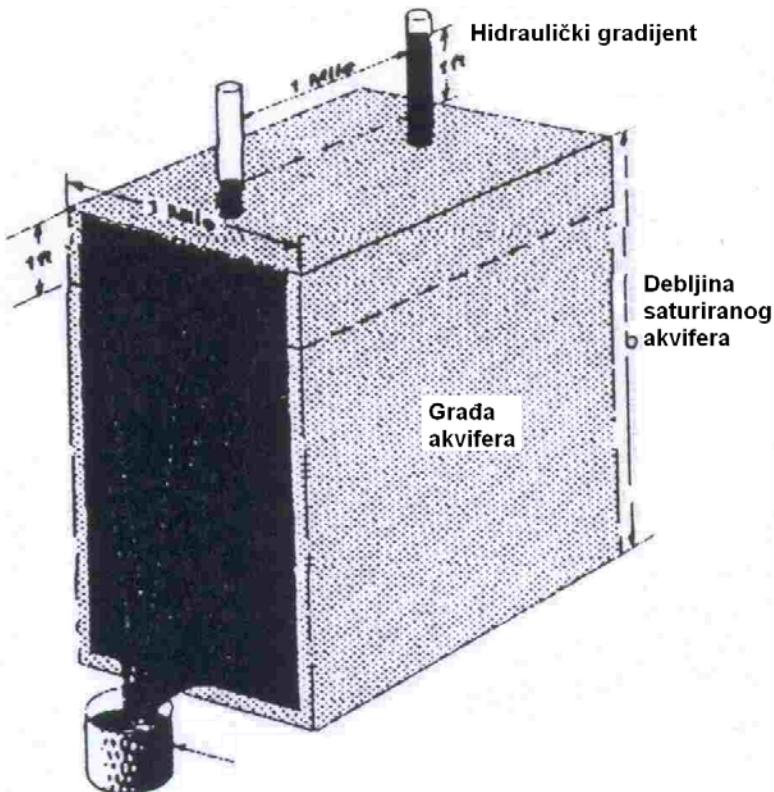
što se riječima može opisati kao volumen vode kojeg vodonosnik može ispustiti po jediničnoj površini i jediničnom padu komponente hidrauličke visine okomite na tu površinu. Kod vodonosnika sa slobodnim vodnim licem parametar zapremine se definira kao specifična izdašnost ("specific yield"), S_y . Definiran je kao volumen vode kojeg vodonosnik sa slobodnim licem ispusti po jediničnoj površini kao rezultat jediničnog pada hidrauličke visine.

Slika 2.7 a prikazuje princip parametra zapremine za vodonosnik pod pritiskom i vodonosnik sa slobodnim vodnim licem.

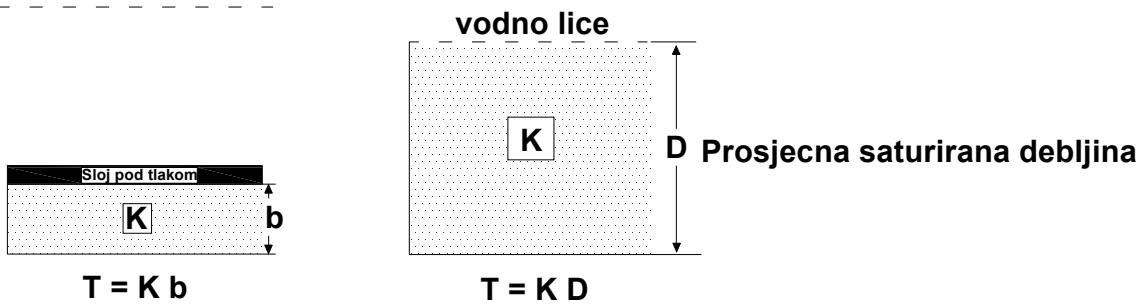


Slika 2.7 a Princip parametra zapremine

Transmisivnost se analogno definira kao umnožak hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnika, $T=Kb$. Iz izraza se jasno vidi da transmisivnost ima jedinicu [dužina²/vrijeme].



Pijezometrijska površina



Slika 2.7 b Princip transmisivnosti

Koncept transmisivnosti (slika 2.7 b) i parametra zapremine uveden je u hidrauliku poroznih sredina prvenstveno za potrebe hidraulike zdenaca u vodonosnicima pod tlakom. Kod dvodimenzionalnih problema i vodonosnicima pod tlakom T i S imaju svoj puni smisao, dok u svim drugim aplikacijama u podzemlju njihov smisao se gubi i potrebno je vratiti se osnovnim definicijama hidrauličke vodljivosti K i specifične zapremine S_s ili čak fundamentalno na permeabilitet k , porozitet n ili stišljivost α .

3. Projektiranje i izgradnja zdenaca

Zdenci su osnovni hidrotehnički objekti u podzemlju i predstavljaju često jedan od prvih objekta s kojima se susreće inženjer u praksi, a pogotovo hidrotehnički inženjer. Zdenac se definira kao bušotina (najčešće vertikalna premda može biti u specifičnim slučajevima pod određenim kutom) koja prodire u zemlju kako bi se omogućio pristup podzemnoj vodi. U prošlom poglavlju je navedeno da bušeni zdenci mogu imati razne namjene i po tome se razlikuju. Zdenci se projektiraju i izvode za potrebe iskorištavanja podzemne vode, mjerjenja količine i kvalitete podzemne vode, za potrebe geofizičkih istraživanja, umjetnog prihranjivanja vodonosnih slojeva i za ispuštanje otpadnih voda u podzemlje.

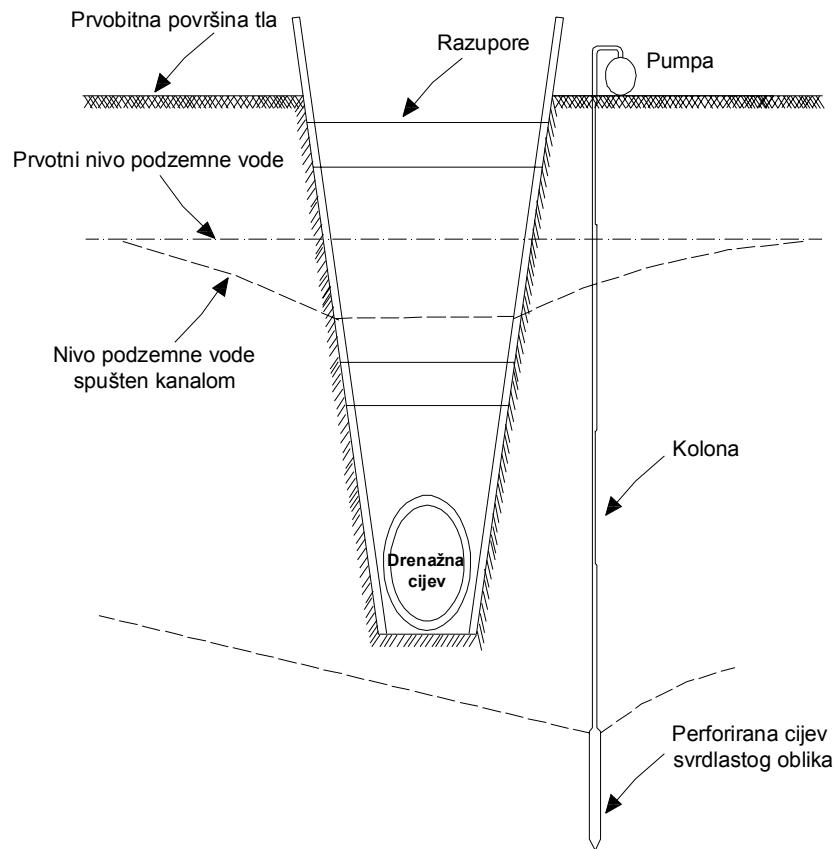
3.1. Vrste zdenaca i način bušenja

Ovisno o namjeni zdenca i tipu geološke sredine, određuje se način izvođenja bušenja. Najjednostavniji tip zdenca je kopani zdenac koji ulazi u zemlju do plitkog nivoa podzemne vode. Zbog težeg načina bušenja ovaj tip zdenca je vrlo plitak i često nema dovoljnu izdašnost.

Zdenci koji se buše u nekonsolidiranim materijalima do 10 cm u dijametru i do 20 m u dubinu mogu se izvoditi s perforiranim cijevima šiljastog oblika. On se uvodi u dubinu s pneumatskim čekićem ili drugim alatom za nabijanje. Kako perforirana šiljasta cijev ulazi u zemlju tako se nastavci dodaju povezani navojem dok se ne postigne željena dubina.

Obzirom da su ovi tipovi zdenaca limitirani u veličini i dubini njihova upotreba za veće crpilišta nije moguća osim ako su nisu korišteni u velikom broju. Ovaj tip zdenaca je vrlo koristan za individualnu vodoopskrbu poljoprivrednika, privremenih gradilišta, te za monitoring kvalitete podzemne vode.

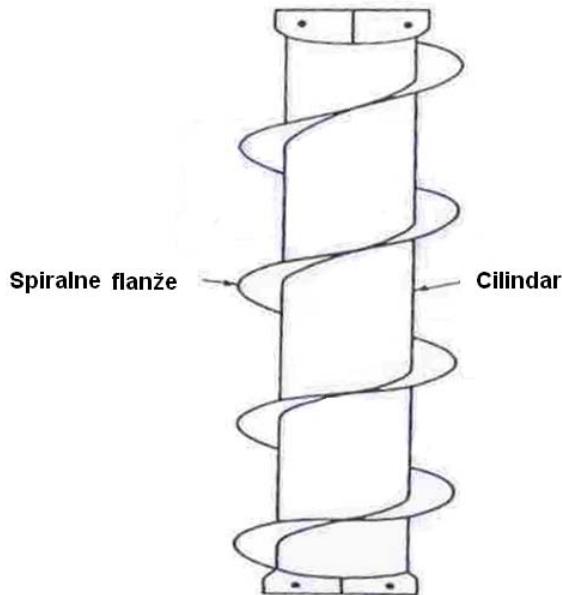
Baterije (skup više zdenaca) ovakvih tipova zdenaca se vrlo često koriste za spuštanje nivoa podzemne vode pri raznim vrstama podzemnih iskopina. Primjerice, slika 3.1 prikazuje slučaj gdje se serija zdenaca s perforiranim cijevima svrđlastog oblika koristi za spuštanje razine podzemne vode ispod dna drenažnog kanala. Slika 3.1 prikazuje kako se pumpanjem zdenca u blizini drenažnog kanala spušta razina podzemne vode i održava suhi kanal. U ovakvim slučajevima jedna se pumpa može koristiti za nekoliko zdenaca međusobno povezanih cijevima na površini zemlje.



Slika 3.1 Princip spuštanja razine podzemne vode pri izvođenju hidrotehničke građevine

U zemljanim formacijama bušenje zdenaca se vrši svrdlima koji kopaju zemlju s noževima postavljenim na kraju svrdla. Iskopani materijal se vadi na površinu sa spiralnim flanžama ("flightinig") (sl.3.2). Ovako bušeni zdenci dosežu promjer 16 – 36 cm te idu u dubinu do 50 m.

Duboki i veći zdenci se buše rotacijskim metodama. Srvdlo s noževima na kraju cijevi se rotira i uz pomoć cirkulirajuće tekućine smravljeni materijal se izvlači na površinu. Najčešće korištena tekućina za bušenje je mješavina bentonita i ostalog smravljenog materijala iz bušotine. Tekućina se injektira kroz cijev te se vraća kroz prostor između cijevi i stjenke bušotine natrag na površinu. Nekad se koristi i reverzibilna cirkulacija kada se voda injektira okolo cijevi, a vraća se kroz cijev.



Slika 3.2 Spiralni cilindar za vađenje iskopanog materijala

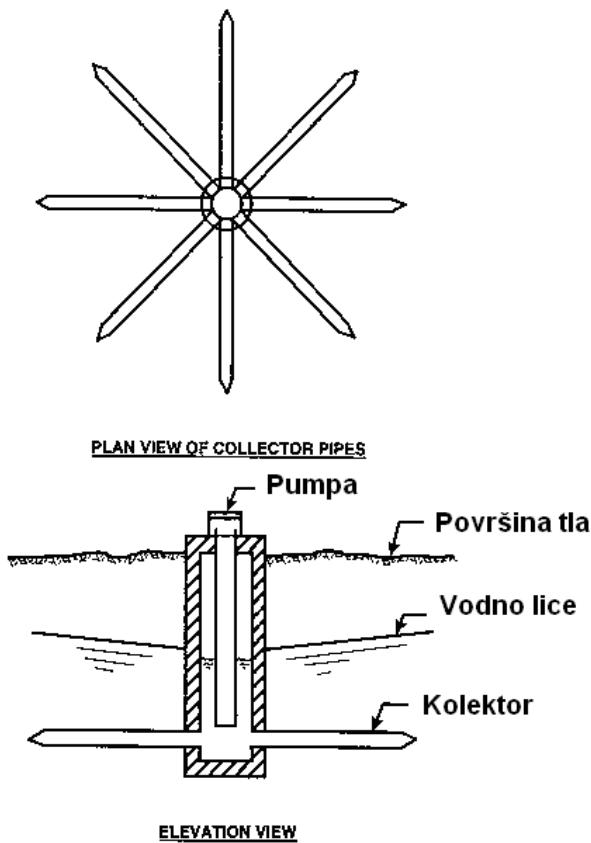
Ovakve rotacijske metode se koriste za zdence u dijametru koji može ići i do 1,5 m te u dubinama do 1,5 km. U naftnoj industriji postoje primjeri vrlo dubokih bušotina.

Na slici 3.3 dan je prikaz rotacijskog svrdla koje je korišteno za bušenje zdenaca u koje se postavljala nuklearna naprava za svrhu automatskih testiranja (prikaz rotacijskog svrdla korištenog u SAD-u, Nevadi ("Nevada Test Site")).

Slika 3.3 Srvdlo za NTS

Nisu svi zdenci vertikalni. Na bliskom istoku i u Iranu susrećemo zdence po imenu ganati, koji su ustvari tuneli bušeni horizontalno ili u usponu. Oni najčešće prate vodno lice u planinskom području i mogu ići do 20 km u daljinu i do 70 m u dubinu. Ganati zdenci danas u Iranu doprinose i 75 % od ukupnih potreba za vodom. Prvenstveno se koriste u planinskim područjima tako da se prikupljena voda može gravitacijski dostavljati stanovništvu. Slični zdenci se koriste i na Havajskim otocima za prikupljanje vode za piće koja se nalazi u manjim slojevima iznad slane podzemne vode.

Drugi tip horizontalnih zdenaca su radijalni kolektori. Najčešći primjer je tzv. Reni kolektor koji se sastoji od centralnog (vertikalnog) zdencu većeg dijametra (4 – 16 m) te perforiranih (horizontalnih) kolektora koji se šire radijalno i mogu dosezati dužine od nekoliko stotina metara. Skica jednog takvog Reni kolektora prikazana je na sl. 3.4. Radijalni kolektori se najčešće koriste u blizini vodotoka za povećanje perkolicije i infiltracije iz vodotoka u vodonosni sloj.



Slika 3.4 Reni kolektor

Osnovna svrha ovakvih hidrotehničkih objekata je zaštiti kvalitetu vode koja je u površinskim tokovima daleko više izložena mogućem zagađenju nego voda u vodonosniku. S druge strane ovakav tip zaštite kvalitete vode povećava troškove kaptiranja vodnih resursa iz podzemlja u usporedbi sa kaptiranjem iz otvorenih tokova.

3.1.1 Izgradnja i zaštita zdenaca

Nakon završetka bušenja projektirane vrste zdenca preostaje završni dio konstrukcije zdenca koji se sastoji u oblaganju bušotine i projektiranju perforiranog dijela zdenca. Osim u području konsolidiranih stijena, bušeni zdenac se oblaže kako bi ga se zaštitilo od mogućeg kolapsa stijenki bušotine. Dio obloge se sastoji od perforiranog materijala koji omogućuje slobodni tok podzemne vode.

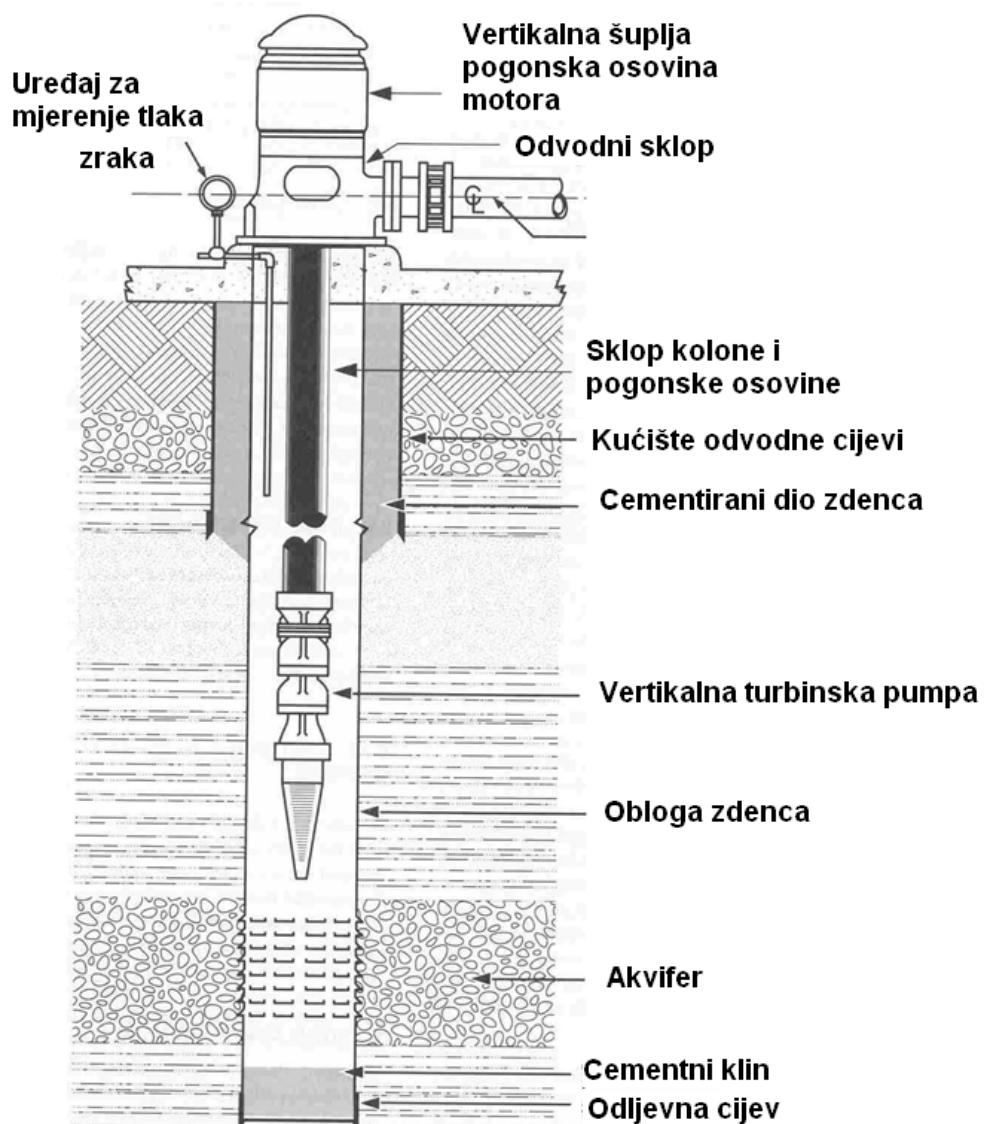
Najčešći materijal koji se koristi za oblogu je nehrđajući čelik ili teflon dok se perforirani dijelovi obloge izvode od fiberglass-a, teflona ili čelika. Veličina otvora u perforiranom dijelu obloge zdenca se određuje na temelju distribucije zrna u vodonosniku.

Zdenac se u završnoj fazi uglavnom sastoji od slijedećih elemenata (sl.3.5):

1. Ulazni dio zdenca koji je cementiran i služi za zaštitu zdenca od površinskog zagađenja

2. Kućište za pumpu i odvod crpljene vode
3. Obloga zdenca s perforiranim dijelom
4. Vertikalna turbinska pumpa

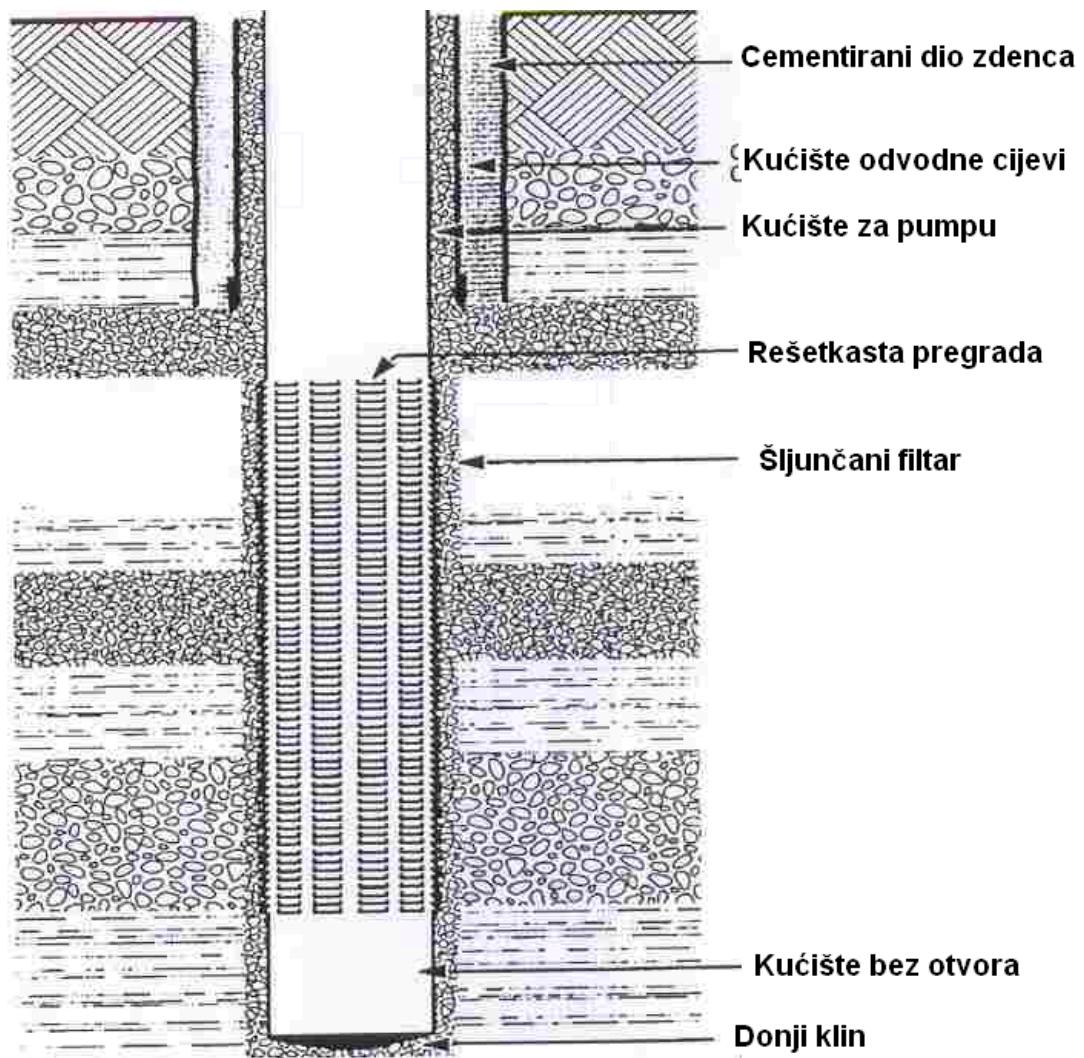
Vrlo česti način konstrukcije zdenca je s tzv. šljunčanim filtrom. Ovakva konstrukcija se uglavnom koristi u vodonosnicima s finim materijalom. Na slikama 3.6, 3.7 i 3.8 mogu se vidjeti različite konstrukcije zdenaca u nekim geološkim formacijama.



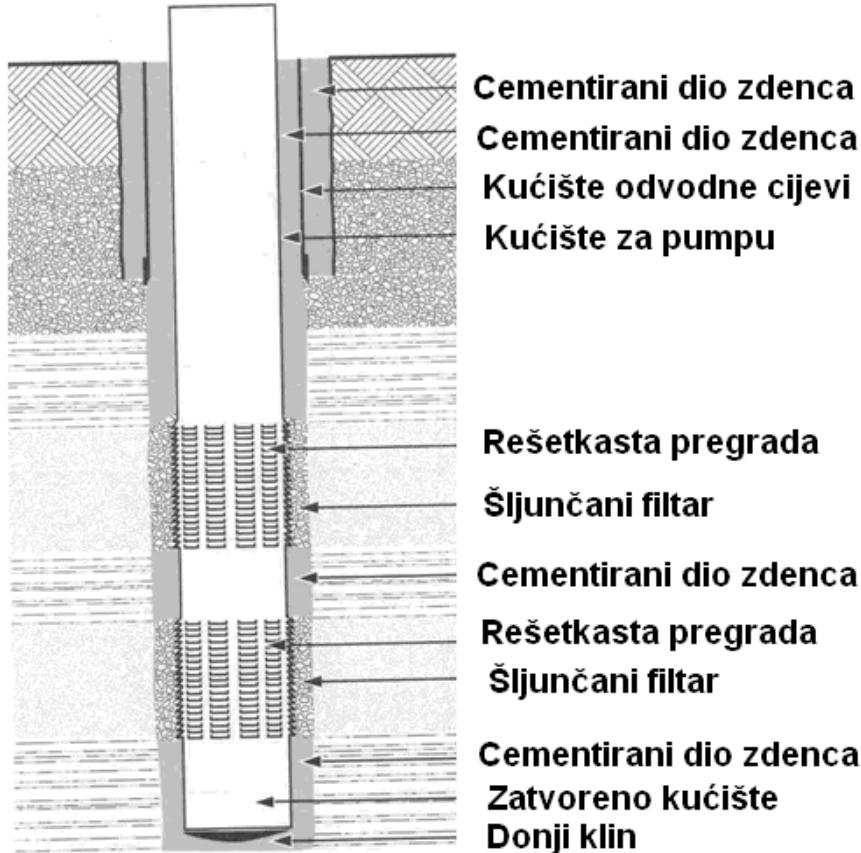
Slika 3.5 Elementi instaliranog zdenca

Nakon što je završena konstrukcija zdenca, pristupa se pumpanju i ispiranju zdenca kako bi se očistio od rezidualnih čestica koje mogu ostati nakon bušenja. Ispiranje

pumpanjem također omogućava ulazak sitnom materijalu u zdenac koji se time vadi vani pumpanjem. Tim postupkom se omogućuje ulazak slobodniji protok vode u zdenac te bolja izdašnost zdenca.



Slika 3.6 Princip izgradnje sa šljunčanim filtrom

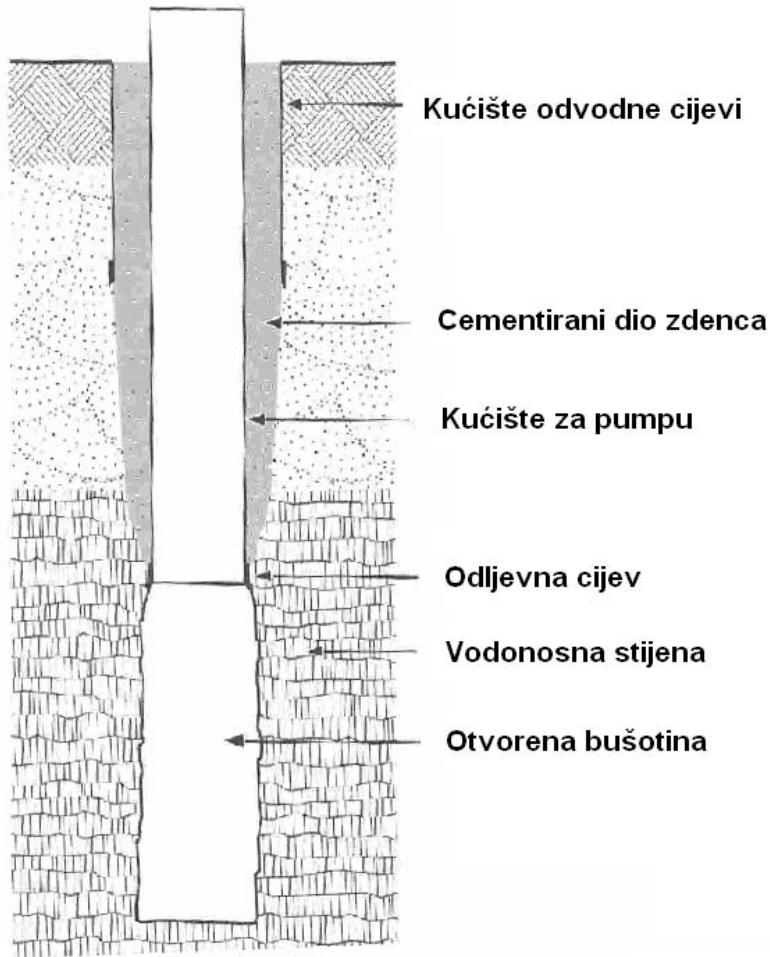


Slika 3.7 Instalacija šljunčanog filtra u višestrukim zonama

3.1.2 Održavanje zdenaca

Pravilno projektirani i izvedeni zdenac u pravilu zahtijeva malo održavanja. U slučajevima prekomjernog pumpanja može doći do pomjeranja čestica vodonosnika i brtvljenja perforacija na oblozi zdenca. Fini pijesak koji može ući u zdenac pri prekomjernom pumpanju može također oštetiti samu pumpu u zdencu.

Podzemna voda koja ima jaku mineralošku kompoziciju vrlo često uzrokuje naslage otopljenih tvari na stjenkama zdenca (inkrustracija). Naslage mogu prouzrokovati pad tlaka uz povećanje brzina blizu samih perforacija na oblogama zdenca. Mineraloške naslage se mogu smanjiti jakim ispiranjem zdenaca sa zrakom ili tekućinom. Jako pumpanje i injektiranje uspostavlja tok naprijed – nazad kroz perforaciju i time ispire naslage minerala i ostalih tvari.



Slika 3.8 Instalacija zdenca u vodonosnoj stijeni

3.2 Hidraulika i testiranje zdenaca

Hidraulika zdenaca je vrlo važan element u projektiranju i odabiranju lokacija na kojima će se vršiti bušenje. Osnovni principi hidraulike zdenaca omogućuju projektantu i izvođaču da pravilno odaberu tip zdenca, način bušenja te potrebnii broj zdenaca ovisno o njihovoj konačnoj namjeni. U ovom dijelu poglavlja dati će se prikaz samo osnovnih principa hidraulike zdenaca koji se najčešće susreću u praksi.

3.2.1 Jednadžbe protoka podzemne vode

U svakom području znanosti i inženjerstva metode korištene u analizama temeljene su na razumijevanju fizikalnih procesa te njihovom matematičkom opisivanju. U procesima kretanja podzemne vode osnovni princip je eksperimentalni Darcy-ev zakon koji, kad se poveže s osnovnim zakonom održanja mase, rezultira parcijalnom diferencijalnom

jednadžbom kontinuiteta. Ako zamislimo jedinični volumen porozne sredine, tada prema zakonu održanja mase za stacionarni tok vrijedi: tok mase tekućine, koja ulazi u kontrolni volumen, jednak je toku mase tekućine koja izlazi iz kontrolnog volumena. To se matematički opisuje jednadžbom kontinuiteta:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Analiza dimenzije oblika ρv pokazuje da se radi o toku mase tekućine kroz jedinični poprečni presjek na kontrolnom volumenu. U slučaju nestišljive tekućine, $\rho(x,y,z)=\text{konstanta}$, gustoća vode se eliminira iz gornjeg izraza. U slučaju toka vode u podzemlju, čak kada ρ nije konstanta (dakle slučaj stišljive tekućine) član $\rho \partial v_x / \partial x$ je puno veći od člana $v_x \partial \rho / \partial x$ (oba člana nastaju kada se razvije derivacija produkta ρv) tako da se (3.1) pojednostavi sa:

$$-\nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

gdje prvi dio simbolički predstavlja divergenciju vektora brzine. Supstitucijom Darcy-evog zakona (1. poglavlje) u gornji izraz za komponente brzina, dobije se jednadžba stacionarnog tečenja podzemne vode kroz anizotropni porozni medij:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.3)$$

Kod izotropne sredine $K_x = K_y = K_z$, dok za homogenu sredinu $K(x,y,z) = \text{konstanta}$. To dalje reducira (3.3) u oblik :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.4)$$

koji predstavlja najosnovniju parcijalnu diferencijalnu jednadžbu poznatu u fizici i matematici kao Laplasova jednadžba čije je rješenje prostorna funkcija $h(x,y,z)$.

U općenitom slučaju nestacionarnog tečenja, zakon održanja mase se manifestira u tome što neto protok mase vode kroz kontrolni volumen mora biti jednak vremenskoj promjeni mase tekućine unutar volumena. Korisno je napomenuti da u bilo kojem mediju i pri bilo kojim fizikalnim procesima zakon održanja neke mjerljive veličine se riječima opisuje kao: *vremenska promjena veličine jednaka je negativnoj divergenciji toka te veličine*. U podzemnoj sredini i korištenjem Darcy-evog zakona za protok vode, zakon održanja mase matematički se opisuje kao:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.5)$$

pri čemu je S_s specifična zapremina dana u izrazu (2.19). Za gornji izraz nestacionarnog tečenja mogu se primjenjivati ista pojednostavljenja u odnosu na homogenost i izotropnost hidrauličke vodljivosti. Ako pri tome još promatramo dvodimenzionalni slučaj horizontalnog vodonosnika pod pritiskom, tada (3.5) poprima slijedeći oblik:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.6)$$

gdje je $S=S_sb$, $T=Kb$ i b je debљina vodonosnika. Rješenje opisuje polje hidrauličkog potencijala kroz horizontalnu ravninu u funkciji vremena. Parametri potrebni za rješenje gornjeg izraza su koeficijent zapremeine S i transmisivnost T . Slijedeći dio opisuje praktične metode testiranja zdenaca i određivanja potrebnih parametara za analizu procesa u podzemlju.

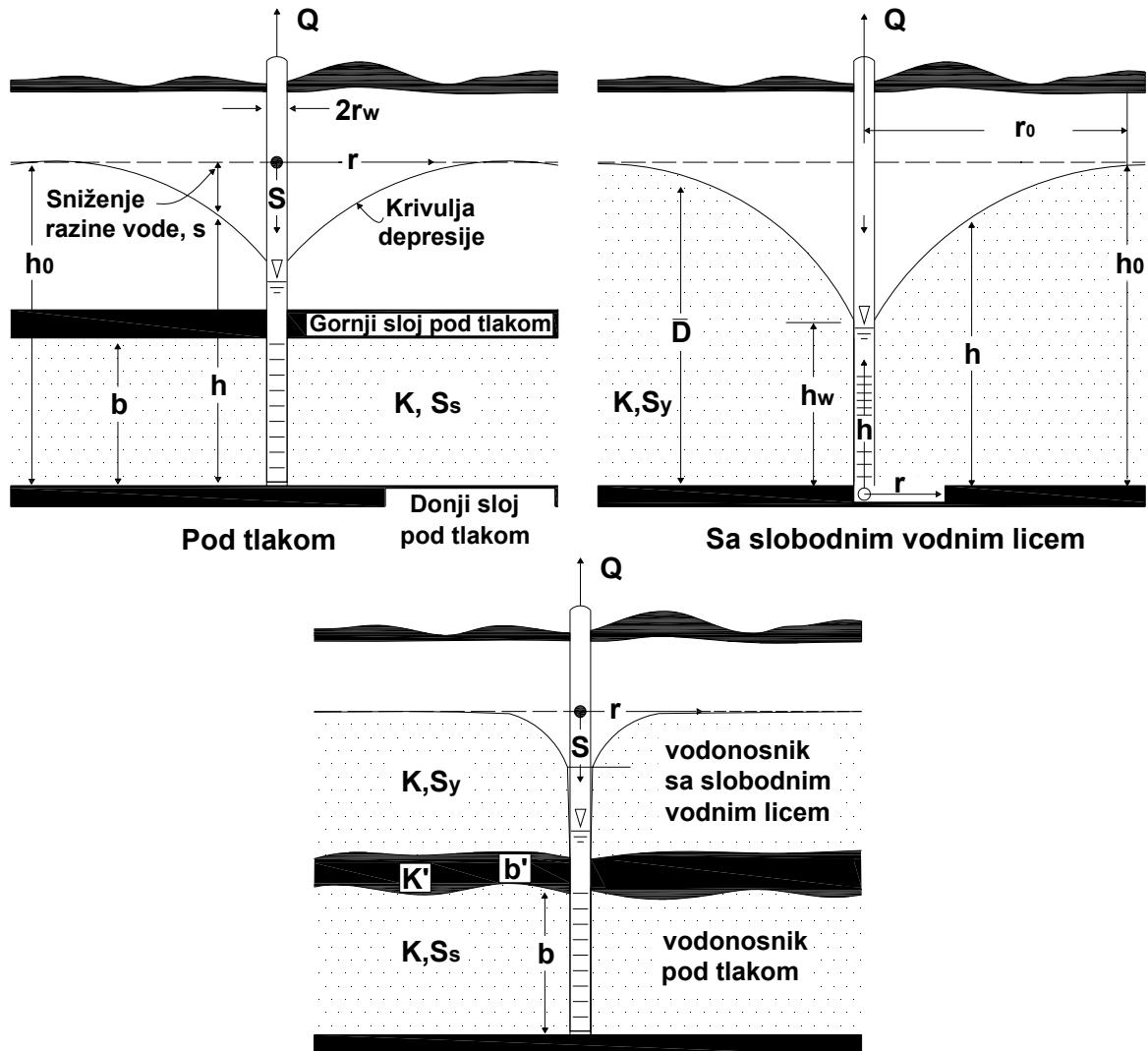
3.2.2 Stacionarno tečenje prema zdencu

U slučaju kada bušotina zdenca potpuno penetrira vodonosnik i kada je vodno lice u početku bilo horizontalno, prilikom pumpanja vode iz zdenca uspostavlja se tzv. cirkularna zona depresije. Ovakav prikaz zone depresije (zona opadanja vodnog lica) pretpostavlja homogenu i izotropnu hidrauličku vodljivost. Slika 3.9 a prikazuje uspostavljanje cirkularnih zona u vodonosnicima koji se nalaze u različitim uvjetima tečenja.

Pri svakoj radijalnoj udaljenosti, r od zdenca, protok vode prema zdencu se određuje prema izrazu:

$$Q = 2\pi r h K \frac{dh}{dr} \quad (3.7)$$

pri čemu $2\pi rh$ predstavlja površinu cilindra kroz koji protjeće voda, K je hidraulička vodljivost i dh/dr je gradijent vodnog lica. Lako se primijeti da gornji izraz proizlazi iz Darcyevog empirijskog zakona kojeg smo upoznali u prvom poglavlju.



Slika 3.9 a Osnovni tipovi vodonosnika sa cirkularnim zonama depresije

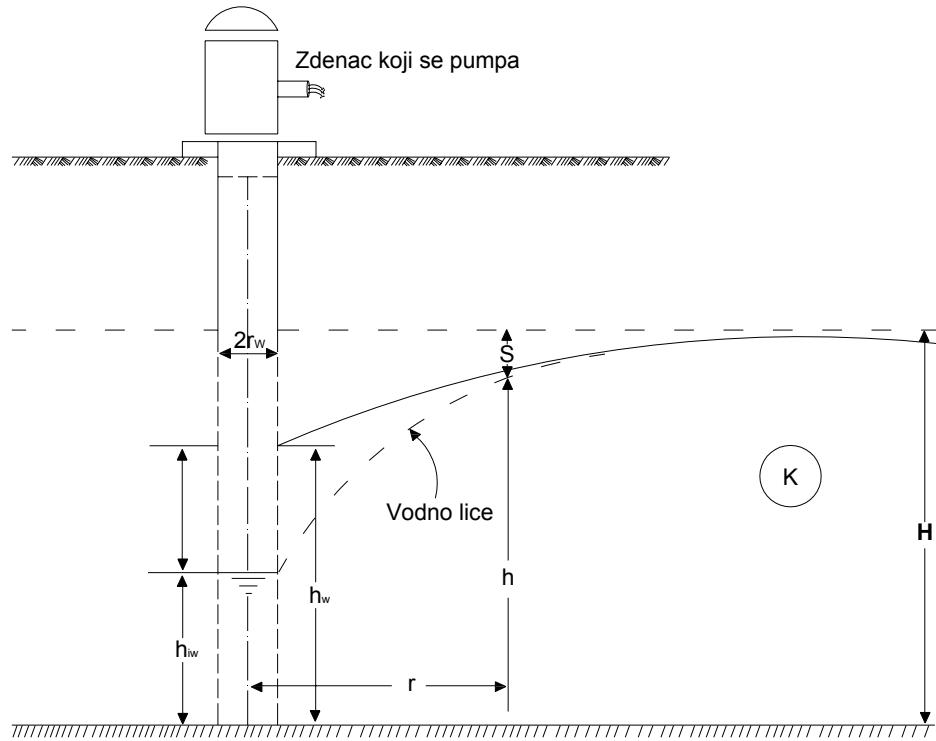
Upotreba vertikalnog cilindra za presjek kroz koji voda prolazi pretpostavlja da su strujnice horizontalne. Ako postoji dva zdenca na udaljenosti r_1 i r_2 od zdenca koji se pumpa, integracijom gornjeg izraza dobiva se:

$$Q = \frac{\pi K (h_2^2 - h_1^2)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{1.36 K (h_2^2 - h_1^2)}{\log(r_2/r_1)} \quad (3.8)$$

što predstavlja izraz Dupuit-a ili Theim-a. Iz gornjeg izraza se također lako primijeti da je kvadrat hidrauličkog potencijala (dakle visine vode) logaritamska funkcija radijusa. To možemo pisati kao:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.9)$$

što predstavlja izraz Dupuit-Forchheimer.

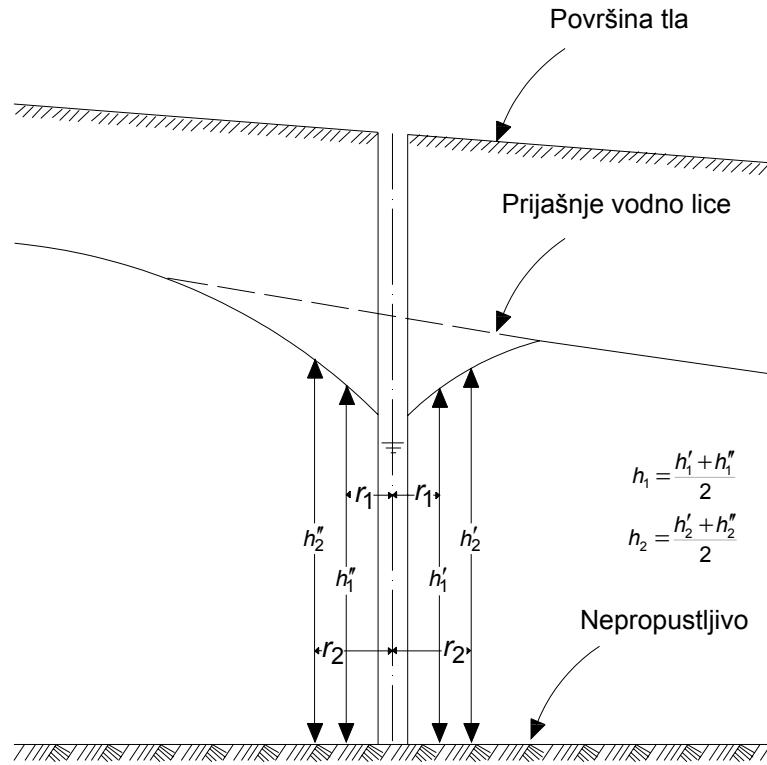


Slika 3.9 b Tečenje prema zdencu u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem

Izraz (3.8) se može još pojednostaviti ako se uzme da $h_2^2 - h_1^2 = (h_2 - h_1)(h_2 + h_1)$ i ako je opadanje vodnog lica znatno manje od debljine vodonosnika $h_2 + h_1$ se aproksimira kao $2H$ (vidi sl. 3.10). Iz toga slijedi $K(h_2 + h_1)/2 \approx KH$, što rezultira izrazom:

$$Q = \frac{2\pi KH(h_2 - h_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3.10)$$

Izraz (3.8) limitiran je u praksi s nekoliko prepostavki. U prvom redu da bi strujnice bile potpuno horizontalne, zdenac mora potpuno penetrirati vodonosnik i pad vodnog lica u zdencu mora biti mali u usporedbi s debjinom vodonosnika. Prepostavka o horizontalnim strujnicama je sve manje i manje zadovoljena kako se približavamo zdencu. U praksi također i uvjet da početno stanje vodnog lica bude horizontalno je rijetko slučaj. Međutim, testiranja u praksi su pokazala da se izraz (3.8) ipak može koristiti uz zadovoljavajuću točnost i kod vodnog lica sa nagibom ako se pijezometarske visine h_2 i h_1 procjene kao osrednjene veličine uzvodno i nizvodno od zdanca koji se pumpa (sl.3.10).



Slika 3.10 Princip tečenja sa slobodnim vodnim licem u nagibu

Hidrauličke karakteristike vodonosnika se mogu odrediti uz pumpanje zdenca sa konstantnim protokom Q i praćenjem opadanja vodnog lica u piezometru u nekom vremenskom intervalu. Kod vodonosnika pod tlakom, stacionarni izraz Theim-a daje procjenu transmisivnosti po izrazu:

$$T = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi(h_2 - h_1)} \quad (3.11)$$

na osnovi praćenja opadanja vodnog lica na udaljenosti r_2 i r_1 od zdenca koji se pumpa.

3.2.3 Nestacionarno tečenje prema zdencu

Jednadžba tečenja u horizontalnoj ravnini za homogeni i izotropni vodonosnik pod tlakom je dana u izrazu (3.6). Kako u slučaju pumpanja iz zdenca pad vodnog lica poprima radijalni oblik, korisno je izvršiti transformaciju u radijalne koordinate. Transformacija se jednostavni izvrši korištenjem relacije $r^2=x^2+y^2$, te iz izraza dobije konačni oblik:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial T} \quad (3.12)$$

Početni uvjeti su $h(r, 0) = h_0$ za svaki r gdje je h_0 početno horizontalno stanje vodnog lica na beskonačnoj granici, $h(\infty, t) = h_0$ za bilo koji t .

Pri pumpanju vode iz zdenca uspostavlja se cirkularno opadanje vodnog lica kod vodonosnika sa slobodnim tečenjem dok se kod vodonosnika pod tlakom uspostavlja opadanje pijezometarske visine. Pad vodnog lica $s(r, t) = h_0 - h(r, t)$ na udaljenosti r od zdenca iz kojeg se pumpa voda sa konstantnom protokom Q u vremenu t od početka pumpanja dana je rješenjem (3.12):

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3.13)$$

gdje je varijabla u bezdimenzionalna i dana izrazom:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (3.14)$$

pri čemu je t vrijeme u danima od početka pumpanja, S je koeficijent aktivne poroznosti i T predstavlja transmisivnost vodonosnika. Ovo je rješenje predstavljeno u radu Theis (1935) te izraz (3.13) nosi njegovo ime. Integral u (3.13) je tzv. eksponencijalni integral koji ima poznato rješenje u obliku serije i u literaturi je dat u tabelarnom obliku. Često se naziva kao funkcija zdenca ("well function") i piše se $W(u)$. Funkcija $W(u)$ se izračuna po slijedećem izrazu koji predstavlja razvoj u red:

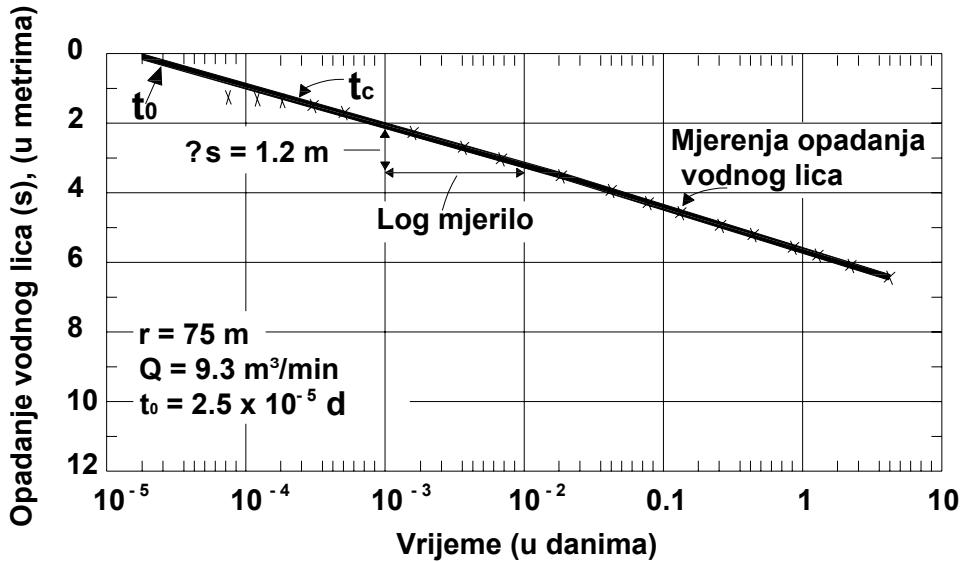
$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (3.15)$$

Theis-ova jednadžba (3.13) je najčešće korištena za procjenu transmisivnosti T i koeficijenta aktivne poroznosti S vodonosnika iz podataka opadanja vodnog lica pri pumpanju zdenca.

Ako je vrijeme t od početka pumpanja veliko tada je varijabla u mala i cijeli izraz po Theisu se može logaritamski aproksimirati u tzv. Jacob jednadžbu (Jacob, 1959):

$$s(r, t) = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \left[\log \left(\frac{2.25 T t}{r^2 S} \right) \right] \quad (3.16)$$

koja se koristi u praksi kada je zadovoljen odnos $u < 0.05$. Pogreška zbog korištenja Jacob izraza umjesto Theis za vrijednost $u = 0.01, 0.02, 0.04$ i 0.1 je 0.3% , 0.5% , 1.4% , 5.2% , u odgovarajućem redu.



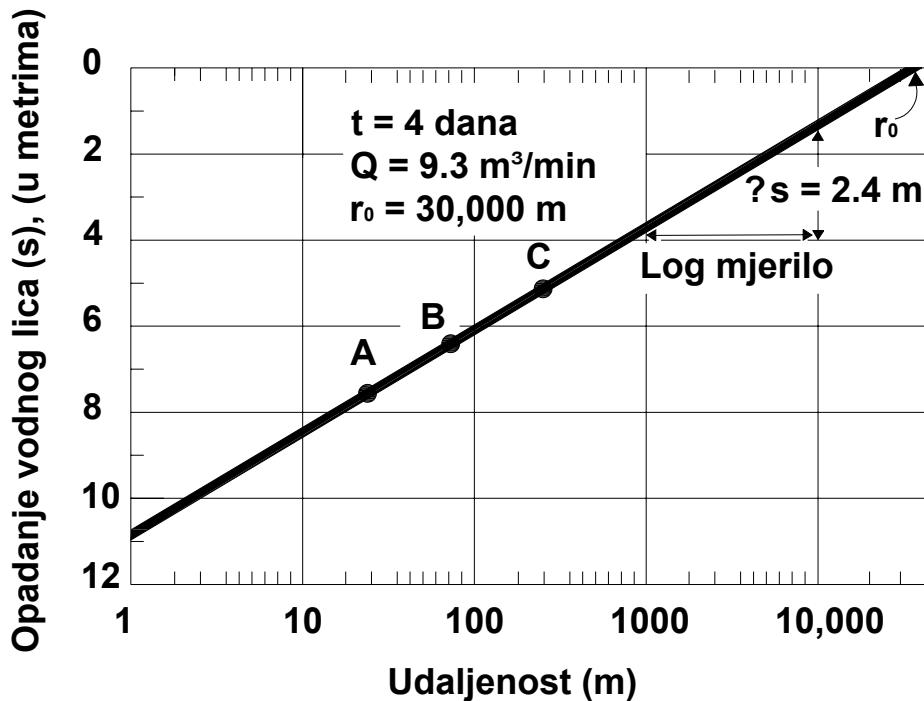
Slika 3.11 a Odnos opadanja vodnog lica i vremena pumpanja

Hidrauličke karakteristike vodonosnika pod tlakom u nestacionarnom stanju se određuju iz Jacob izraza (24), korištenjem polulogaritamskog odnosa (sl.3.11a) između opadanja vodnog lica (aritmetičko mjerilo) i vremena pumpanja (log mjerilo). Izrazi koji se u praksi koriste su slijedeći:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \quad (3.17)$$

$$S = \frac{2.25 T t}{r^2} \quad (3.18)$$

pri čemu je Δs povećanje u opadanju vodnog lica po 10 puta vremenskoj jedinici(vidi sl. 3.11 a) i t_0 je vrijeme presijecanja ravne linije sa linijom nultog stanja opadanja vodnog lica (vidi sl. 3.11 a) Alternativno se transmisivnost i koeficijent zapremine mogu odrediti prateći (također u polulogaritamskom mjerilu) opadanje vodnog lica i udaljenosti od zdenca iz kojeg se pumpa voda (sl.3.11 b).



Slika 3.11 b Odnos opadanja vodnog lica i udaljenosti od zdenca

3.3 Izgradnja piezometara i metode mjerena

Piezometri su zdenci s primarnim zadatkom mjerena razine podzemne vode ili piezometarskog tlaka. Također mogu poslužiti za skupljanje uzoraka vode u svrhu određivanja kakvoće. U nekim posebnim slučajevima, piezometri mogu ustvrditi prisutnost nesuspendiranih dijelova vode s različitom gustoćom, npr. prisustvo nafte.

Ako je svrha piezometara samo mjerena razine podzemne vode, tada se koristi obloga 2 -3 cm debljine koja ide do 5 cm u slučajevima ako se piezometar koristi i za skupljanje uzoraka vode. Perforacija na piezometru je standardnog tipa kao i na ostalim zdencima. Uglavnom je okružena sa šljunčanim filtrom koji se proteže oko 50 cm iznad perforiranog dijela. Tu se, za slučaj zagađenja, postavlja nepropusni sloj prsten od finog pijeska i gline, dok se za jače brtvljenje može koristiti i bentonit. Treba posvetiti posebnu pažnju da se zagađenje vertikalno ne sprovode na druge horizonte u podzemlju. Kod vodonosnika pod tlakom vrlo često postoji vertikalni hidraulički gradijent koji može kroz šljunčani filter sprovoditi zagađenje na gornje i donje slojeve.

Mjerena kakvoće vode u nezasićenoj sredini se sprovodi korištenjem lizimetara koji se postavljaju u bušotini iznad razine podzemne vode. Lizimetar se sastoji od porozne

čaše montirane na dnu cijevi. Kako je tlak vode u nezasićenoj sredini manji od atmosferskog, usisavanje se mora primijeniti da bi voda penetrirala u proznu čašu.

4. Objekti za odlaganje otpada

4.1 Odstranjivanje i zgrađivanje zagađenja

Pravovremena kontrola izvora zagađenja je preventivna mjera zaštite. Postoje tri osnovna principa kontrole izvora zagađenja:

1. Odstranjivanje zagađenja u samom izvoru
2. Zgrađivanje izvora
3. Hidrodinamička izolacija

U prvom slučaju radi se o iskopima i transportiranju materijala na ekološki prihvatljive lokacije npr. smetlišta, deponije i ostale objekte za odlaganje otpada. Ova metoda je konačna, ali skupa i zahtjeva unaprijed definiranu i ekološki prihvatljivu lokaciju permanentnog odlaganja.

U drugom slučaju radi se o fizičkom zgrađivanju izvora postavljanjem podzemnih zidova (injekcijskih zavjesa) od bentonita pomiješanog sa glinom ili upotrebom samog betona kod visoko toksičnog otpada (otpad kod nuklearnih reaktora). Ovaj pristup tretiranja izvora zagađenja također spada u skuplu alternativu te iziskuje dodatna promatranja i održavanja objekata zgrađivanja.

Kod trećeg slučaja radi se o instaliranju zdenca nizvodno od izvora zagađenja. Cilj je prihvatiti, određenom količinom pumpanja, podzemnu vodu koja prolazi kroz lokaciju zagađenja, u instalirani zdenac i time izolirati okolno područje vodonosnika koje ostaje nezagađeno. Drugim riječima uspostavi se zona kaptiranja koja prihvata vodu koja protjeće kroz izvor te sa sobom nosi zagađenje. Oblik zone kaptiranja s jednim zdencem postavljenim i ishodište koordinatnog sistema se određuje po izrazu (Grubb, 1993):

$$x = \frac{-y}{\tan(2\pi KbJy/Q)} \quad (4.1)$$

pri čemu je Q protok pumpanja, b predstavlja debeljinu vodonosnika, K je hidraulička vodljivost, a J označava regionalni hidraulički gradijent (bez pumpanja). Postoje dva granična rješenja gornjeg izraza:

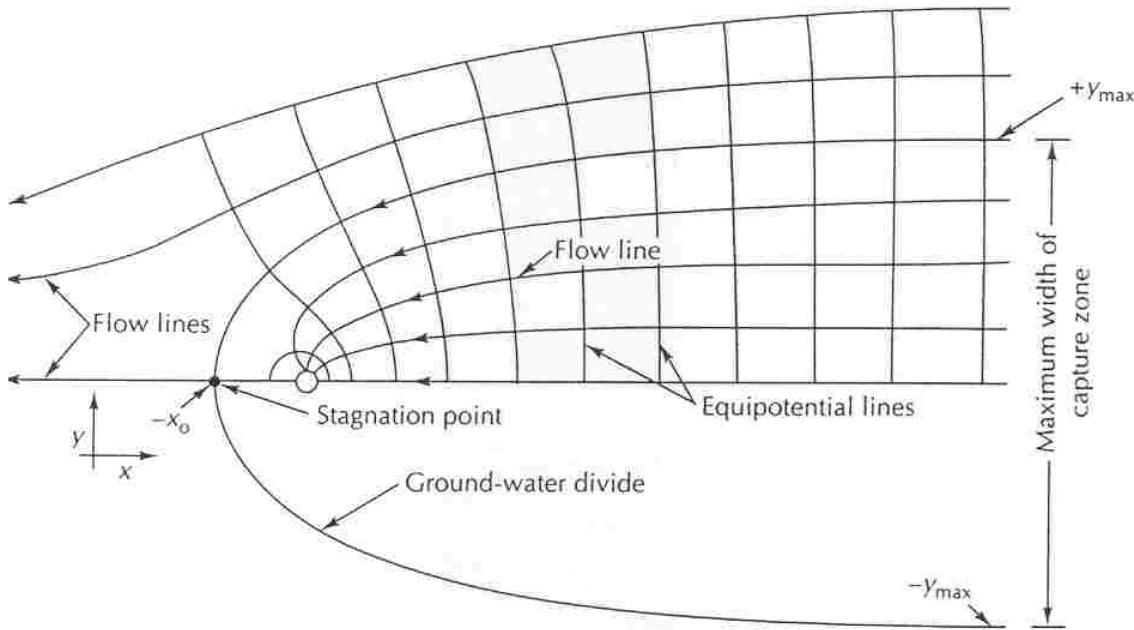
1. Nizvodno od zdenca udaljenost do stagnacijske točke se računa prema izrazu:

$$x_0 = \frac{-Q}{2\pi KbJ} \quad (4.2)$$

2. Maksimalna širina zone kaptiranja (dok $x \rightarrow \infty$):

$$y_{\max} = \pm \frac{Q}{2KbJ} \quad (4.3)$$

pri čemu y_{\max} označava polovicu širine zone kaptiranja (sl.4.1).



Slika 4.1

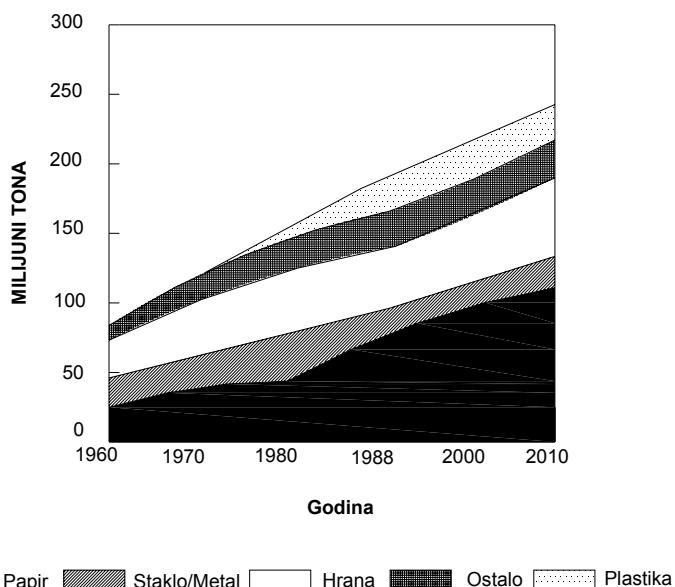
Pumpanje se odabire kao ono koje potpuno okružuje izvor zagađenja. Ovaj treći pristup tretiranju samog izvora zagađenja je najjeftiniji, ali ima nedostatak u tome što simplificira tečenje kao stacionarno kroz potpuno homogenu sredinu, te ne uzima u obzir disperziju koja može povećati transverzalno širenje oblaka zagađenja.

4.2 Projektiranje i izgradnja objekata za odlaganje nisko toksičnog otpada



Slika 4.2 Poprečni presjek aktivnog odlagališta otpada

Objekti za odlaganje otpada ("landfill") su prostori na terenu (površinski ili ukopani) na kojima se permanentno odlaže otpad. Današnja tehnologija razvoja generira velike količine otpada koje nije moguće odstraniti paljenjem i reciklažom. Objekti za odlaganje otpada ostaju jedina alternativa za permanentno odstranjivanje otpada. Slika 4.3 pokazuje generaciju otpada u SAD-u u periodu između 1960 - 2010. godine.



Slika 4.3

Objekti za odlaganje otpada mogu biti klasificirani po trima osnovnim kriterijima:

- 1) vrsti otpada kojeg primaju,
- 2) vrsti sistema zaštitnih tepiha koji su ugrađeni i
- 3) geometrijskog konfiguraciji same izgradnje.

Po vrsti otpada najčešće dijelimo odlagališta na:

- a) odlagališta za kruti otpad stanovništva
- b) odlagališta za industrijski otpad,
- c) odlagališta za nisko i visoko toksični otpad te
- d) odlagališta za radioaktivni otpad.

Po vrsti nepropusnog tepiha, odlagališta se klasificiraju na:

- a) odlagališta s jednostrukim zaštitnim tepisima
- b) odlagališta s dvostrukim zaštitnim tepisima

Svaki nepropusni zaštitni tepih sastoji se od najčešće dva sloja gline, geomembrane ili geosintetičke gline te drenažno-kolektorskog sustava koji će procijeđenu vodu skupljati na određeno mjesto za daljnju dispoziciju.

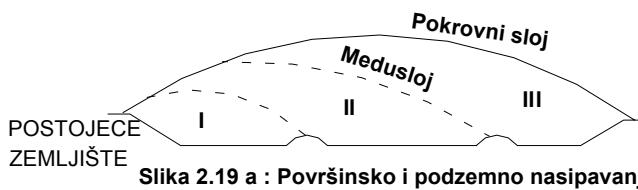
Geometrijska konfiguracija objekta za odlaganje otpada ovisi o nizu faktora, a među najvažnije spadaju:

- a) vrsta predviđenog otpada
- b) geološke karakteristike odabrane lokacije
- c) infiltracijske karakteristike podzemlja
- d) dubina do razine podzemne vode te
- e) smjer tečenja u podzemlju

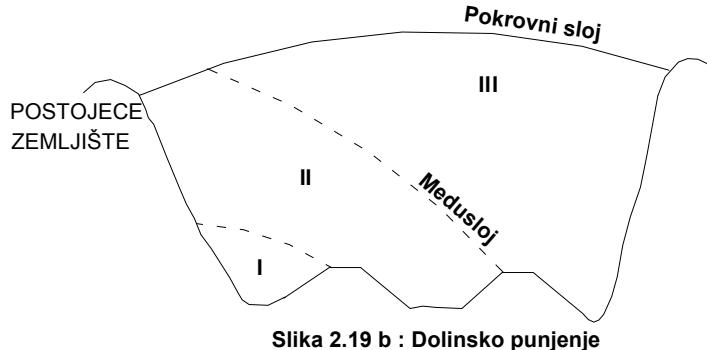
Po geometrijskoj konfiguraciji najčešće susrećemo: površinsko nasipanje, površinsko i podzemno nasipavanje, dolinska punjenja te punjenja u kanalima. Navedene vrste tipova odlagališta su prikazana na sl.4.4.

Osnovni kriterij za projektiranje objekata za odlaganje otpada je zaštita podzemne vode postavljanjem nepropusnih tepiha u kombinaciji s drenažno - kolektorskim sustavom.

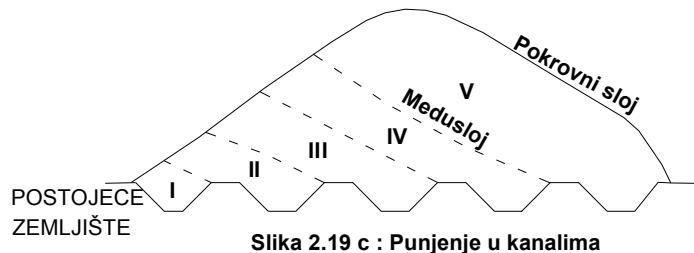
Tipični projekt odlagališta sastoji se od 3 glavnih sloja. Gornji sloj predstavlja pokrov odlagališta i služi prvenstveno za minimiziranje infiltracije od kiše te da zaštititi odlagalište od erozije.



Slika 2.19 a : Površinsko i podzemno nasipavanje



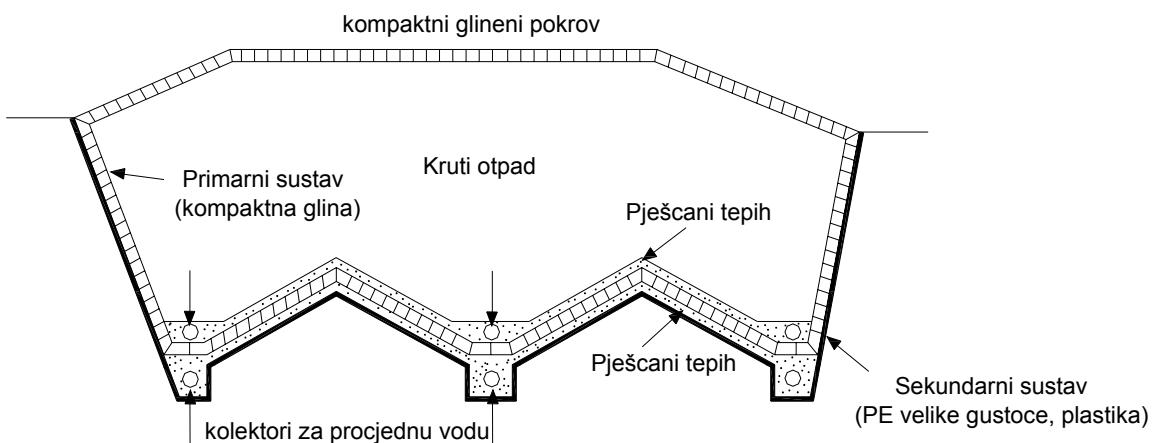
Slika 2.19 b : Dolinsko punjenje



Slika 2.19 c : Punjenje u kanalima

Slika 4.4 Tipovi odlagališta

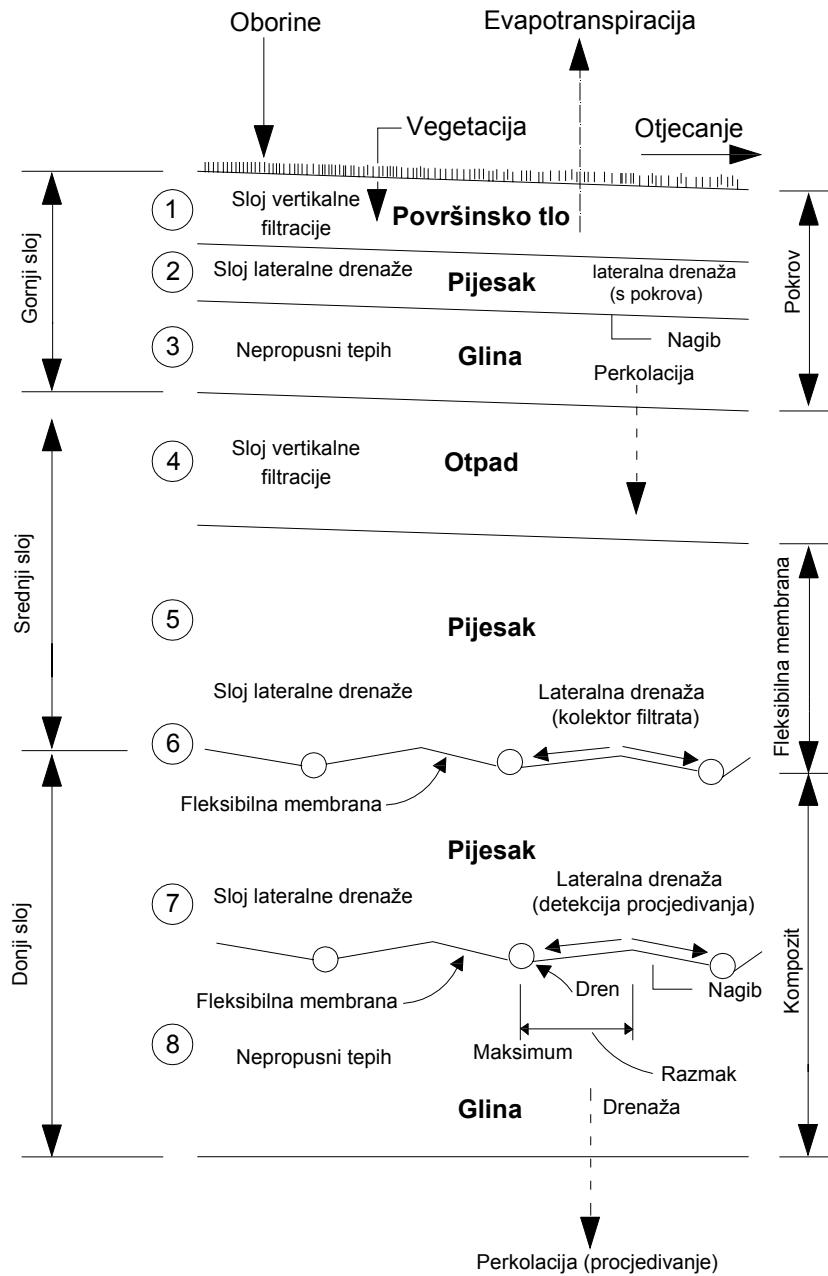
Srednji sloj sadrži konsolidirani otpad te lateralnu drenažu s kolektorskim sustavom za procijeđenu tekućinu. Donji sloj je dodatni nepropusni tepih s drenažnim sustavom i kolektorima za detekciju procjeđivanja. Slika 4.5 a pokazuje detaljni sistem slojeva koji se koriste prilikom izvođenja objekata za odlaganje otpada.



Slika 4.5 a

Drenažno kolektorski sustav je vrlo važan u ispravnom projektiranju, a pogotovo izvođenju objekata za odlaganje otpada. Zaštitni tepih treba imati hidraulički konduktivitet

koji ne prelazi $1 \cdot 10^{-9} [m/s]$ te debljinu od minimalno 1 m. Primarni i sekundarni drenažni sustav s kolektorima za procjednu vodu treba imati debljinu oko 50 cm, hidraulički konduktivitet od barem $1 \cdot 10^{-2} [m/s]$ te minimalni nagib dna od 2%.



Slika 4.5 b

Payton i Schroeder (1990) predlažu pojednostavljeni izraz za tok procijeđene vode u drenažne kolektore u obliku:

$$Q_D = \frac{2C_1 K_D Y h_0}{L^2} \quad (4.4)$$

pri čemu je K_D hidraulički konduktivitet saturiranog dijela drenažnog sloja (sl.4.6), Y srednja saturirana dubina iznad membranskog tepiha, h_0 je hidraulička visina iznad drenažnog kolektora, L je dužina dreniranja, $C_1 = 0.51 + 0.00205 \alpha L$, gdje je α bezdimenzionalni nagib membrane (sl.4.6).

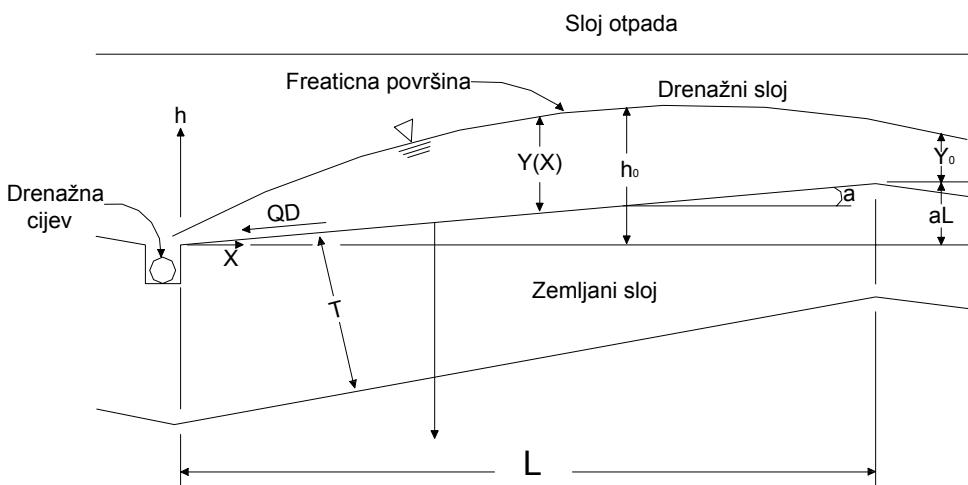
Saturirana dubina na samoj kruni drenažnog sloja se računa po izrazu:

$$y_0 = \frac{Y^{1.16}}{(\alpha L)^{0.16}} \quad (4.5)$$

dok je vertikalna perkolacija kroz zemljani (glineni) sloj dana prema izrazu:

$$Q_P = \frac{L_F K_P (Y + T)}{T} \quad (4.6)$$

gdje je L_F faktor procjeđivanja za sintetičku membranu (dan u specifikacijama proizvođača membrane), K_P je hidraulički konduktivitet zemljjanog sloja i T je debljina zemljjanog sloja. Na sl. 4.6 prikazani su svi detalji i veličine koje se nalaze u gornjim izrazima.



Slika 4.6

Sakupljena procijeđena voda u drenažno-kolektorskom sustavu podvrgava se tretmanu i pročišćavanju. Ta projedna tekućina je puna organskih tvari te ovisno o otpadu i njegovoj starosti podvrgava se biološkim i kemijskim procesima pročišćavanja. Osim spomenutih karakteristika projektiranja i izvođenja objekata za odlaganje otpada, po završetku izgradnje i tijekom korištenja istog, potrebno je postaviti monitoring sustav kako za plinove u zraku tako i za motrenje kvalitete podzemne vode. Svrha ovog monitoringa je i

pravovremena detekcija nepoželjnog procjeđivanja u podzemnu vodu i moguće zagađenje okolnih područja.

6. Literatura

- 1) **Andričević, R., 1996.**, *Evaluation of sampling in the subsurface*, Water Resources Research.
- 2) **Archie, G.E., 1942.**, *The electrical resistivity logs as an aid in determining some reservoir characteristics*, Pet. Tech., vol.5, no.1.
- 3) **Bonacci, O., Karst Hidrology,**
- 4) **Chapellier, D., 1992.**, *Well Logging in Hydrogeology*, A.A. Bakema Publisher.
- 5) **Chilingar, G.V., 1963.**, *Relationship between porosity, permeability, and grainsize distribution of sands and sandstones*, Proc. Intern. Sedimentol. Congr.
- 6) **DeMarsily, 1986.**, *Quantitative Hydrogeology*.
- 7) **Freeze, R.A. and J.A., 1979.**, *Cherry, Groundwater*, Prentice Hall, New Jersey.
- 8) **Hubbert, M.K., 1956.**, *Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids*, Trans. Amer. Min. Met. Eng., 207, p. 222-239.
- 9) **Kitanidis, P.K., 1997.**, *Introduction to Geostatistics: Applications in hydrogeology*, Cambridge University Press.

