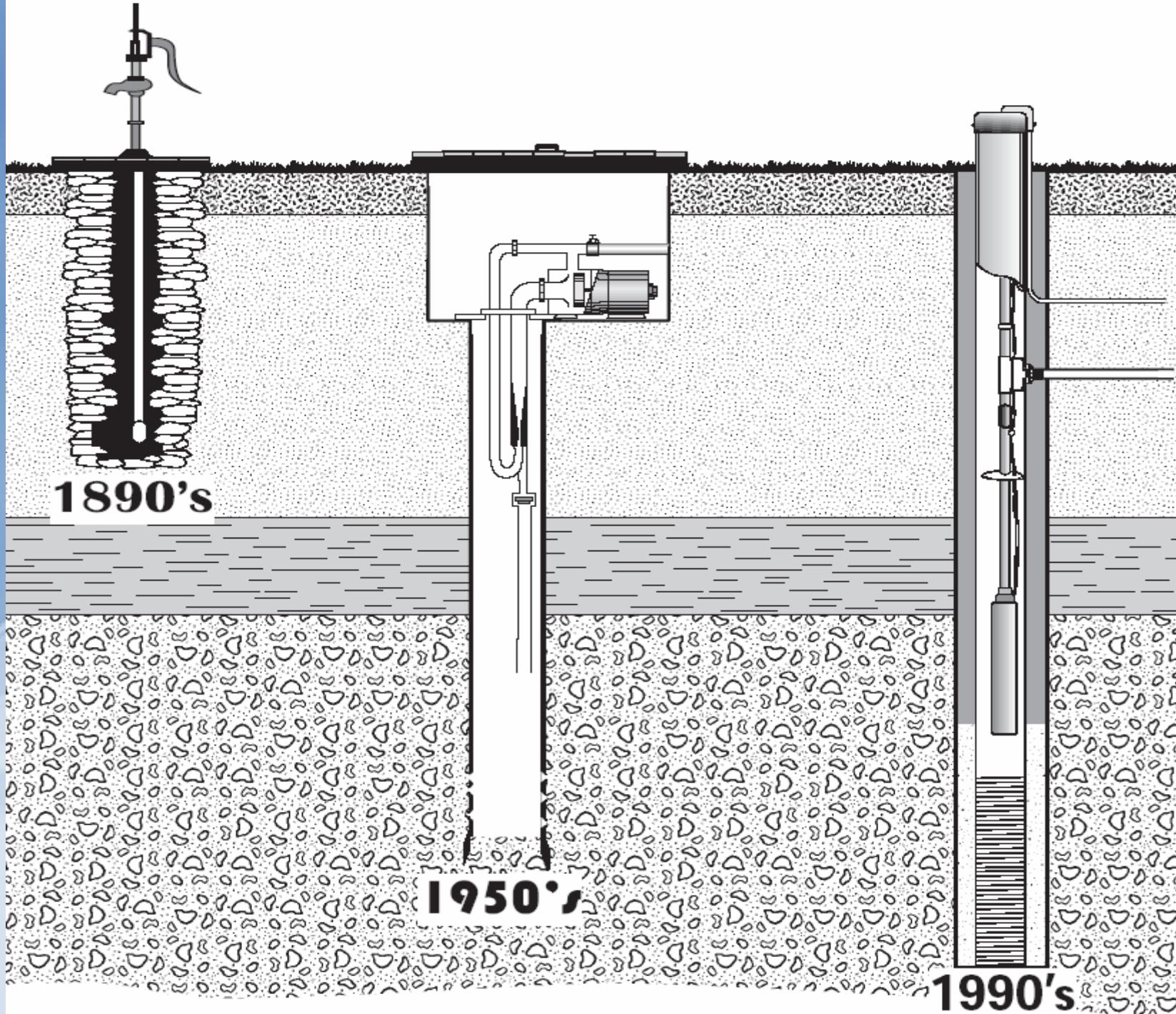


2. POGLAVLJE

OBJEKTI U PODZEMLJU



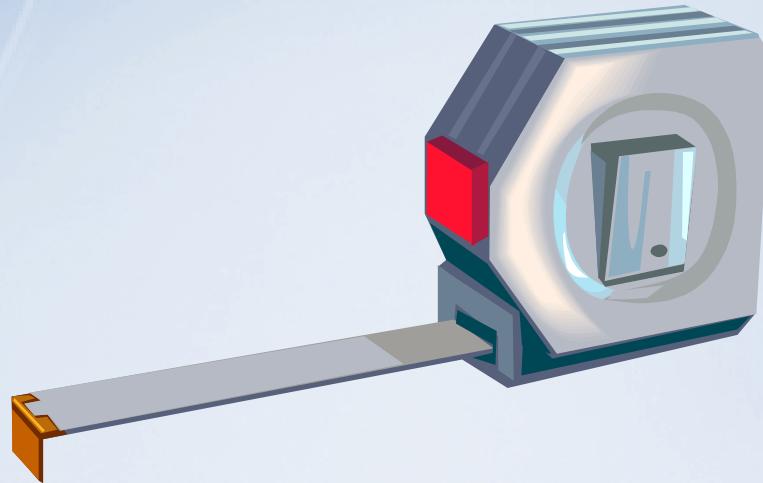
**STATISTIKE, ISKUSTVA, NAMJENA,
KORIŠTENJE, MATERIJALI, LJUDSKI
RESURSI.....**

Michigan - USA

Podzemni izvori vode su najvažniji prirodni resurs Savezne države Michigan (USA)

- 2.77 milijuna stanovnika koristi vodu iz zdenaca
- Prosječno korištenje = 86.3 gal./osobi/dan
- Skoro pola stanovništva koristi vodu za piće iz ovakvih izvora

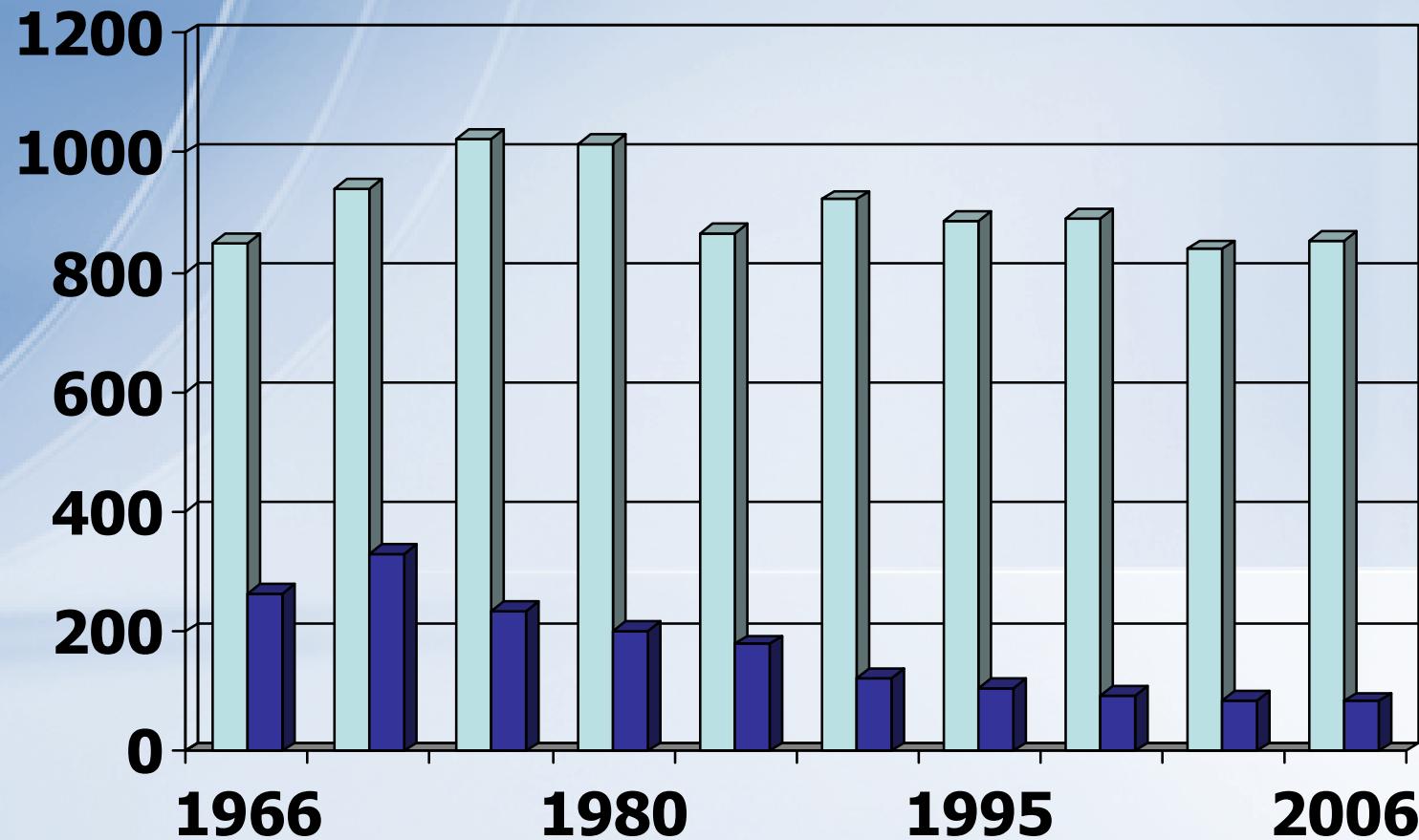
Kolika je ukupna dubina svih zdenaca izgrađenih u SD Michigan tijekom 2006. godine?



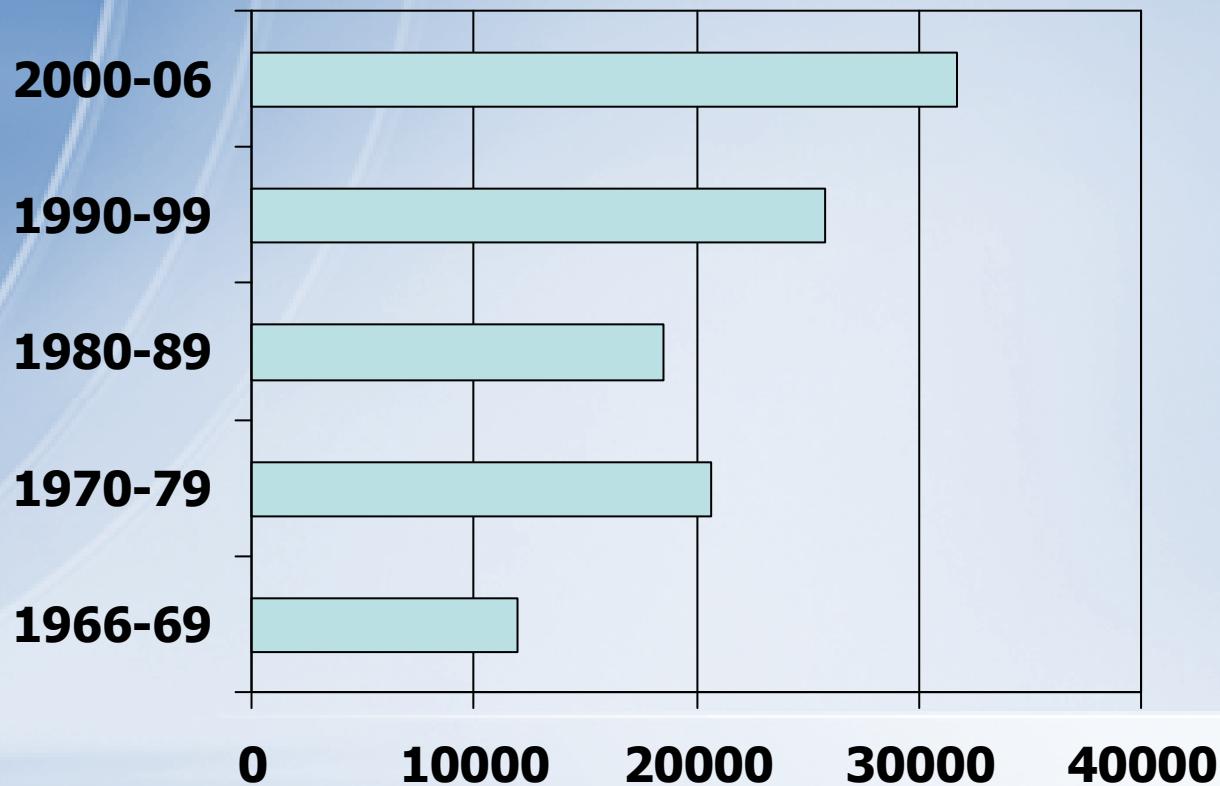
Odgovor : 2.7 milijuna stopa
= 822 960 m

BROJ KVALIFICIRANIH RADNIKA ZA IZGRADNJU ZDENACA (1996-2006)

■ BUŠAČI ■ INSTALATERI



PROSJEK IZGRAĐENIH ZDENACA PO DEKADAMA

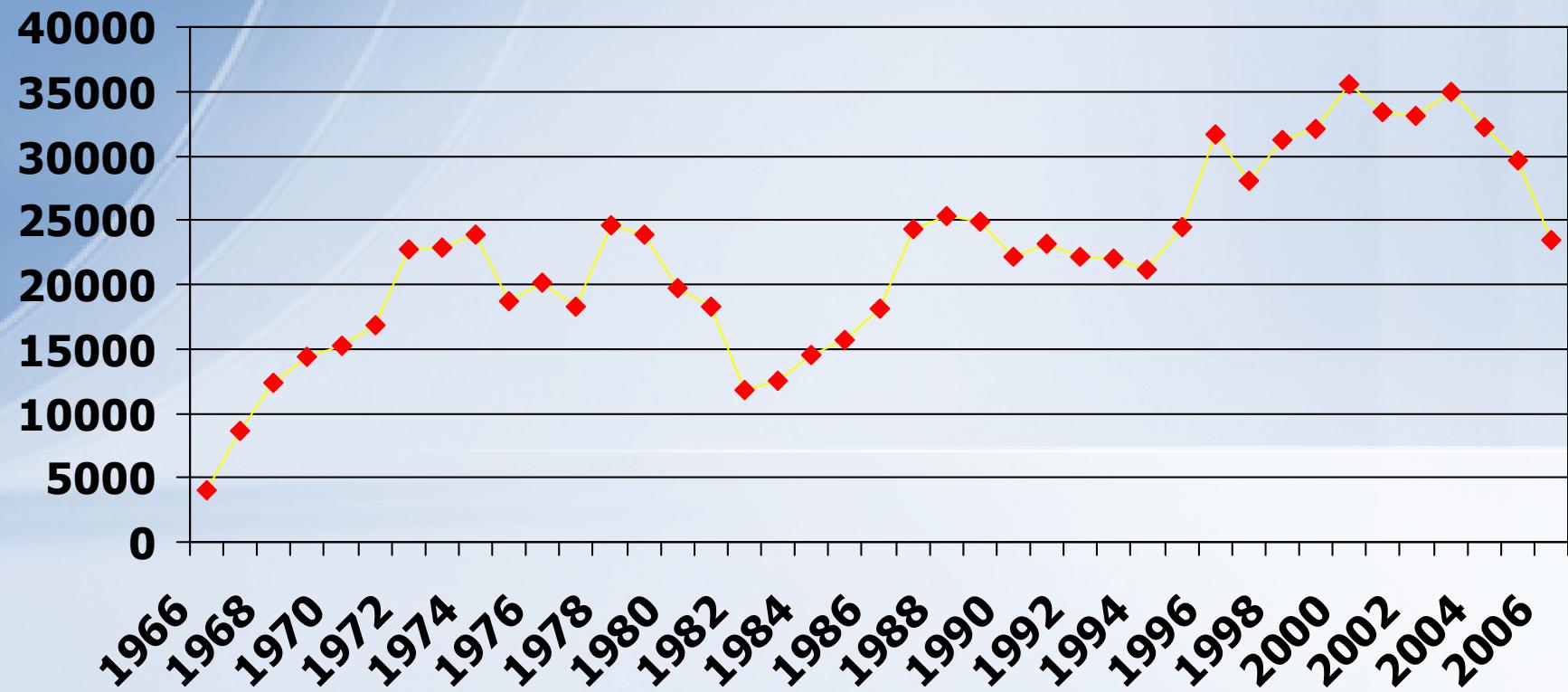


40-godišnji prosjek: 22,000 zdenaca godišnje



POTVRĐENE KOLIČINE IZGRAĐENIH ZDENACA

1966 - 2006

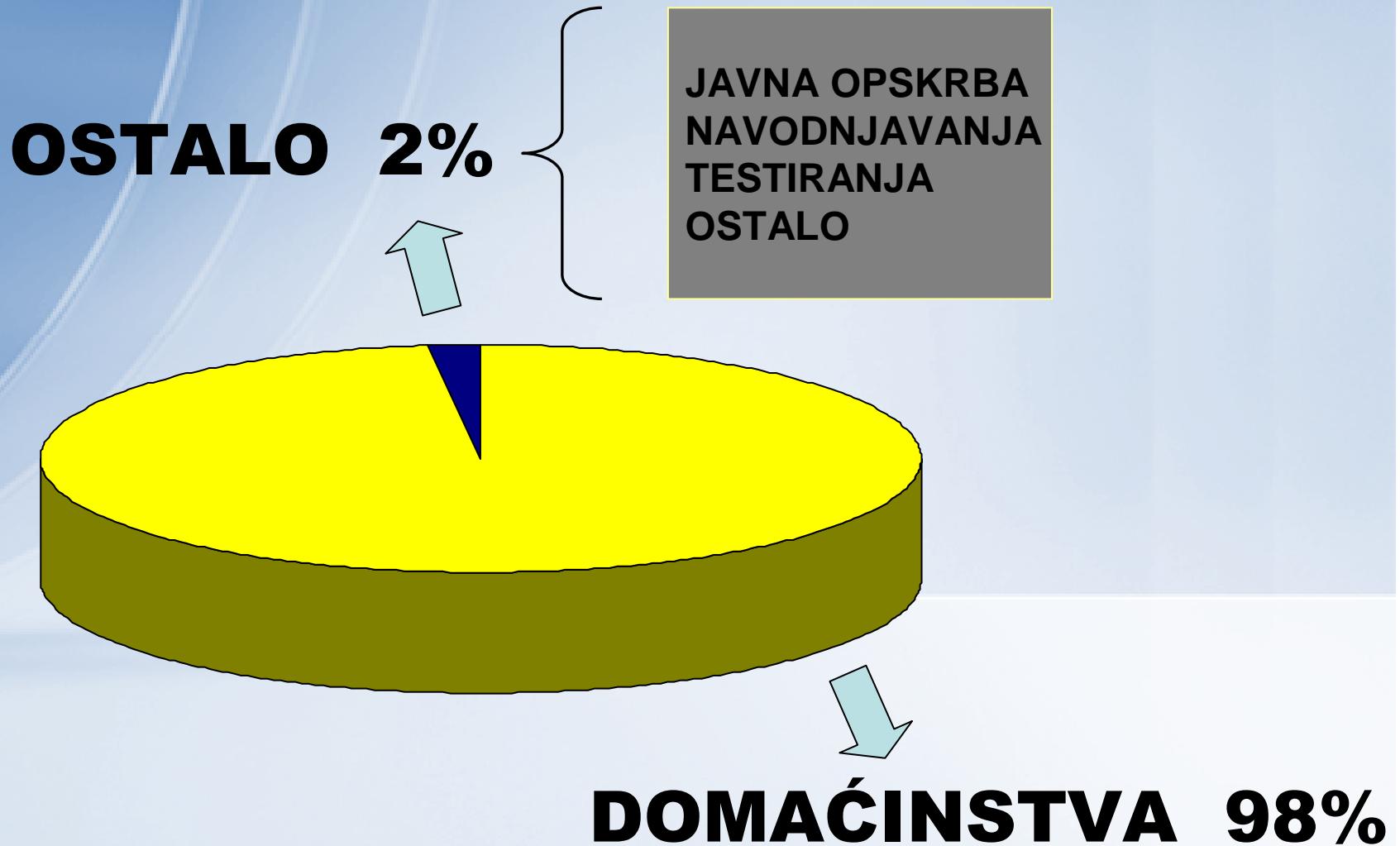


BROJ ZDENACA GODIŠNJE IZGRAĐENIH

(2000 – 2006)

| <u>GODINA</u> | <u>Broj zdenaca</u> |
|-------------------|---------------------|
| 2000 | 35,557 |
| 2001 | 33,411 |
| 2002 | 33,043 |
| 2003 | 34,935 |
| 2004 | 32,178 |
| 2005 | 29,622 |
| 2006 | 23,431 |

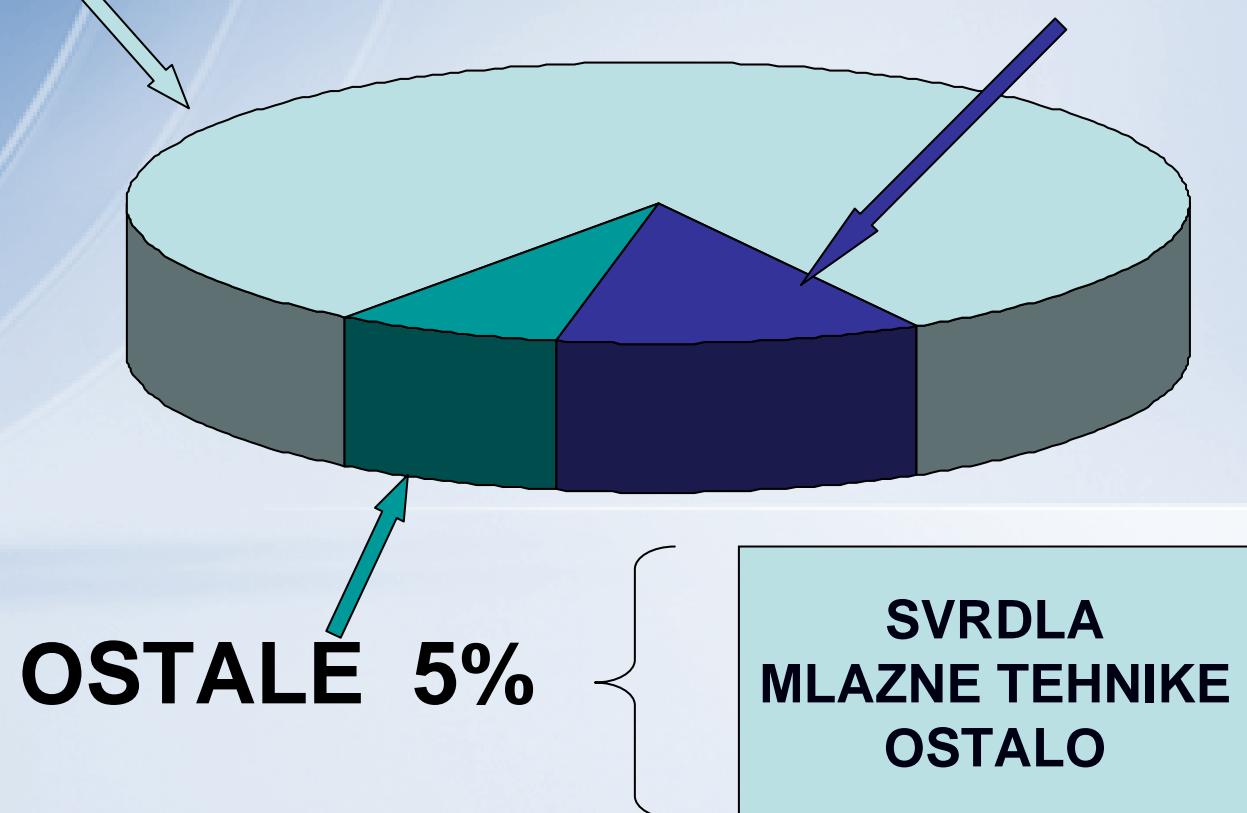
UPOTREBA VODE IZ ZDENACA



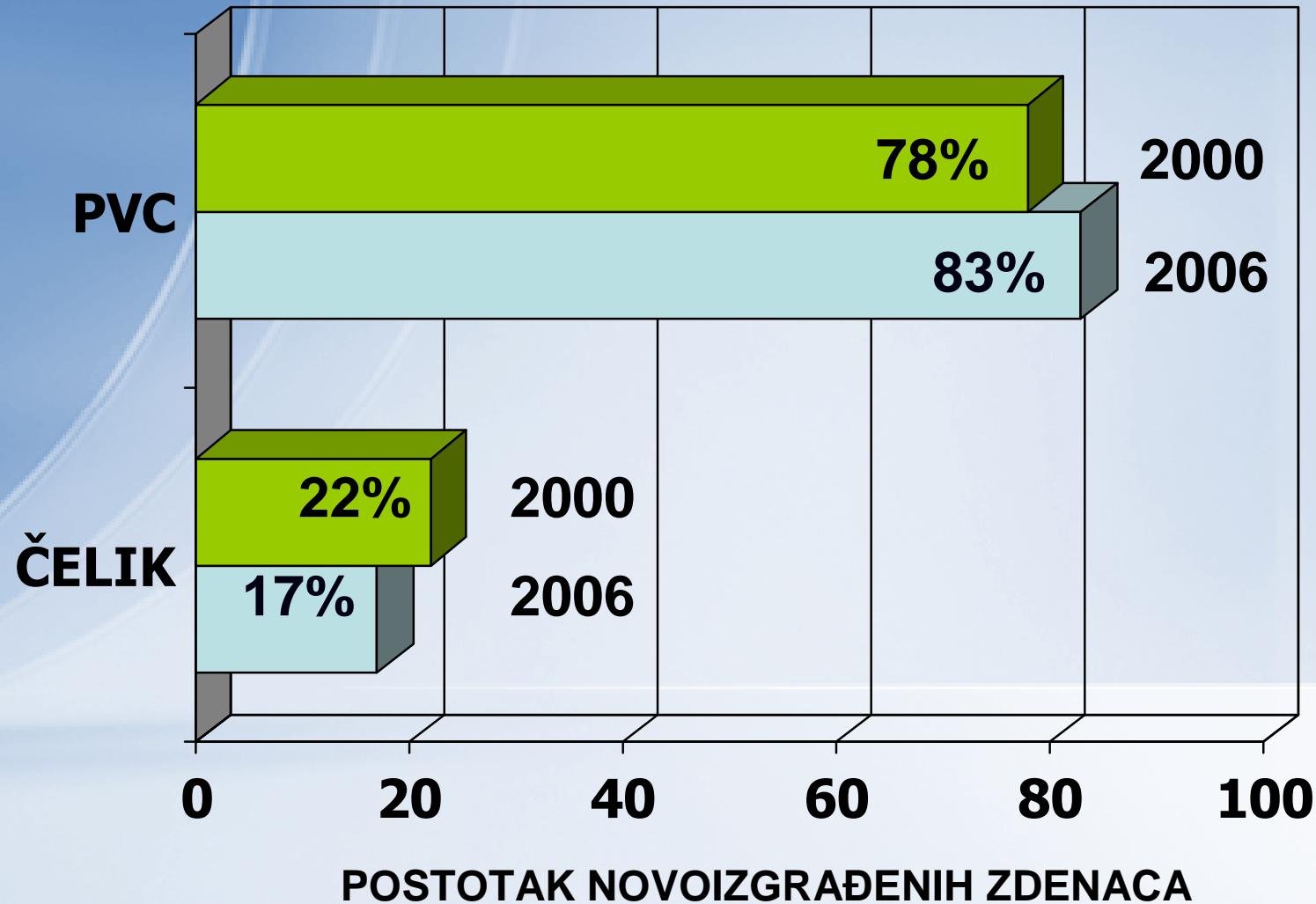
METODE BUŠENJA

ROTACIJSKA 85%

KABLOM 10%



KORIŠTENI MATERIJAL OBLOGE ZDENCA



DULJINA UGRAĐENE OBLOGE TIJEKOM 2006

PVC :
2 MILIJUNA stopa

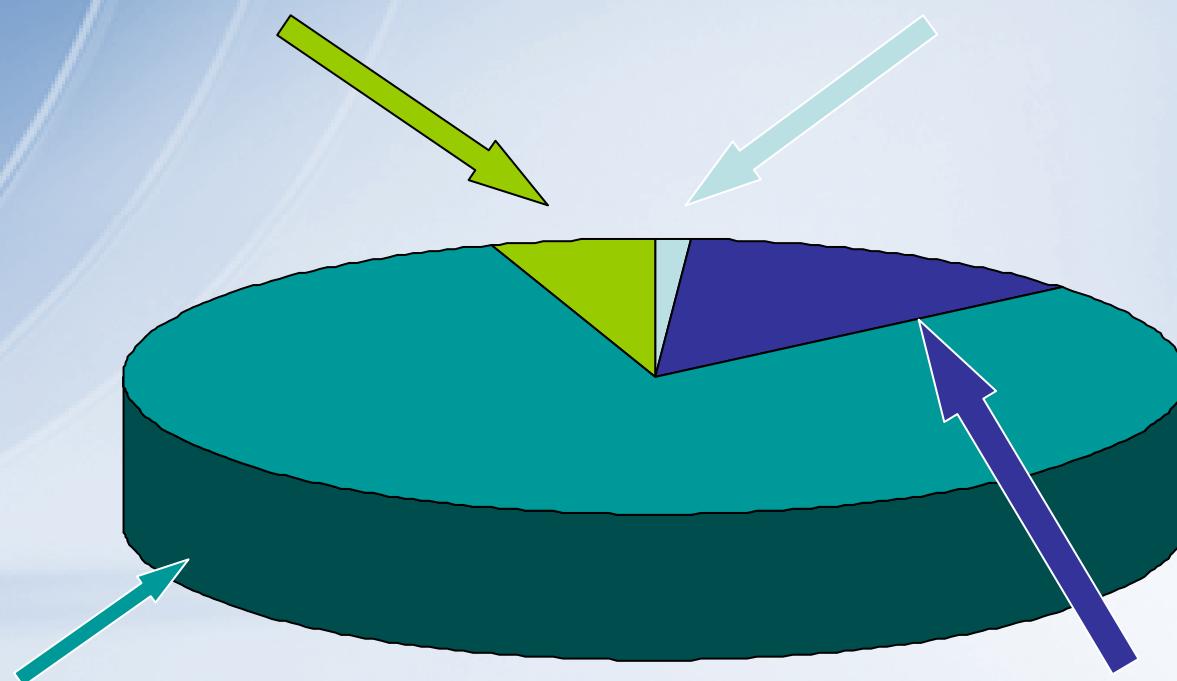


ČELIK :
312,000 stopa

PROMJER OBLOGE NOVOIZGRAĐENIH ZDENACA

6 incha ili
veći – 5%

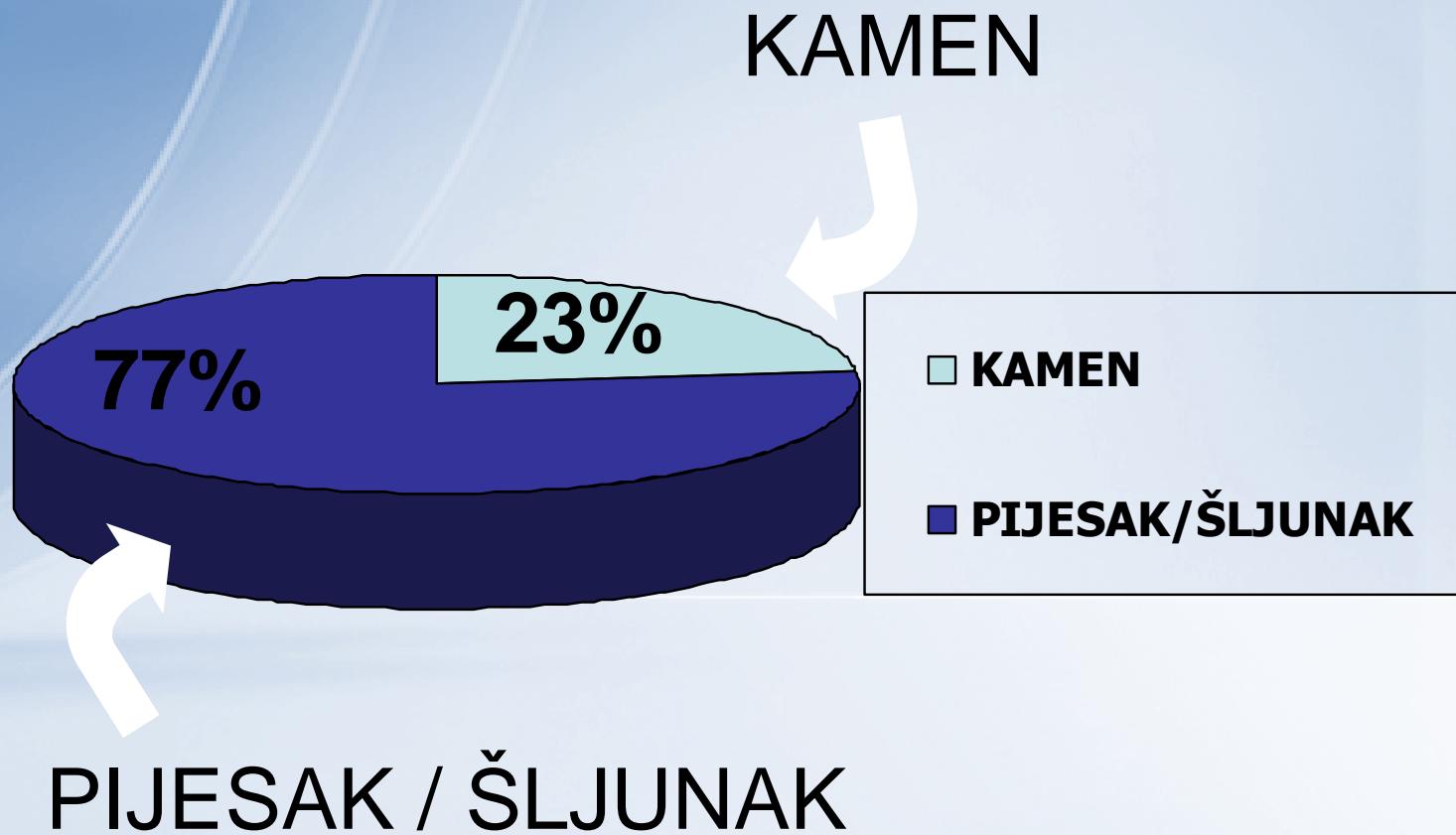
1 $\frac{1}{4}$ do 3 incha – 1%



5 incha – 81%

4 incha – 13%

SREDINA PENETRIRANJA NOVOIZGRAĐENIH ZDENACA



TESTIRANJE VODE IZ ZDENACA NA KOLIFORMNE BAKTERIJE...



IZLOŽENOST KOLIFORMNIM ORGANIZMIMA U VODI



KONZUMACIJA



HRANA



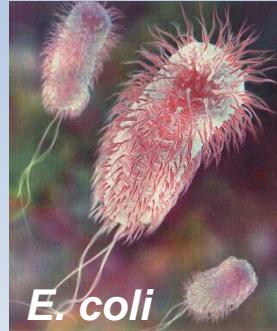
HIGIJENA



KONTAKT PREKO KOŽE

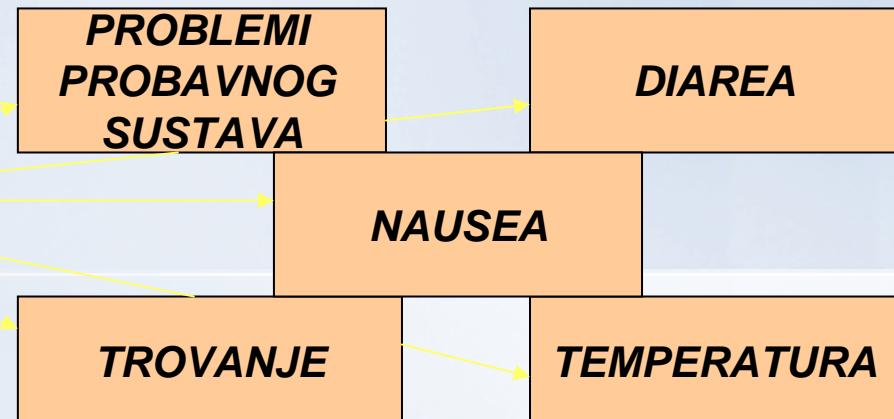


ORGANIZMI U VODI



DJELOVANJE

AKUTNI SIMPTOMI:



ZAKLJUČAK

**ZDENCI IZ KOJIH SE VODA KORISTI U
SVAKODNEVNOJ KONZUMACIJI, MORAJU
BITI IZGRAĐENI TAKO DA BI U VIJEKU
TRAJANJA OSIGURALI HIGIJENSKI
POTREBNE UVJETE VODE ZA KONZUMACIJU!!!**

**NAKON PRAVILNE IZGRADNJE, PRISTUPA SE
EKSPLOATACIJI, ALI I REDOVNIM
ODRŽAVANJIMA RADI OČUVANJA TRAŽENIH
UVJETA!!!**

1. UVOD

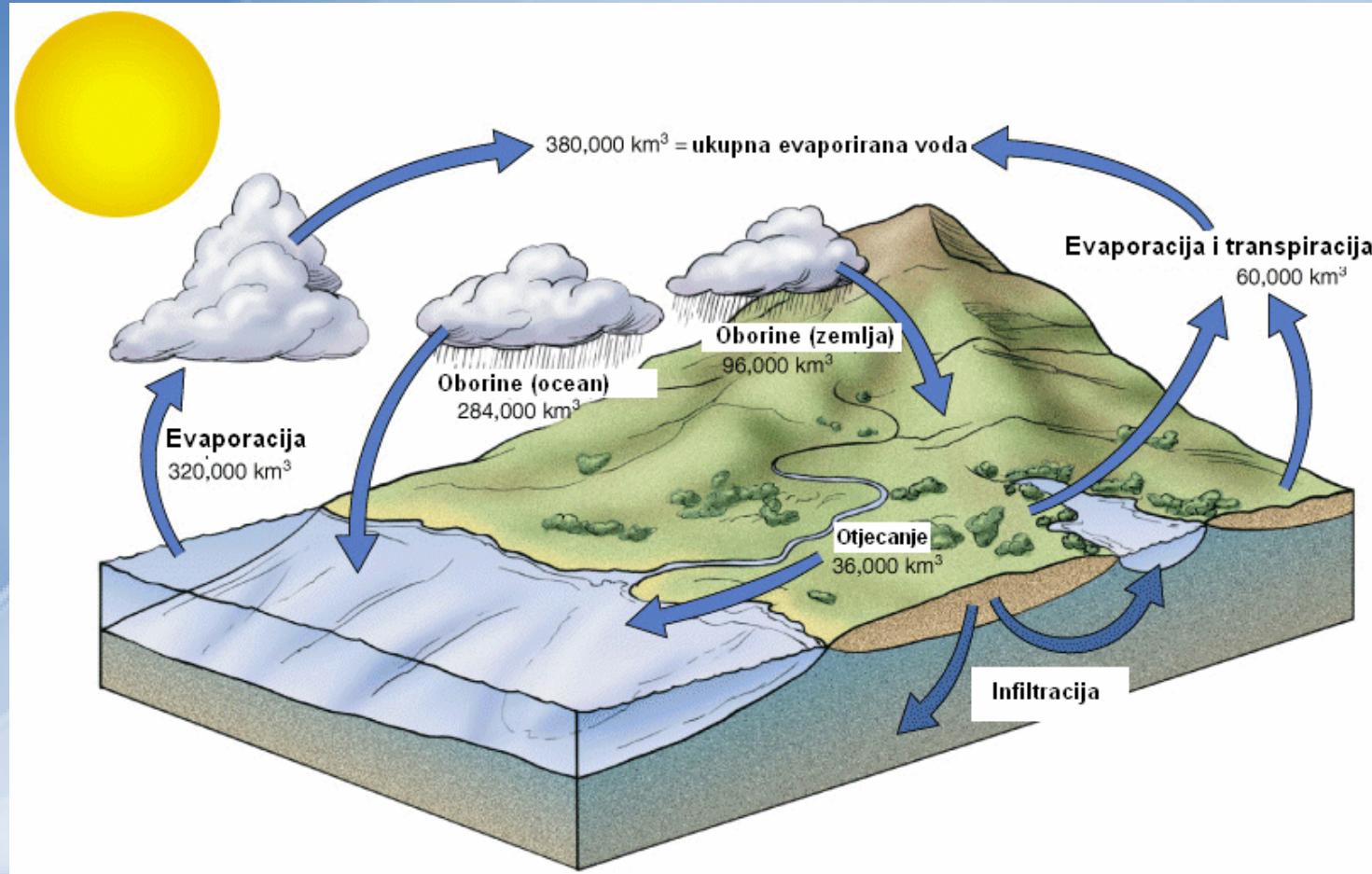
- ✖ Ovo poglavlje posvećeno je prvenstveno objektima u podzemlju te njihovoj izgradnji.
- ✖ Projektiranje i izgradnja objekata u podzemlju usko je vezana za vodoopskrbu, navodnjavanje i zaštitu od podzemne vode.
- ✖ Pri gornjem dijelu zemljine kore velike količine vode pohranjene su u poroznom i raspucanom materijalu.
- ✖ Samo manji dio oborina probije se do podzemlja, no kroz geološko vrijeme ovakav proces rezultirao je velikim zalihamama podzemne vode.
- ✖ Volumen podzemne vode predstavlja NAJVEĆI volumen nezaslanjene vode raspoložive za uporabu.

| Lokacija | Volumen (km ³ 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 |

Procjena vodnih resursa Zemlje

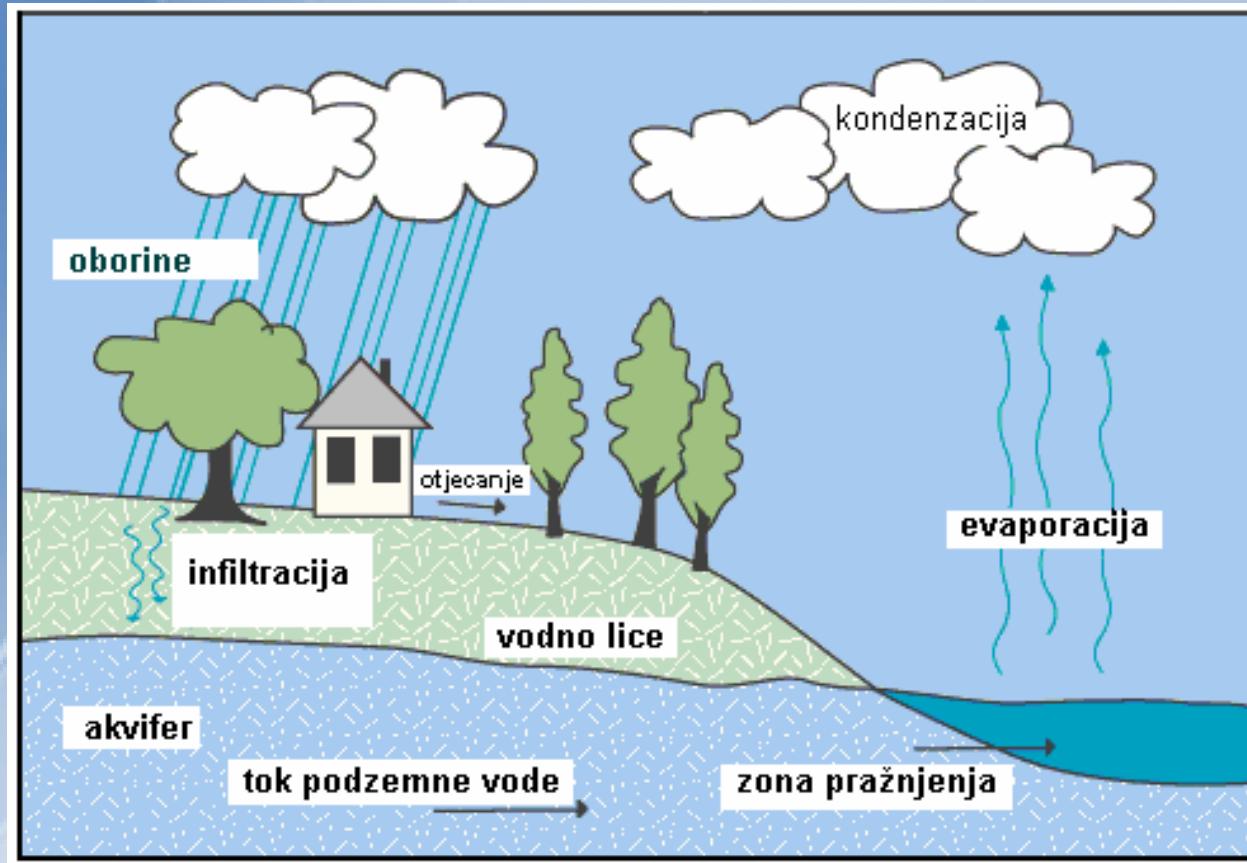
✖ U SAD-u je procijenjeno da pumpanje podzemne vode za vodoopskrbu i navodnjavanje doseže 73 milijarde galona ili $277 \times 10^6 \text{m}^3$ dnevno, što čini otprilike 1/5 ukupne upotrebe voda u SAD-u.

Voda u podzemlju



Hidrološki ciklus vode na Zemlji

✗ Voda u podzemlje dolazi prvenstveno iz oborina procesima infiltracije i perkolicije kroz poroznu sredinu.



Voda u podzemlju

✗ Brzinu i količinu vode koja će se infiltrirati u zasićenu zonu određuju vrsta geološke sredine sistema te stupanj heterogenosti.

✗ **NESTACIONARNOST RAZINE PODZEMNE VODE** vrlo je važna karakteristika na koju treba обратити posebnu pozornost при projektiranju objekata čiji temelji mogu zadirati u područje oscilacija razine podzemne vode.

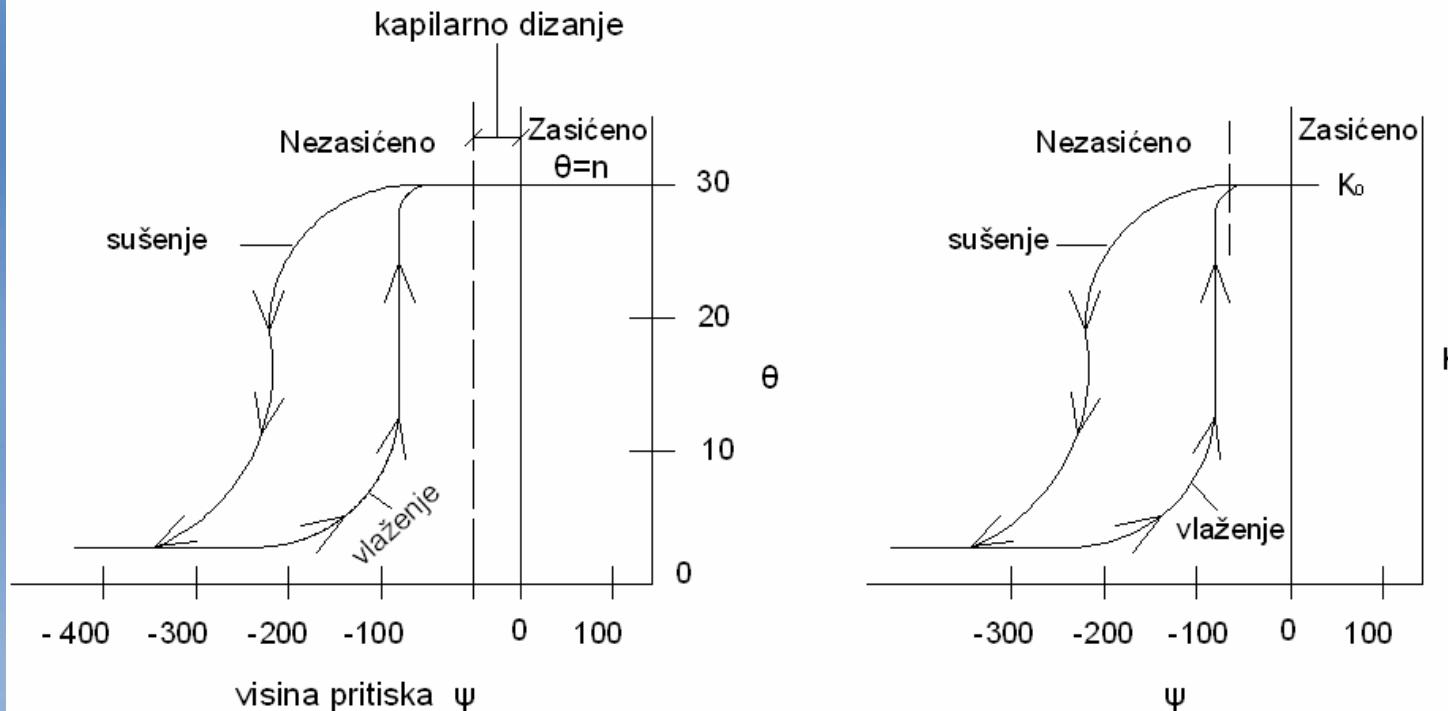
2. VODONOSNI I VODONEPROPUŠNI SLOJEVI : STUPANJ ZASIĆENOSTI

2.1. NEZASIĆENA SREDINA

- ➡ 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:

$$\theta = \frac{V_v}{V_U} 100 \quad [\%]$$

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

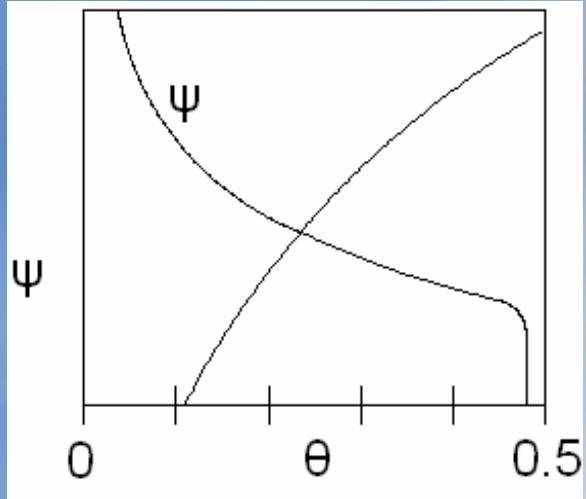


✗ vodno lice u podzemlju predstavlja granicu između zasićene i nezasićene sredine

✗ 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, a kod gline 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.



ψ = usisna visina

$h = \psi + z$ = gravitacijska visina

visina uslijed brzine toka je zanemariva

Darcy-ev zakon:

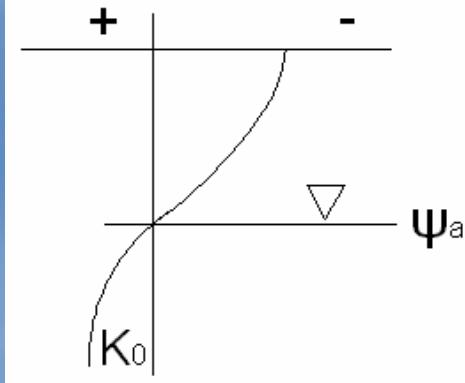
$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \Rightarrow q = -K \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z} = -\left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} + K \right) = -\left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right)$$

D = difuzni koeficijent u poroznoj nezasićenoj formaciji:

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

Jednadžba kontinuiteta:

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

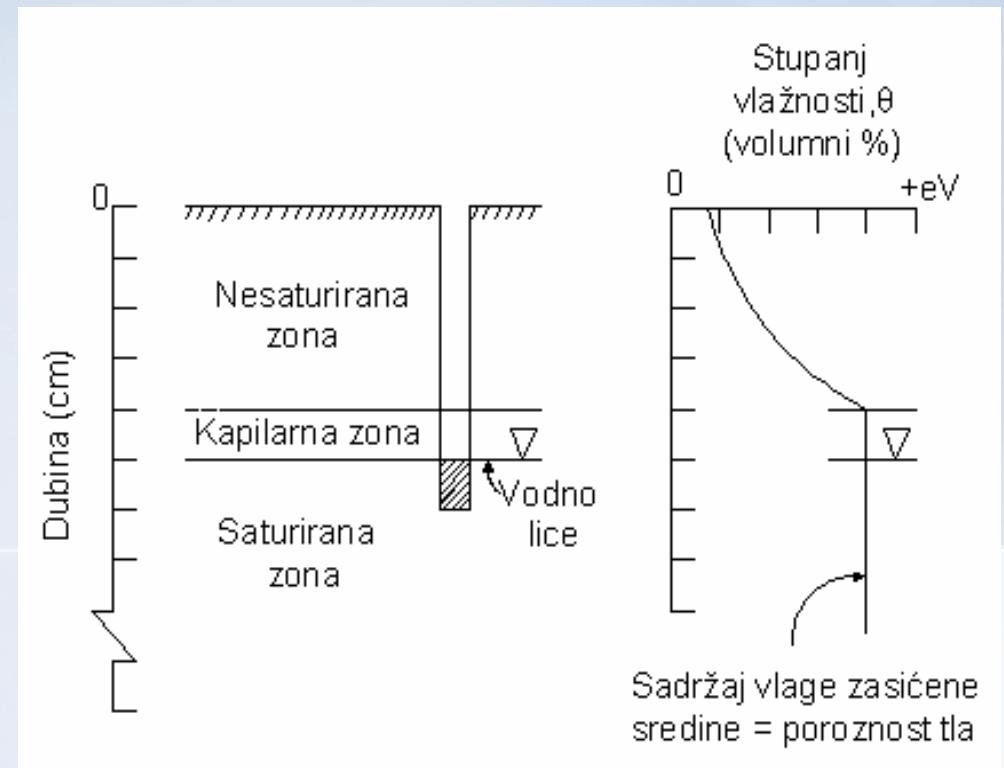


$\psi_a \Rightarrow$ atmosferski pritisak
 $K_0 \Rightarrow$ saturirana hidraulička vodljivost

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

Darcy-ev zakon za nezasićenu sredinu:

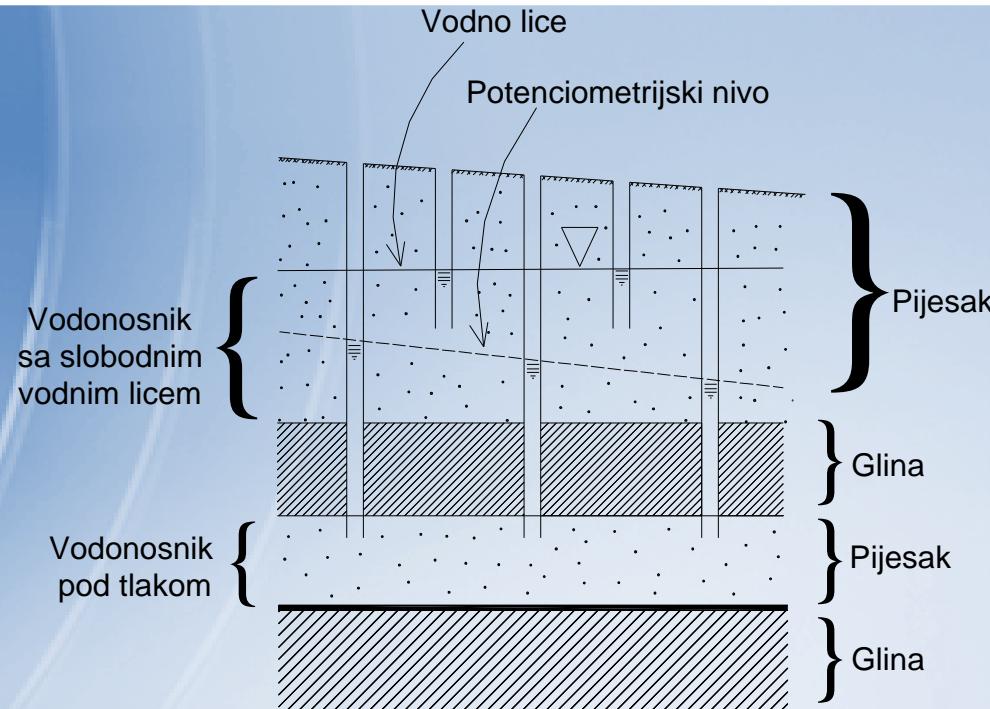
Vodno lice u podzemlju se definira kao ravnina pri kojoj je tlak vode jednak atmosferskom tlaku, a mjeri se određivanjem razine vode u zdencu. Ako s p označimo mjereni tlak, onda je na vodnom licu $p = 0$, poviše vodnog lica $p < 0$, dok je u zasićenoj sredini $p > 0$.



Raspodjela tlaka između zasićene i nezasićene sredine

2.2. ZASIĆENA SREDINA

- ✖ nalazi se 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
- ✖ **vodonosni sloj** ili **vodonosnik** → svaka geološka formacija koja je porozna, zasićena vodom i može pronositi značajne količine vode pod utjecajem hidrauličkog gradijenta (riječ akvifer, koja se često susreće u stranoj literaturi, ima puno šire značenje)
- ✖ **vodonepropusni slojevi** (ili **akvitardi**) → 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



Primjer tečenja u vodonosniku

● 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.) Slika predstavlja tu razliku između dva prikaza vognog stanja.

Vodonosni sloj može biti pod tlakom ili sa slobodnim vodnim licem.

- ➡ 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 mjerenim 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

2.3. FIZIKALNE KARAKTERISTIKE VODONOSNIH SLOJEVA

● osnovne fizikalne karakteristike vode i porozne sredine koje treba poznavati da bi se opisale hidrauličke karakteristike podzemlja koje služe kao podloga inženjeru pri projektiranju i izvođenju podzemnih hidrotehničkih objekata:

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

Stišljivost i efektivni tlak

- **stišljivost** - 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 inverzna modulu elastičnosti, definirana kao relativna deformacija/narezanje $d\varepsilon/d\sigma$

► čvrstoća materijala u poroznoj sredini mjeri se modulom elastičnosti:

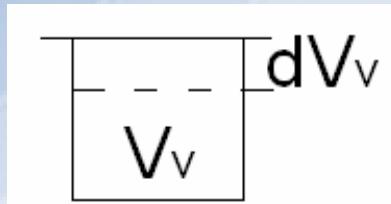
$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

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

► stišljivost je obrnuto proporcionalna modulu elastičnosti:

$$\text{stišljivost} = \frac{1}{E} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma}$$

► povećanje tlaka (p) vode može rezultirati smanjenju određenog volumena vode, V_V . Stišljivost vode je tada definirana kao:



$$\beta = \frac{-dV_V / V_V}{dp}$$

negativan predznak potreban je da se dobije pozitivna vrijednost β za

$$\frac{dV_V}{V_V} - \text{relativna deformacija u vremenu}$$

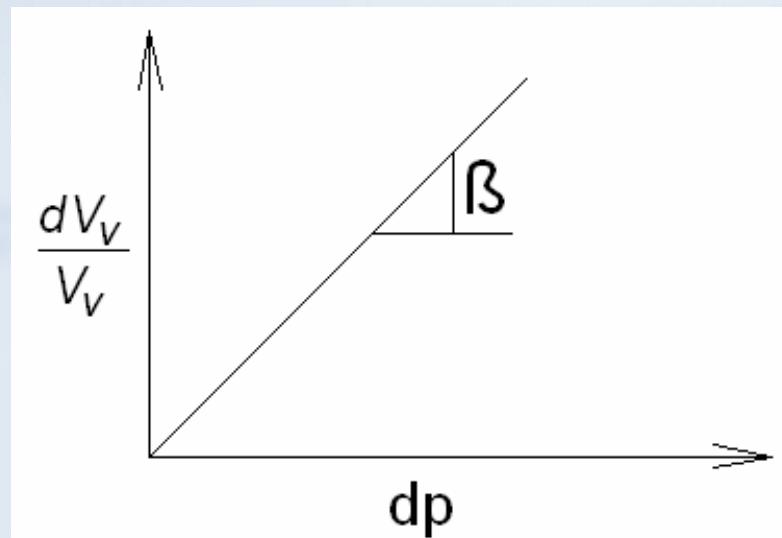
$$dp - \text{promjena tlaka}$$

Prethodni izraz prikazuje linearu elastičnu relaciju između volumetrijske deformacije i tlaka inducirano 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:

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

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

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



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

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp}$$

ρ - gustoća vode

$\frac{d\rho}{\rho}$ - relativna deformacija volumena izražena kao relativna promjena gustoće

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

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

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

$$\rho = \rho_0 \exp[\beta p] = \rho_0 e^{\beta p}$$

Za nestišljivu tekućinu vrijedi:

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

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

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

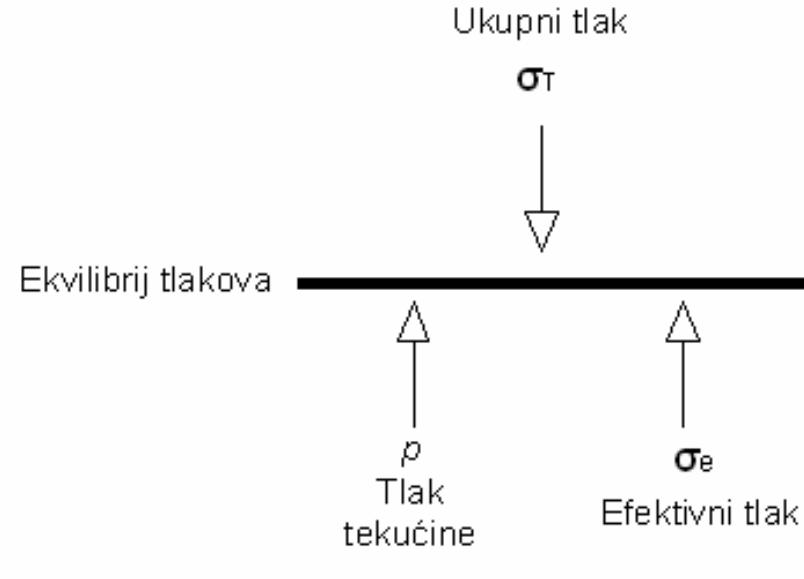
- 1) kompresijom vode u porama – kontroliran stišljivošću vode (β)
- 2) kompresijom individualnih zrna materijala - stišljivost individualnih zrna (taj mehanizam je zanemariv pod pretpostavkom da su zrna materijala nestišljiva)
- 3) preraspodjelom porognog materijala u gušće pakiranu sredinu (taj mehanizam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

Koncept efektivnog tlaka predloženog od Terzaghi-a (1925)

Primjer: tlak je u ravnoteži na proizvoljnoj plohi (Sl.2.5).

σ_t - ukupni tlak koji djeluje prema dolje na plohu (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) $d\sigma_T = d\sigma_e + dp$.



Ravnoteža tlakova

- ➡ 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:

$$\alpha = \frac{-dV_U / V_U}{d\sigma_e}$$

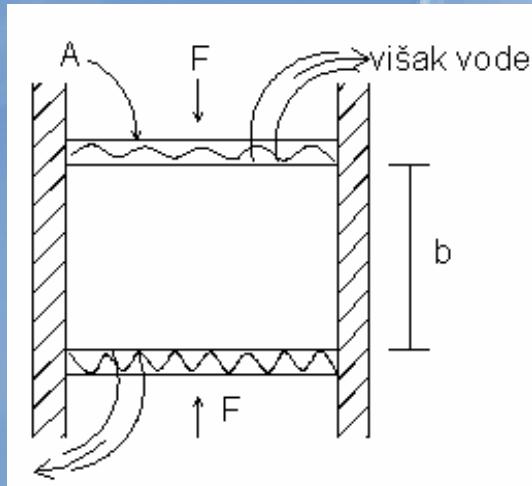
gdje je V_U ukupni volumen porozne mase, definiran kao $V_U = V_s + V_v$, pri čemu V_s označava volumen krute faze dok V_v označava volumen tekućine

- povećanje efektivnog napona σ_e rezultira smanjenjem dV_U ukupnog volumena porozne sredine 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. $dV_s = 0 \rightarrow$ 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:

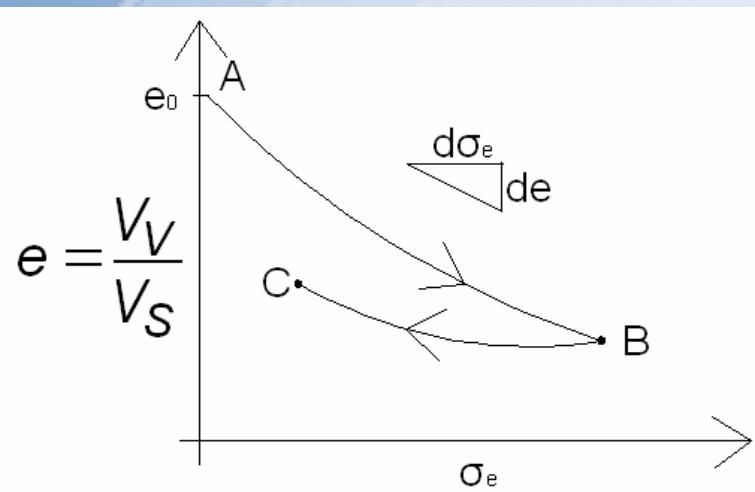
$$dV_u = dV_s + dV_v$$

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**.

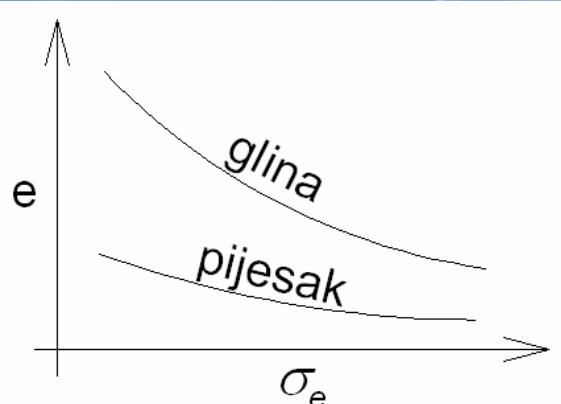


Stišljivost α se određuje preko odnosa (e vs. σ_e). Krivulja \overline{AB} je za povećanje opterećenja, dok je krivulja \overline{BC} za smanjenje σ_e . Različitost krivulja naziva se **histerez**.

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

Odnos volumena vode prema čvrstoj fazi:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad e_0 = \text{početni}$$



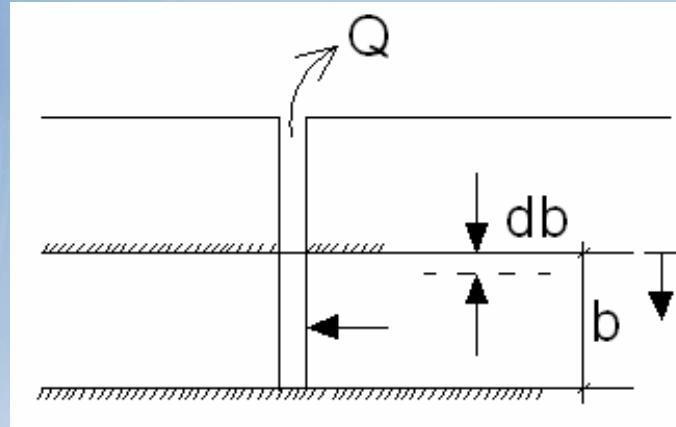
$$\alpha = \frac{-db/b}{d\sigma_e} = \frac{-de/(1+e_0)}{d\sigma_e}$$

| 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() | 4.4×10^{-10} |

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

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

Deformacija vodonosnika i zbijanje



- $\sigma_T = \text{const}$. (težina objekta ista) → smanjenje hidrauličke visine – dh rezultira povećanjem σ_e ($d\sigma_T = -\rho g dh$). Dakle:

$$db = -\alpha b d\sigma_e = -\alpha b \rho g dh$$

-negativni znak pokazuje da se radi o smanjenju debljine vodonosnika

► Dakle, prekomjerno pumpanje prouzrokuje horizontalne gradijente, **h opada**, σ_e raste i **vodonosnik se zbij**a. 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 izraza dobiva:

$$dV_v = -dV_U = \alpha V_U d\sigma_e = \alpha \rho g$$

pri čemu je zadnja jednakost dobivena uzimanjem jediničnog volumena, $V_T=1$, te činjenicom da je promjena efektivnog tlaka σ_e kontrolirana promjenom hidrauličke visine, $d\sigma_e = \rho gdh$ (jedinično opadanje hidrauličke visine rezultira sa $dh=-1$)

Voda koja se izluči opadanjem tlaka može se pisati korištenjem (2):

$$dV_v = \beta n \rho g$$

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

- **specifični volumen** je zbroj navedena dva mehanizma koji opisuju način ispuštanja vode iz jedinične zapremine vodonosnika:

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

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:

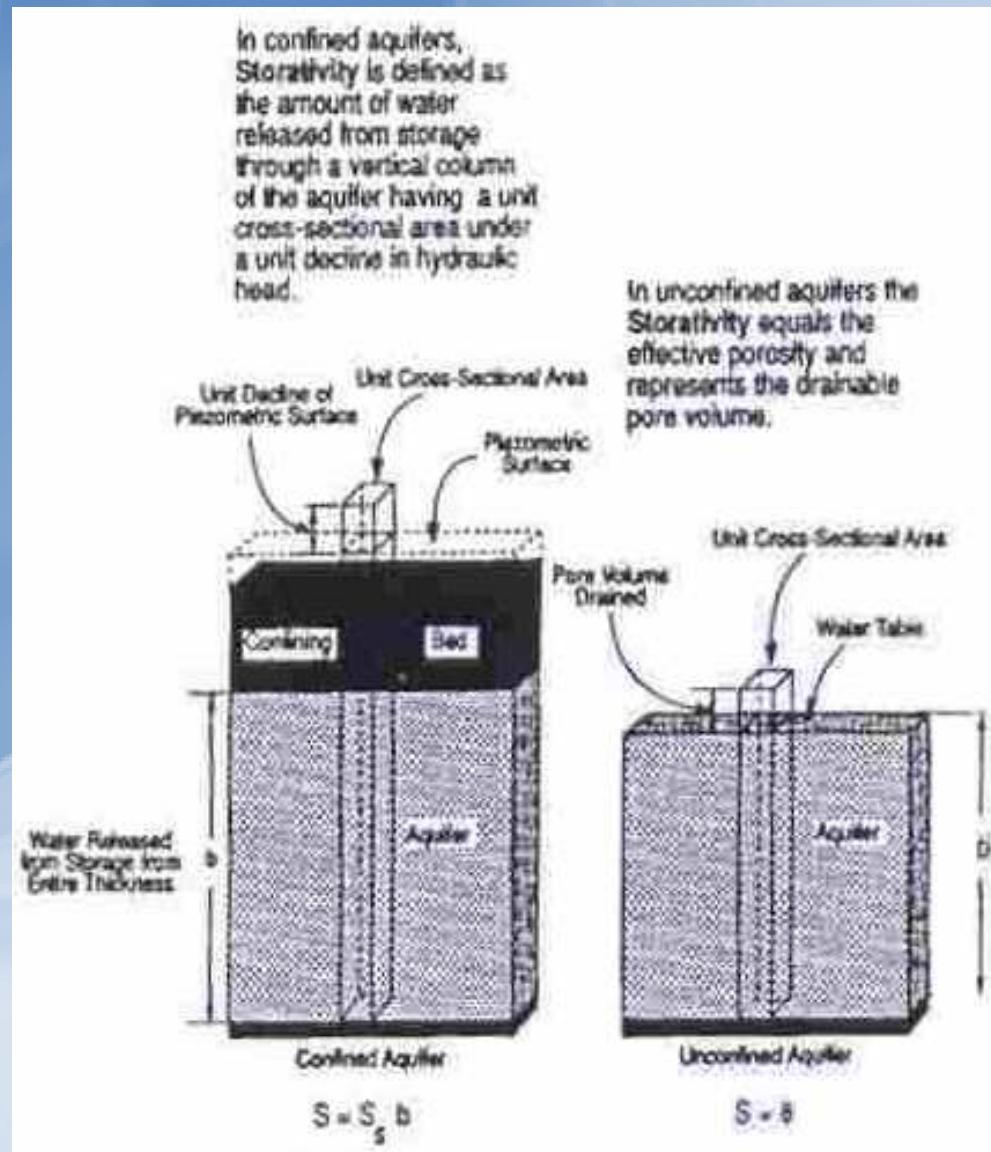
$$S = S_s b = \rho g b (\alpha + n\beta)$$

S → 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 .

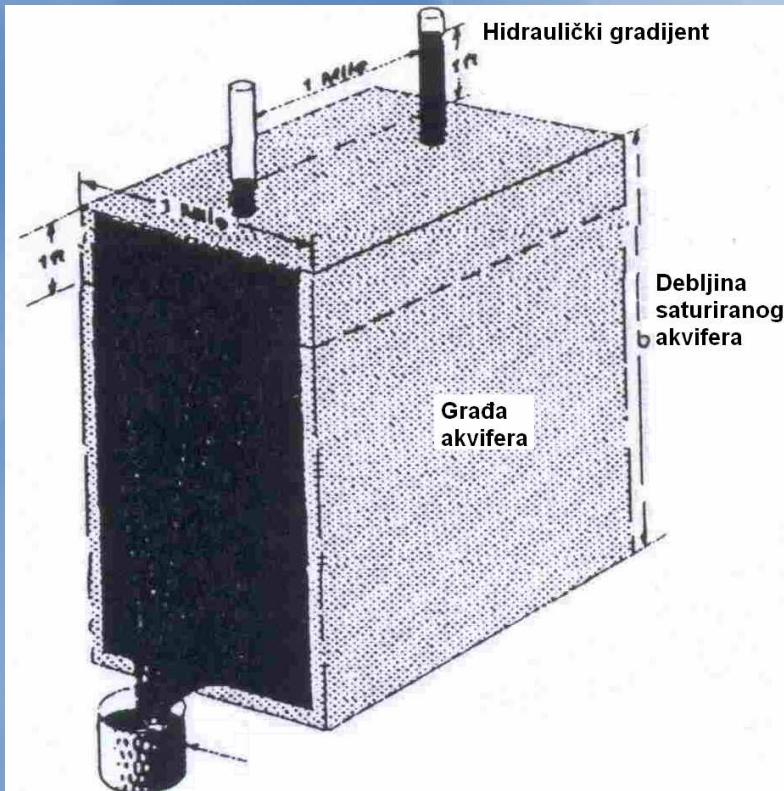
S_y → volumen vode kojeg vodonosnik sa slobodnim licem ispusti po jediničnoj površini kao rezultat jediničnog pada hidrauličke visine.

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



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

Princip parametra zapremine



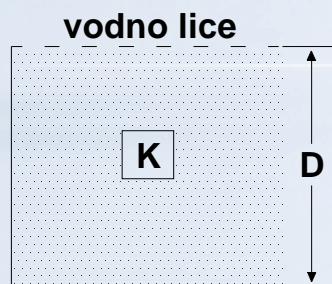
Pijezometrijska površina



$$T = K b$$

Vodonosnik pod tlakom

Princip transmisivnosti



$$T = K D$$

► Koncept transmisivnosti 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 a .

PROJEKTIRANJE ZDENACA

CILJEVI

- ❖ Osigurati da zdenac zadovoljava potrebe korisnika
 - ❖ Osigurati što veću produktivnost uz što manje sniženje vodnog lica
 - ❖ Osigurati traženu kvalitetu vode
 - ❖ Osigurati projektni vijek konstrukcija ovog tipa (cca. 25 godina)

NOVO: Minimizirati utjecaj okolnih zdenaca & živog vodenog svijeta

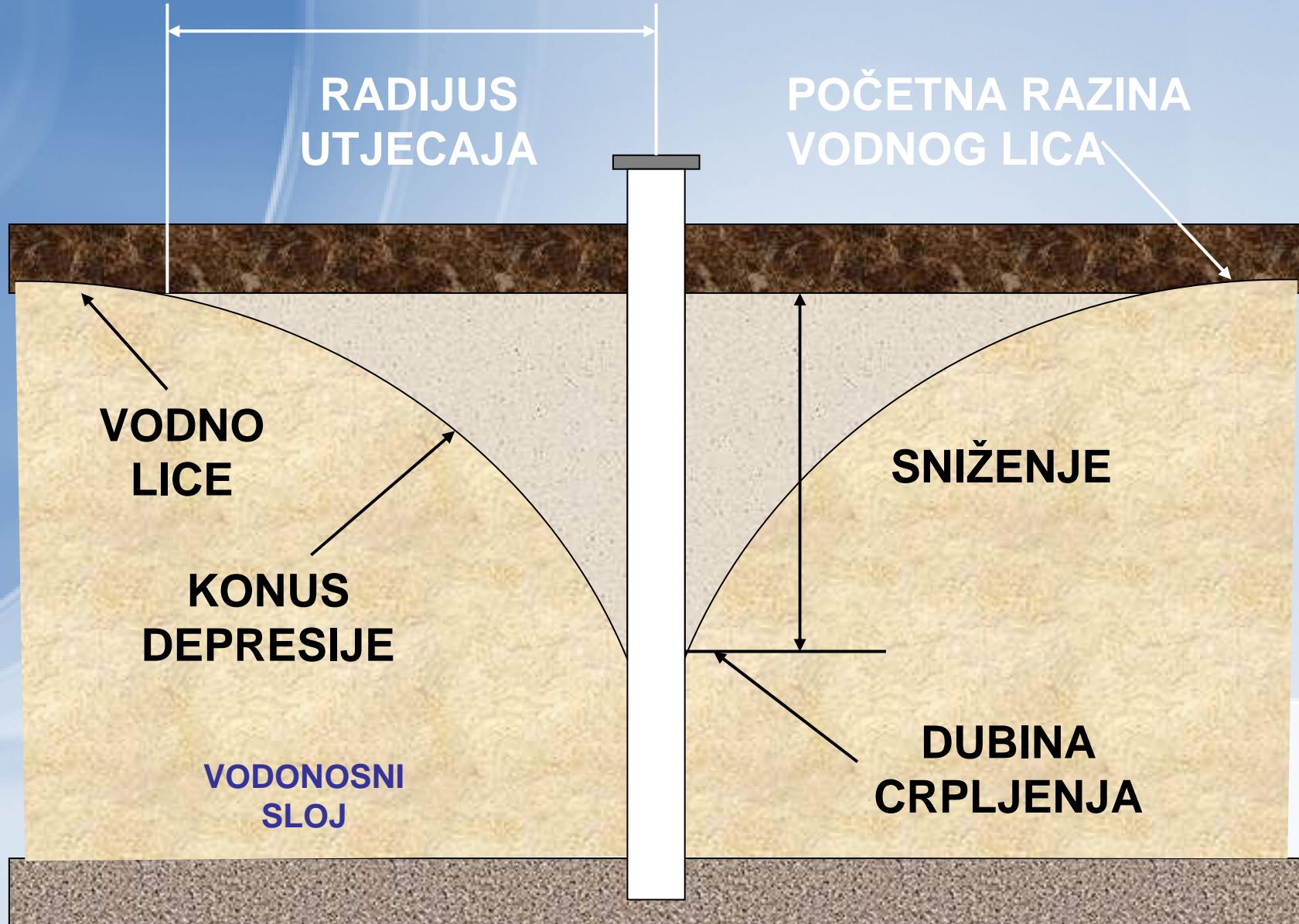
3. PROJEKTIRANJE I IZGRADNJA ZDENACA I KOLEKTORA

► 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.

Zdenci se projektiraju i izvode za potrebe:

- iskorištavanja podzemne vode
- mjerena količine i kvalitete podzemne vode
- za potrebe geofizičkih istraživanja
- umjetnog prihranjivanja vodonosnih slojeva
- za ispuštanje otpadnih voda u podzemlje

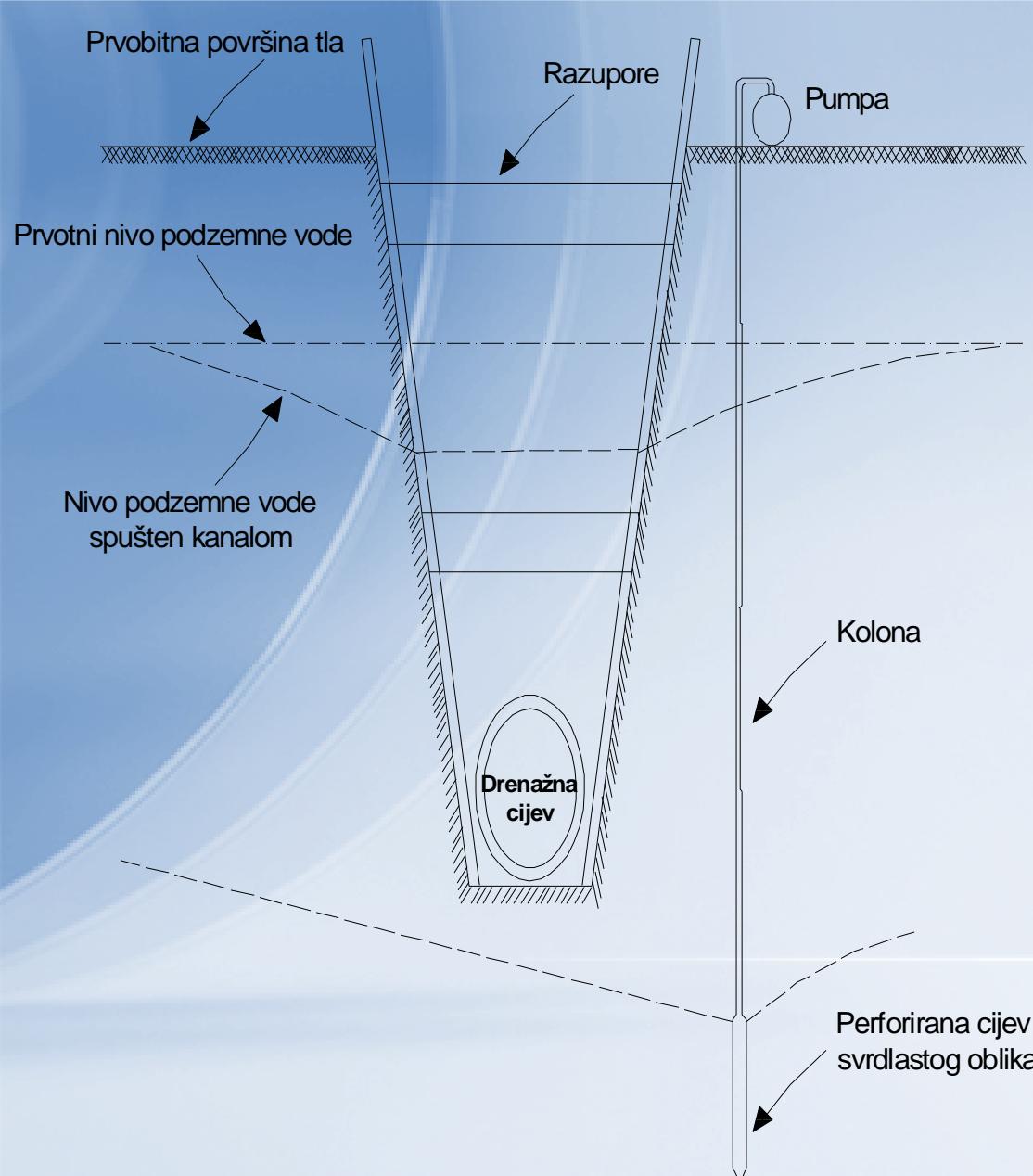


3.1. VRSTE ZDENACA I NAČIN BUŠENJA

- ◆ 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 10cm 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.

Ovi tipovi zdenaca limitirani su u veličini i dubini te njihova upotreba za veća crpilišta nije moguća osim ako nisu korišteni u velikom broju. No vrlo je koristan za individualnu vodoopskrbu poljoprivrednika, privremenih gradilišta, te za monitoring kvalitete podzemne vode.

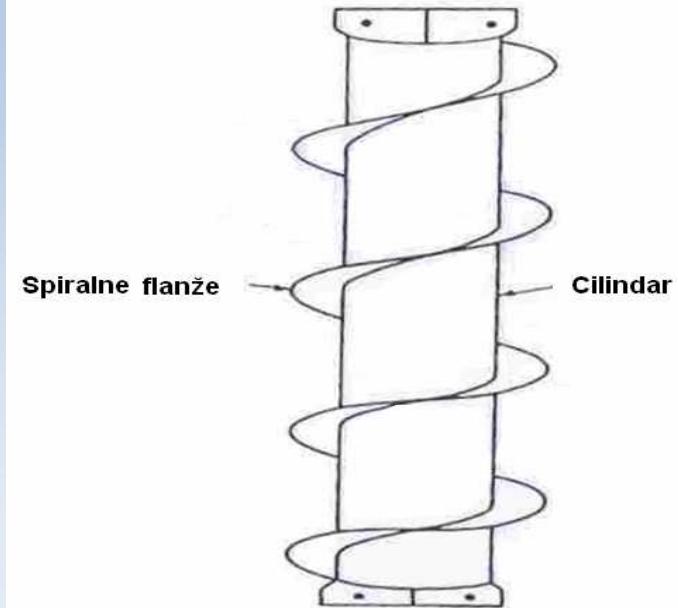
Baterije (skup više zdenaca) ovakvih tipova zdenaca se vrlo često koriste za spuštanje nivoa podzemne vode pri raznim vrstama podzemnih iskopina.



Princip spuštanja razine podzemne
vode pri izvođenju hidrotehničke građevine

Slika prikazuje slučaj gdje se serija zdenaca s perforiranim cijevima svrđlastog oblika koristi za **spuštanje razine podzemne vode ispod dna drenažnog kanala**. Pumpanjem zdenca u blizini drenažnog kanala spušta se razina podzemne vode i održava suhi kanal. U ovakvim slučajevima jedna se pumpa može koristiti za nekoliko zdenaca međusobno povezanih cijevima na površini zemlje.

► 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"). Ovako bušeni zdenci dosežu **promjer 16 – 36 cm te idu u dubinu do 50 m.**

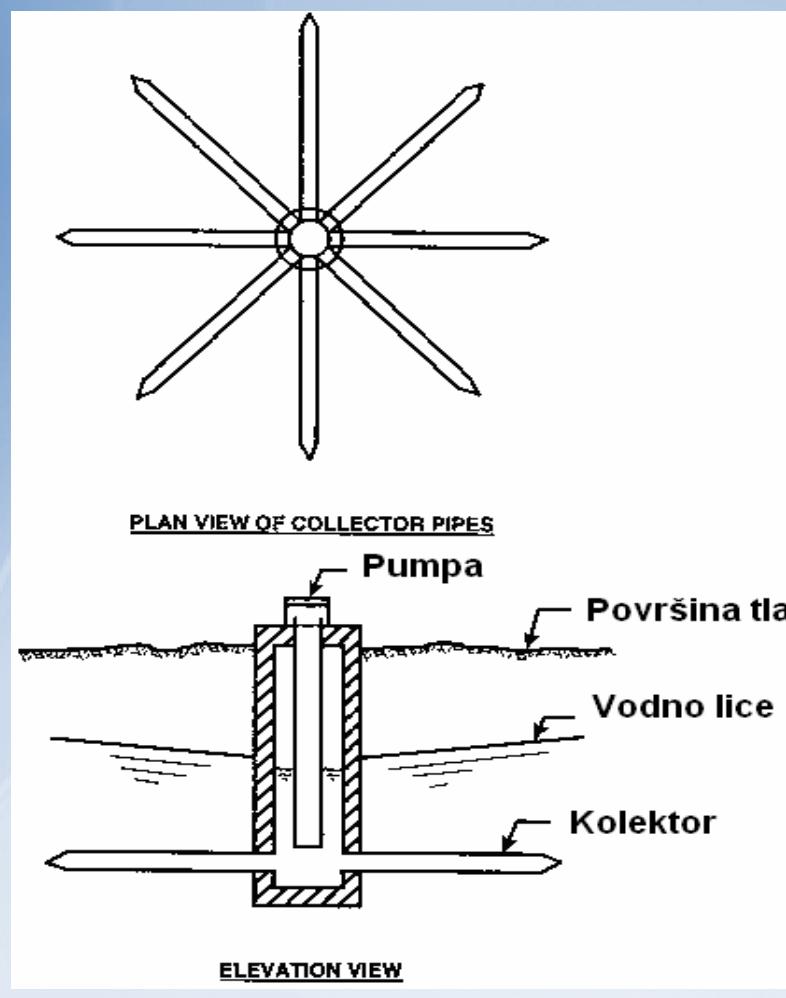


Spiralni cilindar za vađenje
iskopanog materijala

► Duboki i veći zdenci se buše **rotacijskim metodama**. Svrđlo s noževima na kraju cijevi se rotira i uz pomoć cirkulirajuće tekućine smrvljeni materijal se izvlači na površinu. Najčešće korištena tekućina za bušenje je mješavina bentonita i ostalog smrvljenog 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. 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.

Nisu svi zdenci vertikalni. Evo nekih primjera horizontalnih zdenaca:

- ➡ **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.
- ➡ **radijalni kolektori** - najčešći primjer je tzv. Reni kolektor koji se sastoji od centralnog (vertikalnog) zdenca 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.



● Osnovna svrha ovakvih hidrotehničkih objekata je zaštитiti kvalitetu vode koja je u površinskim tokovima daleko više izložena mogućem zagadjenju 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.

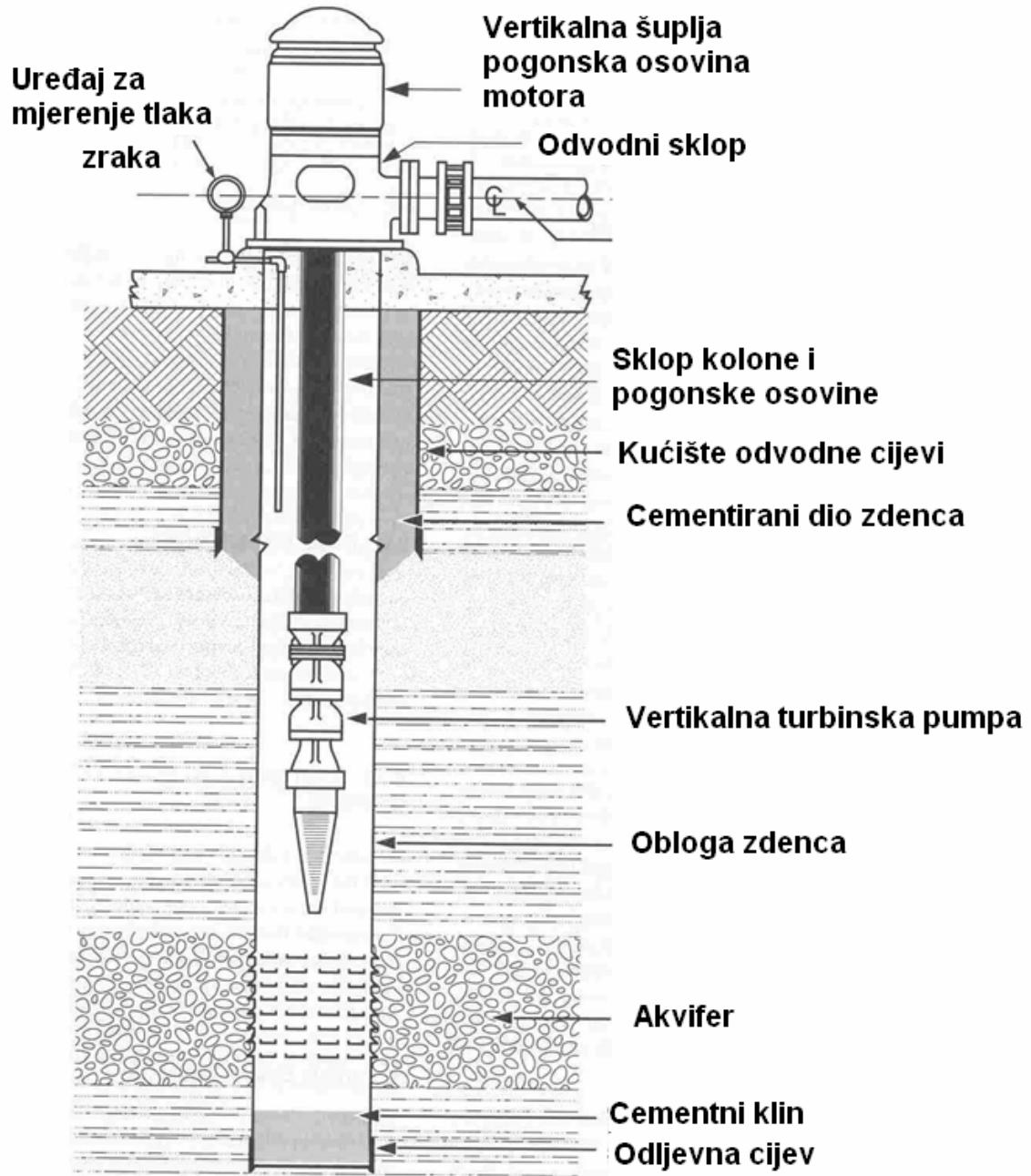
Izgradnja i zaštita zdenaca

Nakon završetka bušenja projektirane vrste zdenca preostaje završni dio konstrukcije zdenca koji se sastoji od:

- ⇒ oblaganja bušotine i projektiranja perforiranog dijela zdenca
- ⇒ pumpanja i ispiranja zdenca

► **Bušeni zdenac** se oblaže kako bi ga se zaštitilo od mogućeg kolapsa stijenki bušotine (osim u području konsolidiranih stijena). 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.

► 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 slobodniji protok vode u zdenac te bolja izdašnost zdenca

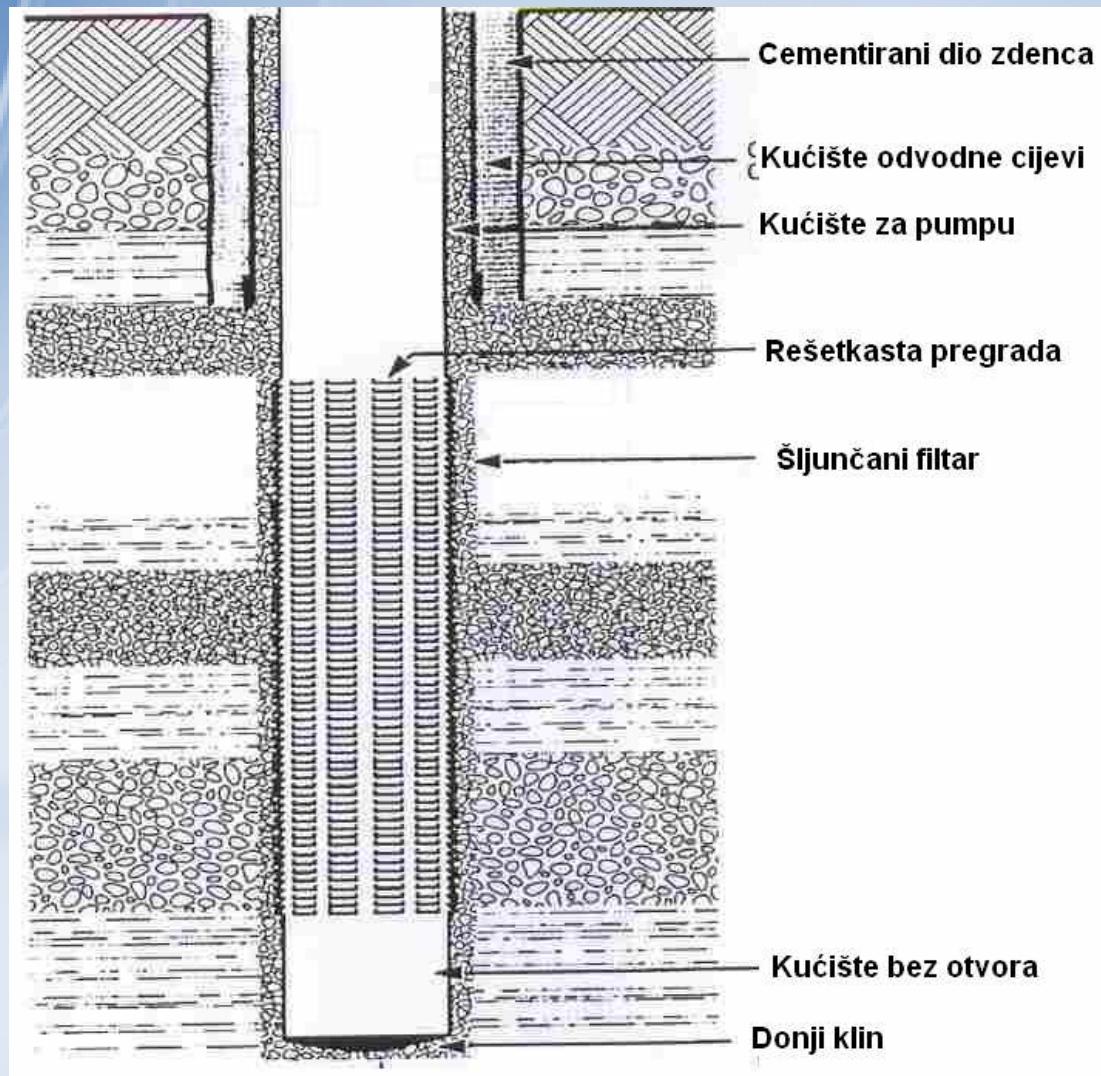


Elementi instaliranog zdenca

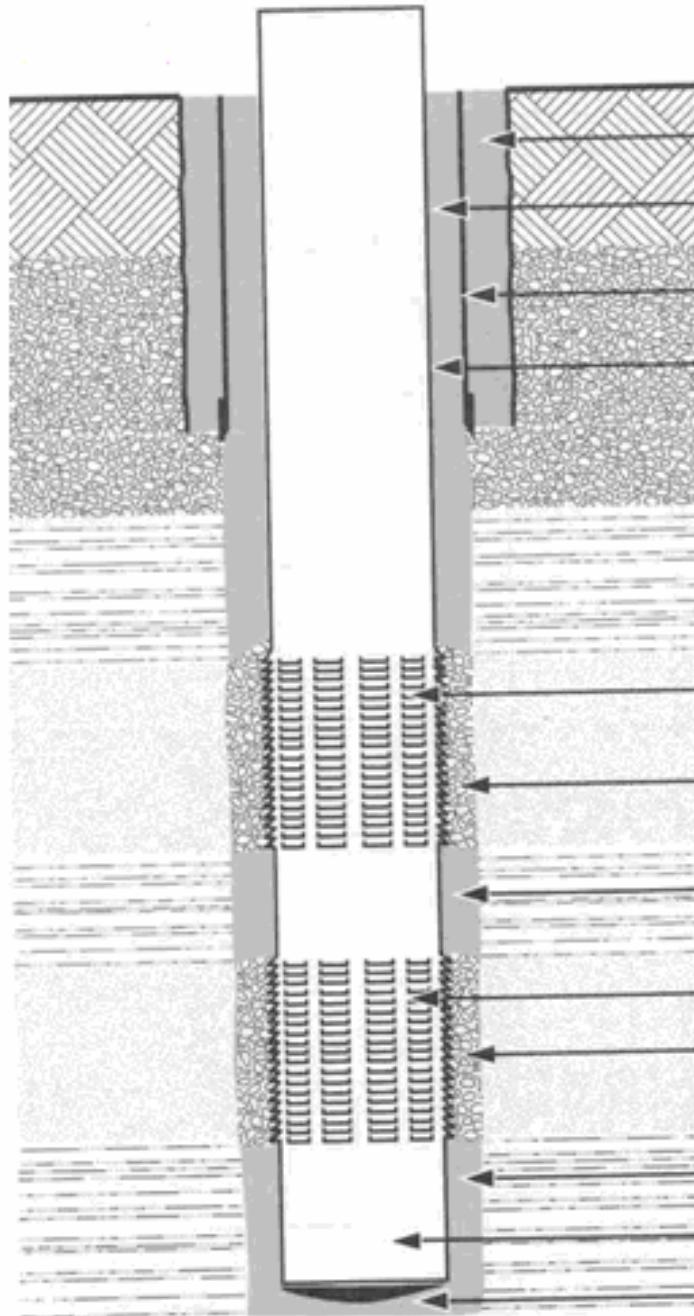
Zdenac se u završnoj fazi uglavnom sastoji od slijedećih elemenata :

1. **Ulagni 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 mogu se vidjeti različite konstrukcije zdenaca u nekim geološkim formacijama.



Princip izgradnje sa šljunčanim filtrom



Cementirani dio zdenca

Cementirani dio zdenca

Kućište odvodne cijevi

Kućište za pumpu

Rešetkasta pregrada

Šljunčani filter

Cementirani dio zdenca

Rešetkasta pregrada

Šljunčani filter

Cementirani dio zdenca

Zatvoreno kućište

Donji klin

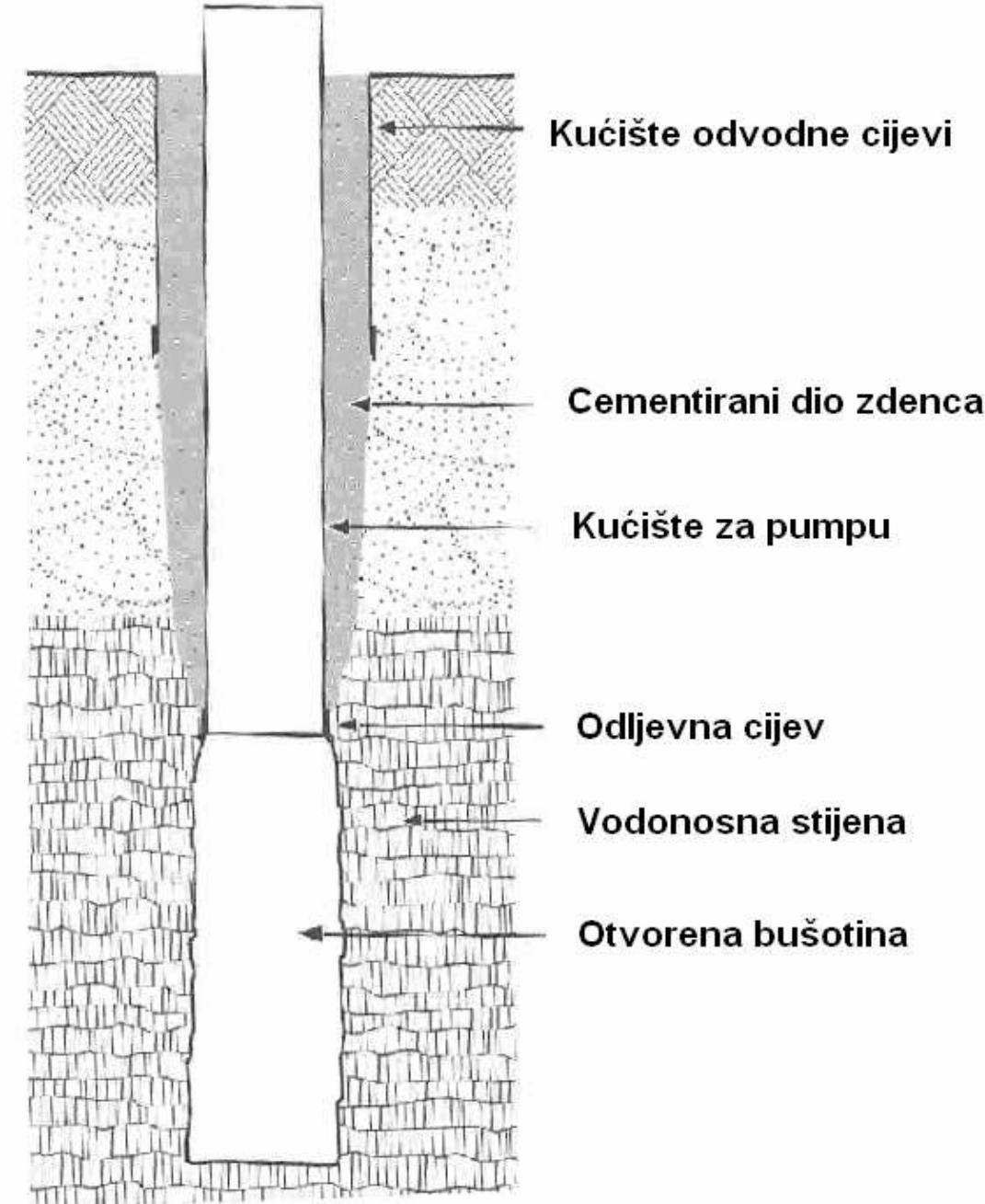
Instalacija šljunčanog filtra u višestrukim zonama

Održavanje zdenaca

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

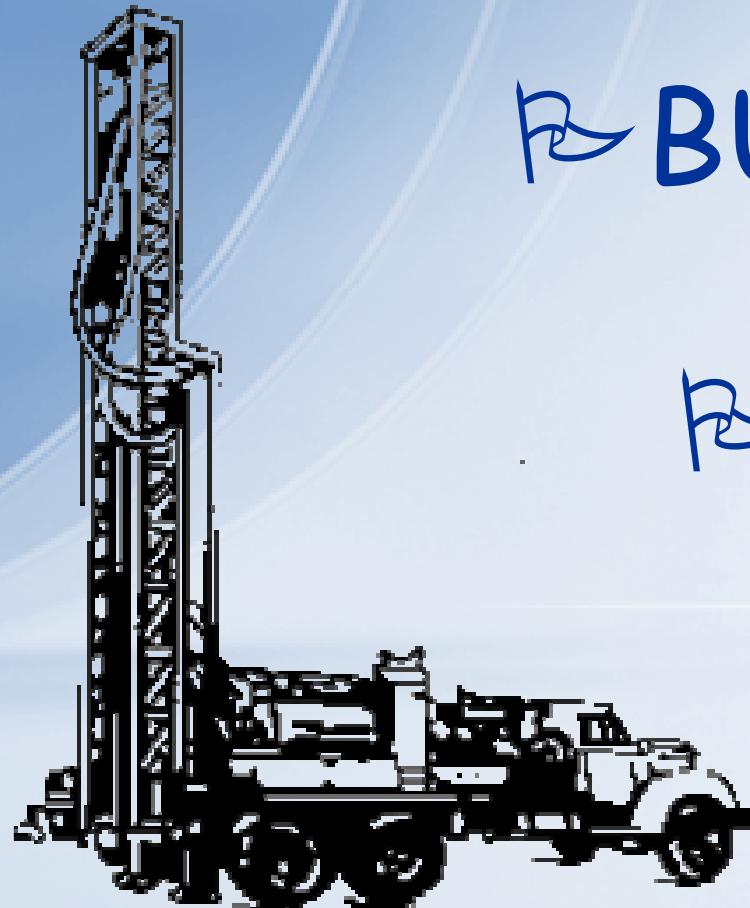
- Podzemna voda koja ima jaku mineralošku kompoziciju vrlo često uzrokuje naslage otopljenih tvari na stjenkama zdenca (inkrustracija). Naslage mogu prouzrokovati pad tlaka uz povećanje brzina blizu samih perforacija na oblogama zdenca.

- 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.



Instalacija zdenca u vodonosnoj stijeni

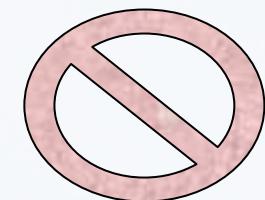
VRSTE ZDENACA OVISNO O NAČINU IZVOĐENJA



☞ BUŠENI

☞ ZABIJANI

☞ KOPANI



BUŠENI ZDENCI

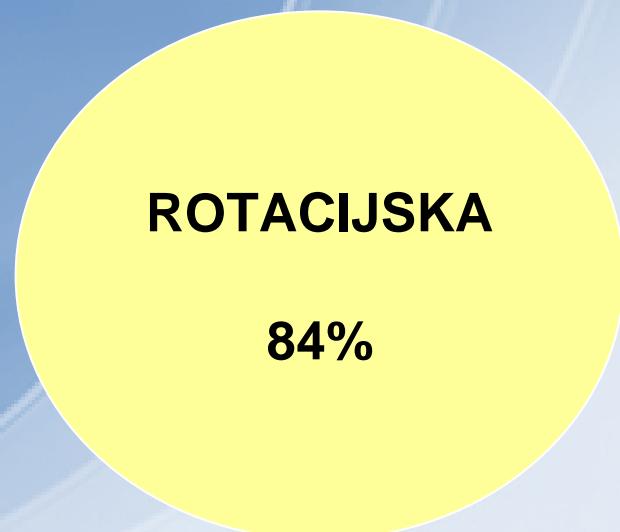
- Mogućnost izvođenja u različitim prirodnim materijalima (pijesak, šljunak, stijena,...)
- Izgradnja rotirajućim, uz pomoć kabla, mlaznim, bušenjem uz pomoć svrdla,... metodama
- 2 in. ili veće obloge

BUŠENI ZDENCI

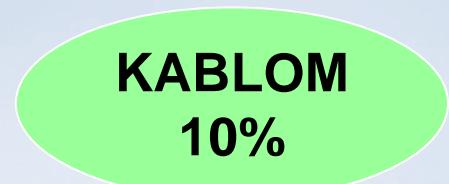
- Materijal obloge: Čelik ili PVC
- Veliki izbor uređaja za ugradnju
- Mnogo praktičnija izvedba od zabijanih i kopanih zdenaca
- Većina >50 ft. dubine
- *SA SANITARNOG GLEDIŠTA POKAZUJU IZUZETNO BOLJA SVOJSTVA U ODNOSU NA OSTALE VRSTE ZDENACA*

METODE BUŠENJA ZDENACA

NAJČEŠĆA:

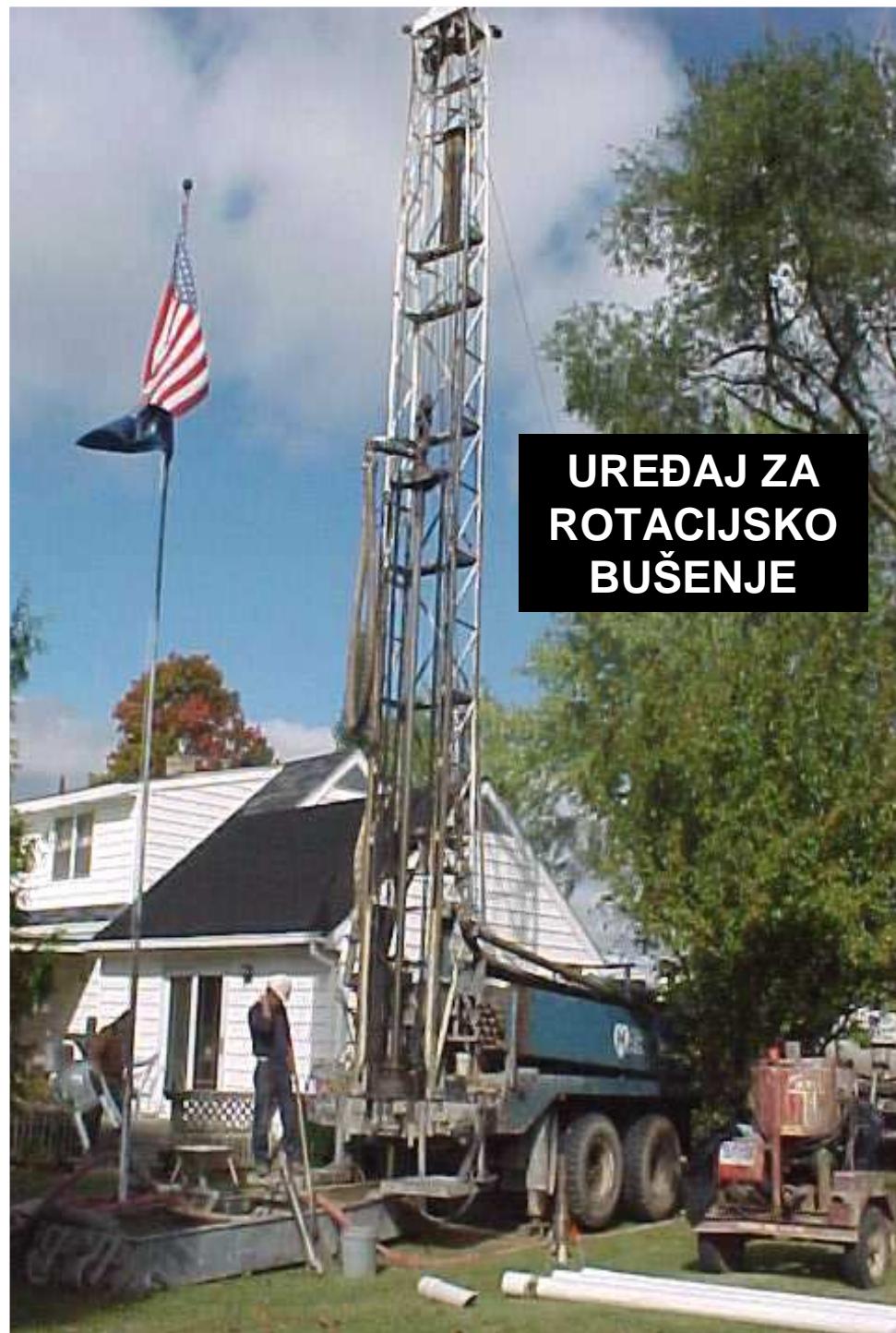


MANJA UČESTALOST :



“DUAL TUBE” TEHNOLOGIJA

HORIZONTALNA BUŠENJA

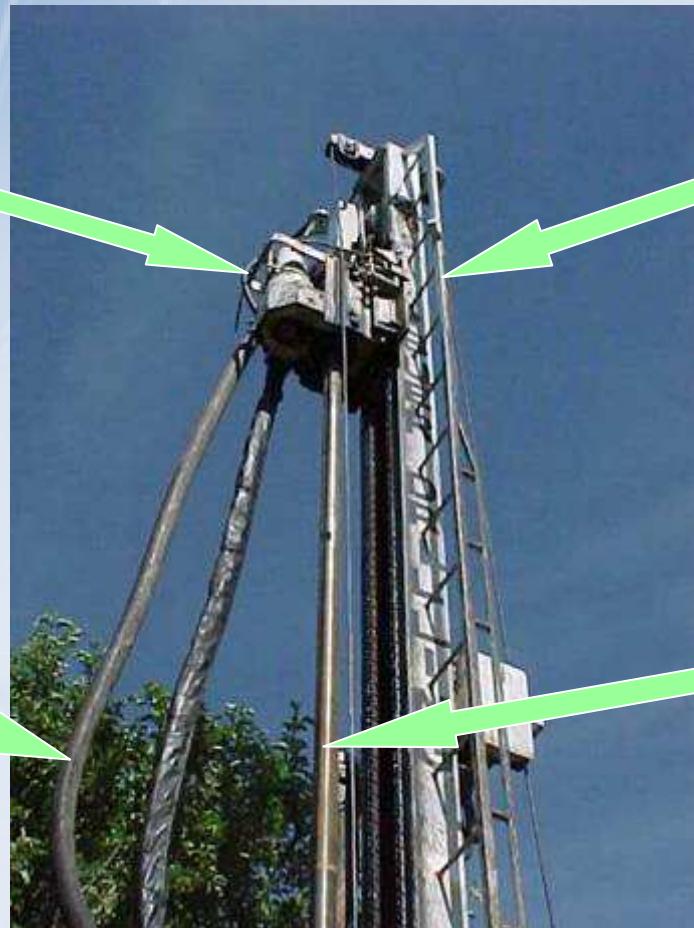




UREĐAJ ZA ROTACIJSKO BUŠENJE

GLAVA JEDINICE
ZA ISKOP

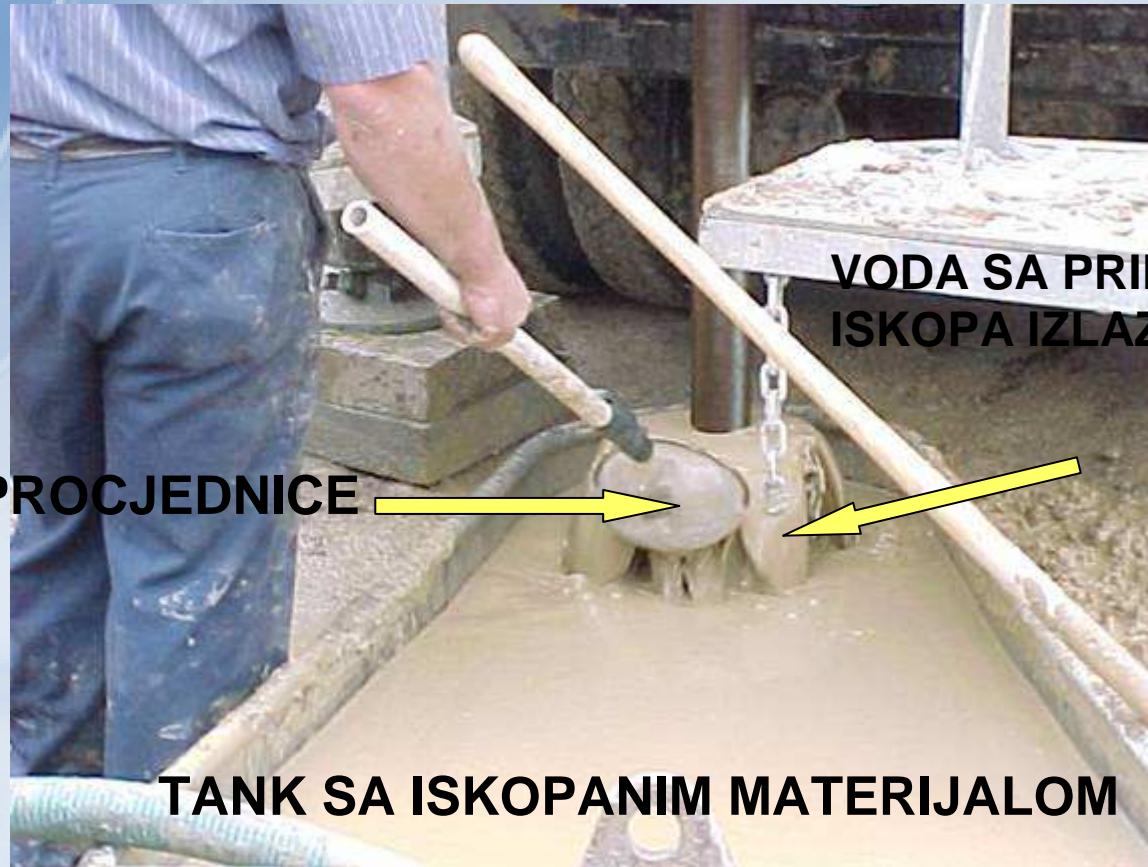
SUSTAV ZA
CIRKULACIJU



JARBOL

ŠIPKE ZA BUŠENJE

PROVJERA OŠTRICA ZA BUŠENJE



BENTONITNA SMJESA

Funkcije

- VAĐENJE IZBUŠENOG MATERIJALA IZ BUŠOTINE
- STABILIZIRANJE BUŠOTINE
- KONTROLA GUBITAKA TEKUĆINE U GEOLOŠKE FORMACIJE
- LAKO SAKUPLJANJE ISKOPANOOG MATERIJALA
- OLAKŠAVA SKUPLJANJE GEOLOŠKIH PODATAKA
- UPIJA ISKOPANI MATERIJAL KADA DOĐE DO OTKAZIVANJA UREĐAJA ZA CIRKULIRANJE



**IZVEDENI ZDENAC
SA ZATVARAČEM -
KAPOM**

SANITARNI ZATVARAČ NOVIJEG TIPOA





**STARIJI TIP
ZATVARAČA ZDENCA**

**MOGUĆ JE ULAZAK
INSEKATA I MANJIH
ŽIVOTINJA**

**ZATVARAČI OVOG TIPOA
NISU PRIHVATLJIVA SA
SANITARNOG GLEDIŠTA
I TREBAJU BITI
ZAMIJENJENI**

DIJELOVI BUŠENOG ZDENCA

ZATVARAČ
ZDENCA

BUŠOTINA

OBLOGA

CEMENTNA
SMJESA

PERFORIRANI
DIO



PERFORIRANI
ZDENAC

DIJELOVI BUŠENOG ZDENCA

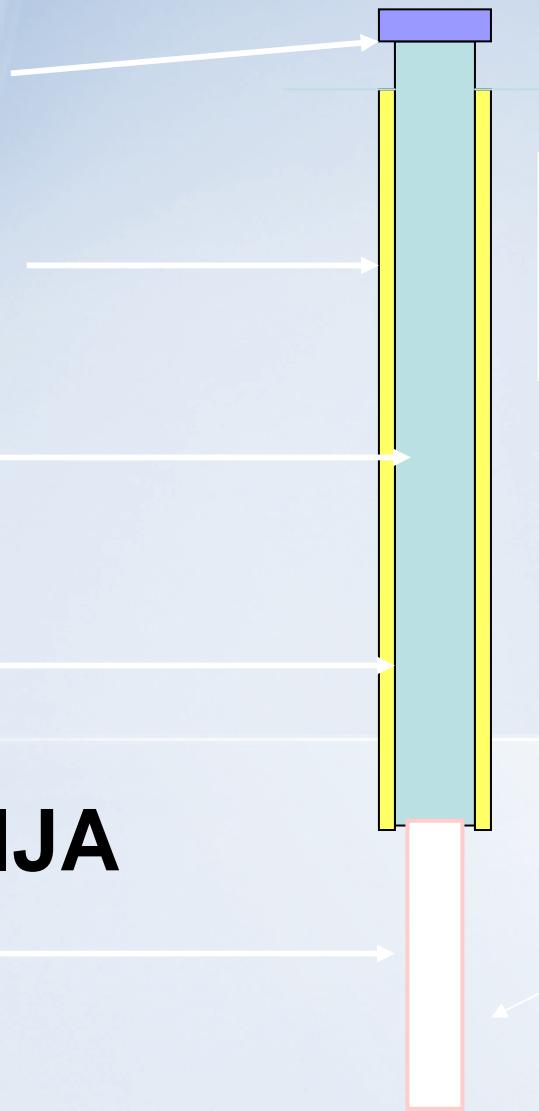
ZATVARAČ
ZDENCA

BUŠOTINA

OBLOGA

CEMENTNA
SMJESA

PENETRACIJA
U STIJENU



ZDENAC U
STIJENI

NEMA OBLOGE

BUŠOTINA

VERTIKALNO
BUŠENI ZDENAC



**Čelična ili PVC
obloga koja štiti
bušotinu od
urušavanja.**

OBLOGA



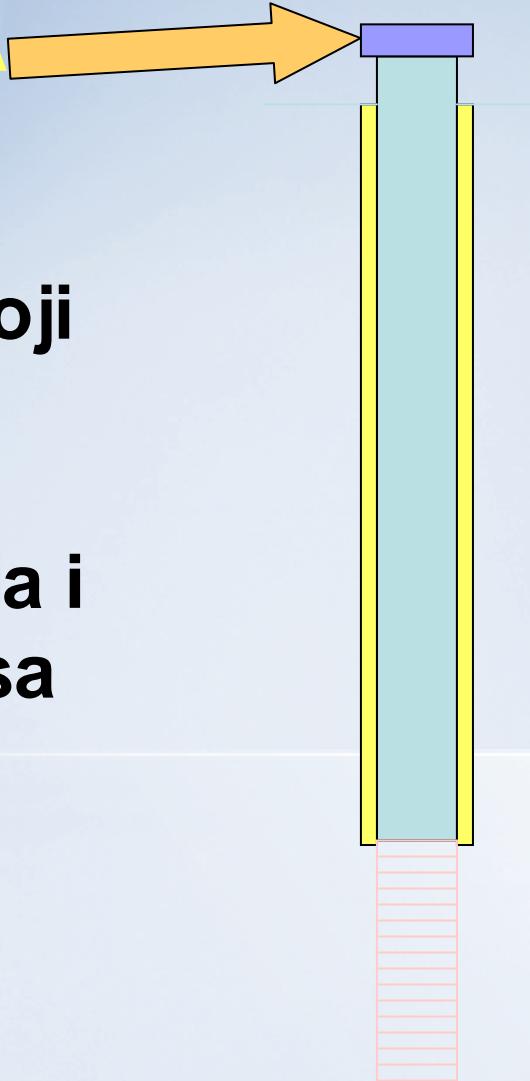
**STANDARDNE
DUŽINE OBLOGE**

ČELIK 21 FT.

PVC 20 FT.

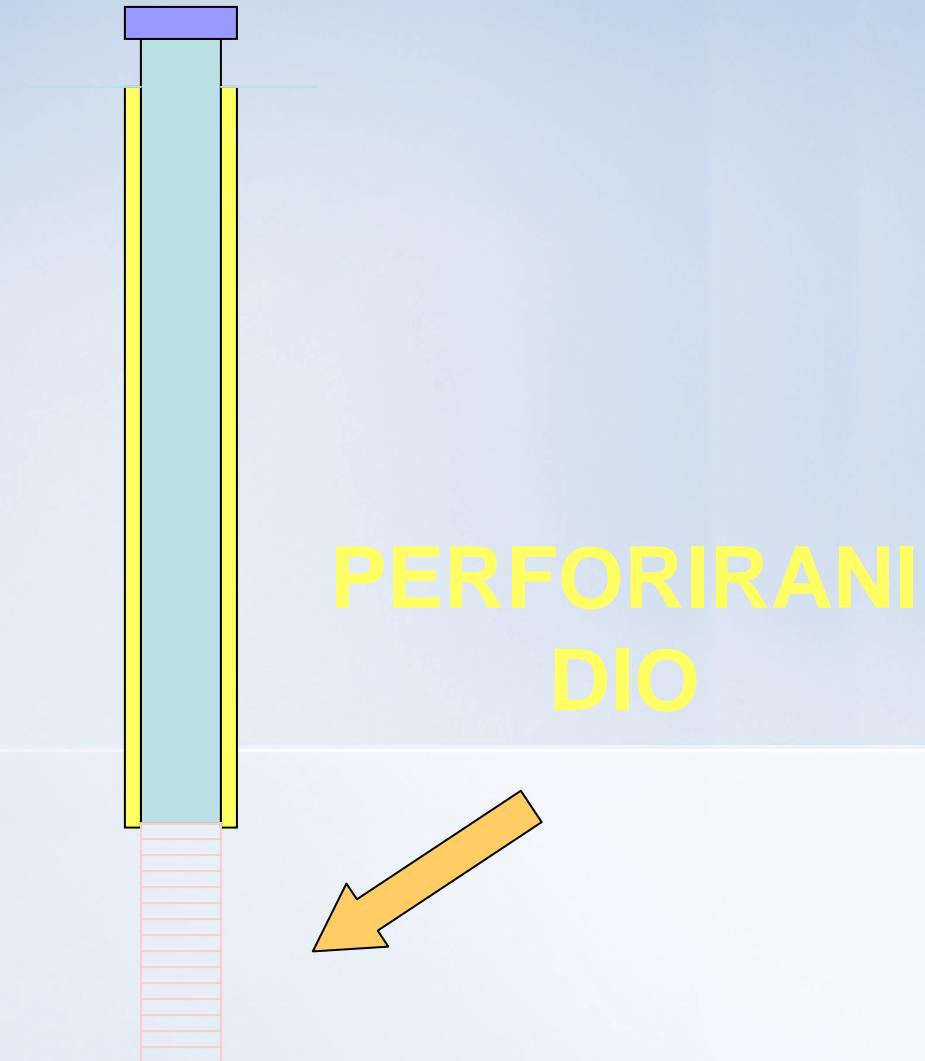
ZATVARAČ ILI KAPA ZDENCA

Mehanički dio koji
štiti vodu u
zdencu od
vanjskog utjecaja i
kontakta vode sa
koliformnim
organizmima.



**ULAZNI DIO KOJI
OMOGUĆAVA
PRODOR VODE U
ZDENAC A
ONEMOGUĆUJE
ULAZAK MATERIJALA
(PIJESAK, ŠLJUNAK..)**

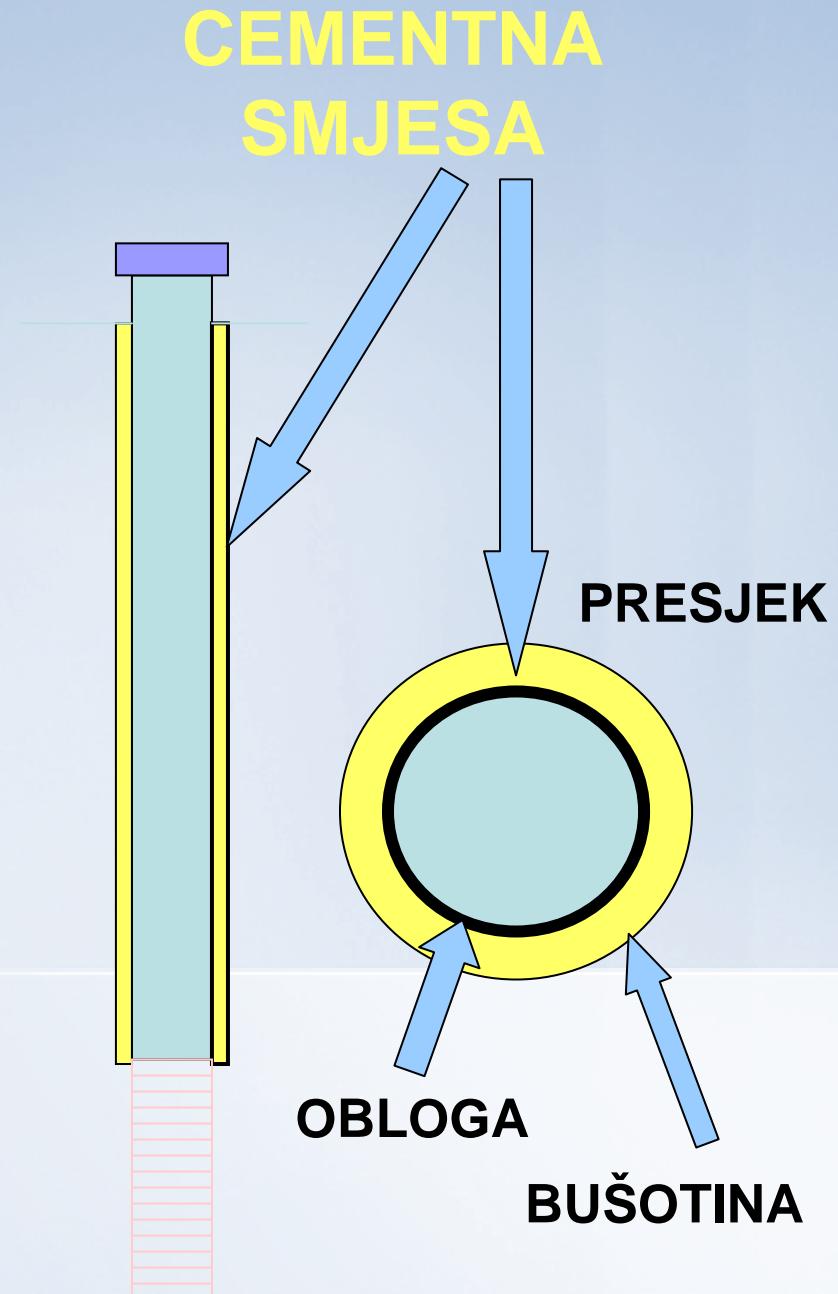
**OBAVEZNA
UPOTREBA U
NEKONSOLIDIRANIM
VODONOSNICIMA**



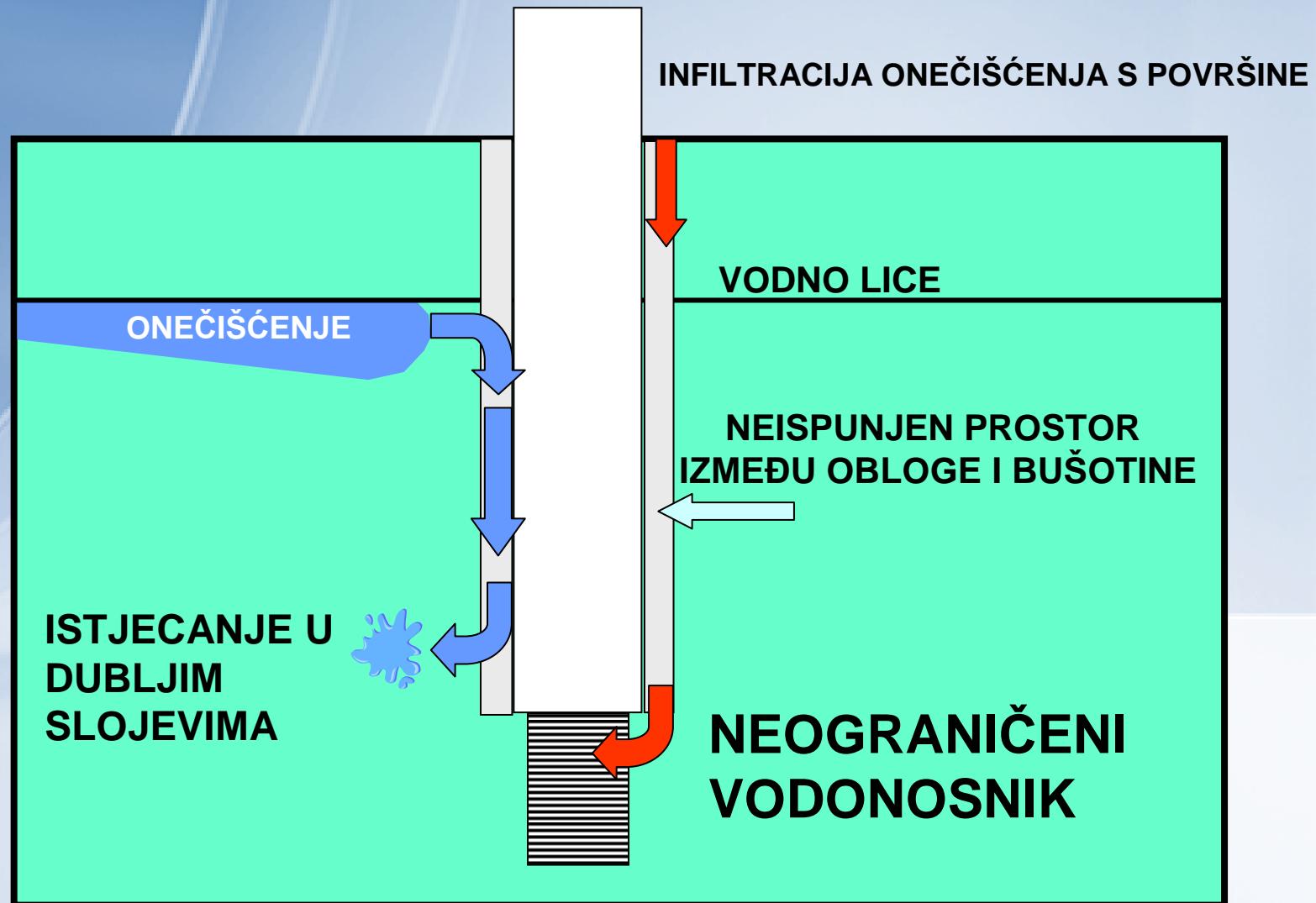


**VODONEPROPUŠNI
CEMENT ILI
BENTONITNA GLINA**
postavljaju se u prostor
između obloge i stijenki
bušotine zbog:

- ◆ OSIGURANJE OD
ULAZA ONEČIŠĆENJA
- ◆ ODVAJANJA
VODONOSNIH SLOJEVA
- ◆ UOBIČAJENA
UPOTREBA KOD
ARTEŠKIH UVJETA



PRODOR ONEČIŠĆENJA U ZDENAC U SLUČAJU NEZAPUNJENOG PROSTORA IZMEĐU STIJENKE I OBLOGE ZDENCA



ZAŠTO JE POTREBNO ZAPUNITI PROSTOR IZMEĐU OBLOGE I STIJENKE ZDENCA

- *NEMOGUĆNOST PRODORA
ONEČIŠĆENJA S POVRSINE*
- *NEMOGUĆNOST MIJEŠANJA VODE IZ
RAZLIČITIH VODONOSNIH SLOJEVA*
- *OČUVANJE ARTEŠKIH UVJETA U
VODONOSNIKU*

METERIJALI ISPUNE

TIP

BENTONITNE
SMJESE

SMJESE

BENTONIT
& VODA

GRANULIRANI BENTONIT,
POLIMER & VODA

SVOJSTVA

- VARIJABILNO SVOJSTVO BRTVLJENJA
- MOGUĆNOST POJAVE SLIJEGANJA
- POPULARAN ZBOG POVOLJNE CIJENE
- MOGUĆNOST ISPIRANJA U ARTEŠKIM UVJETIMA
- MALA TOPLINE HIDRATACIJE

ČISTI CEMENT

PORTLAND CEMENT
& VODA

- ČEŠĆE KORIŠTENO U BUŠOTINAMA ZA NAFTNU INDUSTRIJU
- BOLJA SVOJSTVA BRTVLJENJA
- NAJBOLJI IZBOR ZA SLUČAJ BUŠOTINA U STIJENSKOJ MASI
- NEŠTO VEĆE TOPLINA HIDRATACIJE

BETONSKE SMJESE

PORTLAND CEMENT, PIJESAK
& VODA

- VEĆA PROPUSNOST
- MOGUĆNOST POJAVE ABRAZIJE NAKON DUŽEG VREMENA
- DOBAR IZBOR KOD ZDENACA VEĆEG POLUMJERA



ISPUNA ZDENCA OVISNO O VRSTI IZVOĐENJA

ROTACIJSKA METODA

VS.

KABLOM



CIJEV ZA UNOS SMJESE

OBLOGA ZDENCA U BUŠOTINI

**SMJESE SE UNOSI PUMPANJEM OD
DNA PREMA POVRŠINI**



SUHI GRANULIRANI BENTONIT

**SMJESA SE PRENOSI S
POVRŠINE PREMA DNU
ZAJEDNO SA CIJEVIMA ZA BUŠENJE**

- DUBINA PRODORA SMJESE JE NEODREĐENA,
OVISI OD SLUČAJA DO SLUČAJA
- OGRANIČENOST RAZINOM VODNOG LICA

ZDENAC PENETRIRAN U STIJEŠKOJ MASI

CIJEV OBLOGE

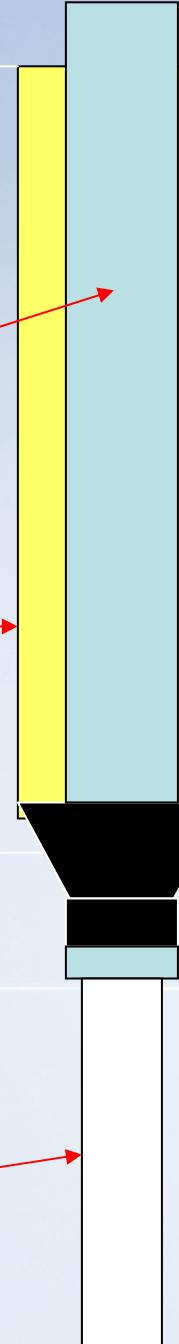
ISPUNA

KROVINSKA PLOHA STIJENE

BUŠOTINA U STIJEŠKOJ MASI
(MANJEG PROMJERA OD OBLOGE)

PACKER ZA
BRTVLJENJE

NEMOGUĆNOST
PRODORA ISPUNE U
PODRUČJE
VODONOSNE STIJENE



USPOREDBA MATERIJALA OBLOGE

PVC

VS.

ČELIK

NE KORODIRA

KORODIRA

MANJA ČVRSTOĆA

VEĆA ČVRSTOĆA

KVALITETA VODE
complaints

MOGUĆNOST ZAGAĐENJA

MOGUĆA UGRADNJA SAMO
ROTACIJSKOM METODOM

POGODNO ZA SVE
METODE

1/3 CIJENE ČELIKA

TOPLINA HIDRATACIJE
NEMA UTJECAJA

**UREĐAJ ZA SJEČU
PVC OBLOGE
(MIN. 12 IN. IZNAD
RAZINE TERENA)**



PROMJER ZDENCA:

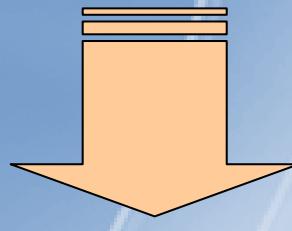
MIT

*POVEĆANJE
PROMJERA
POVEĆAVA
KAPACITET ZDENCA*

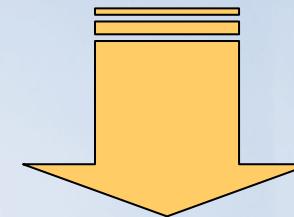
STVARNOST

DVOSTRUKO
POVEĆANJE PROMJERA
10% POVEĆANJE
KAPACITETA
DVOSTRUKO POVEĆANE
DULJINE PERFORACIJE
DVOSTRUKI KAPACITET

PERFORIRANI ZDENCI



PERFORACIJE

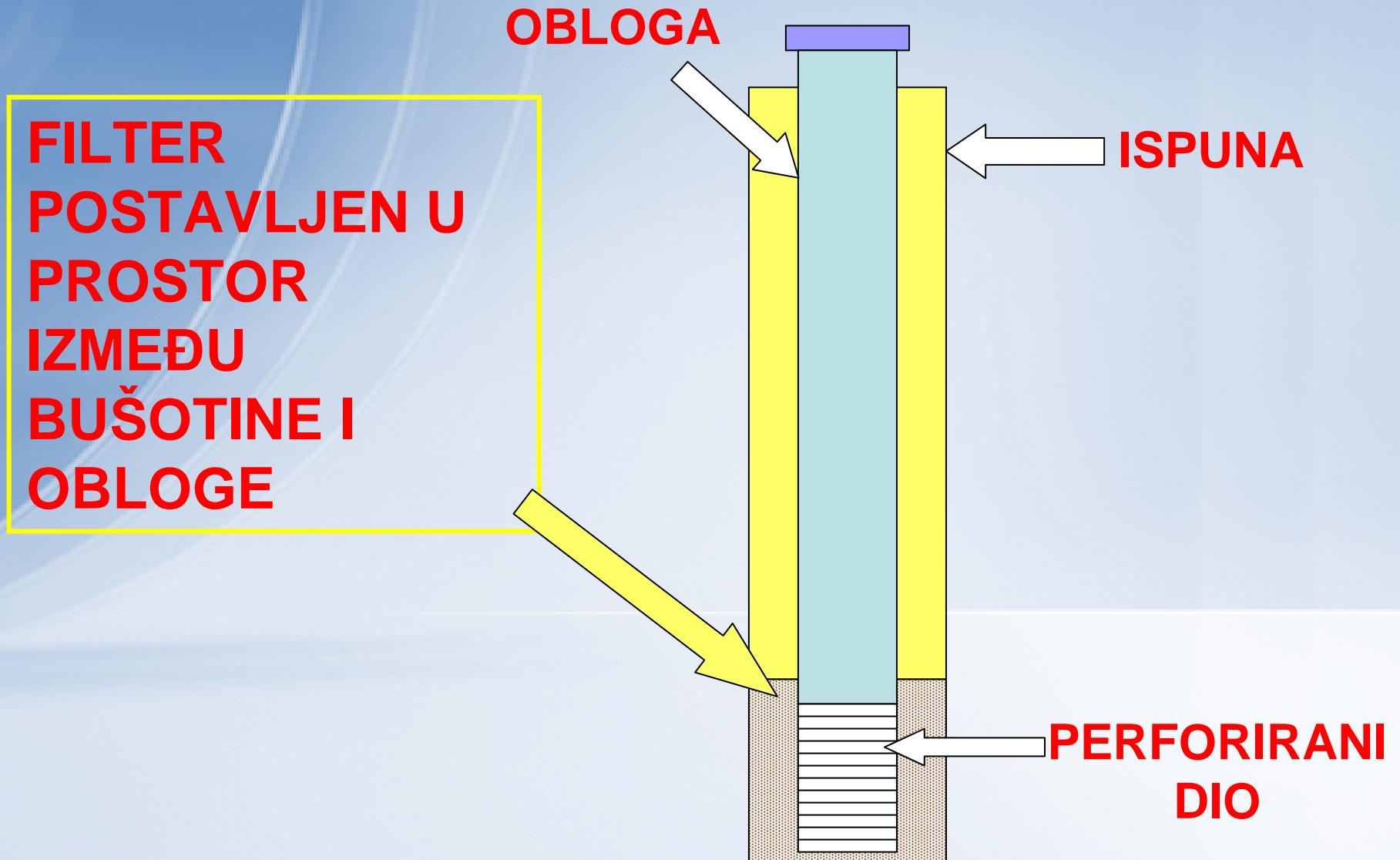


FILTERI

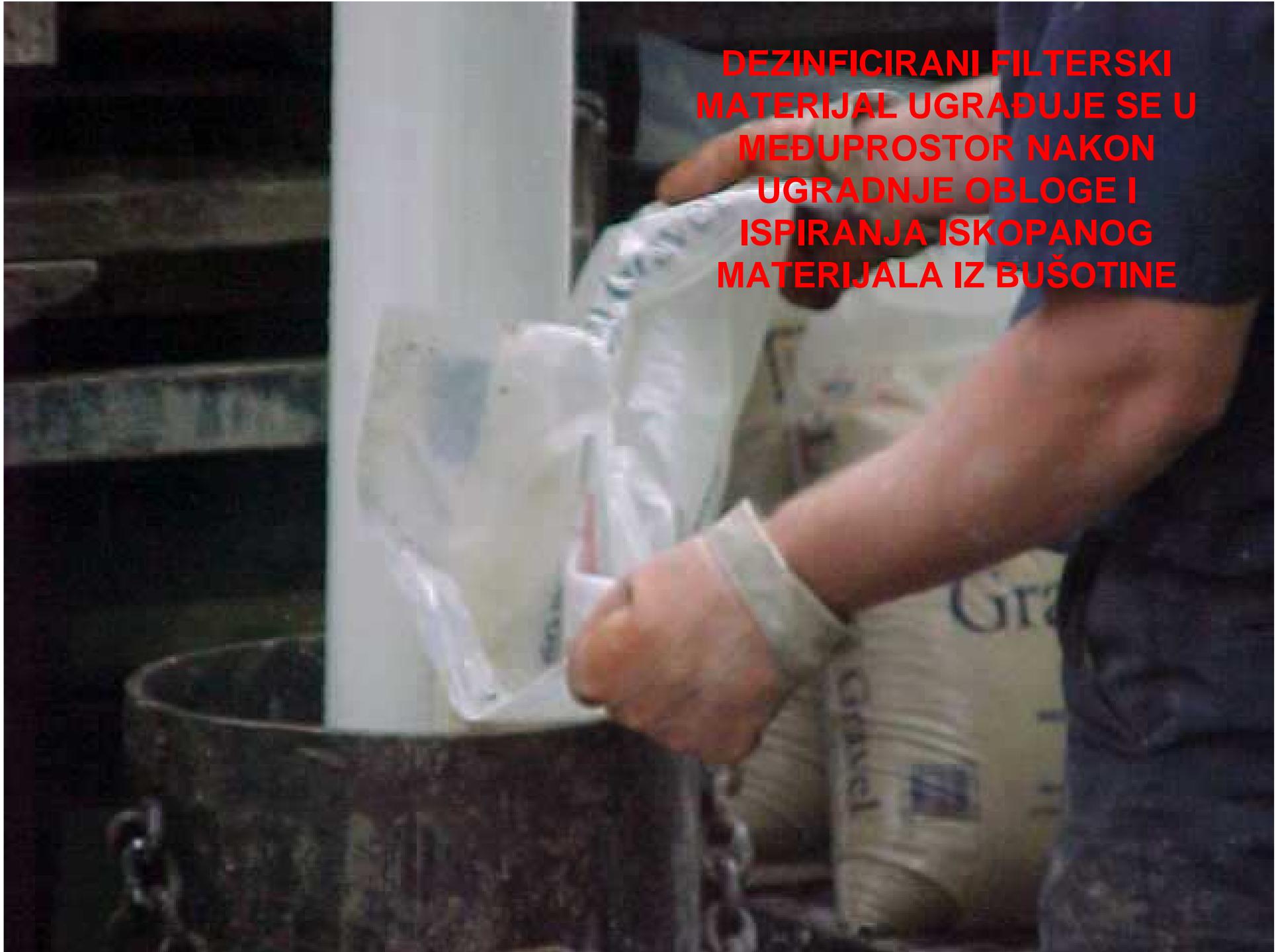
PERFORACIJA UGRAĐENA
U MATERIJALE SA VEĆOM
VODLJIVOŠĆU
(PIJESAK, ŠLJUNAK)

GRANULIRANI
ŠLJUNAK/PIJESAK
POSTAVLJEN S
VANJSKE STRANE
OBLOGE

KONSTRUKCIJA ZDENCA SA FILTEROM



**DEZINFICIRANI FILTERSKI
MATERIJAL UGRAĐUJE SE U
MEĐUPROSTOR NAKON
UGRADNJE OBLOGE I
ISPIRANJA ISKOPANOG
MATERIJALA IZ BUŠOTINE**



KRITERIJI IZBORA PERFORACIJA

- Maksimizirati % otvorenog dijela

DOBRO

KONTINUIRANI PROREZI

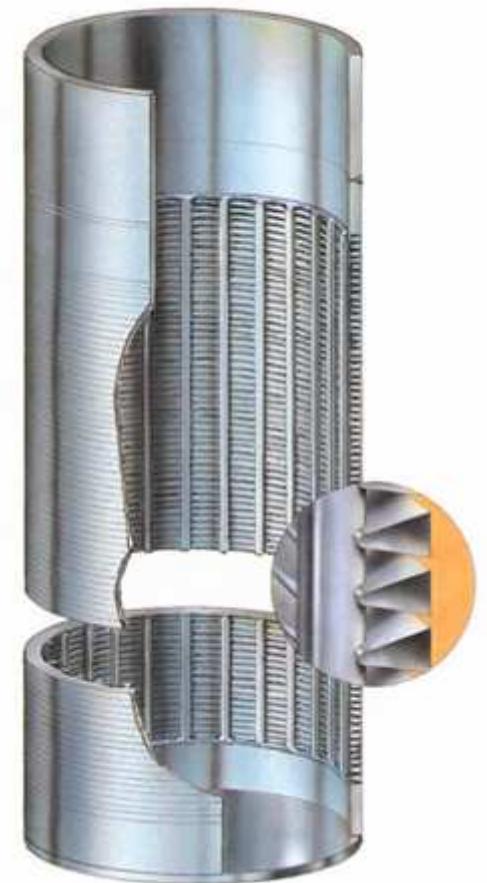
LOŠE

PREKRIVANJE RAZL.
MATERIJALIMA

- Uklanjanje smetnji na otvorima
- Otpornost na koroziju

Čelik vs. PVC

- POPREČNA TLAČNA ČVRSTOĆA



KRITERIJI IZBORA PERFORACIJA

VELIČINA OTVORA PERFORACIJE OVISNA JE
O MATERIJALU VODONOSNIKA:

PROMJER PERFORACIJE: OVISAN O
PROMJERU OBLOGE

OSIGURATI ULAZNU BRZINU...

<0.1 FT./SEC.

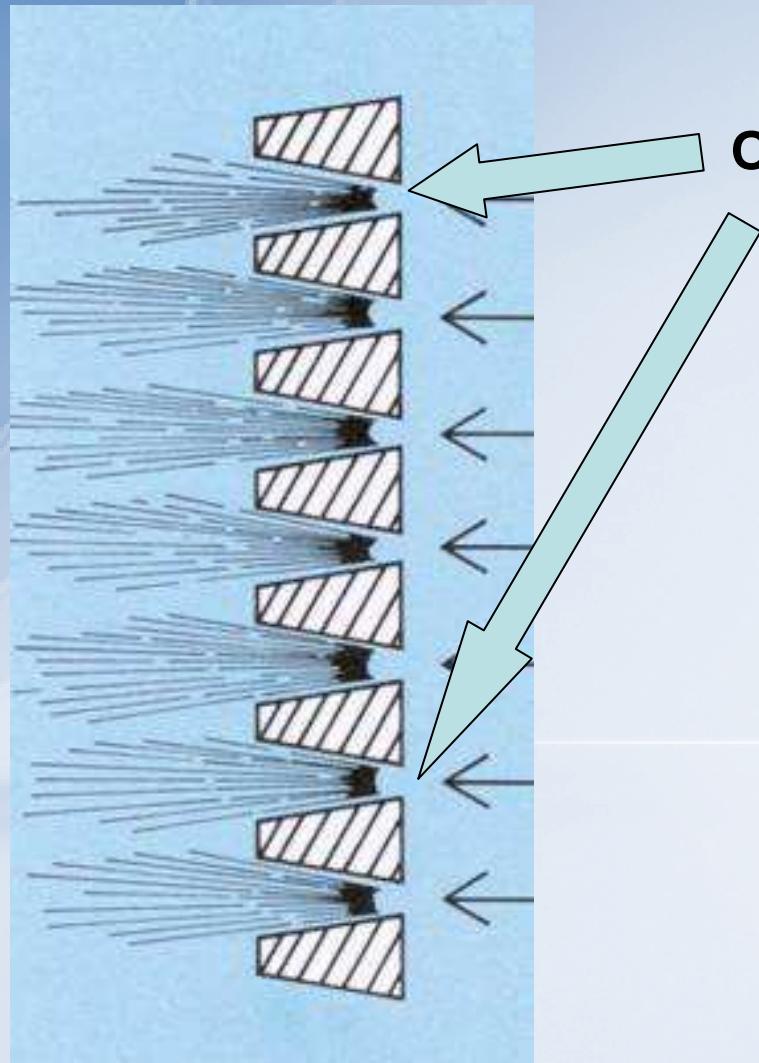


PRIMJER INKRUSTIRANOG
PERFORIRANOG DIJELA

Manja brzina reducira inkrustaciju

PRODUŽUJE SE VIJEK TRAJANJA ZDENCA

**ULAZNA BRZINA = KOLIČINA CRPLJENJA
OTVOR PERFORACIJE**



OTVORI PERFORACIJE

POPREČNI PRESJEK



**ČISTA VODA KOJA SE
CRPI IZ NETOM ZAVRŠENOG
BUŠENOOG ZDENCA**

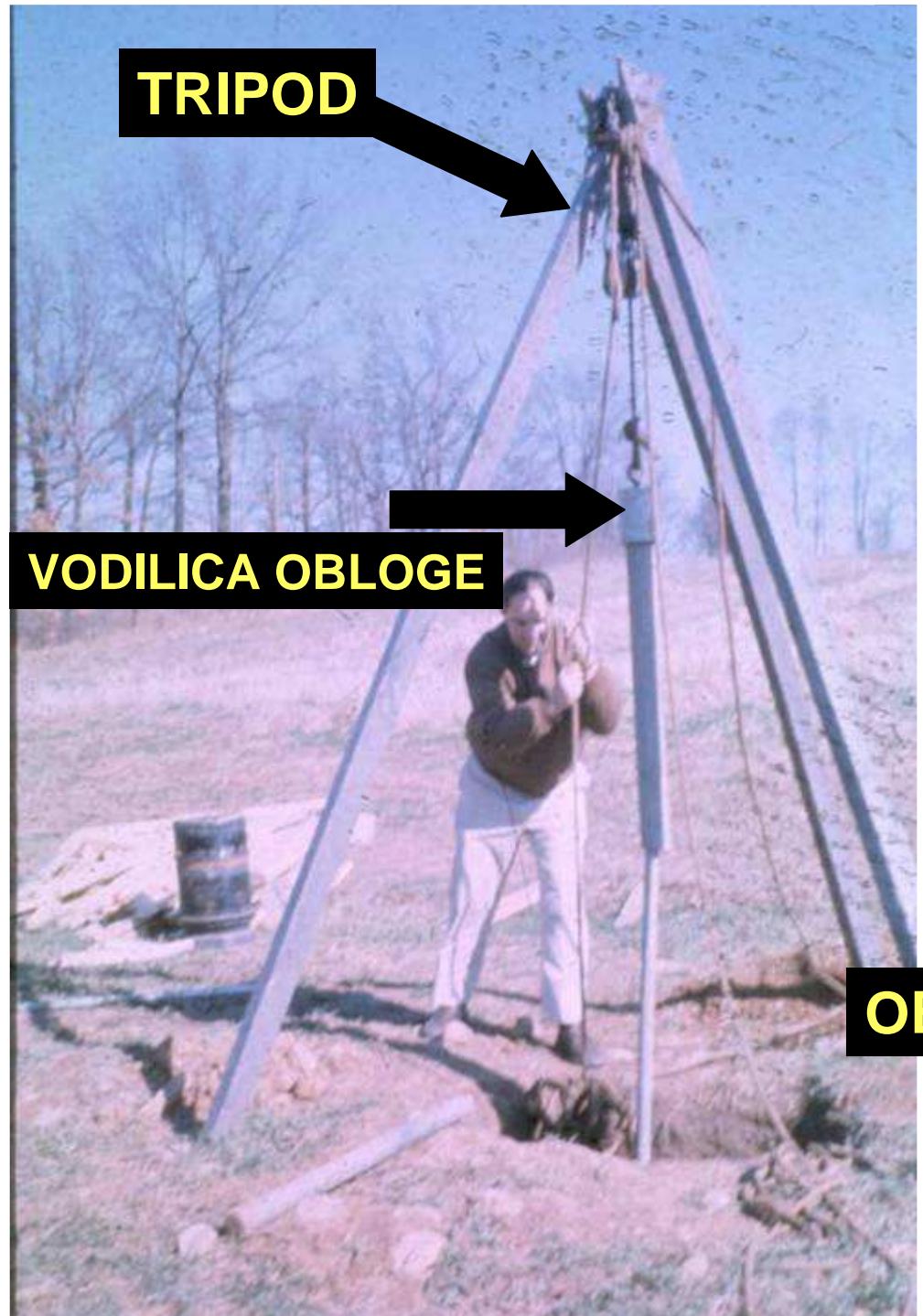
ZDENCI IZVEDENI ZABIJANJEM

- MOGUĆNOST IZVEDBE U SVIM MATERIJALIMA OSIM U STIJENI
- ZABIJANJE SE IZVODI UTEZIMA, SPECIJALnim UREĐAJIMA ZA ZABIJANJE PO PRINCIPU SILE TEŽE ILI TLAKA
- 1 1/4 in. do 2 in. promjeru

ZDENCI IZVEDENI ZABIJANJEM

- INTALIRANI PREMA POTREBAMA KORISNIKA
- NAJČEŠĆE U PODRUČJIMA GDJE VODNO LICE NIJE DUBOKO ISPOD POVRŠINE TERENA
- <35 ft. DUBINE , LIMITIRANI KAPACITET

**OSJETLJIVI NA POVRŠINSKA
ONEČIŠĆENJA OD BUŠENIH ZDENACA**



KOPANI ZDENCI

- VELIKI PROMJER (18-48 in.)
- UGLAVNOM U SLABO PRODUKTIVNIM PODRUČJIMA
- METERIJAL OBLOGE-KAMEN, OPEKA, BETONSKI BLOKOVI
- PRIHRANJIVANJE SE VRŠI KROZ GRUBO OBRAĐENU OBLOGU TE JE OMOGUĆEN UNOS STRANIH ORGANIZAMA I PRIMJESA



ZATVARAČ KOPANOG ZDENCA



**STARI NEHIGIJENSKI ZDENAC RUČNO KOPAN I
OBLOŽEN KAMENIM OBLUCIMA**

KOPANI ZDENCI

- STARIJI ZDENCI - RUČNO KOPANI
- Mali kapacitet – velika mogućnost skladištenja (100-ne galona)
- Neotporni na onečišćenja



STRANI ORGANIZMI.....

- U UZORCIMA VODE UZORKOVANIM U ZDENCIMA OVAKVOG TIPO OTKRIVENA JE PRISUTNOST OD cca 85% SVIH POZNATIH KOLIFORMNIH ORGANIZAMA**
- KOPANI ZDENCI SA OBLOGOM OD OPEKE, BETONA, DRVA IZRAZITO SU NEPOVOLJNI UKOLIKO SU PREDVIĐENI ZA KORIŠTENJE ZA PIĆE**

4. 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.

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.

Darcy-ev zakon poveže se s osnovnim zakonom održanja mase

⇒ parcijalna diferencijalna jednadžba 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 volumen**.

To se matematički opisuje jednadžbom kontinuiteta:

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

- 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 stišljive tekućine, $\rho(x, y, z) = \text{nije konstanta}$, 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 gornja jednadžba pojednostavi sa:

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

gdje prvi dio simbolički predstavlja divergenciju vektora brzine.

Supstitucijom Darcy-evog zakona u prethodni izraz za komponente brzina \Rightarrow jednadžba stacionarnog tečenja podzemne vode kroz anizotropni porozni medij:

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

- kod izotropne sredine $K_x = K_y = K_z$,
- za homogenu sredinu $K(x,y,z) = \text{konstanta}$

To dalje reducira u oblik :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

➤ Izraz predstavlja najosnovniju parcijalnu diferencijalnu jednadžbu poznatu u fizici i matematici kao **Laplaceova diferencijalna 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:

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

pri čemu je S_s specifična zapremina. 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 jednadžba poprima slijedeći oblik:

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

gdje je $S=S_S b$, $T=Kb$ i b je debljina vodonosnika

- ➡ rješenje opisuje polje hidrauličkog potencijala kroz horizontalnu ravnicu u funkciji vremena
- ➡ parametri potrebni za rješenje gornjeg izraza su koeficijent zapremine S i transmisivnost T .

Stacionarno tečenje prema zdencu

- ➡ 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

Iduća slika prikazuje uspostavljanje cirkularnih zona u vodonosnicima koji se nalaze u različitim uvjetima tečenja.

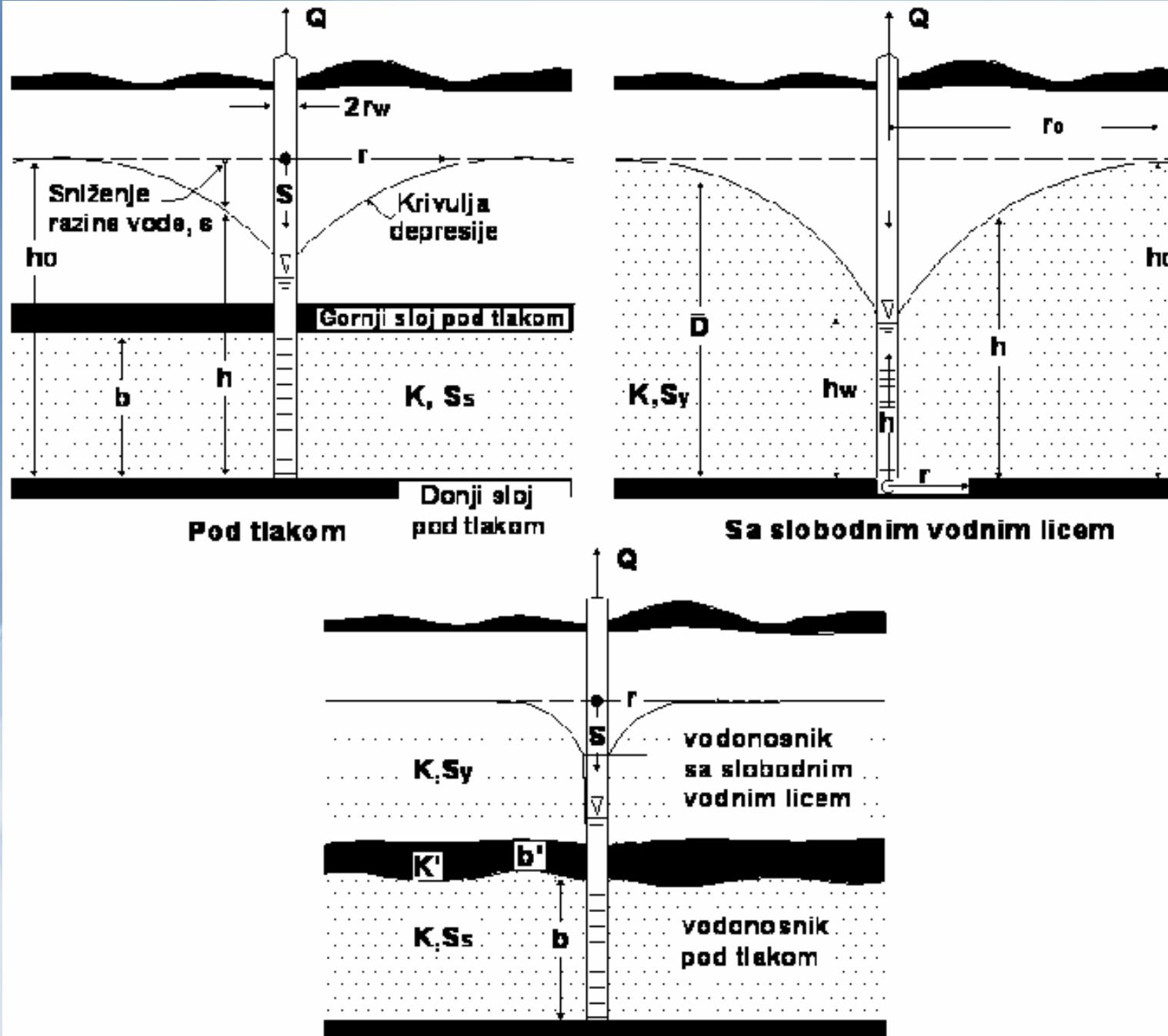
Pri svakoj radijalnoj udaljenosti, r od zdenca, protok vode prema zdencu se određuje prema izrazu:

$$Q = 2\pi r h K \frac{dh}{dr}$$

pri čemu:

- $2\pi r h$ predstavlja površinu cilindra kroz koji protječe voda,
- K je hidraulička vodljivost
- dh/dr je gradijent vodnog lica

Lako se primijeti da **gornji izraz proizlazi iz Darcyevog empirijskog zakona**.



Osnovni tipovi vodonosnika sa cirkularnim zonama depresije

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

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

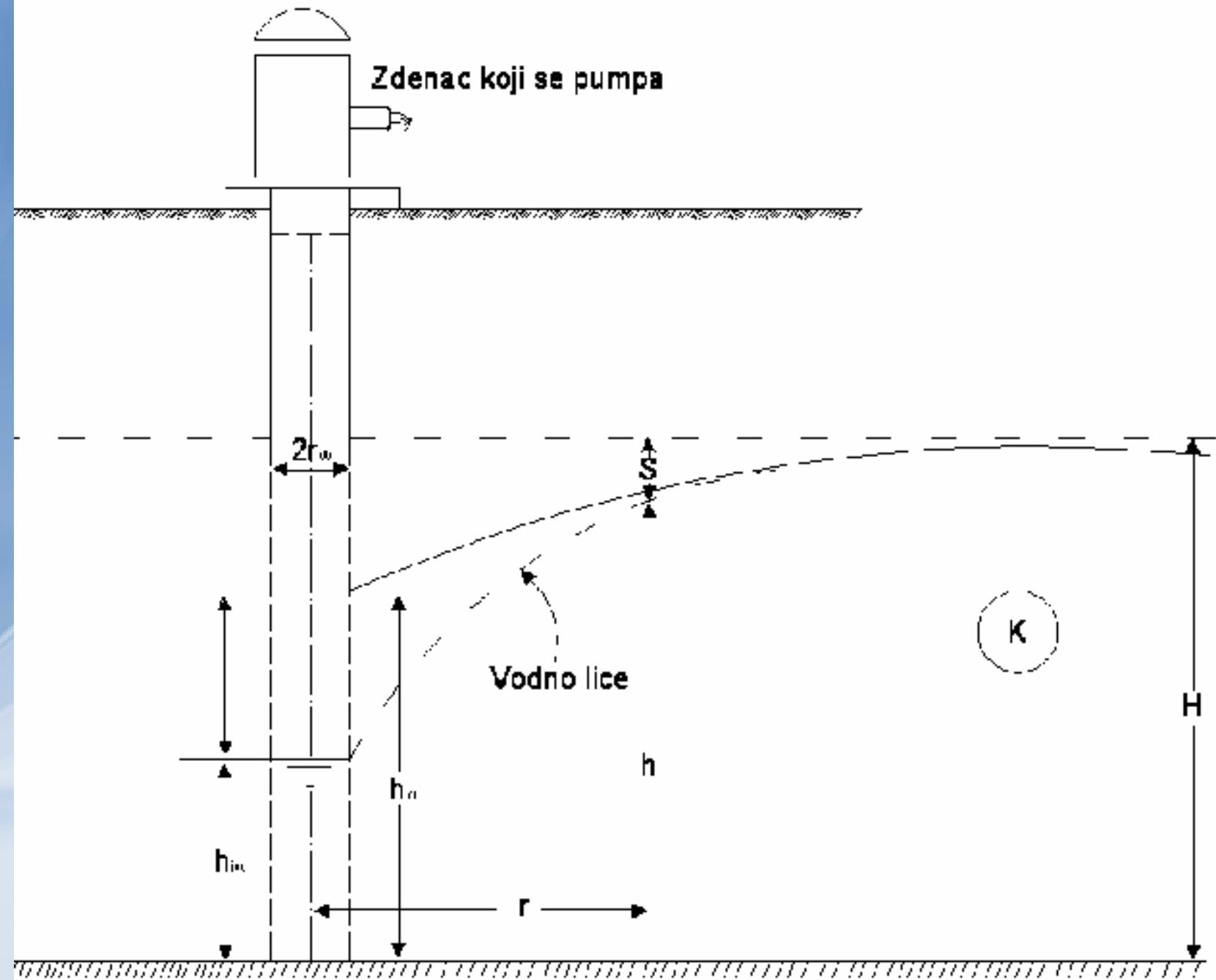
što predstavlja **izraz Dupuit-a ili Theim-a**.

Iz gornjeg izraza se također lako primijeti da je kvadrat hidrauličkog potencijala (dakle visine vode) logaritamska funkcija radijusa.

To možemo pisati kao:

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

što predstavlja **izraz Dupuit-Forchheimer**.



Tečenje prema zdencu u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem

Prethodni izraz se može još pojednostaviti ako se uzme

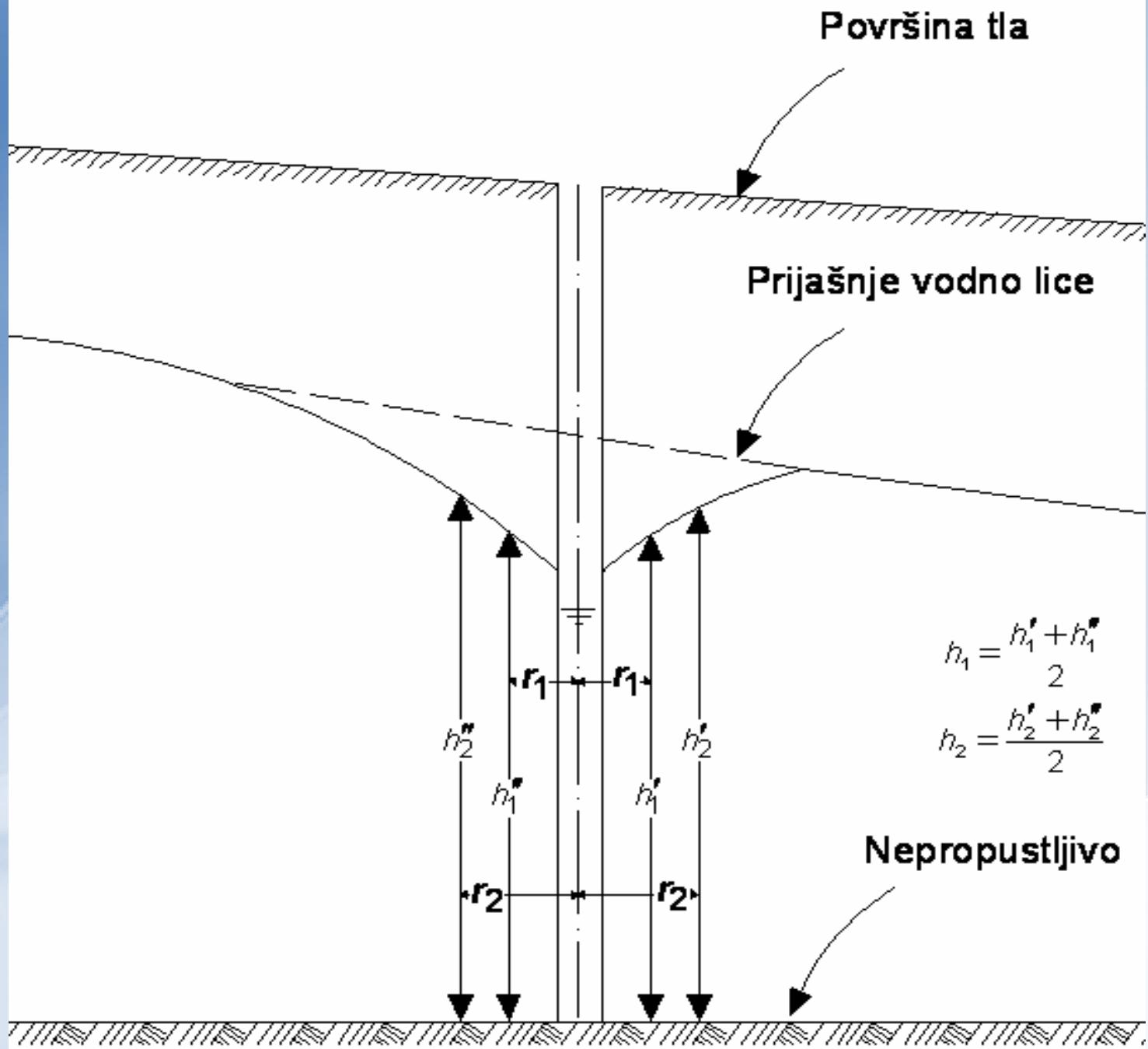
$$h_2^2 - h_1^2 = (h_2 - h_1)(h_2 + h_1)$$

i ako je opadanje vodnog lica znatno manje od debljine vodonosnika
 $h_2 + h_1$ se aproksimira kao $2H$.

Iz toga slijedi $K(h_2 + h_1)/2 \approx KH$, što rezultira izrazom:

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

➡ Izraz (*) limitiran je u praksi s nekoliko pretpostavki. 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 debljinom vodonosnika. **Pretpostavka 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 (*) ipak može koristiti uz zadovoljavajuću točnost i kod vodnog lica sa nagibom ako se piyezometarske visine h_2 i h_1 procjene kao osrednjene veličine užvodno i nizvodno od zdenca koji se pumpa.



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:

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

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

Nestacionarno tečenje prema zdencu

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

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

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 pumpaju vode iz zdenca uspostavlja se:

- cirkularno opadanje vodnog lica kod vodonosnika sa slobodnim tečenjem
- opadanje pijezometarske visine kod vodonosnika pod tlakom

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 jednadžbe(***):

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

gdje je varijabla u bezdimenzionalna i dana izrazom:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

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). Integral u prethodnoj jednadžbi 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:

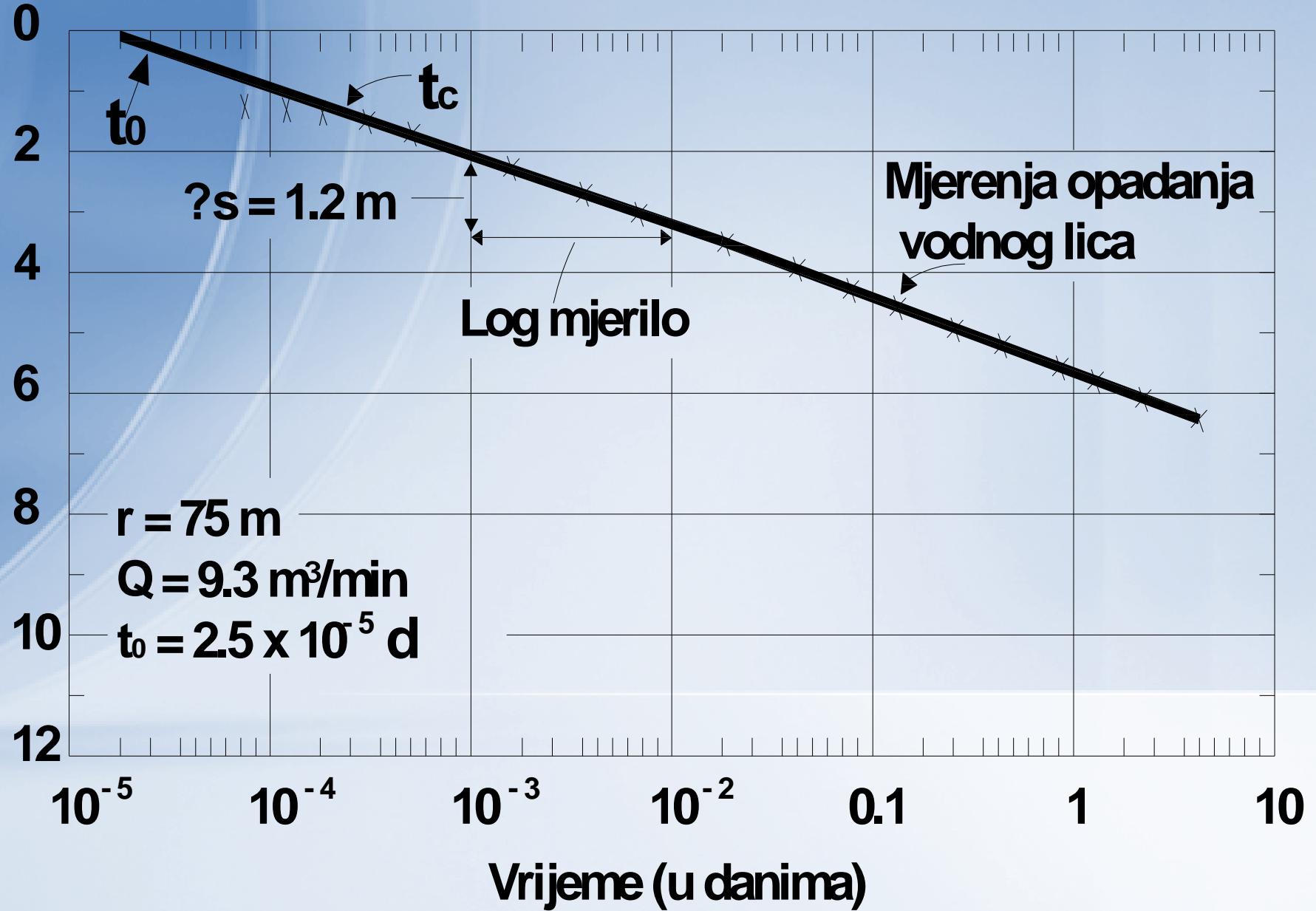
$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

Theis-ova jednadžba 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 Theis-u se može logaritamski aproksimirati u tzv. **Jacob jednadžbu** (Jacob,1959):

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

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.

Opadanje vodnog lica (s), (u metrima)



Odnos opadanja vodnog lica i vremena pumpanja

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

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi \Delta S}$$

$$S = \frac{2.25 T t}{r^2}$$

pri čemu je:

ΔS - povećanje u opadanju vodnog lica po 10 puta vremenskoj jedinici

t_0 - je vrijeme presijecanja ravne linije sa linijom nultog stanja opadanja vodnog lica

Alternativno se **transmisivnost i koeficijent zapreme mogu odrediti prateći** (također u polulogaritamskom mjerilu) **opadanje vodnog lica i udaljenosti od zdenca** iz kojeg se pumpa voda.

Opadanje vodnog lica (s), (u metrima)

0
2
4
6
8
10
12

$$t = 4 \text{ dana}$$
$$Q = 9.3 \text{ m}^3/\text{min}$$
$$r_0 = 30,000 \text{ m}$$

A B C

Log mjerilo

$$? s = 2.4 \text{ m}$$

r_0

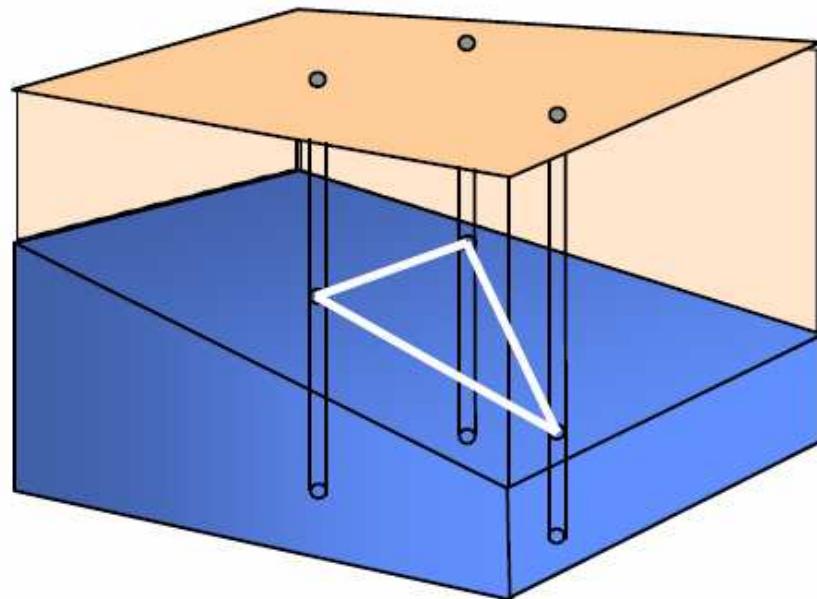
1 10 100 1000 10,000

Udaljenost (m)

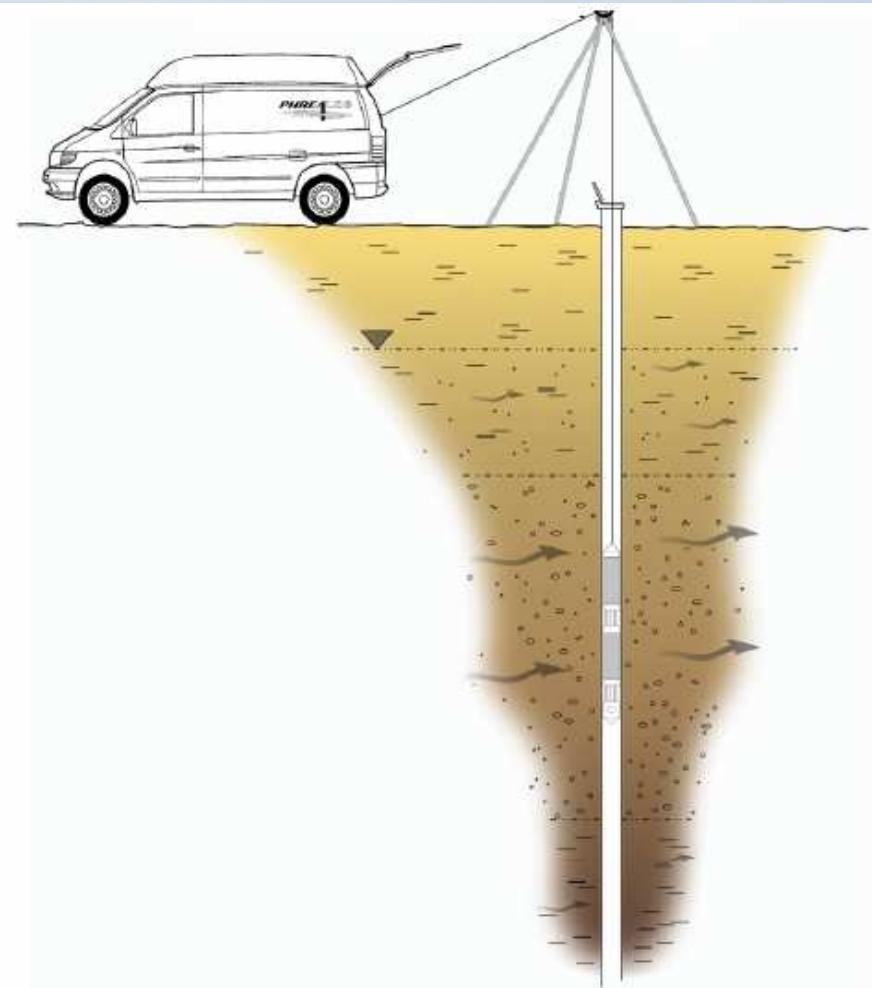
Odnos opadanja vodnog lica i udaljenosti od zdenca



POSREDNE METODE (Tracer test, triangulacije, testovi crpljenjem)

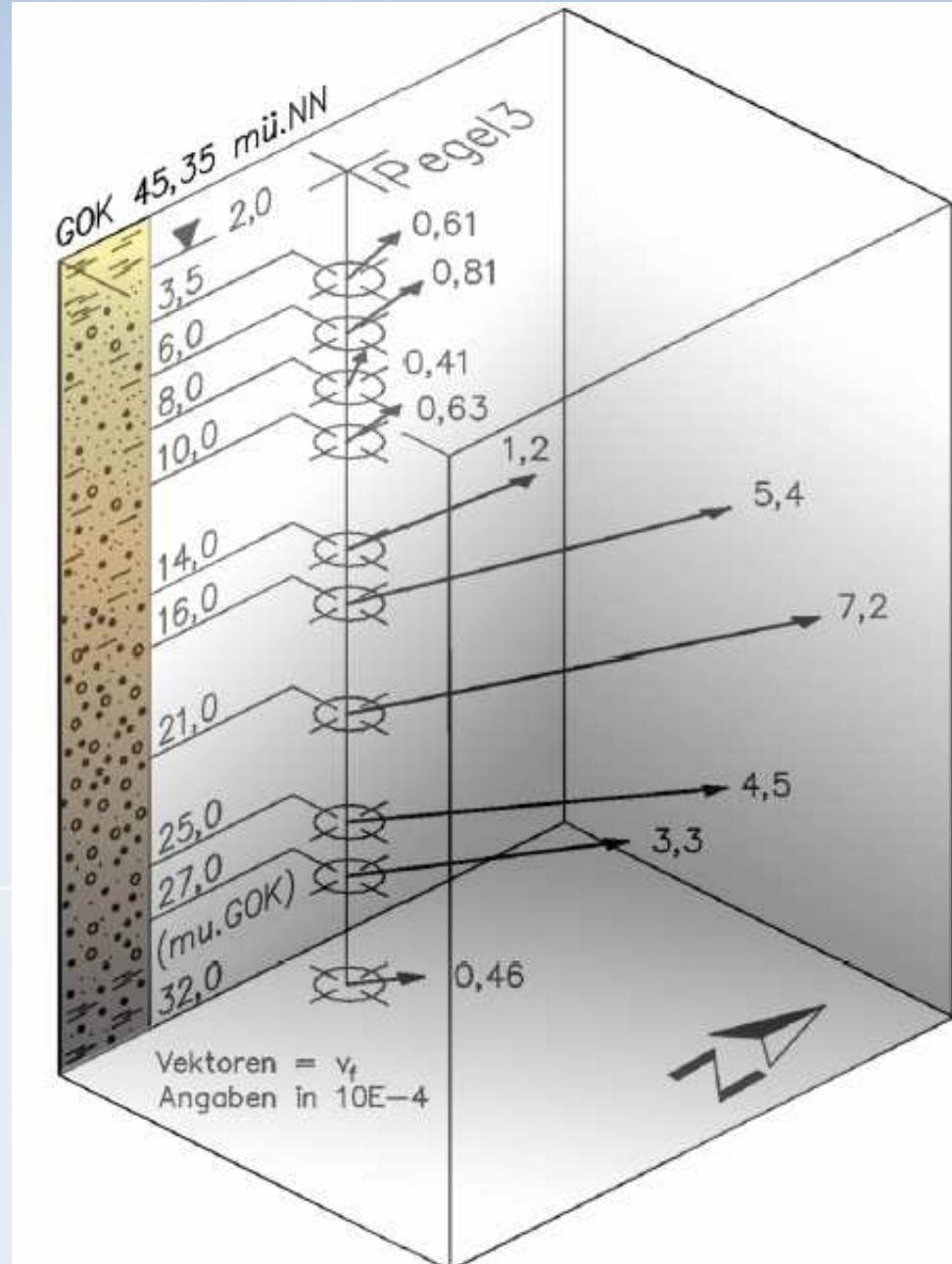


DIREKTNE METODE (Mjerenja u zdencima, mjerači protoka, tlaka...)



PREDNOSTI DIREKTNIH METODA U BUŠOTINAMA

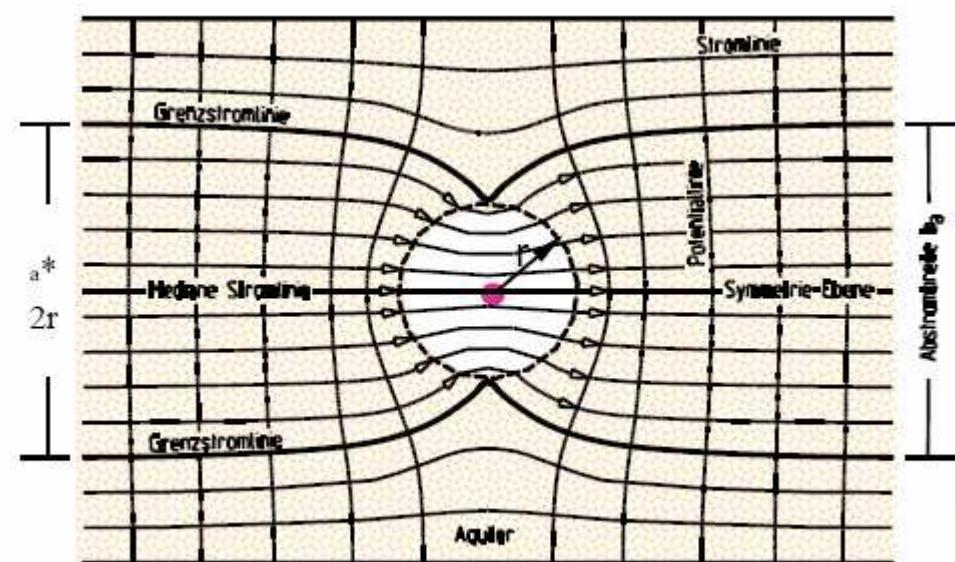
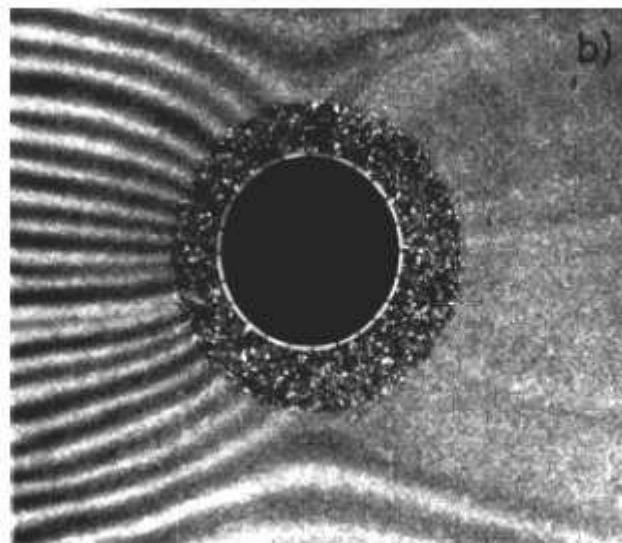
- DOVOLJNA JE SAMO JEDNA BUŠOTINA
- GRAFIČKI PRIKAZ U OBLIKU VEKTORA DODATNA OLAKŠAVA RAZUMIJEVANJE MJERENIH VELIČINA
- NISKA CIJENA
- BAZA PODATAKA JE NEOVISNA O CRPLJENJU I RAZINI VODNOG LICA U ZDENCU



DA BI REZULTATI MJERENJA BILI ŠTO TOČNIJI POTREBNO JE:

- RASPOLAGATI PODACIMA O KONSTRUKCIJI ZDENCA
- POZNAVATI GEOLOŠKE PODATKE O MATERIJALU U KOJEM JE BUŠOTINA IZVEDENA
- UKLONITI EVENTUALNE IZVORE TOPLINE IZ PODRUČJA MJERENJA ZBOG MOGUĆEG UTJECAJA NA MJERNE INSTRUMENTE
- POZNAVATI DUBINE NA KOJIMA SE NALAZE PERFORACIJE
 - MJERENJA IZVODITI NA ŠTO GUŠĆOJ SKALI I PO MOGUĆNOSTI NA SVAKOJ PROMJENI GEOLOŠKIH SVOJSTAVA

HORIZONTALNO TEČENJE U PODRUČJU OKO ZDENCA

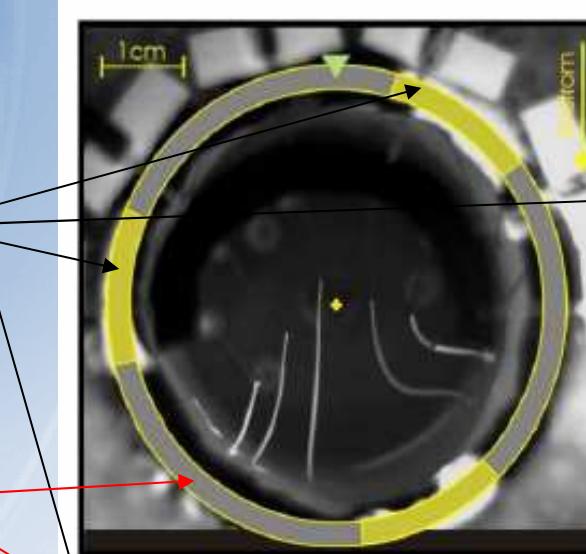


DJELOMIČNO PERFORIRANA OBLOGA ZDENCA

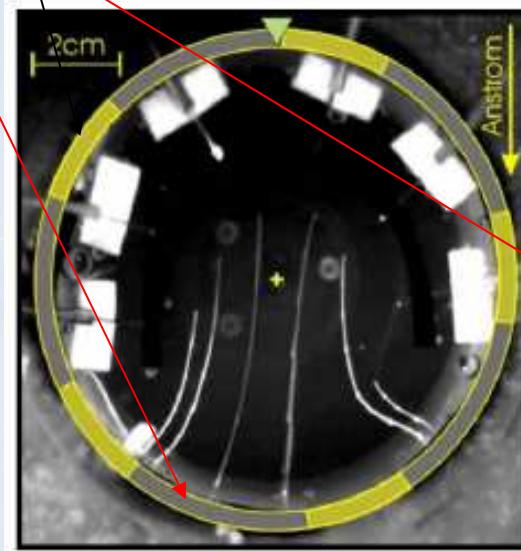
NEPROPUSNI
DIO

PROPUSNI
DIO

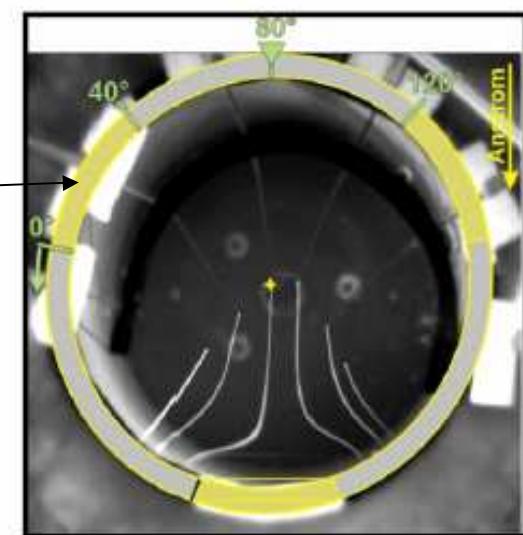
**STRUJNICE SE
LOCIRANE U
PROPUSNOM
PODRUČJU !!!**



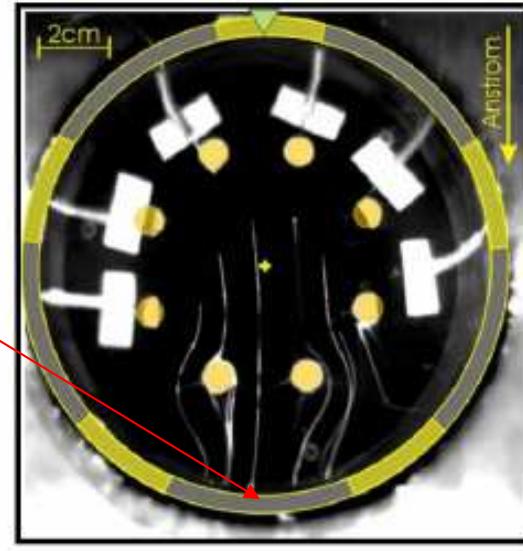
2" ($v_f: 3,1 \times 10^{-4}$)



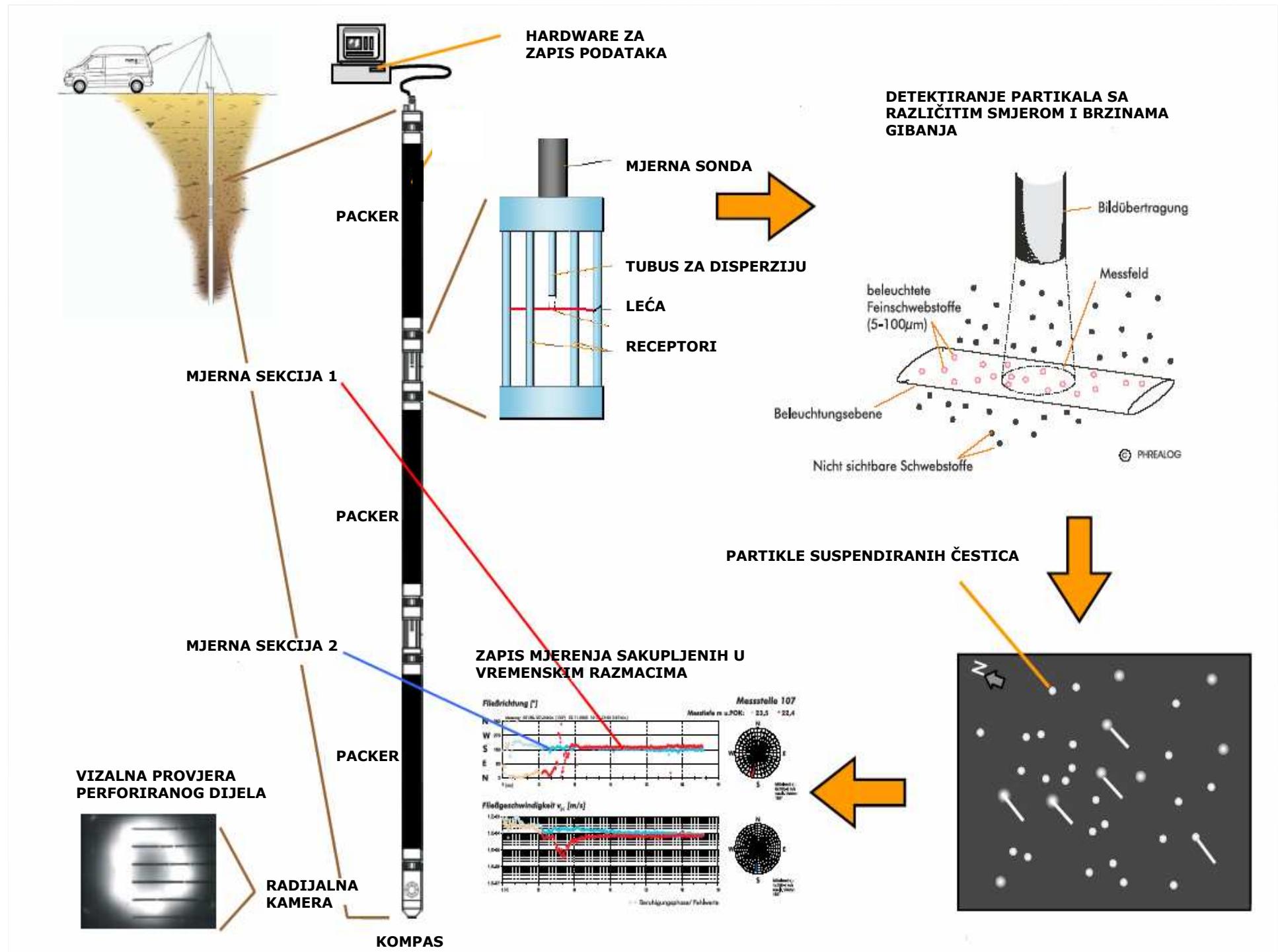
4" ($v_f: 3,1 \times 10^{-4}$)



3" ($v_f: 3,1 \times 10^{-4}$)



5" ($v_f: 3,1 \times 10^{-4}$)





INSTALACIJA I UPOTREBA MJERNE INFRASTRUKTURE

MJERNE SONDE

PACKERI



OPREMA ZA ZAPIS I PRIKUPLJANJE PODATAKA TVRTKE



Mobile Control and Computing Unit

Radial Color-camera
for Well Inspection

Packer

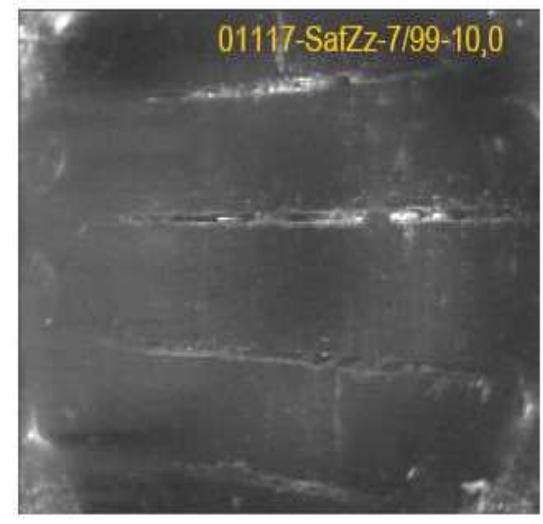
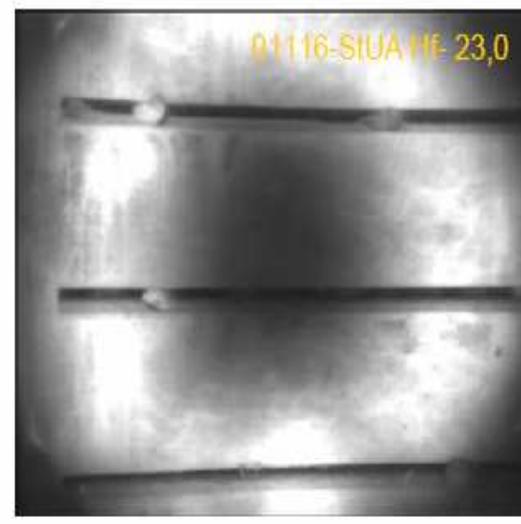
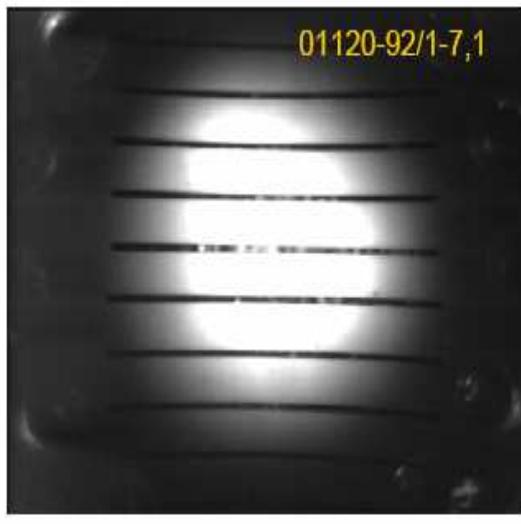
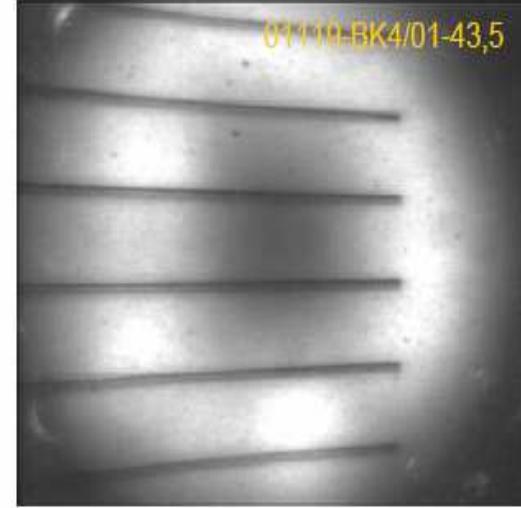
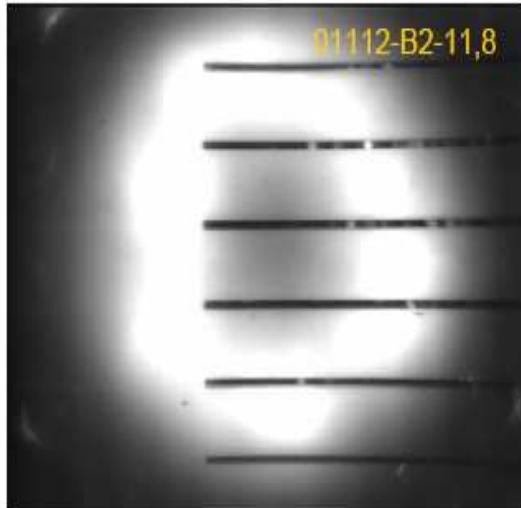
Measuring section

Packer

Einsatzkabel 150m

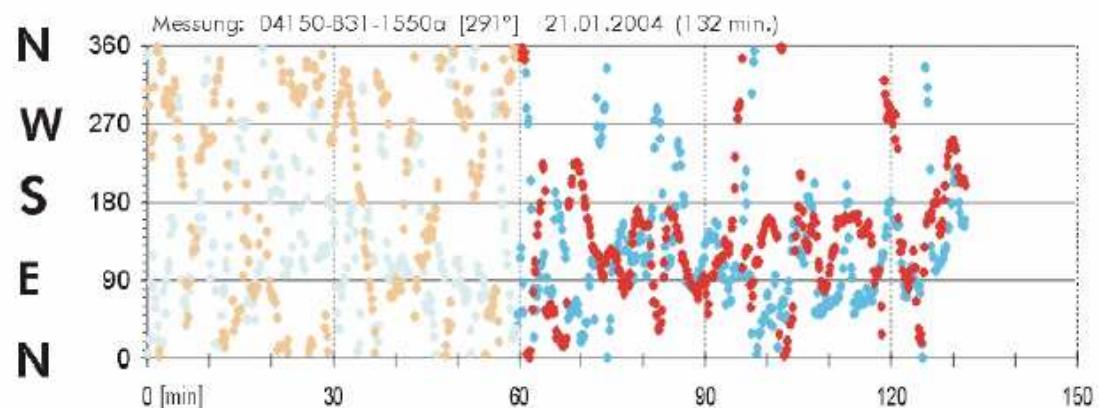


VIZUALNI PREGLED PROPUSNE OBLOGE ZDENCA OVISNO O OBЛИKU I STANJU PERFORACIJA

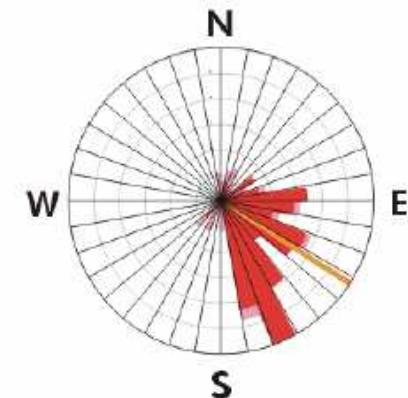


IZVORNI ZAPIS SMJERA I BRZINE TEČENJA U BUŠOTINI

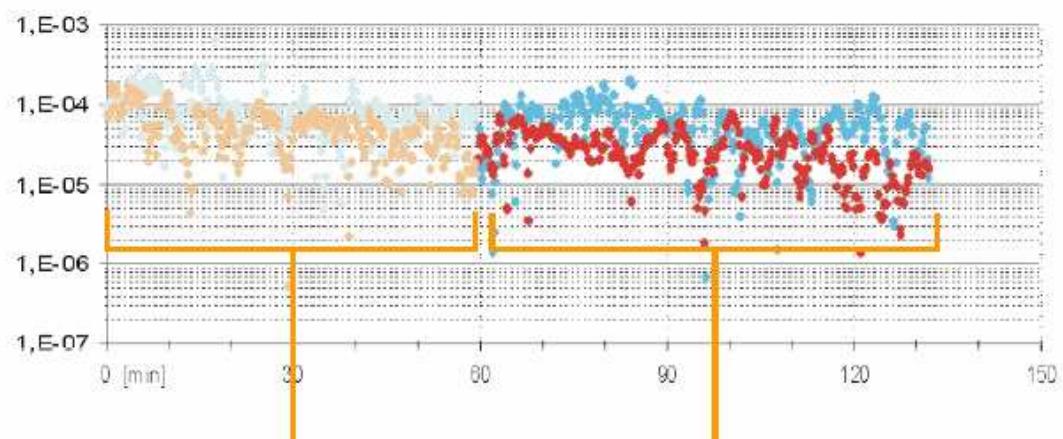
Direction of Flow [°]



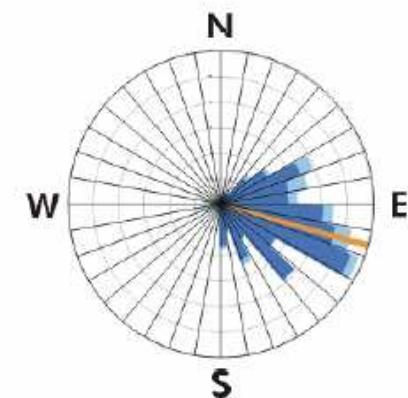
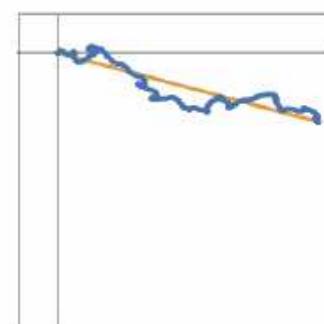
Measuring depth m u.POK: ● 14,4 ● 13,3



Flow velocity v_H [m/s]



Addition aller gültigen Vektoren: (343)
Richtung: 122 °
Betrag: 1,7E-05 m/s (1,45 m/Tag)
Mittel vH: 2,8E-05 m/s

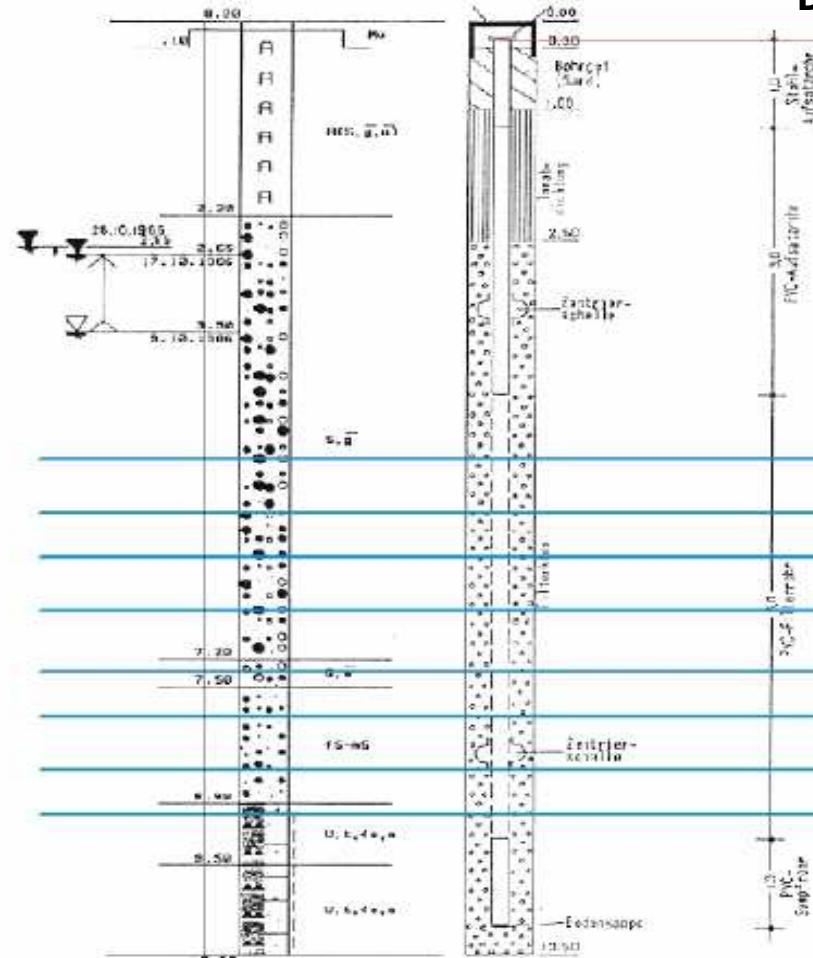


Calming phase after
inserting the probe Measuring course

Addition aller gültigen Vektoren: (342)
Richtung: 105 °
Betrag: 4,0E-05 m/s (3,44 m/Tag)
Mittel vH: 6,0E-05 m/s

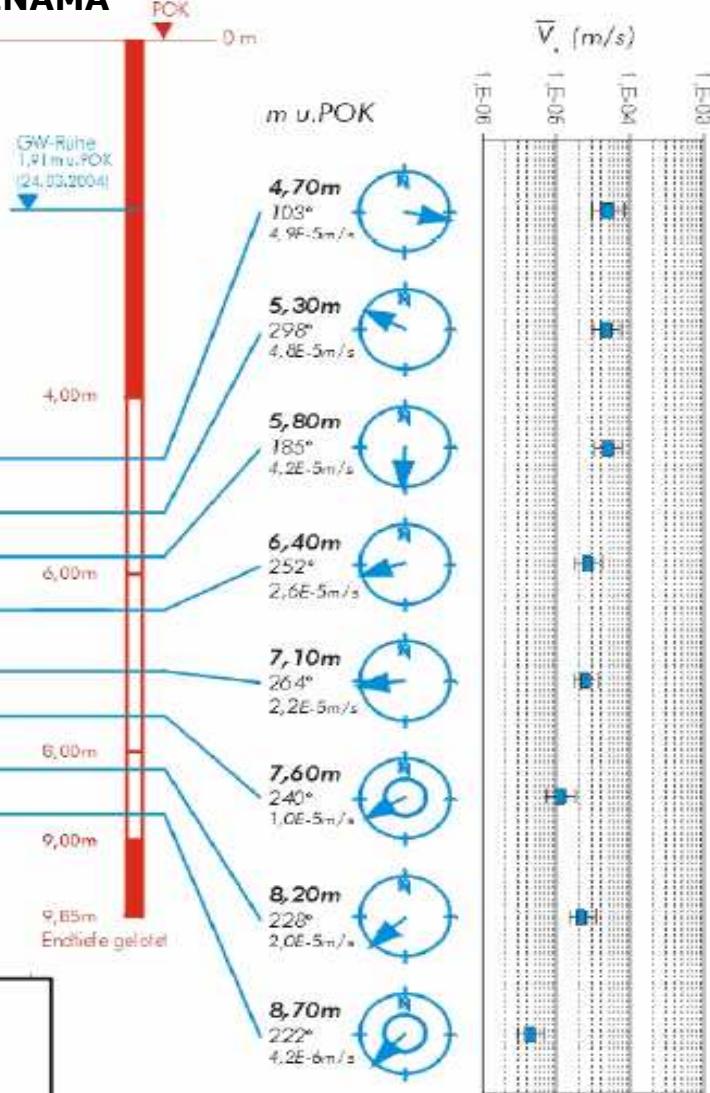
E 13

PLAN IZVEDBE



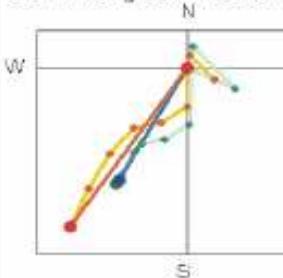
ZONA MJERENJA S DUBINAMA

MJERENJA



Durchführungszeitraum: 24./25.08.2004

Bestimmung der Fließrichtung über alle Messstufen

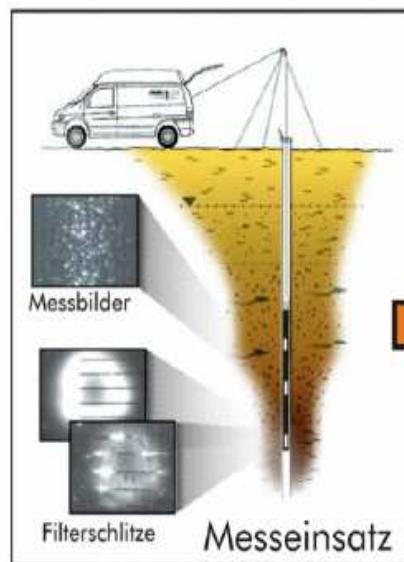


Schematische Darstellung der Summenrichtung der mittleren Fließrichtung über alle Messstufen

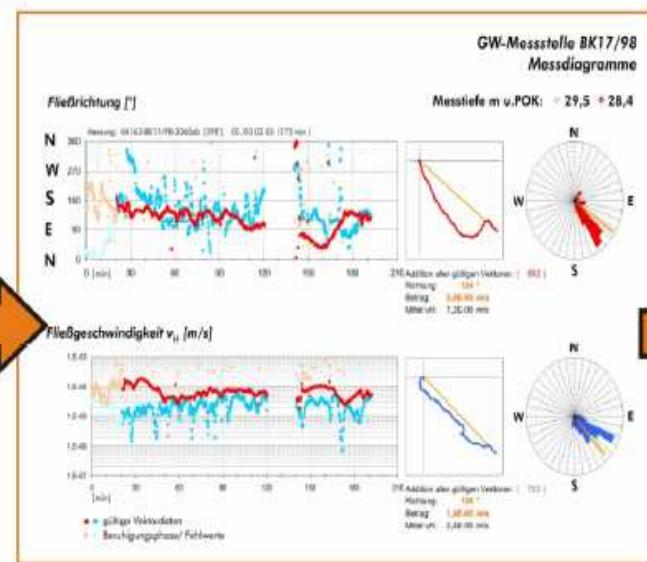
- Summe der Richtungvektoren (gleichwertige Beträge): 234°
 - Summe der Richtungvektoren (als Betrag v_i): 229°
 - Summe der Richtungvektoren (als Betrag v_i + Güterichtung): 229°
- Mittelwert: 230°

**KOMPLETAN ZAPIS SA
KARAKTERISTIKAMA
BUŠOTINE I MJERENJIMA**

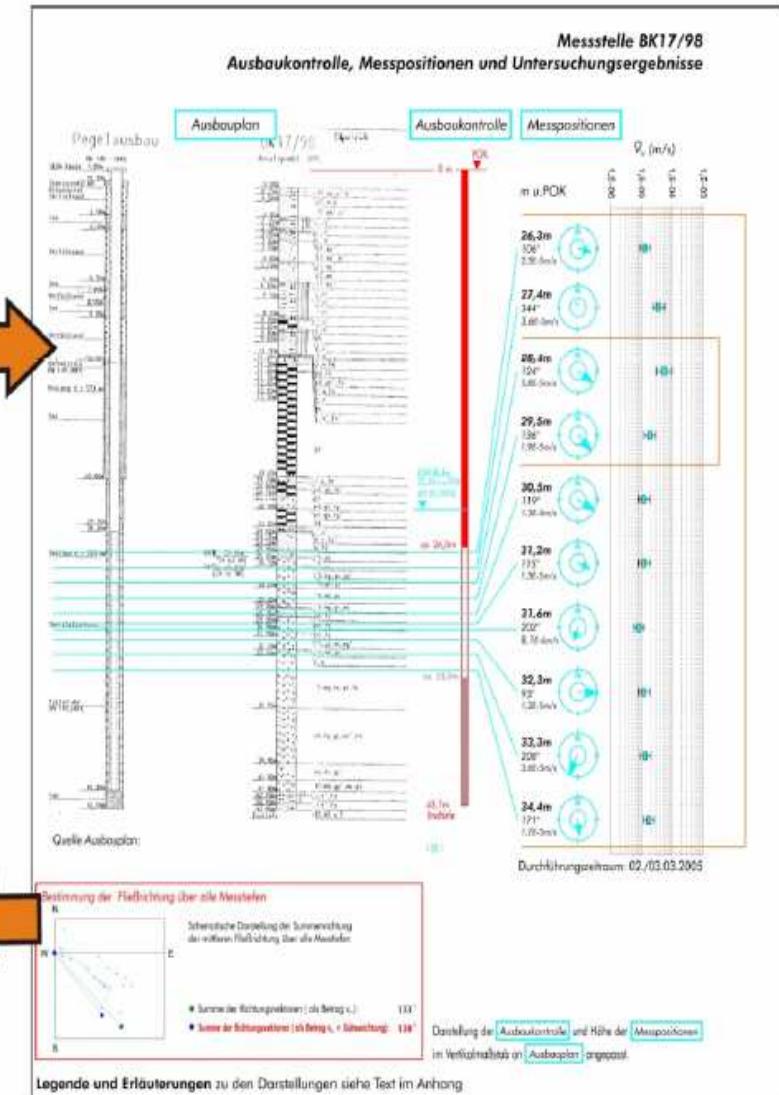
OD MJERENJA DO REZULTATA



1



2



3



4

5. IZGRADNJA PIEZOMETARA I METODE MJERENJA

- **Piezometri** su zdenci s primarnim zadatkom mjerjenja razine podzemne vode ili piezometarskog tlaka.
- 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 mjerjenje 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.

- Mjerenje 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 primjeniti da bi voda penetrirala u proznu čašu

6.OBJEKTI ZA ODLAGANJE OTPADA

6.1. OGRAĐIVANJE I ZAGRAĐIVANJE ONEČIŠĆENJA

Pravovremena kontrola izvora zagađenja je preventivna mjer zaštite.

Postoje tri osnovna principa kontrole izvora zagađenja:

1. Odstranjivanje zagađenja u samom izvoru
2. Zagrađivanje 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 zagrađivanju 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 zagrađivanja.

➤ 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 nezagadeno. Drugim riječima uspostavi se zona kaptiranja koja prihvata vodu koja protječe kroz izvor te sa sobom nosi zagađenje.

Oblik zone kaptiranja s jednim zdencem postavljenim i ishodište koordinatnog sistema se određuje po izrazu (Grubb, 1993):

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

pri čemu je:

Q - protok pumpanja

b - predstavlja deblinu vodonosnika

K - je hidraulička vodljivost,

J - označava regionalni hidraulički gradijent (bez pumpanja).

Postoje dva granična rješenja prethodnog izraza:

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

$$x_0 = \frac{-Q}{2\pi KbJ}$$

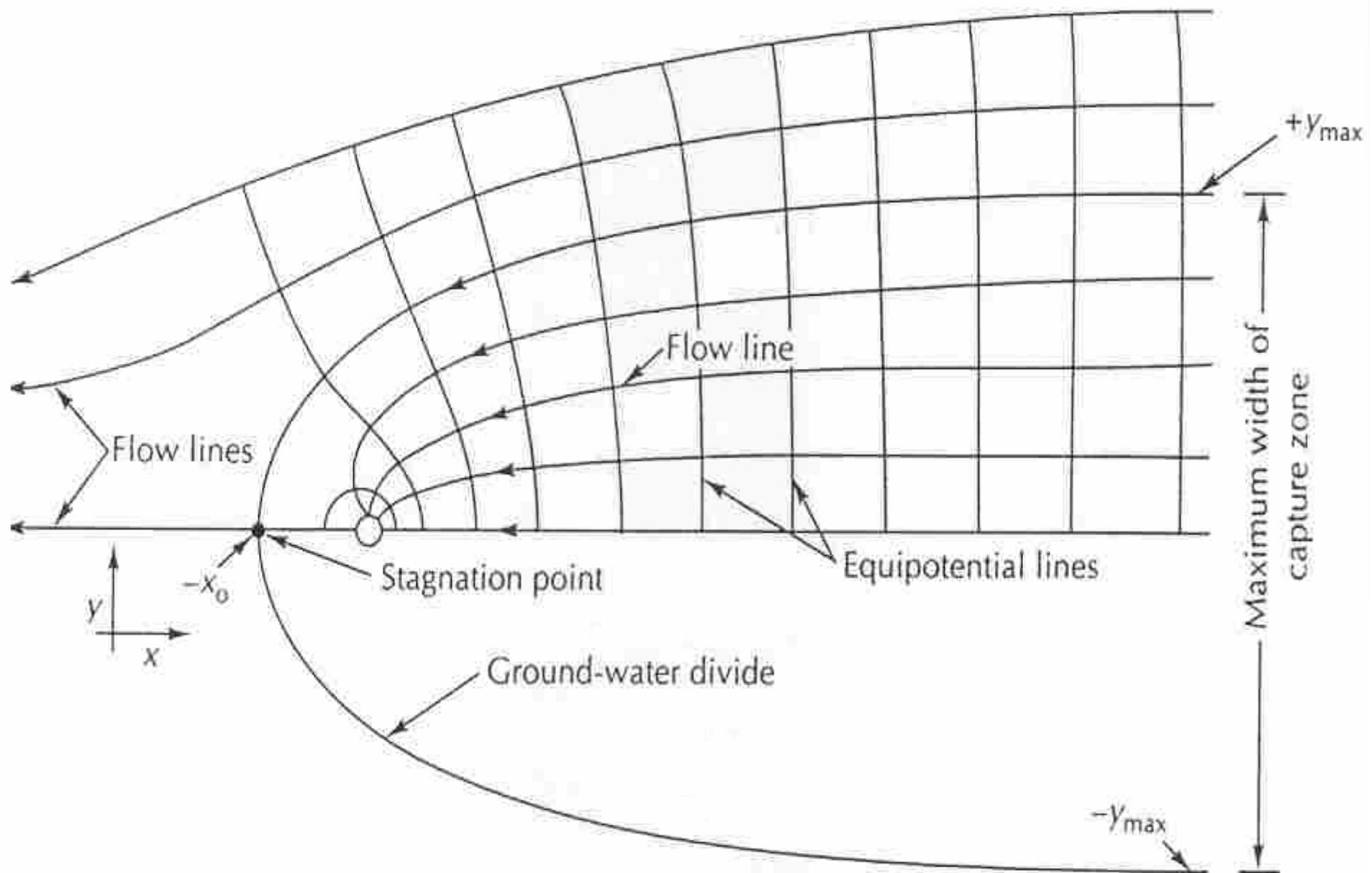
2. Maksimalna širina zone kaptiranja (dok $x \rightarrow \infty$):

$$y_{\max} = \pm \frac{Q}{2KbJ}$$

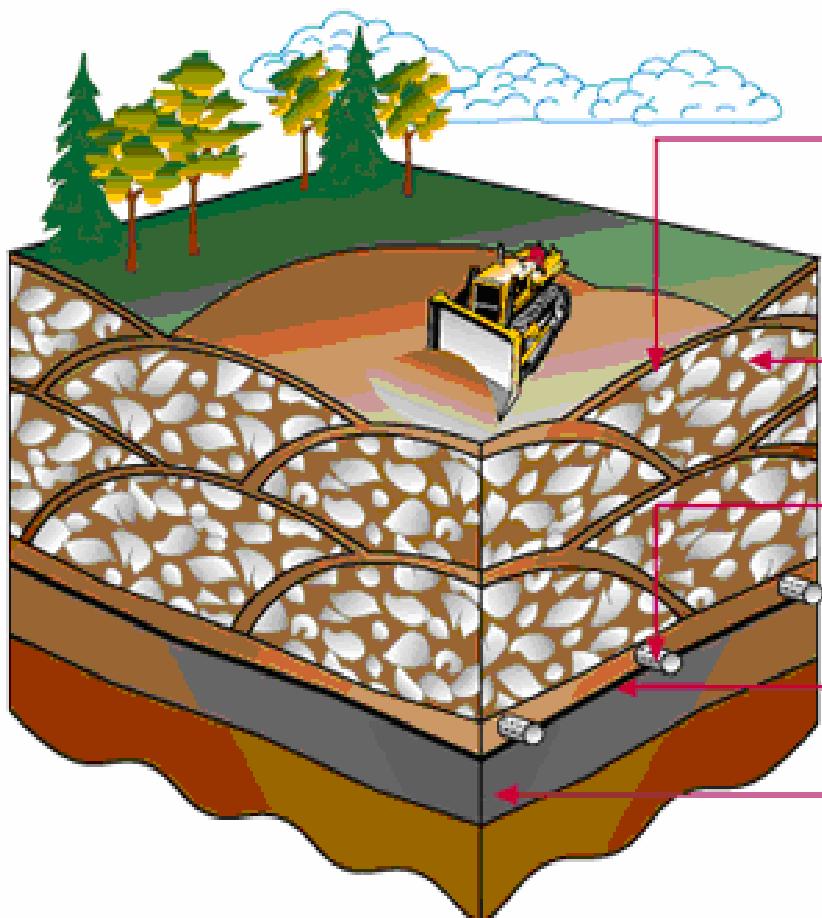
pri čemu y_{\max} označava polovicu širine zone kaptiranja

Pumpanje se odabire kao ono koje potpuno okružuje izvor zagađenja.

Ovaj treći pristup tretiranja 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.



6.2. PROJEKTIRANJE I IZGRADNJA OBJEKATA ZA ODLAGANJE NISKO TOKSIČNOG OTPADA



Dnevni pokrovni sloj

Na kraju svakog dana otpad je potrebno prekriti s minimalno 15-tak cm kompaktnog tla

Konsolidirani otpad

Drenažno - kolektorski sustav

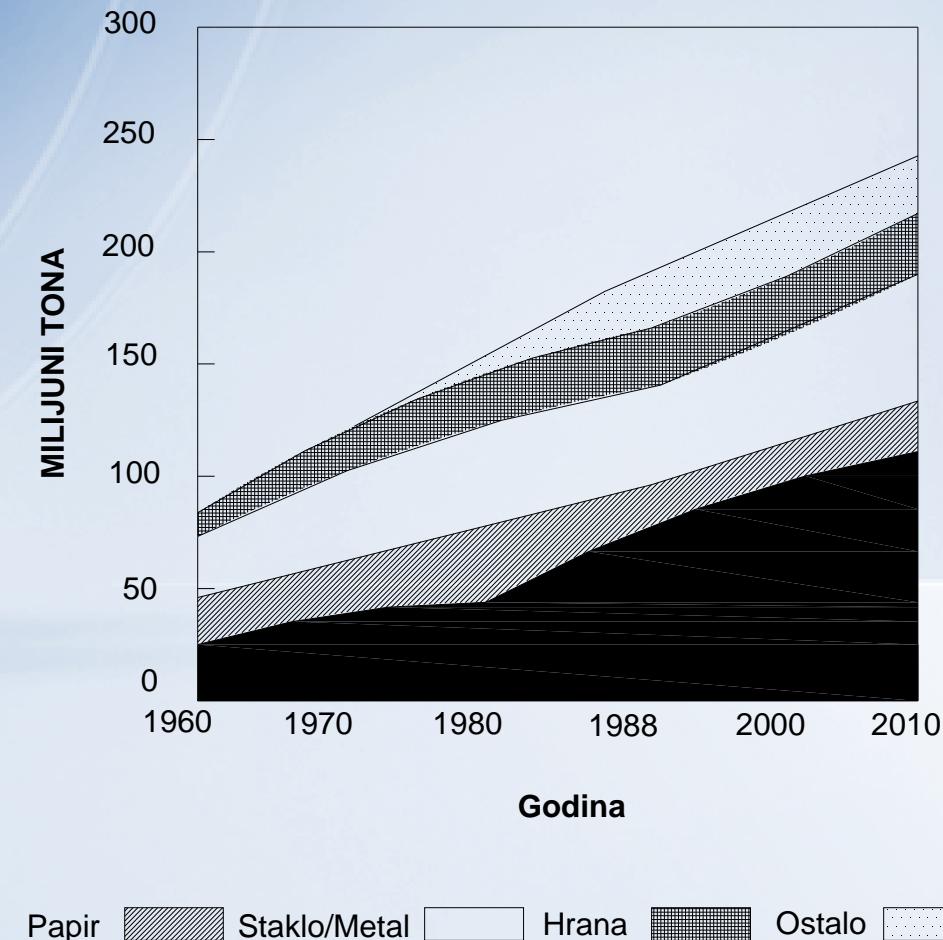
Geosintetički sloj

Nepropusni zaštitni tepih od gline

Sprječava onečišćenje tla i vode

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 pokazuje generaciju otpada u SAD-u u periodu između 1960 - 2010. godine.



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.

1) 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.

2) 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.

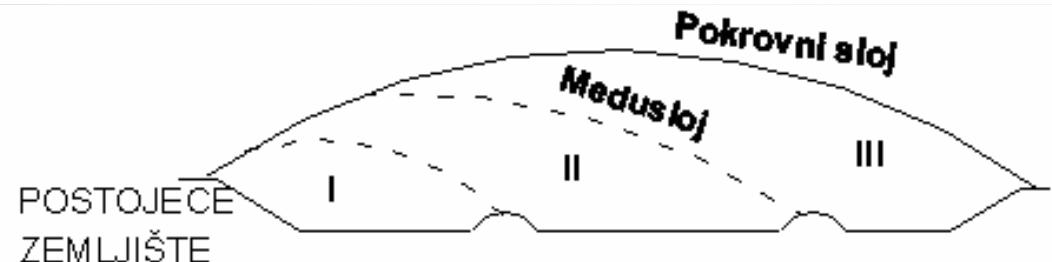
Geometrijska konfiguracija objekta za odlaganje otpada ovisi o nizu faktora, a među najvažnije spadaju:

- 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

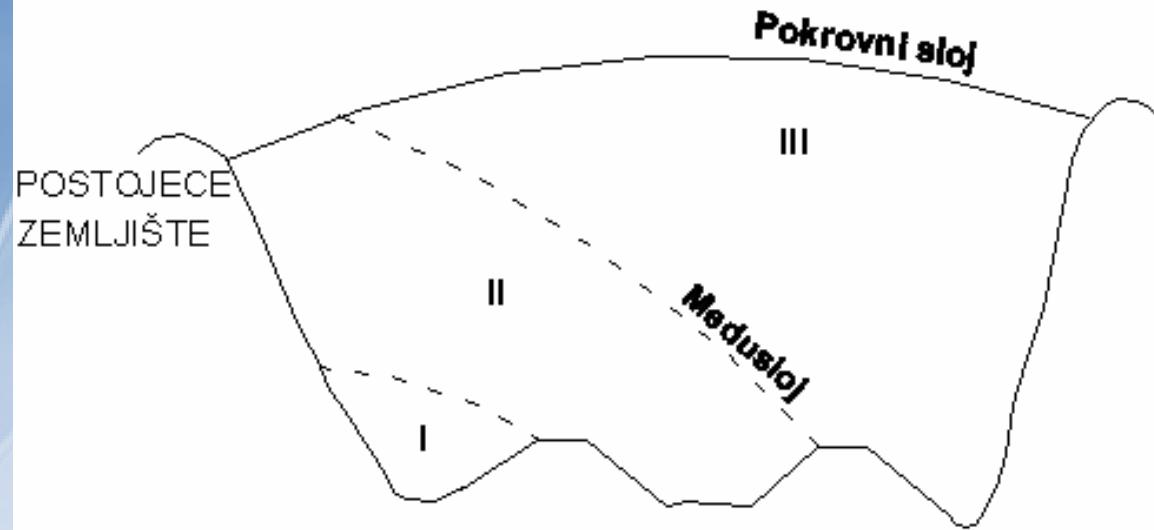
Po geometrijskoj konfiguraciji najčešće susrećemo:

- površinsko nasipanje,
- površinsko i podzemno nasipavanje,
- dolinska punjenja te
- punjenja u kanalima.

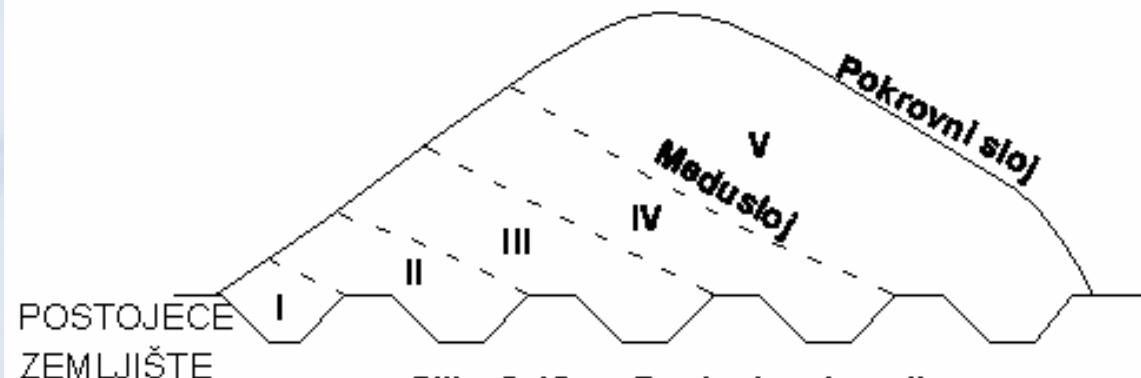
Navedene vrste tipova odlagališta su prikazana na idućoj slici;



Slika 2.19 a : Površinsko i podzemno nasipavanje



Slika 2.19 b : Dolinsko punjenje



Slika 2.19 c : Punjenje u kanalima

Tipovi odlagališta

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

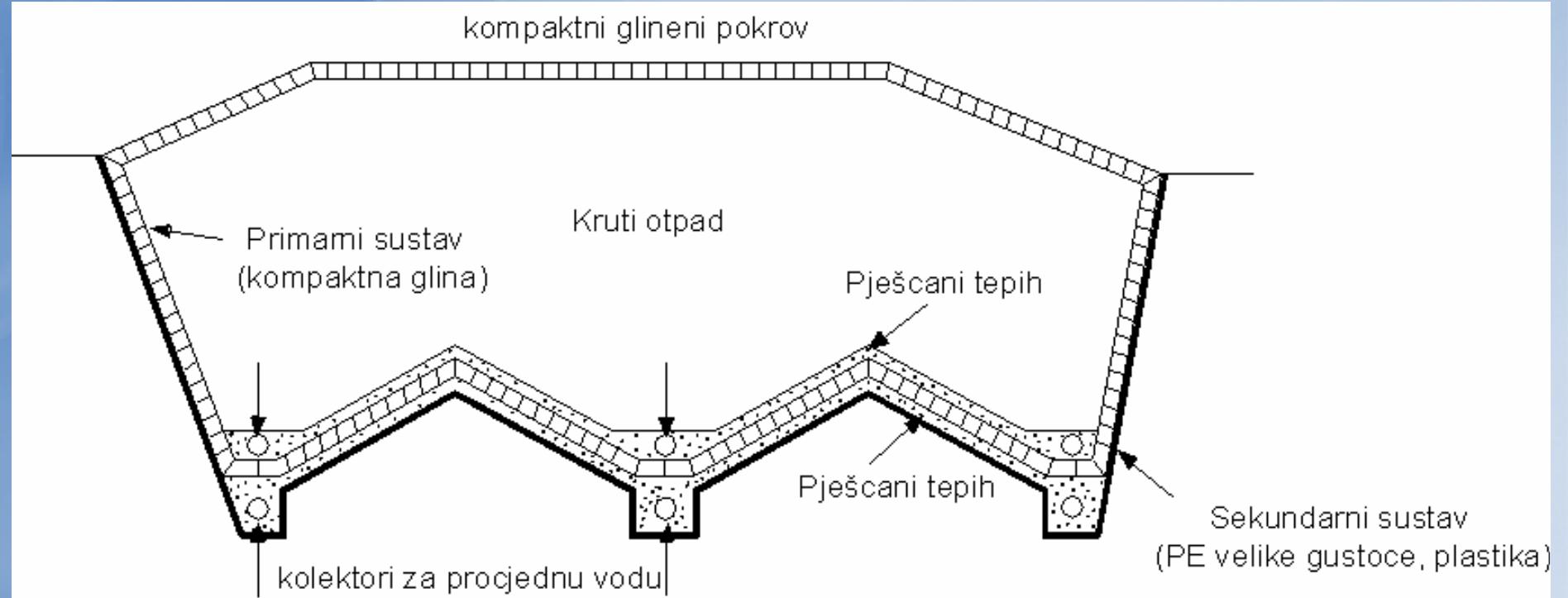
➤ Tipični projekt odlagališta sastoji se od 3 glavna sloja:

Gornji sloj predstavlja pokrov odlagališta i služi prvenstveno za minimiziranje infiltracije od kiše te da zaštiti odlagalište od erozije.

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.

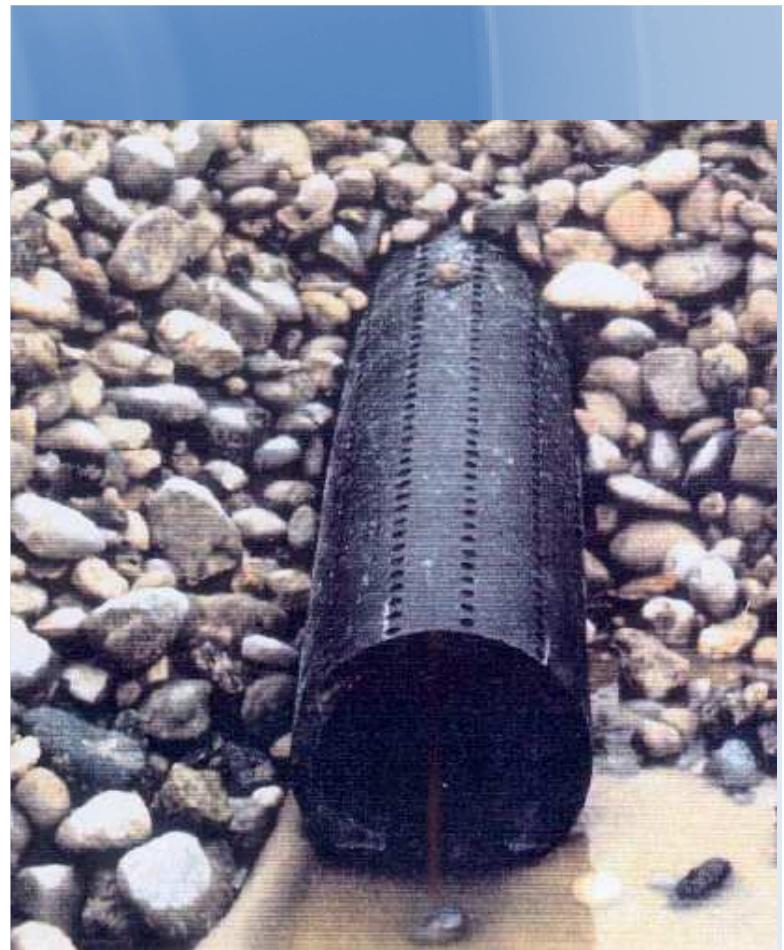
Iduća slika pokazuje detaljni sistem slojeva koji se koriste prilikom izvođenja objekata za odlaganje otpada.



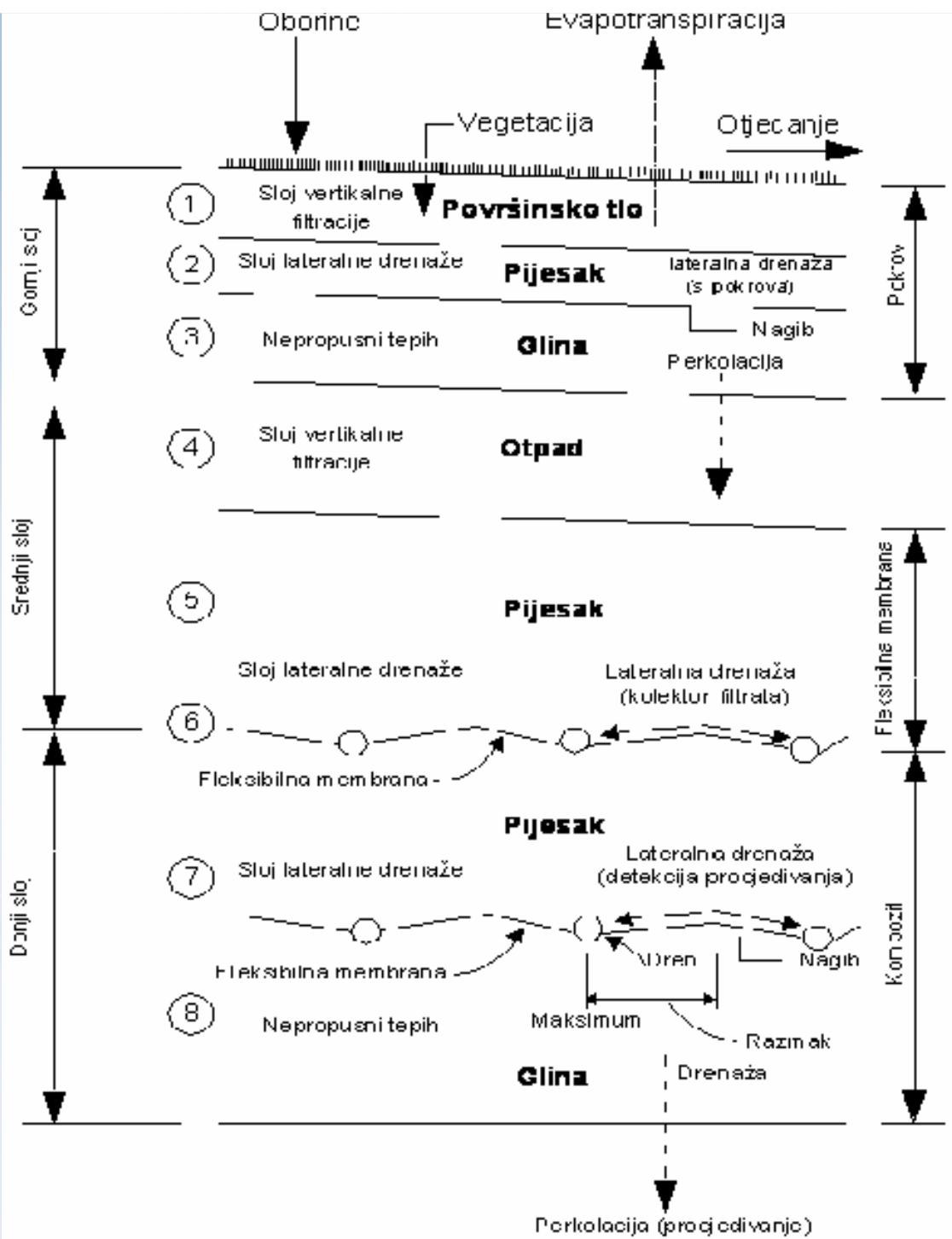
Drenažno kolektorski sustav je vrlo važan u ispravnom projektiranju, a pogotovo izvođenju objekata za odlaganje otpada.

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%.



Odvodnja procjednih voda



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

$$Q_D = \frac{2C_1 K_D Y h_0}{L^2}$$

pri čemu je:

K_D - hidraulički konduktivitet saturiranog dijela drenažnog sloja

Y - srednja saturirana dubina iznad membranskog tepiha

h_0 - hidraulička visina iznad drenažnog kolektora

L - dužina dreniranja

$C_1 = 0.51 + 0.00205 \alpha L$

α - bezdimenzionalni nagib membrane

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

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

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

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

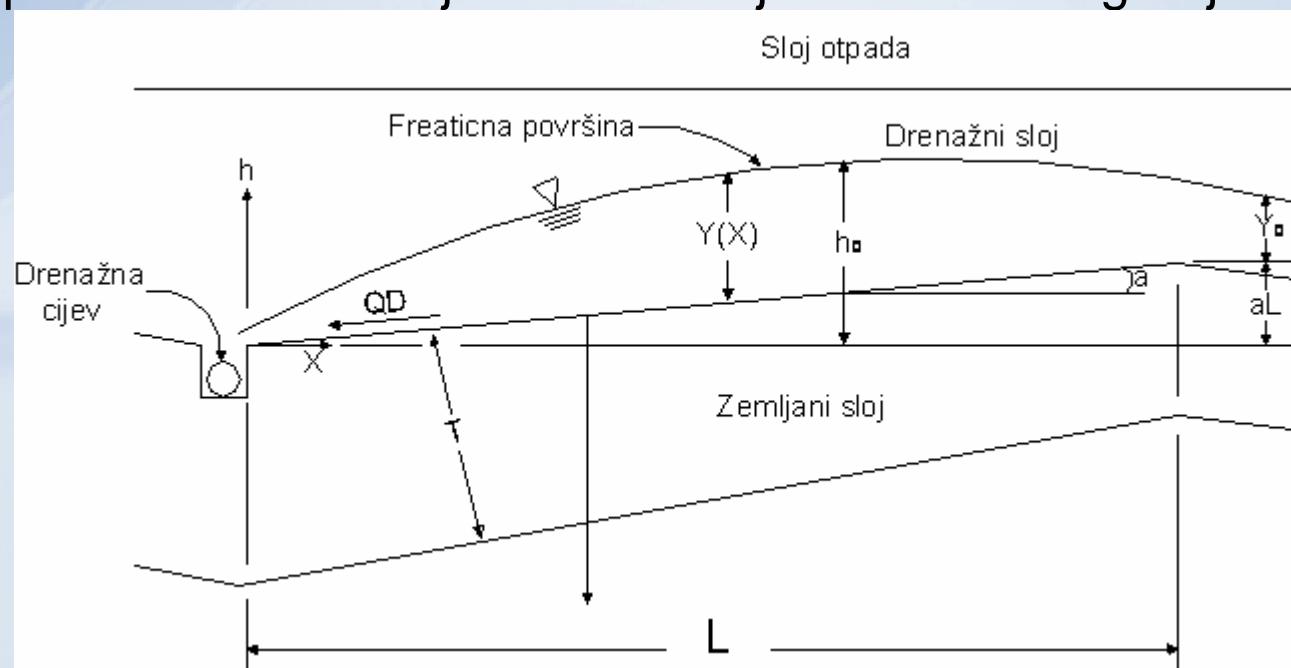
gdje je:

L_F - faktor procjeđivanja za sintetičku membranu (dan u specifikacijama proizvođača membrane),

K_P - hidraulički konduktivitet zemljanog sloja

T - debljina zemljanog sloja

Na slici su prikazani svi detalji i veličine koje se nalaze u gornjim izrazima.



- **Sakupljena procijeđena voda u drenažno-kolektorskom sustavu podvrgava se tretmanu i pročišćavanju.**
- Ta procjedna 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.**