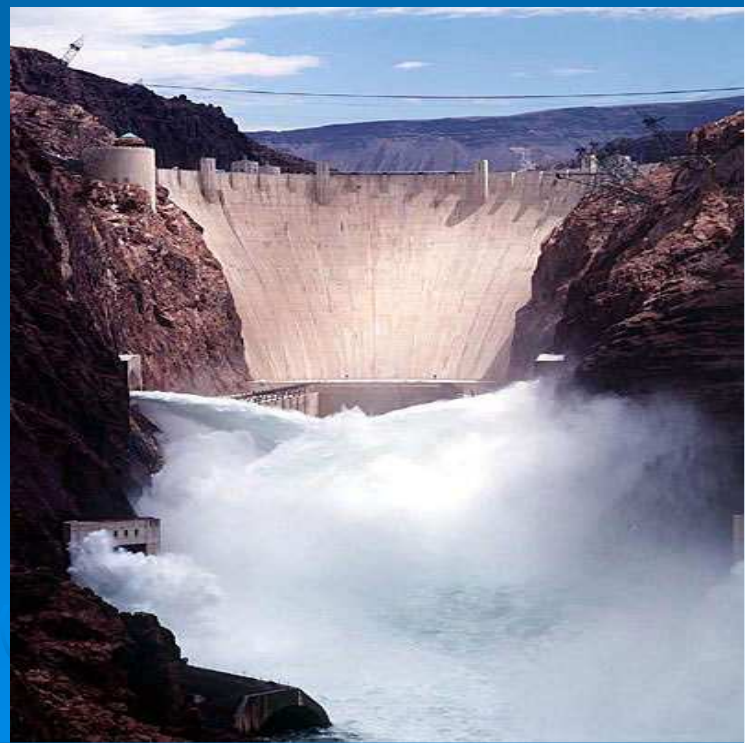
GRAĐEVINSKO – ARHITEKTONSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U SPLITU

HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE



SADRŽAJ:

1. POGLAVLJE : PODZEMNI ISTRAŽIVAČKI RADOVI

1. Uvod u hidrotehničke građevine

2. Fizikalne karakteristike i principi

2.1. Totalna i apsolutna poroznost

2.2. Darcy-ev eksperiment

3. Geofizička istraživanja

3.1. Seizmička istraživanja

3.2. Geoelektrična ispitivanja

3.3. Snimanja u bušotinama

4. Geološka istraživanja

4.1. Aluvij

4.2. Taloženje vjetrom

4.3. Taloženje ledom

4.4. Sedimentne stijene

2. POGLAVLJE : OBJEKTI U PODZEMLJU: ZDENCI, GALERIJE, KOLEKTORI

1. Uvod
2. Vodonosni i vodonepropusni slojevi; stupanj zasićenosti
3. Projektiranje i izgradnja zdenaca i kolektora
4. Hidraulika i testiranje zdenaca
5. Izgradnja piezometara i metode mjerenja
6. Objekti za odlaganje otpada

3. POGLAVLJE : BRANE S PRATEĆIM OBJEKTIMA

1. Podjela i klasifikacija
2. Projektiranje i izgradnja
3. Objekti na branama
4. Procesi u akumulacijama

4. POGLAVLJE : PROJEKTIRANJE S ANALIZOM NEPOUZDANOSTI

1. Analiza pouzdanosti
2. Analiza osjetljivosti

1. POGLAVLJE

PODZEMNI ISTRAŽIVAČKI RADOVI

1. UVOD U HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

- HIDROTEHNIKA je tehnička disciplina građevinarstva povezana s vodom
- njezine djelatnosti objedinjuju projektiranje, izgradnju i održavanje hidrotehničkih objekata i sustava
- pod sustavima se misli na sustave odvodnje (urbane ili melioracijske), korištenje vodnih snaga, regulaciju plovidbe, sustave navodnjavanja i dr.
- globalno gledajući potrebno je pravilno pristupiti upravljanju raspoloživih vodnih resursa te ih pravilno rasporediti na zadanoj mikrolokaciji
- samim time “decision maker” ima dobru podlogu za globalno upravljanje raspoloživim vodama i vodnim resursima
- vodama ćemo upravljati izgradnjom hidrotehničke infrastrukture
- potrebna su detaljna prethodna istraživanja podzemlja

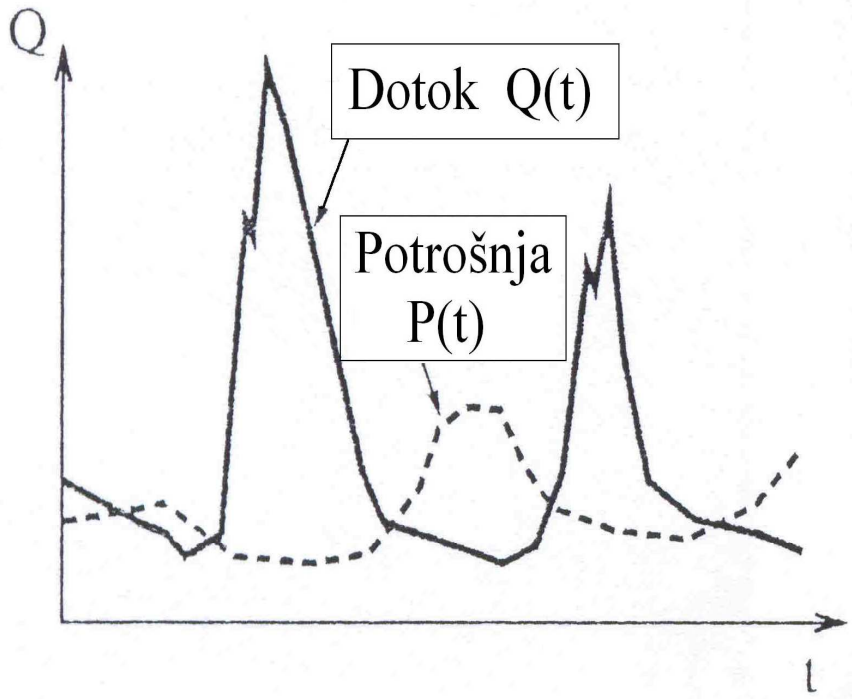
a) OPĆENITO O VODAMA

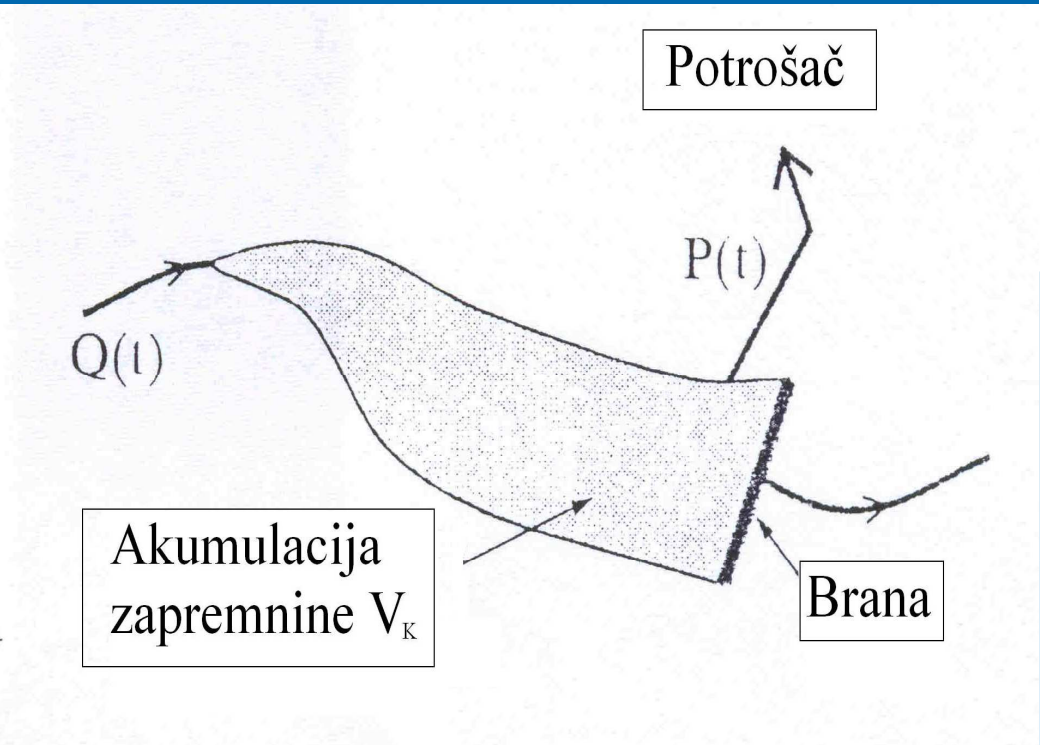
- neraskidiva veza čovjeka i vode
- bez vode je život nezamisliv
- voda kruži u prirodi
- uporaba vode (domaćinstvo, industrija, navodnjavanje, el. energija, plovni put, rekreacija , ribarstvo…)

- od vode se mora često štititi (poplave, erozija, odvodnja, kanalizacija)
- sve više se daje naglasak na očuvanje kvalitete voda (pročišćavanje, obogaćivanje…)

b) NEUSKLAĐENOST DOTOKA I POTROŠNJE VODE

Količina vode koja nam je potrebna često nam nije dostupna (ovisno o mjestu na kojem trebamo vodu, kvaliteti vode i vremenu u kojem je trebamo).





Potrebno je poznavati:

- režim dotoka je neravnomjeran tijekom godine
- potrebe za vodom također su neravnomjerne
- neravnomjernost dotoka i potreba za vodom vremenski se najčešće ne podudaraju

Prema ovom će se odrediti zadatak gospodarenja vodama:

- snabdijevanje vodom
- zaštita od voda
- zaštita voda

c) VODOPRIVREDA

- djelatnost koja se bavi planiranjem, razvojem, uporabom i zaštitom vodnih resursa
- obuhvaća više vodoprivrednih grana (sanitarna hidrotehnika, hidrotehničke melioracije, hidroenergetika, obrana od poplava, vodeni promet i dr.)

d) VODOPRIVREDNO PLANIRANJE, VODOPRIVREDNE SMJERNICE, VODOPRIVREDNA OSNOVA

Zadatak vodoprivrede jednog područja je zadovoljiti potrebe domaćinstava, industrije i poljoprivrede za vodom, potrebe za električnom energijom, potrebe riječnog prometa, zaštititi otvorene i podzemne tokove od zagađivača.

Kako bi pristupili rješenju ovog opširnog problema, neophodno je proučiti potrebe i mogućnosti područja i to:

- društvene i ekonomske uvjete
- svojstva raspoloživih voda
- raspoloživa tehnička rješenja

Na osnovi proučenog daju se smjernice (globalna vodoprivredna rješenja) za razmatrano područje. Te smjernice se koriste kao podloga za daljnje proučavanje pri rješavanju svakog vodoprivrednog zadatka u području.

e) HIDROTEHNIKA

Hidrotehnika je tehnička djelatnost za **rješavanje vodoprivrednih zadataka**, koja obuhvaća:

1) proučavanje režima vodnih dobara (resursa)
2) ispitivanje geološke i hidrogeološke građe na mjestima akumulacija i objekata
3) projektiranje, građenje, održavanje i korištenje (upravljanje) hidrotehničkih objekata i opreme.

Hidrotehnika koristi različite znanstvene discipline od kojih su najvažnije:

1) hidrologija
2) meteorologija
3) vodoprivredni sustavi
4) geologija, hidrogeologija i inženjerska geologija
5) mehanika tla i mehanika stijena
6) mehanika fluida i hidraulika
7) otpornost materijala
8) statika i dinamika konstrukcija i strojeva
9) građevinski materijali
10) ispitivanje materijala i konstrukcija
11) elektrotehnika
12) ekonomija
13) agronomija
14) ekologija

f) PROJEKTIRANJE I PROJEKTNA DOKUMENTACIJA:

Projektiranje je postupno, projektira se u fazama (nivoima). Ide se od rješavanja općenitijih zadataka k detaljima:

1. Prvo je potrebno pokazati da je **objekt tehnički izvodljiv i ekonomski opravdan**, što se radi na nivou vodoprivredne osnove ili vodoprivredne studije (u okviru koje se razmatra vodoprivredno korištenje promatranog područja – sliva, država ili pokrajine).

2. Na nivou idejnog rješenja, od razmatranih mogućnosti, bira se **rješenje s najpovoljnijim općim osobinama** (npr. za hidroelektrane se može odlučivati između pribranske i derivacijske).

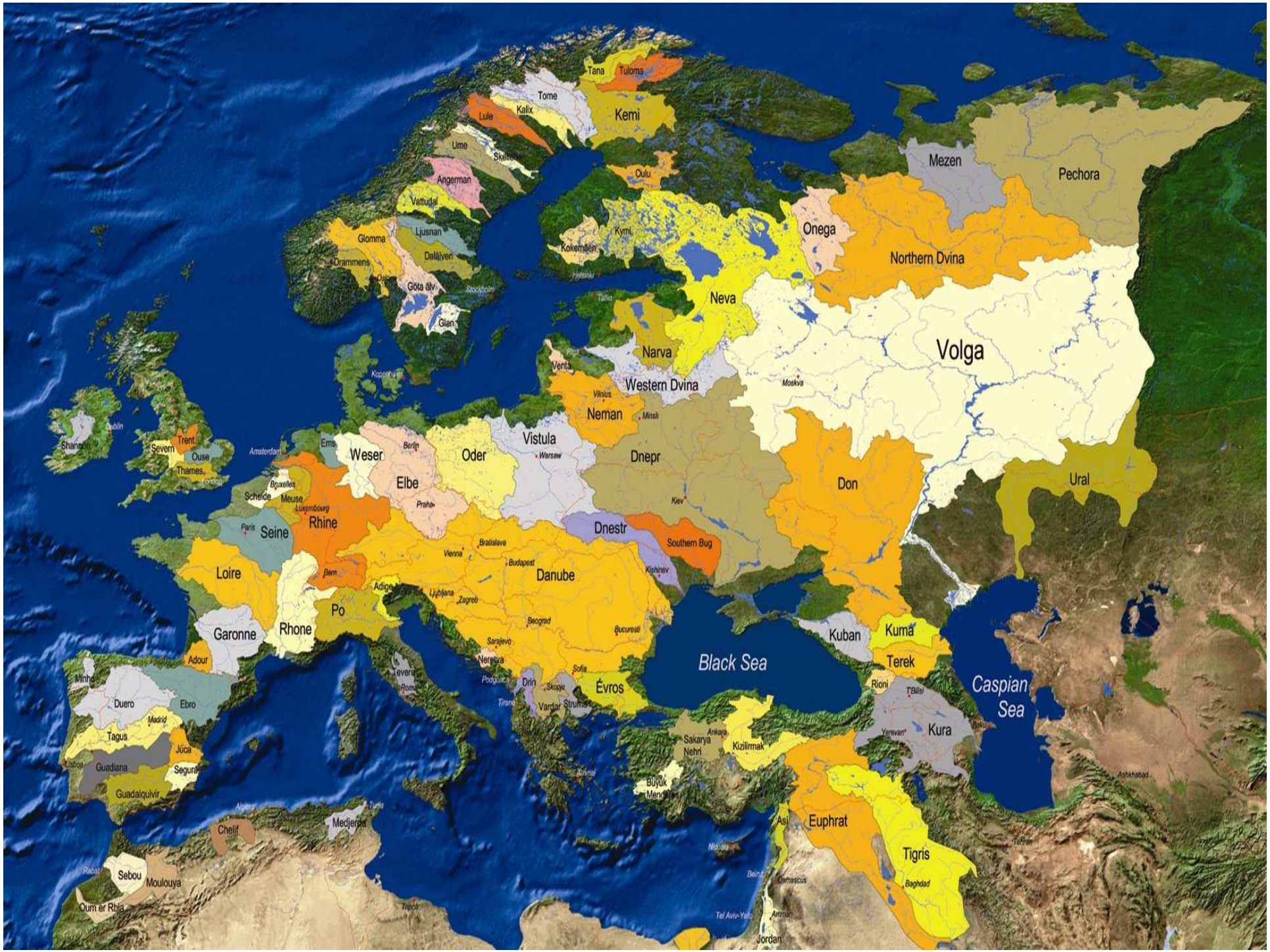
3. U idejnom projektu se određuju **najvažniji parametri rješenja** (veličina akumulacije, tip i mjesto – "profil" brane i sl.), **kao i najznačajnije dimenzije i svojstva objekata i opreme**

4. U okviru glavnog i detaljnog (izvođačkog) projekta **određuju se sve veličine (dimenzije) i svojstva objekata i opreme kao i uvjeti i tehnologija gradnje.**

5. Nakon izgradnje slijedi izrada projekta izvedenog stanja, što se, nažalost u našoj praksi rijetko ostvaruje.

EU Water Framework Directive

Introduction and implementation


Tana
Tuloma
Torne
Kalix
Lule
Kemi
Ume
Skellefte
Angerman
Oulu
Vattudal
Mezen
Pechora
Onega
Kymi
Kokemäen
Glomma
Ljusnan
Drammens
Dalälven
Göta älv
Stockholm
Helsinki
Tallinn
Northern Dvina
Neva
Glan
Narva
Volga
Venta
Riga
Western Dvina
Moskva
Vilnius
Neman
Minsk
Kopenhagen
Dublin
Shannon
Trent
Severn
Ouse
Thames
London
Amsterdam
Ems
Weser
Berlin
Oder
Vistula
Warsaw
Dnepr
Don
Ural
Bruxelles
Schelde
Meuse
Luxembourg
Elbe
Praha
Kiev
Paris
Seine
Rhine
Dnestr
Southern Bug
Bratislava
Vienna
Budapest
Danube
Kishinev
Loire
Bern
Adige
Ljubljana
Zagreb
Po
Rhone
Garonne
Beograd
Bucuresti
Kuban
Kuma
Adour
Sarajevo
Neretva
Black Sea
Terek
Minho
Tevere
Roma
Podgorica
Sofia
Drin
Skopje
Évros
Rioni
Tbilisi
Caspian Sea
Duero
Ebro
Tirana
Vardar
Struma
Madrid
Tagus
Sakarya
Nehri
Ankara
Kizilirmak
Kura
Yerevan
Baku
Júcar
Lisbon
Guadiana
Segura
Büyük Menderes
Guadalquivir
Ashkhabad
Algiers
Tunis
Medjerda
Chelif
Asi
Euphrat
Tehran
Nicosia
Tigris
Rabat
Sebou
Moulouya
Beirut
Damascus
Baghdad
Qum er Rhia
Tripoli
Tel Aviv-Yafo
Amman
Jordan

Contents

- Water Framework Directive – objectives and integrated management
- Common Implementation Strategy – process and results
- Compliance and reporting
- Outlook

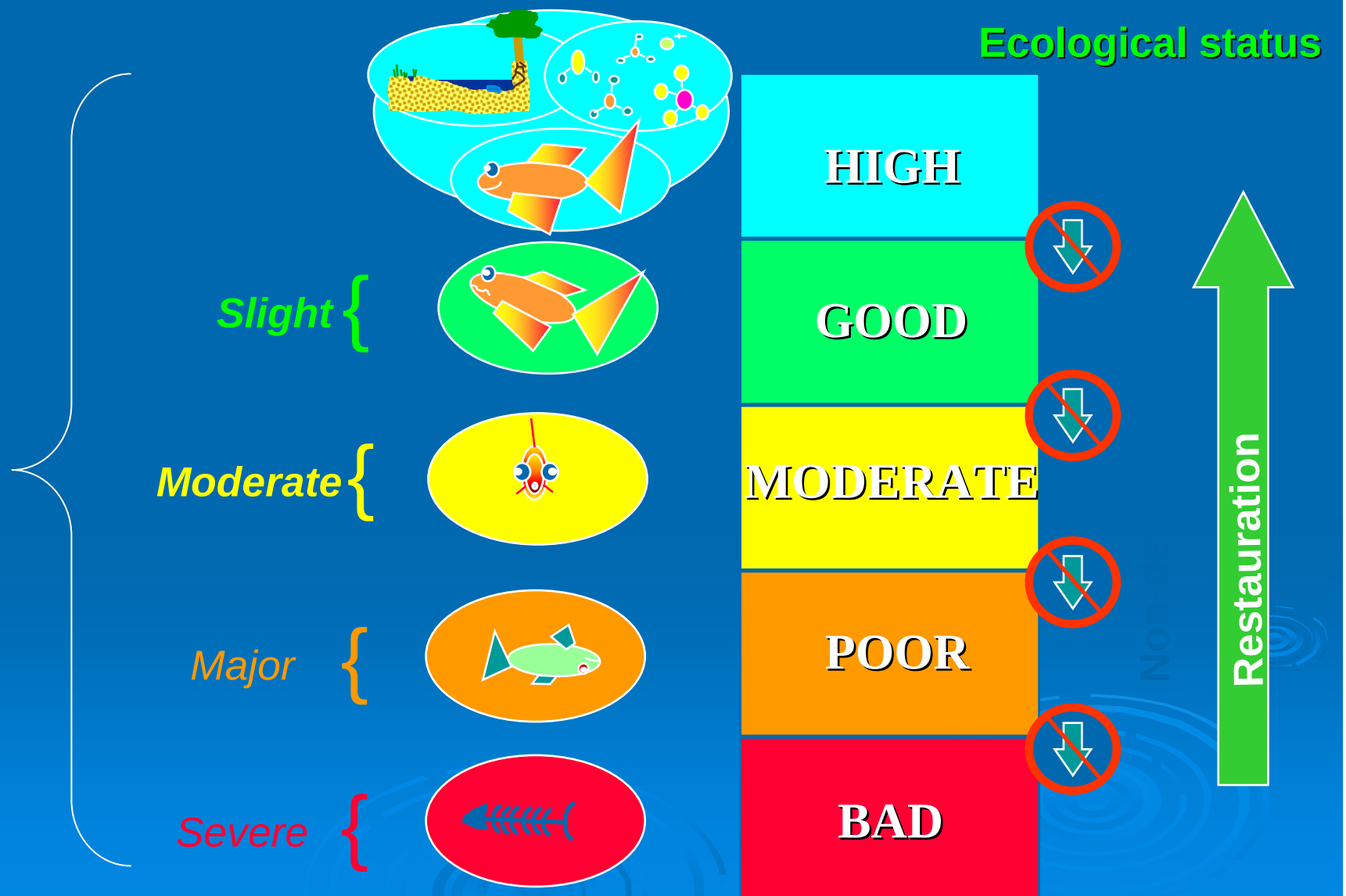
Water Framework Directive – key elements

Objectives and integrated management

Water Framework Directive: objectives

- Protecting <u>all</u> waters, surface and ground waters
- Covering <u>all</u> impacts on waters.
- Good quality ('good status') to be achieved, as a rule, by 2015
- Water quality defined in terms of biology, chemistry and morphology

Ecological objectives



Courtesy Peter Pollard

Objectives of intercalibration

- Setting of good status class boundaries:
  - Consistent with WFD definitions
  - Comparable between all 25 Member States
- IC is required by WFD to start 2003, to end 2006

Water Framework Directive: integrated management

- Management of the River Basin.
- The challenge of shared river basins
- River Basin Management Plans
- Cost Recovery and Equitable Charging
- Public Participation
- Streamlining and integration of EU legislation

The River Basin Concept

Source: Ministry of the environment, Québec, Canada

Shared River Basins

© World Bank

Danube river basin: 18 countries, 817.000 km² catchment area

Evolvement of Water Legislation

TODAY

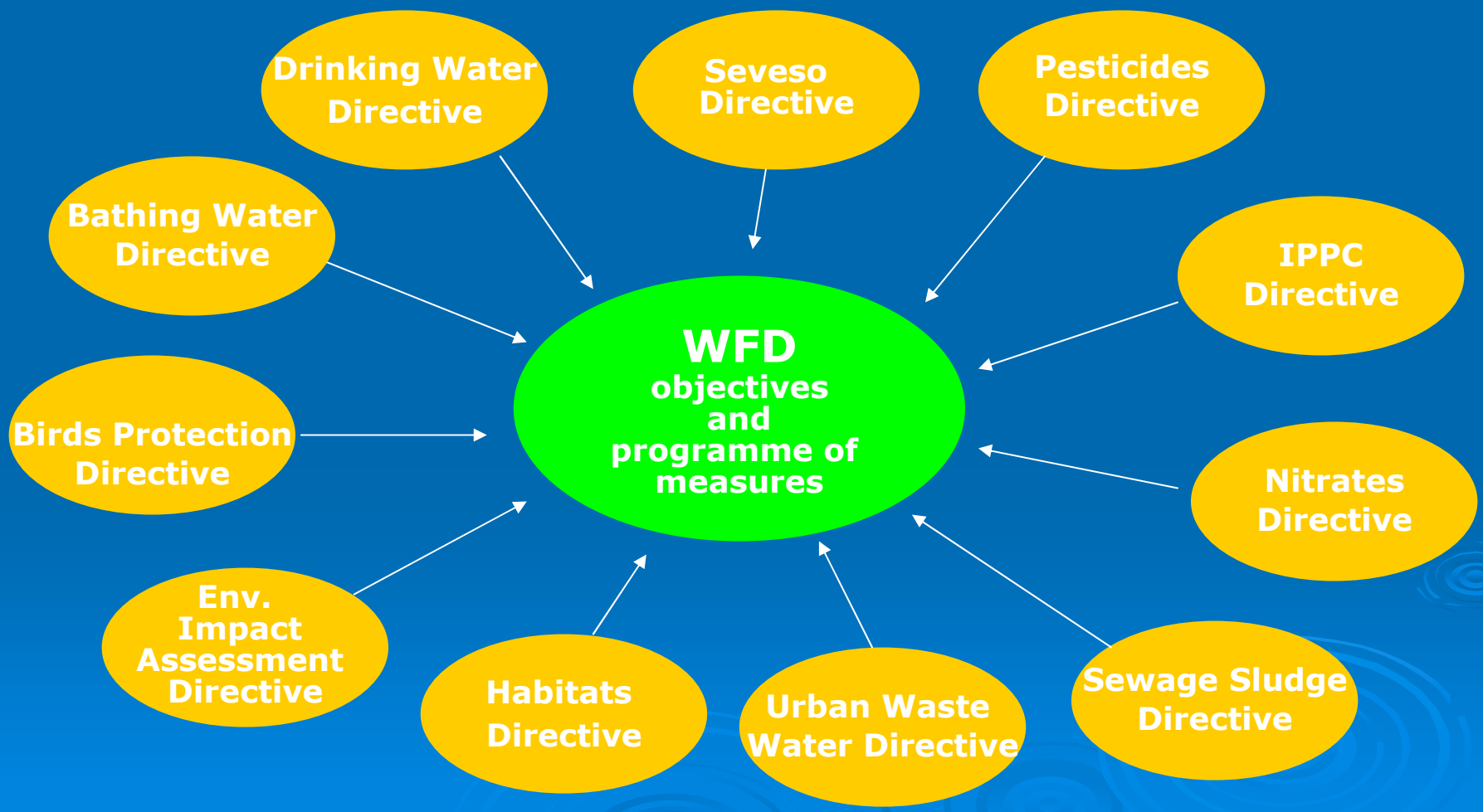
- WFD
- Bathing Water
- Drinking Water
- Surface Water
- Fish Water
- Shellfish Water
- Ground water
- Urban Waste Water
- Nitrates
- IPPC
- Exchange of Information
- Decision Surface Waters
- Dangerous Substances

REPEAL

2013

- WFD
- Bathing Water
- Drinking Water
- Urban Waste Water
- Nitrates
- IPPC

One coherent management frame for all water-related legislation



The Water Framework Directive and the Wider Dimension

- Protection of the Marine Environment
- External Policy and Neighbourhood Policy
- The EU Water Initiative
- Agriculture Policy
- Cohesion Policy
- Transport policy
- Research policy
- Energy policy

Implementation:
a continuous & transparent process

Formal transposition into national law	Dec 2003
⇩	
Environmental analysis, economic analysis	Dec 2004
⇩	
Monitoring programmes operational	Dec 2006
Public participation at the latest	Dec 2006
⇩	
Identify water management issues/projects	Dec 2007
⇩	
Draft river basin management plans	Dec 2008
⇩	
Final river basin management plans	Dec 2009
⇩	
Implementation, assessment, adjustment	2015 and further

Water Framework Directive

The need for a Common Implementation Strategy and results 2001 - 2004

Diversity of river basins

Common Implementation Strategy
CIS

- Challenges for all administrations/stakeholders
- Many large river basins in Europe are shared
- Common understanding of the Directive is critical
- Has led to: The Common Implementation Strategy
- Involves all stakeholders
- Example of Good European Governance

Common Implementation Strategy Process

- Started in 2001
- Three Work Programmes for 2001-2002, 2003-2004 and current 2005-2006
- Organised in phases, (1) guidance document development, (2) pilot testing, (3) key issues
- Organisational structure has evolved over past years

WFD and CIS

- WFD is a central piece of EU environmental policy with links to many other EU actions.
- The CIS is an extremely effective vehicle for supporting the implementation of the directive.
- The CIS has been running for over 4 years, it involves all Member States and all stakeholders.

CIS –Who is Involved

- 25 EU Member States
- Bulgaria, Romania, Norway, Iceland, Switzerland
- Industry - EUREAU, CEFIC, ECPA, EURELECTRIC, Irrigators, Land-Owners etc etc
- NGOs - WWF, EEB, BirdLife, etc
- In total over 1000 people actively involved

CIS Achievements

Fourteen Guidance Documents

1) Economics and the Environment
2) Identification of Water Bodies
3) Analysis of Pressures and Impacts
4) Artificial and Heavily Modified Water Bodies
5) Transitional and Coastal Waters –Typology, Reference Conditions
6) Intercalibration Network and the Intercalibration exercise
7) Monitoring
8) Public Participation
9) GIS and the WFD
10) Rivers and Lakes Typology
11) Planning Process
12) Wetlands
13) Classification
14) Intercalibration Process

In addition

- 2004 and 2005 Reporting guidance
- PRB Outcome reports
- Risk Analysis principles
- and others

FIZIKALNE KARAKTERISTIKE I PRINCIPI

2. FIZIKALNE KARAKTERISTIKE I PRINCIPI

Osnovni fizikalni pojmovi:

- **Energija**, *E*, je kapacitet da se učini rad koji je produkt sile i puta na kome djeluje. Mjerna jedinica za rad je 1 *Joul* (J), to je ustvari sila od 1 *N* koja djeluje na putu od 1 *m*.

$$W = F \times d \qquad \left(\frac{ML^2}{T^2}\right) = \left(\frac{ML}{T^2}\right)(L)$$

- **Sila**, *F*, je produkt mase i akceleracije. Mjerna jedinica za silu je 1 Newton (N) - 1 kg s akceleracijom od 1 m/s^2 .

$$F = m \times a \qquad \left(\frac{ML}{T^2}\right) = (M)\left(\frac{L}{T^2}\right)$$

- **Težina vode**, *W*, gravitacijska je sila zemlje koja djeluje na tijelo, i ima istu mjernu jedinicu kao i sila

$$W = m \times g \qquad (M)\left(\frac{L}{T^2}\right) = \frac{ML}{T^2}$$

- **Gustoća vode**:

$$\rho = \frac{masa}{volumen} = \frac{M}{V}$$

- **Specifična težina**:

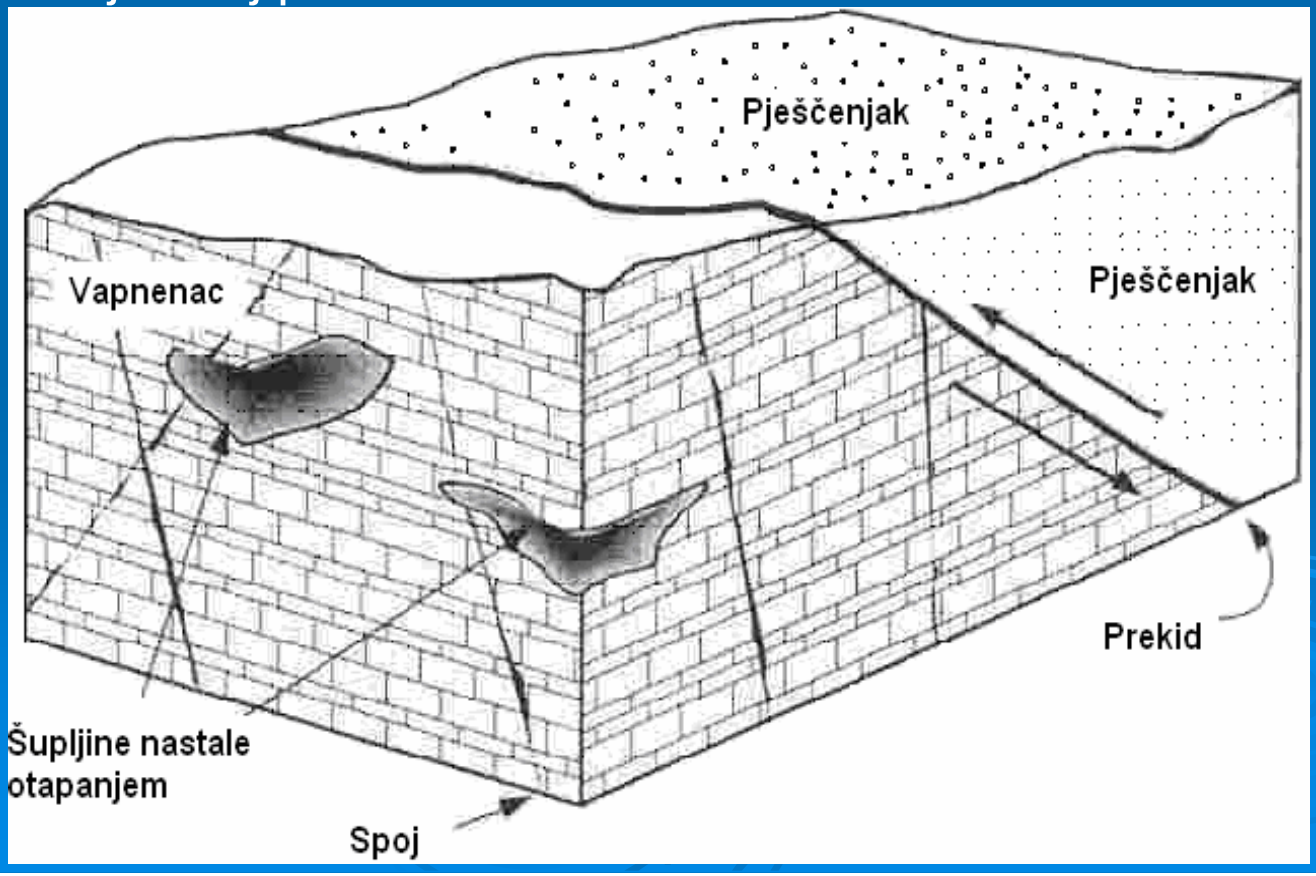
$$\gamma = \rho g = \frac{masa}{dužina^3}\frac{dužina}{vrijeme^2} = \frac{masa}{dužina^2 vrijeme^2} = \frac{W}{V}$$ (težina po jediničnom volumenu)

- Svaki dio podzemlja koji u sebi sadrži vodu u mjerljivoj količini naziva se **vodonosni sloj (akvifer).** Voda može ispunjavati sve pore u podzemlju ili samo dio pora te se po tome definira stupanj zasićenosti porozne sredine.

- Tijekom vremena nastajanja, stijena u sebi formira dvije faze: fazu pora tj. otvorenog prostora, i čvrstu fazu. Stijene pri površini zemlje u stalnom su procesu fizikalne i kemijske dekompozicije i desagregacije, što rezultira kontinuiranim stvaranjem novih pora.

Sedimenti su nakupine zrnastog materijala koji se taložio pod utjecajem vode, vjetra, leda ili gravitacije.

Sedimentne stijene su formirane iz sedimenata procesom **diageneze**, tj. procesom nastajanja kroz geološke epohe. Vapnenačke stijene i dolomiti su primjeri sedimentnih stijena. Pri kori zemlje, sedimentne stijene su napuknute i formiraju mrežu pukotina stvarajući otvoreni volumen prostora raspoloživ za kretanje vode. Otvori, pukotine i pore su od velike važnosti u hidrologiji podzemlja i inženjerskoj praksi.



2.1. TOTALNA ILI APSOLUTNA POROZNOST

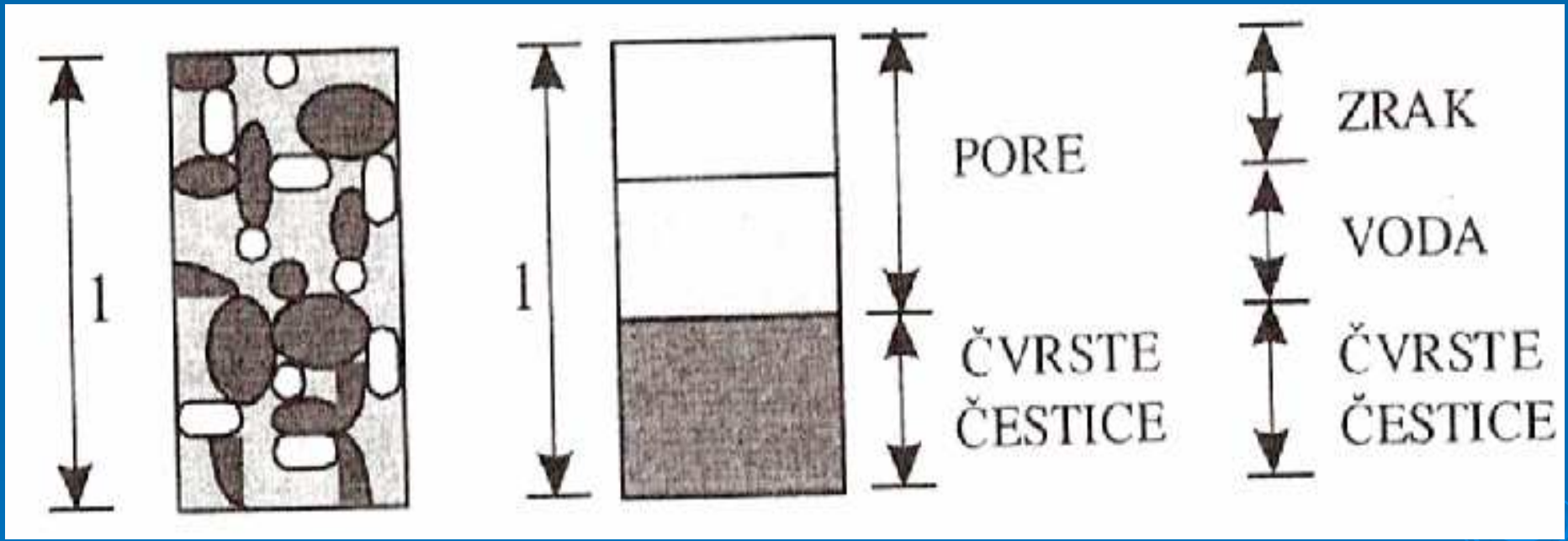
- Poroznost zemljanog materijala **odnos je volumena otvorenog prostora (pora) prema totalnom volumenu promatranog uzorka**. To je bezdimenzionalna veličina najčešće dana u postotku

$$\text{Totalna poroznost} \quad n = \frac{\text{Volumen pora}}{\text{volumen uzorka}} 100 = \frac{V_v}{V} 100$$

gdje je ***V_v*** **volumen otvorenog prostora**, ***V*** **totalni volumen promatranog prostora i** ***n*** **je totalna poroznost uzorka**. Poroznost se laboratorijski određuje uzimanjem uzorka s poznatim volumenom (*V*). Uzorak se potom suši do konstantne težine na temperaturi od 105 ℃ .

- Uzorak se potom suši do konstantne težine na temperaturi od 105 ℃. Time se odstrani sva voda iz pora, ali ne i voda koja je kemijski vezana uz minerale. Osušeni uzorak se zatim potopi u posudu s poznatim volumenom vode i ostavi dok se potpuno ne saturira. Volumen otvorenog prostora u uzorku, *Vv*, jednak je razlici poznatog volumena vode u kojeg je uronjen i volumena vode u posudi kada je uzorak izvađen.

Trokomponentni sastav tla :



$$n = 100\left[\alpha - \left(\frac{\rho_b}{\rho_d}\right)\right]$$

$$\rho_b = \text{bruto gustoća uzorka} = \frac{\text{masa uzorka nakon sušenja}}{\text{originalni volumen uzorka}}$$

$$\rho_d = \text{gustoću čestica materijala} = \frac{\text{masa uzorka nakon sušenja}}{\text{volumen zrna odredjen nakon sušenja}}$$

Efektivna poroznost je prostor u poroznoj formaciji, raspoloživ za protok vode i transport zagađenja kroz podzemlje. Za potpuni saturirani uzorak, efektivna poroznost se (kinematički) definira prema izrazu:

$$\text{Efektivna poroznost} \quad n_e = \frac{\text{Volumen vode dreniran gravitacijski}}{\text{Volumen uzorka}} 100$$

Ograničenja za izračunavanje efektivne poroznosti (n_e) postoje u slijedećim situacijama:

- ⇨ **nepovezanost pora**
- ⇨ **postojanje tzv. mrtvih zona**
- ⇨ **dominiranje pukotina na većoj skali**

Efektivni porozitet (raspoloživ za tok vode) ima važnu ulogu u procesima transporta zagađenja u podzemlju. U nekim slabo poroznim materijalima (npr. glina) razlika između totalnog i efektivnog poroziteta je velika i njihovo točno mjerenje je imperativ.

- **Primarni porozitet** je nastao za vrijeme taloženja sedimenata i uglavnom predstavlja prostor između zrnatog materijala. Njegova veličina ovisi o stupnju sortiranja i obliku deponiranog zrnatog materijala.

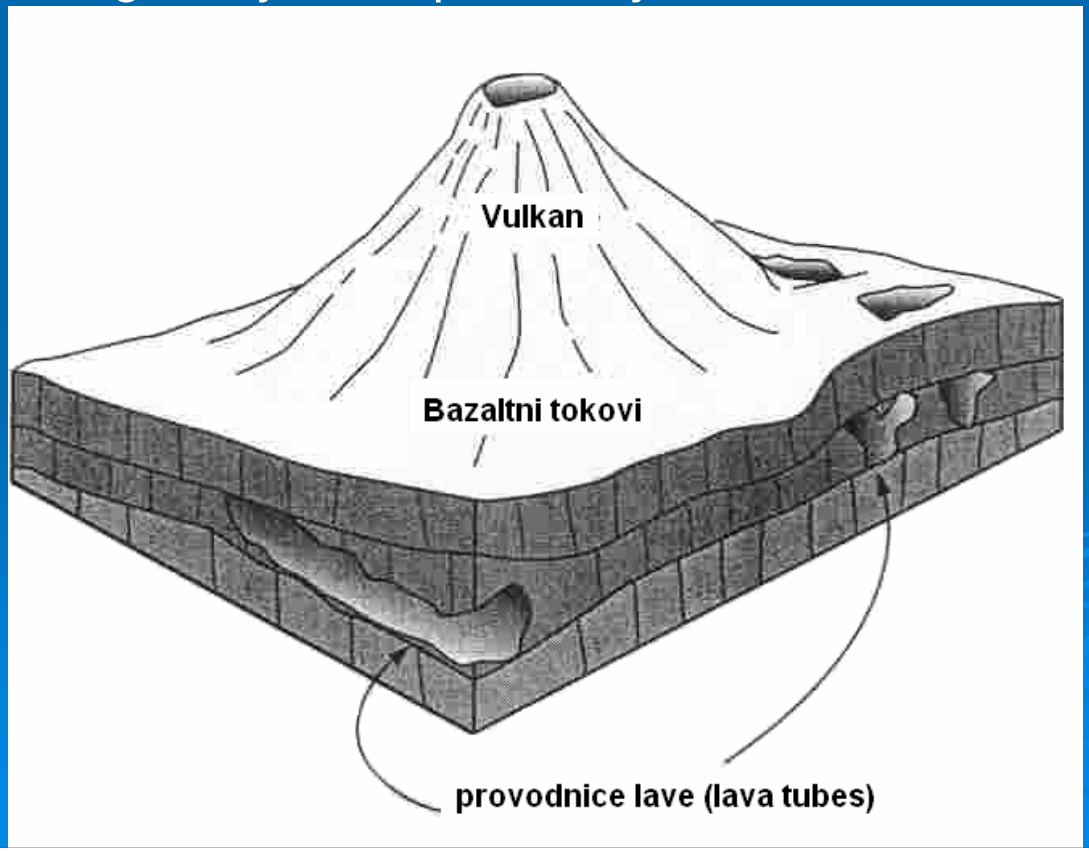
- **Sekundarni porozitet** nastaje hidrološkim i kemijskim procesima nakon formiranja sedimenata. Najčešći procesi koji utječu na sekundarnu poroznost su rastvaranje karbonatnih stijena, pukotine nastale tektonskim pomacima, te ostali procesi vlaženja i rastvaranja stijena kemijskim utjecajem. Sekundarni porozitet doprinosi povećanju efektivne poroznosti

S obzirom na način postanka stijena razlikujemo:

1. **Dolomiti i vapnenci** su najčešće formirani od kalcijevog karbonata, gipsa, kalcijevog sulfata i drugih klorida. Cirkulacija podzemnih voda s vremenom rastvara stijenu prolazeći kroz povezane pore i pukotine.

2. **Stijene metamorfnog** podrijetla su nastale pod jakom toplinom i pritiskom na već postojeće stijene. Njihov porozitet je uglavnom mali i rezultat je procesa vlaženja i pukotina nastalih tektonskim pomacima.

3. **Stijene vulkanskog podrijetla** formirane su hlađenjem lave i u sebi sadrže otvore i pukotine kao rezultat razlike bržeg i sporijeg hlađenja. Ti otvori mogu biti nepovezani i tada malo doprinose protoku vode, dok u slučaju njihove povezanosti mogu predstavljati značajnu trajektoriju za tok vode i pronos zagađenja kroz podzemlje.



U tablici je prikazan srednji porozitet nekih stijena. Vrijednosti su samo indikativnog karaktera, dok stvarne vrijednosti mogu značajno varirati.

Porozna sredina	Ukupna poroznost [%]	Efektivna poroznost [%]
Šljunak	45	40
Pijesak	40	30
Sitni fini pijesak	32	5
Glina	47	0 – 1
Kreda	30	2 – 6
Pješčenjaci	20	5 – 15
Graniti	2	0.2 – 2
Vapnenci	0.5 - 20	0.2 - 10

Primjer sredine u kojoj je ukupni porozitet jednak efektivnom porozitetu su **špekule (franje),** tj. volumen ispunjen špekulama.

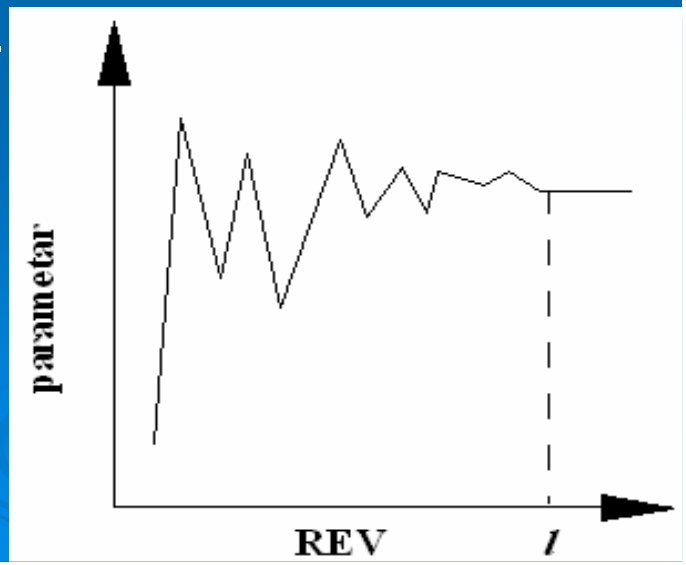
Porozitet u točci je **jedan** ako je točka mjernog instrumenta pala u poru ili je **nula** ako je pala u čvrstu fazu (npr.zrno poroznog materijala).

Tek povećanjem veličine uzorka na neku konačnu skalu, uvodimo obje faze i time porozitet dobiva smisao izraza. Drugim riječima, dajemo matematičkoj točci u prostoru vrijednost poroziteta za određeni volumen koji okružuje tu točku. Ovaj se koncept zove ***reprezentativni elementarni volumen*** (**REV**) i predstavlja vrst prostorne integracije (odnosno osrednjavanja).

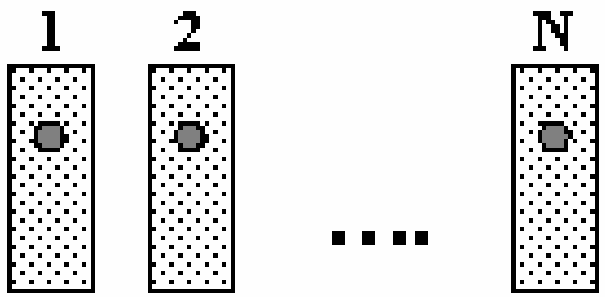
Veličina REV-a **treba zadovoljavati** slijedeća dva uvjeta:

1) dovoljno velika da sadrži dovoljan broj pora kako bi se srednja vrijednost mogla naći uz istodobno zanemariv utjecaj fluktuacija na skali pora (npr.1 *dm*3 za nekonsolidirane materijale).
2) dovoljno malena kako bi se varijacije parametara u prostoru mogle opisati kontinuiranim matematičkim funkcijama.

Praktično se smatra da **veličina REV-a odgovara veličini uzorka kada mjerni parametar (npr.porozitet) dobiva konstantnu vrijednost** u grafu kada je prikazan kao funkcija veličine uzorka (Slika 2.3).



Drugi pristup mjerenju relevantnih fizikalnih karakteristika podzemnih formacija je **koncept slučajne funkcije**. Zamislimo, na primjer, da imamo više uzoraka poroznog medija iste veličine (npr. veliki broj kolona ispunjenih poroznim materijalom), te u svakom uzorku mjerimo porozitet u točci (dakle, mjerimo ili jedan ili nula, ovisno da li je mjerna točka pala u poru ili na zrno materijala). Srednja vrijednost (osrednjena po broju kolona) svih mjerenih poroziteta u točci predstavlja osrednjavanje po realizacijama porozne sredine i jednaka je prostornom osrednjavanju po jednom takvom uzorku. Vrlo bitna razlika je u tome što je osrednjeni porozitet po skupu realizacija jednak za svaku točku uzorka.



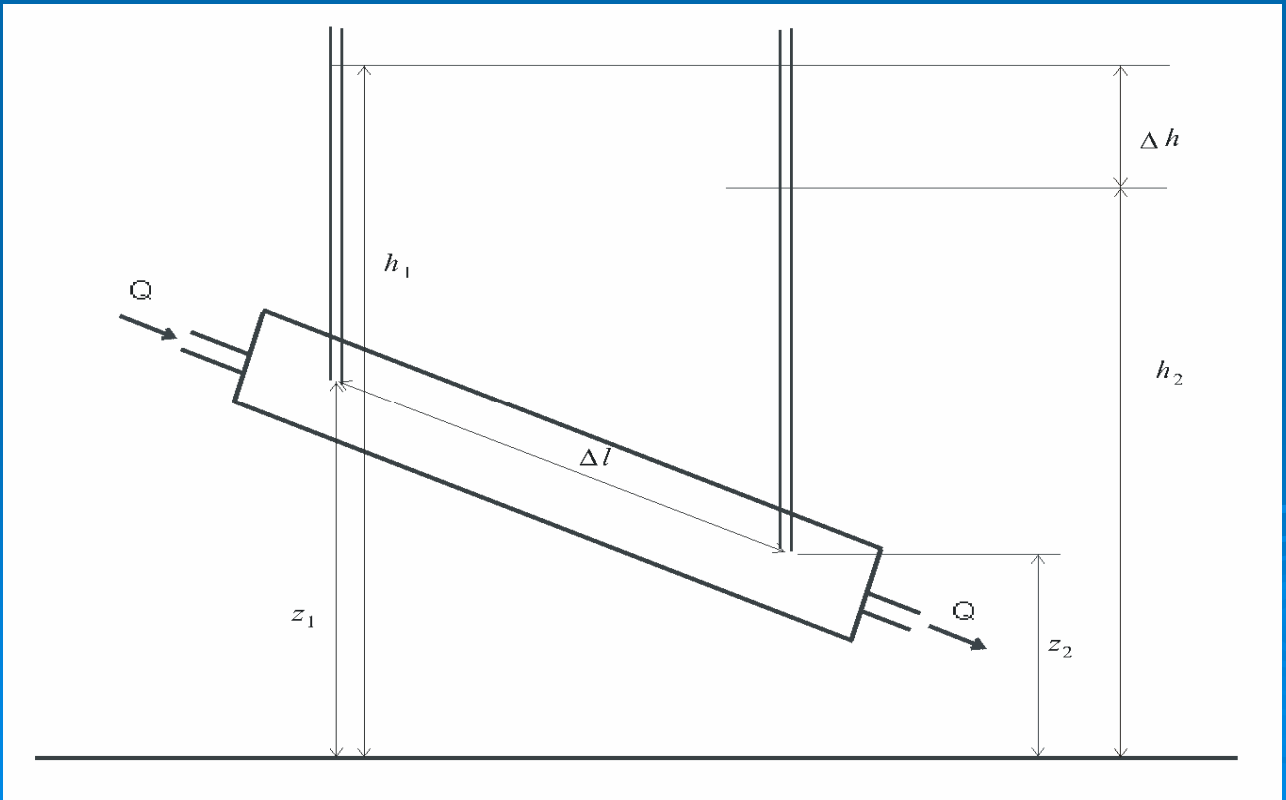
$$\Rightarrow \frac{1}{N}\sum_{1}^{N} i = n \qquad i = 1 \text{ ili } 0$$

2.2. DARCY-ev EKSPERIMENT

- francuski inženjer Henry Darcy
- studija vodoopskrbe grada Dijon-a u Francuskoj
- eksperiment protoke vode kroz cilindar pijeska

Rezultat eksperimenta je slijedeći: protok vode je proporcionalan razlici stupca vode na oba kraja $(Q \propto h_A - h_B)$

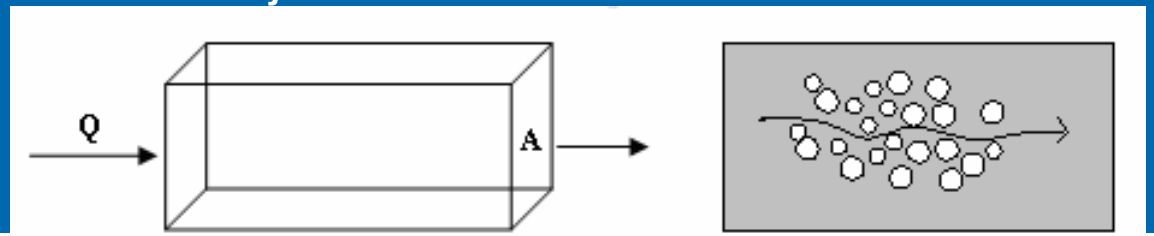
te obrnuto proporcionalan dužini toka vode (npr. dužini cilindra pijeska, $Q \propto 1/L$).

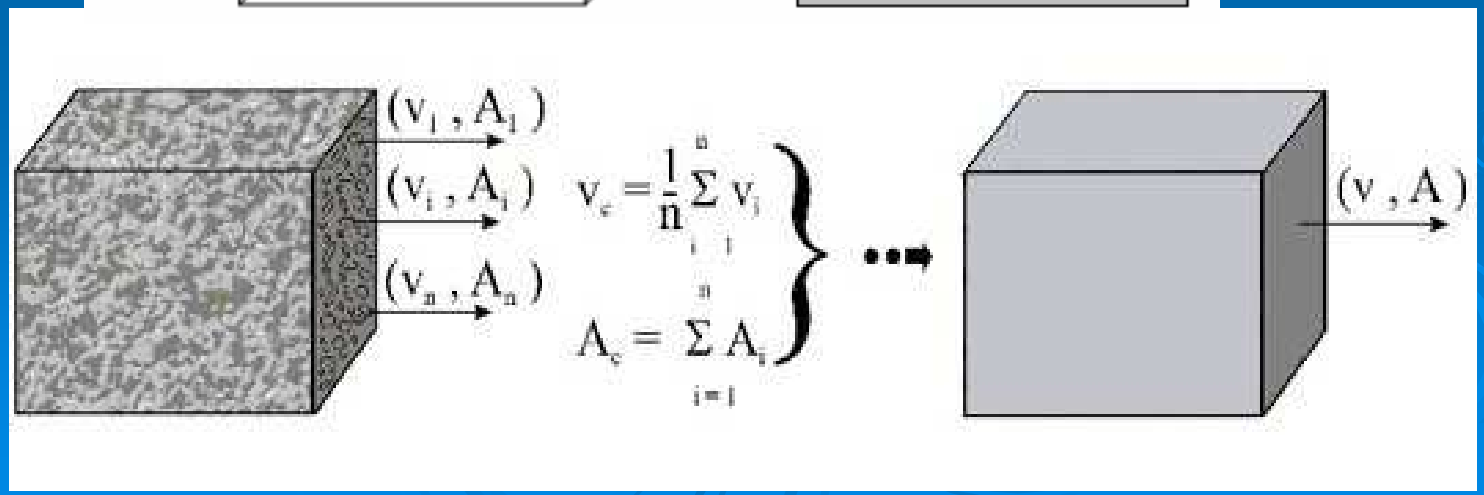


Dakle, Darcy-ev empirijski zakon se može pisati kao: $Q = -KA\left(\frac{h_A - h_B}{L}\right)$

ili u diferencijalnom obliku: $Q = -KA\frac{dh}{dl}$

gdje **dh/dl** predstavlja hidraulički gradijent, **K** je konstanta proporcionalnosti, **A** je poprečni presjek cilindra pijeska. Negativni znak u gornjem izrazu rezultat je tečenja u smjeru opadanja hidrauličkog potencijala. K evidentno mora biti u funkciji poroznog materijala koji ispunjava cilindar, jer će držanjem konstantnog gradijenta, protok varirati za različiti porozni materijal.





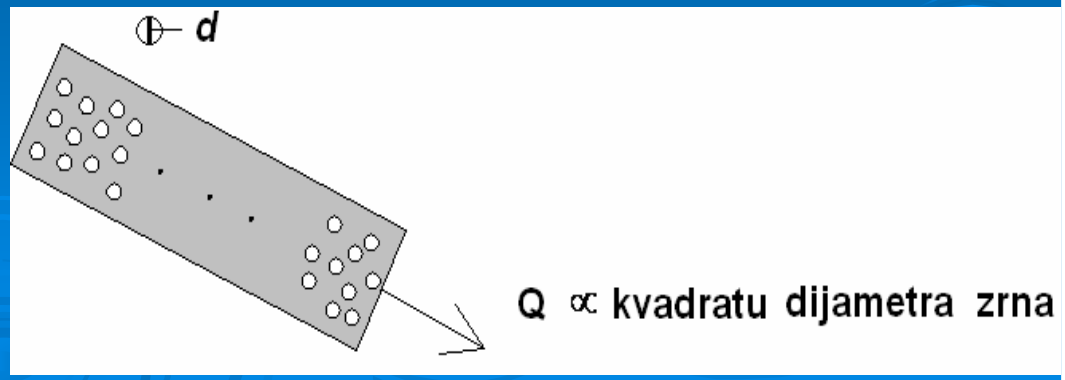
Parametar **K** koji se naziva **hidraulička provodljivost (konduktivitet)** ima veću vrijednost za pijesak i šljunak, a manju za glinu i veliku većinu stijena. Budući je hidraulički gradijent, **K**, bezdimenzionalna veličina, **ima** dimenziju dužina/vrijeme, tj. **dimenziju brzine.**

Darcy-eva konstanta proporcionalnosti, **K, ovisi** ne samo **o vrsti materijala**, već **i o fizikalnoj karakteristici vode** koja prolazi kroz porozni materijal.

Ako bi ponovili Darcy-ev eksperiment sa zrnima materijala jednoličnog dijametra protok vode bi bio proporcionalan kvadratu dijametra zrna

$$Q = -C\frac{d^2\gamma}{\mu}A\frac{dh}{dl}$$

pri čemu **C** predstavlja novu konstantu proporcionalnosti, zvanu **faktor oblika.** *C* i d^2 su karakteristike poroznog materijala, dok su γ i μ karakteristike tekućine.



Sada možemo definirati novi parametar zvani **permeabilitet**, tj. propusnost porozne sredine,

$$k = Cd^2$$

koji je funkcija samo porozne sredine i slobodnim riječima označava veličinu otvora kroz koji tekućina prolazi, k ima dimenziju površine te se konačni oblik Darcy-evog eksperimentalnog zakona može pisati:

$$q = \frac{Q}{A} = -k\frac{\rho g}{\mu}\frac{dh}{dl}$$

Na osnovi ovog izraza, **jedinica za permeabilitet je 1 *darcy*** koji je definiran kao permeabilitet koji rezultira specifičnim protokom q, od 1 [cm^3/s] kroz sekciju od 1 [cm^2] za tekućinu viskoznosti 1 [$10^{-3} Pa\,s$] uz gradijent pritiska od 1 ($atm/cm\,(760\,mm\,Hg/cm)$).
Jedan darcy jednak je 9.87 $\times 10^{-9} cm^2$.

Ako se prisjetimo definicije hidrauličkog potencijala, $h = p/\rho g + z$,
onda se za nestišljivu tekućinu može pisati :

$$q = -\frac{k}{\mu}\nabla(p + \rho g z) = -\frac{k\rho g}{\mu}\nabla h$$

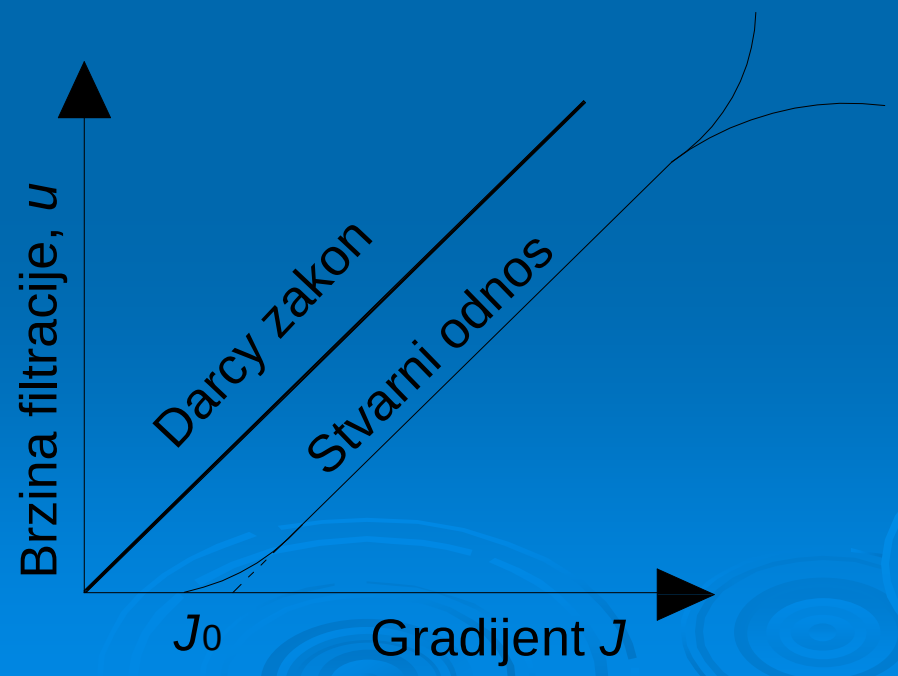
Iz gornjeg izraza definicija hidrauličke vodljivosti je

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\nu}$$

čije su dimenzije iste kao i za brzinu:

$$K = \frac{\left(dužina^{2}\right)\left(masa\ dužina^{-3}\right)\left(dužina\ vrijeme^{-2}\right)}{\left(masa\ dužina^{-1}\ vrijeme^{-1}\right)} = \left(dužina\ vrijeme^{-1}\right)$$

Premda se **Darcy-ev zakon** potvrdio eksperimentalno na raznim primjerima, **postoje slučajevi kada** linearni odnos **ne vrijedi**. To su **slučajevi s vrlo niskim i vrlo visokim hidrauličkim gradijentom**.



U slučajevima visokih gradijenata može se eksperimentalno pokazati da je proporcionalnost između brzine filtracije i gradijenta kvadratnog oblika:

$$\nabla h = \alpha u + \beta u^2$$

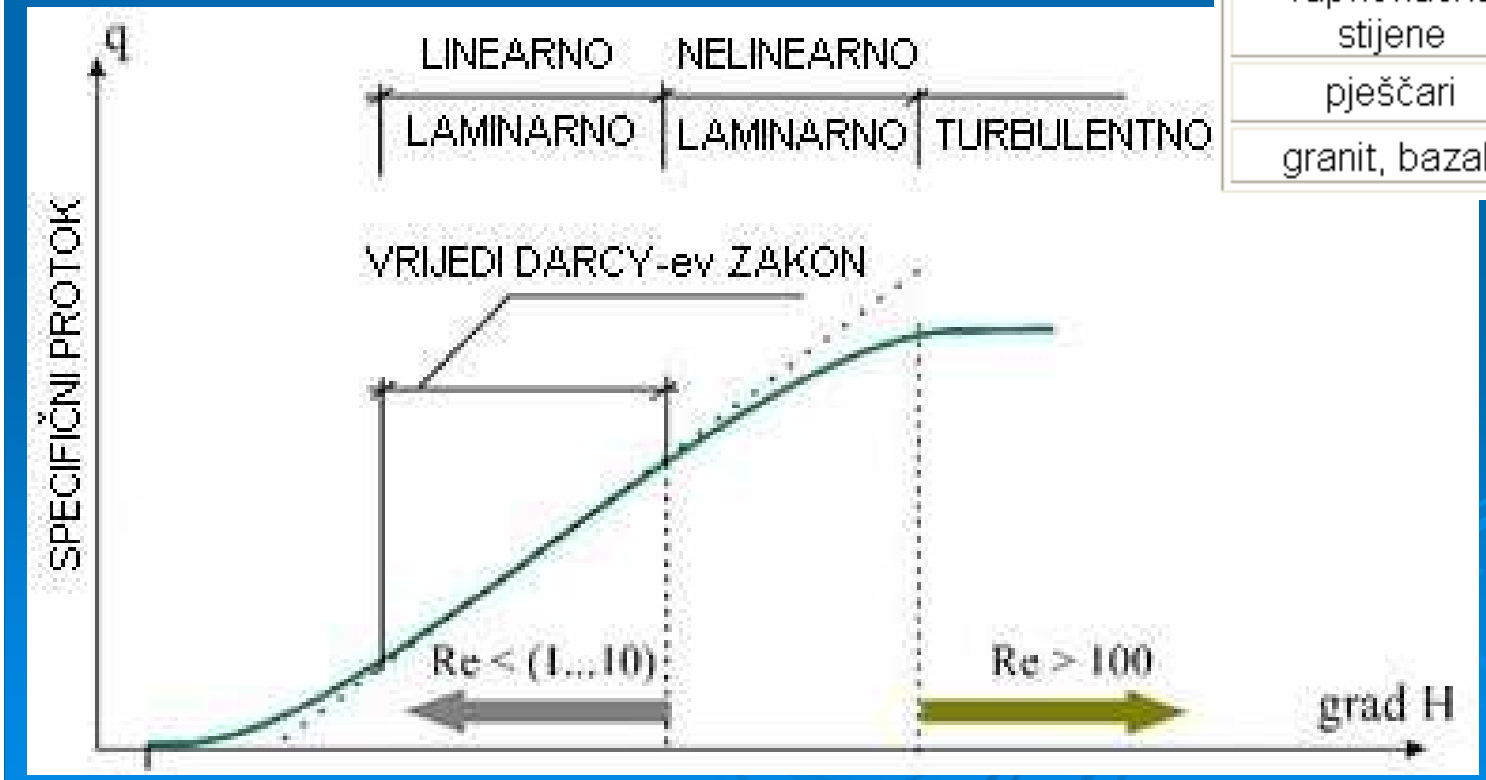
- αu gubici zbog viskoznog trenja
- βu^2 označava gubitke zbog inercije tekućine

U praksi se kaže da **Darcy-ev zakon vrijedi pri Reynolds -ovom broju manjem od limita 1 – 10**. U tim slučajevima tečenje je laminarno unutar pora. Kad R_p **počinje dosezati vrijednosti 10 – 100 dolazi do nestacioniranih pojava i sile inercije nisu više zanemarive** što rezultira nelinearnosti između brzina filtracije i gradijenta - kvadratni oblik u gornjoj jednadžbi počinje dominirati.

Tipičan primjer takvog stanja su <u>tečenja u kršu</u> gdje je disipacija kinetičke energije značajna.

Tablica pokazuje neke približne **raspone hidrauličkog konduktiviteta** za razne vrste poroznih sredina.

Porozna sredina	K (m/s)
krupni šljunak	10^{-1} - 10^{-2}
pijesak i šljunak	10^{-2} - 10^{-5}
fini pijesak	10^{-5} - 10^{-9}
glineni materijali	10^{-9} – 10^{-12}
dolomiti	10^{-3} – 10^{-5}
krednjaci	10^{-3} - 10^{-5}
vapnenačke stijene	10^{-5} - 10^{-9}
pješčari	10^{-4} – 10^{-10}
granit, bazalt	10^{-9} – 10^{-13}



3. GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

- Geofizika istražnih bušotina je znanstvena disciplina mjerenja i analize različitih karakteristika podzemnih geoloških formacija koje bušotina presijeca. Sinonimi u stranoj tehničkoj literaturi su "**geophysical logging**" i "**well logging**", a cijela znanstvena disciplina nastala je iz potreba naftne industrije.

- **Identifikacija geoloških formacija, lokacija i količina podzemne vode te prognoza kapaciteta vodonosnih slojeva** česti su ciljevi u geofizičkim istraživanjima.

- Geofizika istražnih bušotina sastoji se od mehaničkih (pasivnih) metoda, raznih električnih metoda mjerenja koje uključuju električni otpor i potencijal, nuklearnih metoda (gama-gama, neutron), akustičnih metoda i metoda mjerenja magnetskih i termalnih karakteristika.

- Geofizički zapis može se obavljati na otvorenim bušotinama i onima čije su stjenke obložene. **Dobiveni podaci koriste se za identifikaciju raznih karakteristika porozne sredine koje su bitne za inženjerske odluke** o gradnji kako podzemnih, tako i nadzemnih hidrotehničkih objekata.

- Pravilnim odabirom geofizičkih metoda ubrzava se i poboljšava istraživanja. Smanjuje se broj istražnih bušotina (jedne od najskupljih istražnih metoda), a ujedno se istražne bušotine lociraju na najoptimalnije mikrolokacije tj. one koje će dati najviše podataka o ispitivanom terenu.

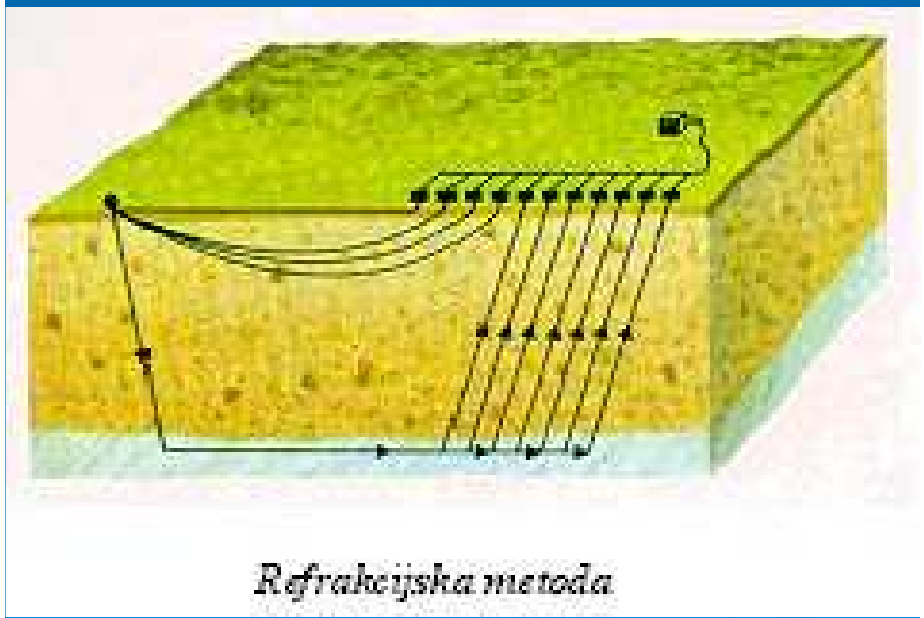
METODA	MJERENA VELIČINA	OGRANIČENJA	PRIMJENA
GEOELEKRIČNA ISPITIVANJA			
GEOELEKRIČNO SONDIRANJE	OTPORNOST	PRISUSTVO PODZEMNIH I NADZEMNIH INSTALACIJA I GRAĐEVINA. PREVELIK OTPOR UZEMLJENJA ELEKTRODA JAKO RAZVEDENA TOPOGRAFIJA	KARTIRANJE LATERALNIH I VERTIKALNIH PROMJENA OTPORNOSTI TLA I STIJENA. ODREĐIVANJE DEBLJINE, LITOLOGIJE I TEKTONIKE NASLAGA. LOCIRANJE I KARTIRANJE KANALA, JAMA, SPILJA. VODOISTRAŽNI RADOVI
GEOELEKRIČNO PROFILIRANJE			
GEOELEKTRIČNO PROFILIRANJE LIS METODOM			
KAROTAŽA:			
GAMA-GAMA	GUSTOĆU		KARTIRANJE ISTRAŽNE BUŠOTINE, OMOGUĆUJE SAZNANJA O LITOLOGIJI, GRANICAMA SLOJEVA, POROZITETU, GUSTOĆI, VODLJIVOSTI, OTPORNOSTI I ZAGLINJENOSTI NASLAGA
DUAL NEUTRON	POROZITET	ZA TOČAN POROZITET BUŠOTINA MORA BITI ZAPUNJENA FLUIDOM	
NEUTRON	ODNOS POROZITETA		
GAMA	ZAGLINJENOST		
ELEKTRO	OTPORNOST, SPONTANI POTENCIJAL	ZACJEVLJENJE BUŠOTINE,POTREBAN FLUID U BUŠOTINI	
INDUKTIVNA	VODLJIVOST	ZACJEVLJENJE METALNIM CJEVIMA	
PH-TEMPERATURA	PH+TEMPERATURA		
SEIZMIČKA ISPITIVANJA			
REFRAKCIJA	BRZINA LONGITUDINALNOG I TRANSFERZALNOG VALA	VISOK NIVO ŠUMA, SLAB KONTRAST BRZINA MEĐU SLOJEVIMA, INVERZNE BRZINE, KONTINUIRANI PORAST BRZINA S DUBINOM,	KONTINUIRANO PRAĆENJE PROSTORNOG RASPOREDA I PROMJENA U KVALITETI TLA I STIJENA. ODREĐIVANJE STUPNJA OKRŠENOSTI I KVALITETE STIJENSKE MASE ODREĐIVANJE DINAMIČKIH MODULA TLA I STIJENA
DOWN (UP) HOLE		LOŠ ZASIP IZMEĐU ZACJEVLJENJA I STIJENKE BUŠOTINE	ODREĐIVANJE DINAMIČKIH MODULA TLA I STIJENA. ODREĐIVANJE GRANICE SLOJEVA I KVALITETE TLA I STIJENA
CROSS HOLE			
ULTRAZVUK		DIMENZIJE UZORKA	ODREĐIVANJE DINAMIČKIH MODULA TLA I STIJENA

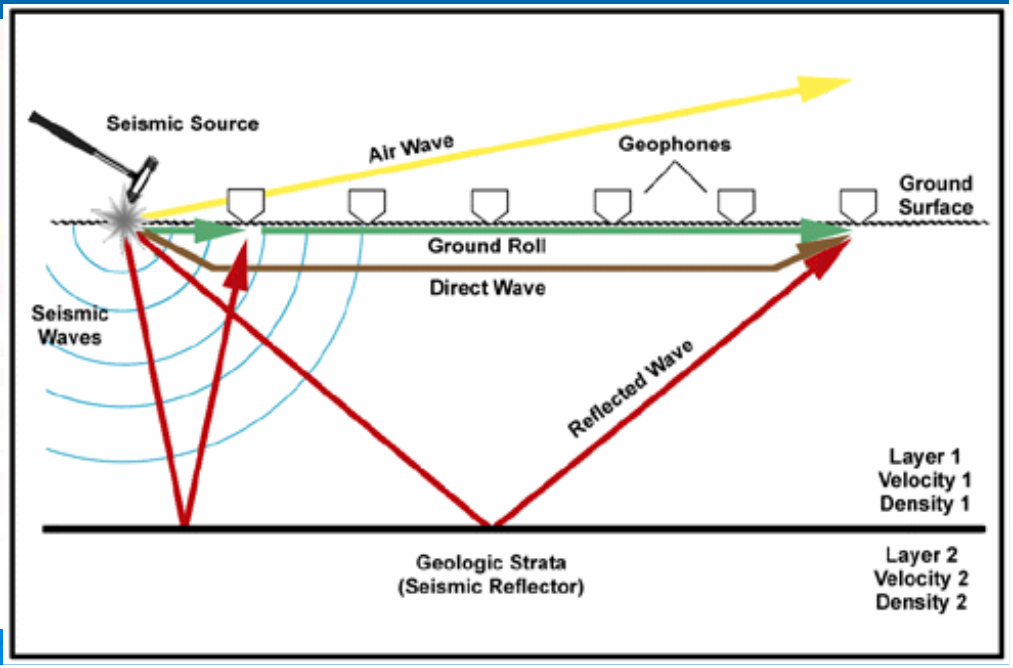
3.1. SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA

- Seizmička istraživanja **se temelje na generiranju seizmičkih valova** i **analizi njihovih širenja kroz poroznu sredinu**. Mjerenjem brzine širenja tih valova te njihovog prigušenja u poroznoj formaciji dobiva se informacija o mehaničkim karakteristikama stijene.

- Općenito, seizmička istraživanja **koriste se za određivanje dubine do čvrste stijene, određivanje litološke strukture, nagib slojeva te dubina do nivoa podzemne vode.**

- Izvor energije za manje dubine istraživanja može se izazvati udarcem čekića na metalnu ploču, a za veće dubine eksplozivom.





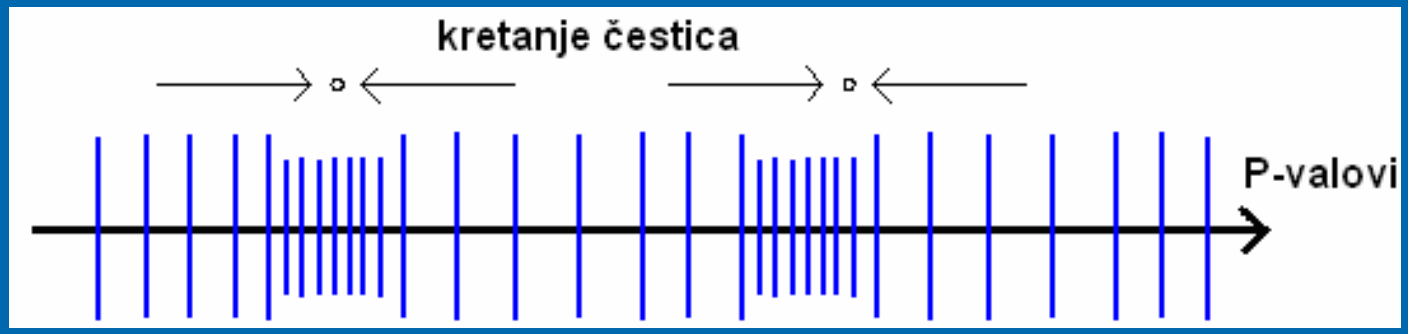
Na površini terena, po profilu, na određenoj udaljenosti od izvora postavljaju se odgovarajući **geofoni** koji registriraju valove (titraje) te ih pretvaraju u električne napone.

Tehničke karakteristike vertikalnih geofona:

- Prirodna frekvencija . . . . . 10 Hz
- Frekventna tolerancija . . . . . 5 %
- Max.kut nagiba 250
- Otpor zavojnice . . . . . 375 Ohma +/- 5 %
- Totalno prigušenje . . . . . 0.60 +/- 5 %
- Osjetljivost . . . . . 29 V/m/s +/- 5 %
- Masa (pokretna) . . . . . 0.011 Kg

Postoje dvije osnovne vrste seizmičkih valova:

- **P valovi** koji se još nazivaju longitudinalni, valovi kompresije ili primarni valovi. Pokretanje čestica je u smjeru širenja i ovisi o sukcesivnoj kompresiji ili dilataciji.

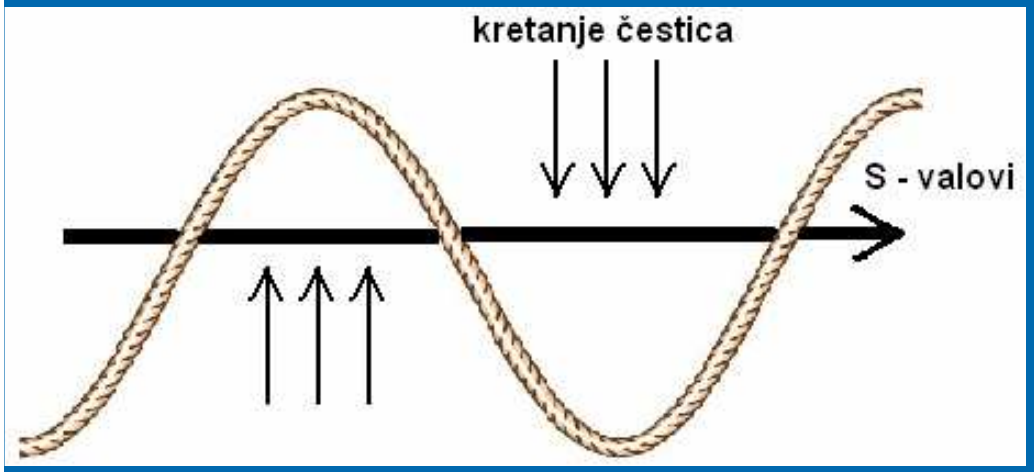


Brzina širenja tih valova može se izraziti preko osnovnih parametara elastičnosti koji se koriste prilikom projektiranja i izvođenja hidrotehničkih građevina.

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

pri čemu je ρ prostorna gustoća smjese, k , označava prostorni dinamički modul,a μ je dinamički modul smicanja.

➢ **S valovi** nazivaju se također poprečni, torzioni ili sekundarni valovi. Oni se registriraju nakon dolaska primarnih valova. Kretanje čestica je okomito smjeru širenja primarnih valova.



Brzine P i S valova u tlu i stijenama		
Materijal	P-valovi brzina (m/s)	S-valovi brzina (m/s)
Zrak	332	
Voda	1400-1600	
Granit	5500-5900	2800-3000
Bazalt	6400	3200
Pješčenjak	1400-4300	700-2800
Vapnenac	5900-6100	2800-3000
Pijesak (saturiran	200-1000	80-400
Pijesak (suh)	800-2200	320-880
Površinska trošna zona	300-900	120-360

Brzina širenja *S*-valova se također može izraziti kao funkcija parametra elastičnosti:

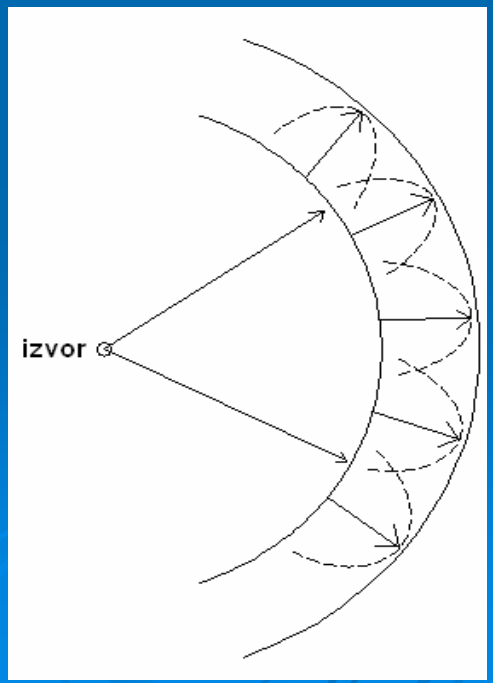
$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

te se oba izraza koriste za određivanje potrebnih parametara elastičnosti. Modul smicanja je praktično nula u tekućini tako da se *S*-valovi ne šire u vodi. Općenito *P*-valovi imaju manju amplitudu nego *S*-valovi, ali se zato brže šire i prvi su koji stižu do postavljenih geofona.

POVRŠINSKA SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA

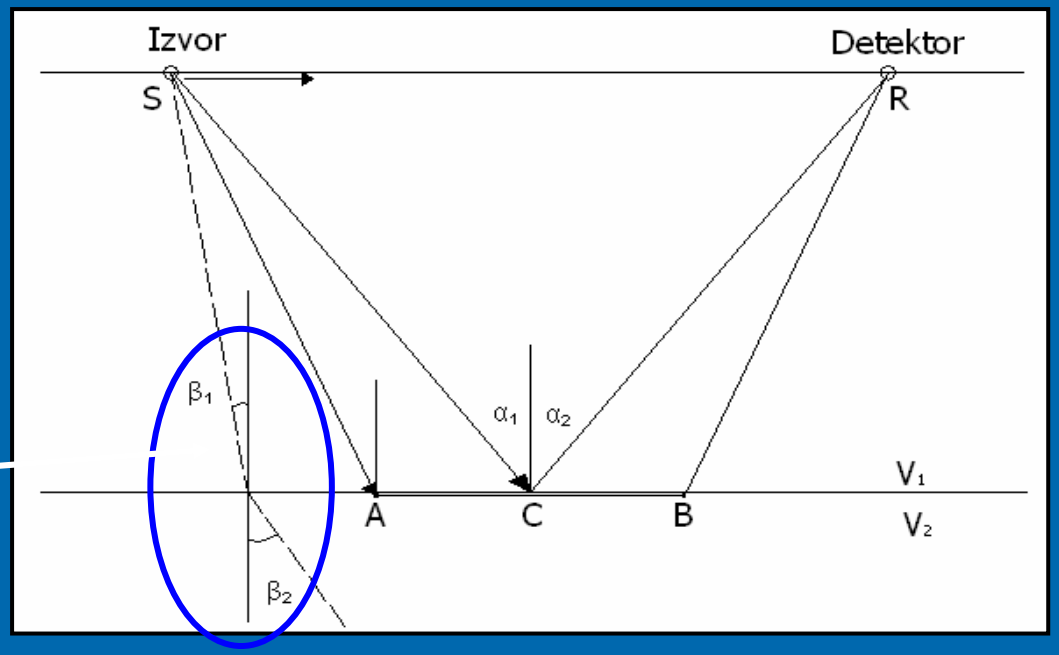
- Primijenjena seizmologija jako je razvijena praktična disciplina u naftnoj industriji gdje se seizmičke refleksijske metode dosta koriste. Nasuprot naftnoj industriji, **u hidrogeologiji, su seizmičke refrakcijske metode korisnije i predmet su geofizičkih istraživanja.**

- Seizmički valovi se šire slično kao i svjetlost, a i ponašaju se po istom zakonu - ***Huygens-ov zakon***. Ovaj zakon opisuje širenje valova kao koncentričnih krugova. Svaka točka u kontaktu s frontom vala postaje izvor valova za daljnje točke te svaka čestica koja oscilira prenosi svoje kretanje na okolne čestice.



➢ Drugi zakon koji je važan u analizi seizmičkih istraživanja je ***Decartes-ov zakon*** koji se odnosi na kutove označene na slici

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

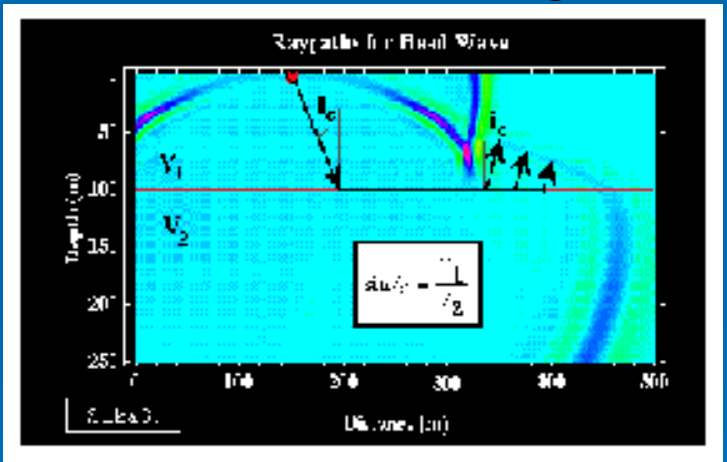


Promotrimo primjer s dvije litološke formacije u podzemlju kao što je prikazano na slici. Za valove generirane u izvoru *S*, postoje tri vrste valova koje postavljeni geofoni mogu registrirati.To su:

1. **Direktni valovi**, SR, koji ostaju u mediju 1
2. **Reflektirani valovi**, SCR, koji su locirani u mediju 1, ali su u doticaju s točkom C u mediju 2
3. **Refrakcijski valovi**, SABR, koji se šire u mediju 2, nakon što su prošli kroz medij 1

➢ **Refrakcijska metoda** temelji se na refrakciji elastičnih seizmičkih valova na kontaktu dviju sredina čije seizmičke karakteristike zadovoljavaju uvjet, $V_2 > V_1$. Elastični val generira se na površini i počinje se širiti brzinom gornje površinske zone.

➢ Za ovu metodu od presudne je važnosti da val koji prolazi kroz gornju površinsku zonu stigne na granicu diskontinuiteta G pod kritičnim kutom 'i', kutom totalne refrakcije. On se dalje širi duž tog kontakta brzinom donjeg medija V_2 i vraća se na površinu (prema Hygensovom principu), gdje se njegov nailazak registrira **geofonima**.



➢ Za uspješnu primjenu metode seizmičke refrakcije u određivanju granica različitih sredina po dubini treba postojati tzv. normalan slijed brzina, što znači da se materijali veće brzine elastičnih valova trebaju nalaziti ispod onih s manjom brzinom. U obrnutom slučaju ne može doći do totalne refrakcije valova duž plohe diskontinuiteta.

Rezultati seizmičko refrakcijskih mjerenja obrađuju se na osobnim računalima GRM metodom po Palmeru (eng. Generalized Reciprocal Method, Palmer, 1981 i 1991). Analizom prvih nailazaka elastičnih valova u S-T dijagramu, dobivaju se dromokrone uzdužnih valova.

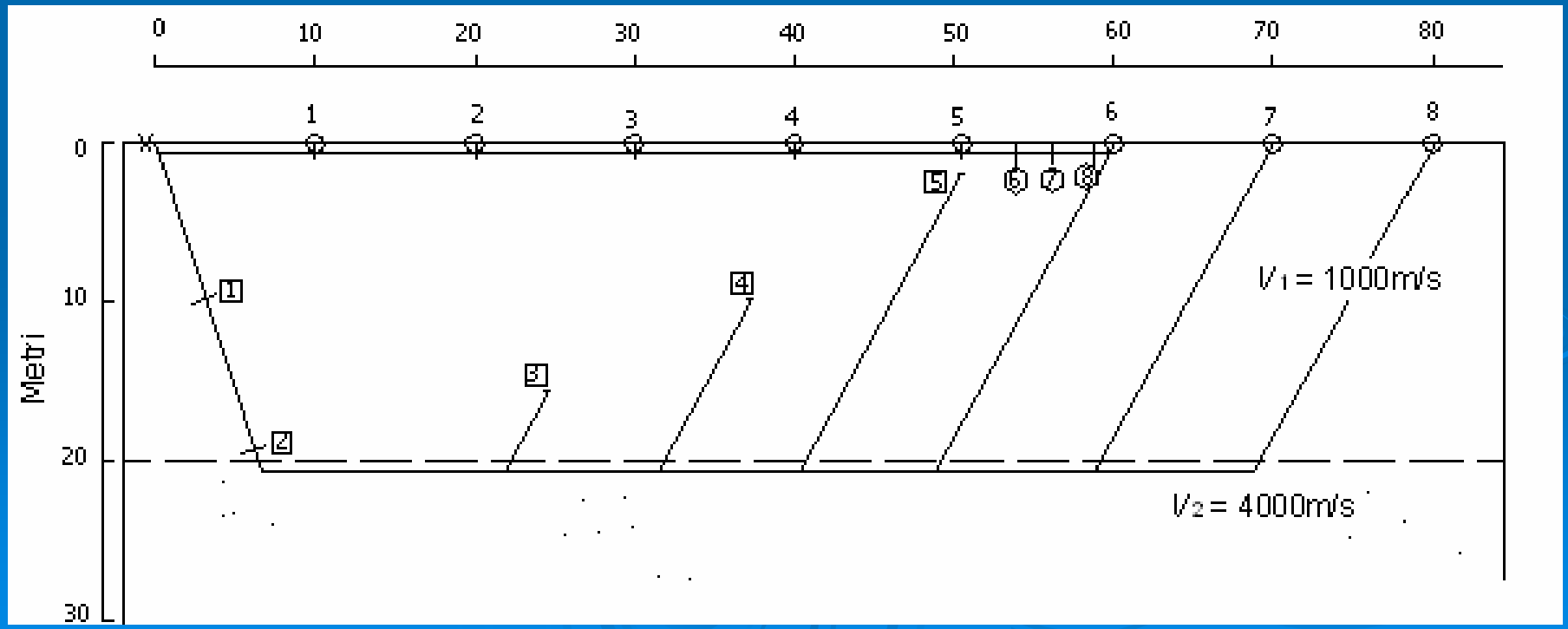
Iz njih se izračunaju brzine i debljine zona različitih seizmičkih karakteristika. Kontinuirano se prate dubine do pojave seizmičkih diskontinuiteta, odnosno lateralne promjene vezane uz izmjene litoloških članova po kvaliteti i vrsti, kao i pojave rasjednih zona i jače rastrošenih zona u osnovnoj stijeni.

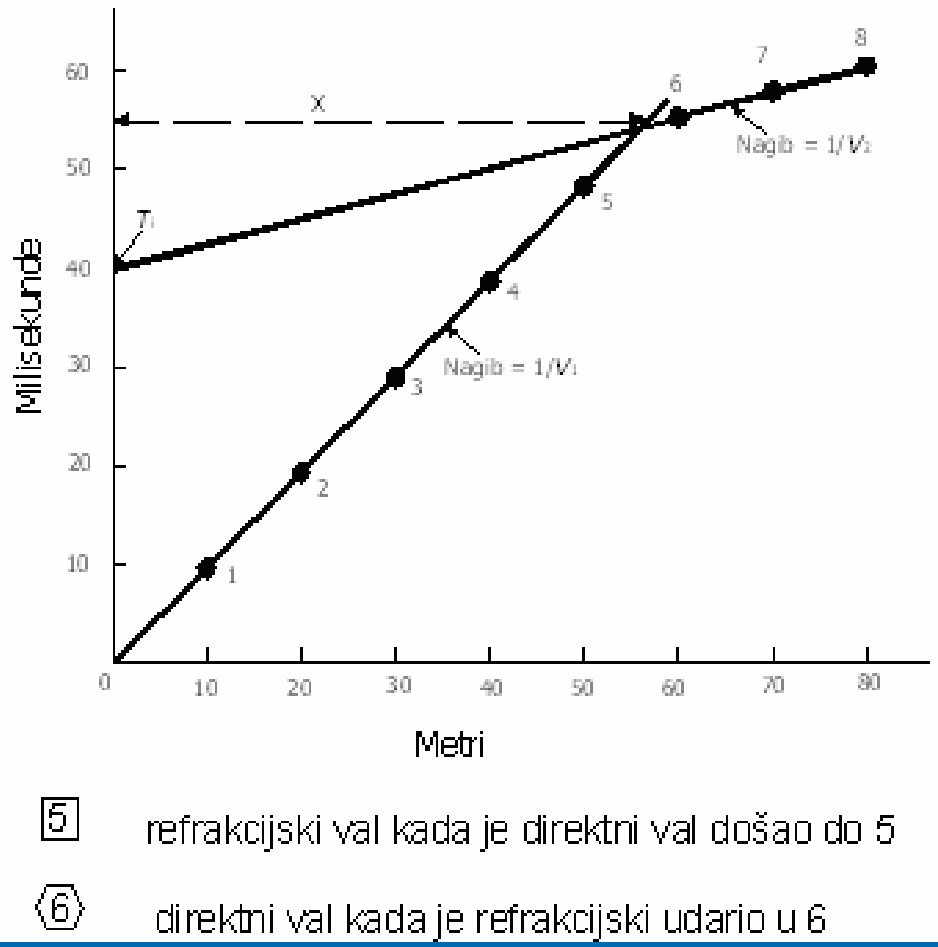
- Veza između vrste i kvalitete, litoloških članova, i brzine prostiranja elastičnih valova ocijeni se iz empirijski određenih vrijednosti. Detaljnija litološka slika dobije se u kombinaciji sa geološkom prospekcijom i bušenjem.

- Na presjecima su po dubini ucrtane granice promjene brzine P vala u materijalima. Brzina je u pojedinim sredinama i upisana. Također su označena i mjesta lateralnih promjena ovih brzina, te mjestimično pojedine zone za koje se može sigurnije pretpostaviti da su intenzivno razlomljene.

Za slučaj totalne refrakcije, vrijedi $\beta_2 = 90^\circ; \Rightarrow \sin\beta_1 = V_1/V_2$.
Pri tom slučaju totalne refrakcije, kut $\beta_2 = \beta_L$ zove se kritični kut refrakcije i može se izračunati poznavanjem brzine širenja valova u dvije formacije.

➢ Postavljeni geofoni na profilu terena primaju valove iz izvora koji se šire direktno kroz gornji sloj te se na osnovu vremena putovanja i udaljenosti geofona dolazi do brzine širenja. Drugi valovi čiji koncentrični krugovi idu prema dubljim slojevima – imaju duži put. Međutim, **u slučaju donjih slojeva s većom brzinom širenja valova, ti valovi mogu putovati brže od direktnih valova, za neke udaljenije geofone.**



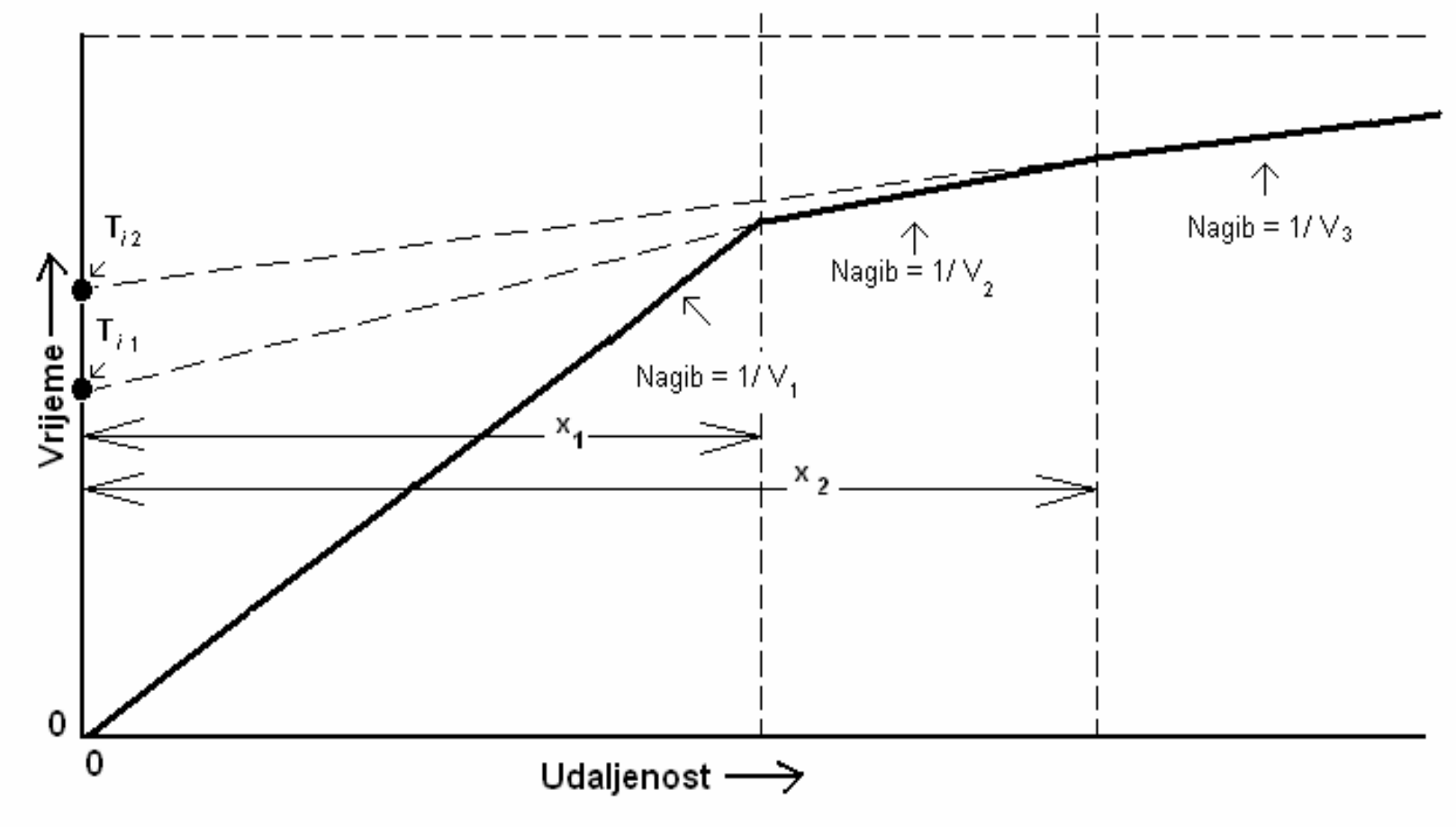


- Na slici je prikazan slučaj s **dva sloja porozne formacije i 8 postavljenih geofona na površinskom profilu** terena. Nakon obavljenih mjerenja vremena putovanja valova do postavljenih geofona, iscrtava se krivulja vremena putovanja i udaljenosti geofona. Projekcija druge linije, odnosa vremena putovanja i udaljenosti, na ordinatu označava vrijeme sjecišta, T_i .

- Također, udaljenost do loma nagiba na istom grafu pokazuje udaljenost, *X*, kada je brzina širenja direktnih valova i onih koji prolaze kroz donju formaciju jednaka. Iz tih podataka dobiva se izraz za određivanje dubine donjeg sloja:

$$Z = \frac{T_i}{2} \frac{V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \qquad Z = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_1 + V_2}}$$

➢ Češći slučaj u hidrogeologiji je kad se istražuje **podzemna formacija sastavljena od više slojeva (npr. 3 i više),** od kojih je prvi nekonsolidirani i nezasićeni sloj. Drugi sloj je geološki jednak, ali zasićen, te zbog prisutne vode ima veću seizmičku brzinu. Treći sloj je čvrsta stijena. U opisanom slučaju, **seizmička metoda osim dubine slojeva, može se koristiti za određivanje nivoa podzemne vode**. Slučaj seizmičke refrakcije za poroznu formaciju od tri sloja prikazan je na slici, pri čemu vrijedi $V_1 < V_2 < V_3$.

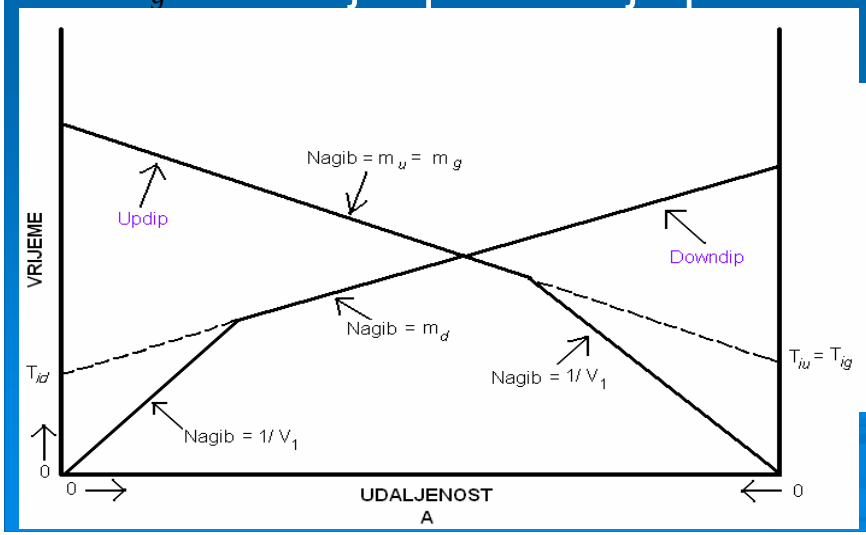


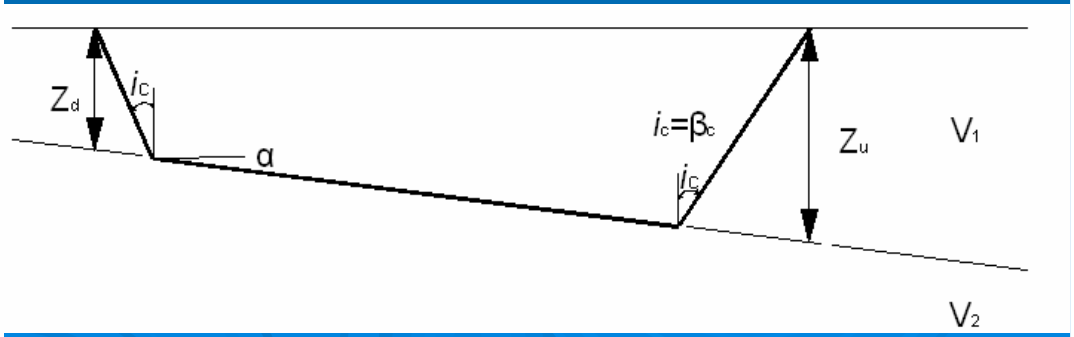
Presjecište na ordinati za svaki dublji sloj, kao i udaljenost loma odnosa vrijeme-udaljenost, odredi se, da bi se konačno procijenila dubina Z_2 po izrazu:

$$Z_2 = \frac{1}{2}\left(T_i - 2Z_1 \frac{\sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_3 V_1}\right)\left(\frac{V_2 V_3}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}\right)$$

Dubina prvog sloja, Z_1, treba se odrediti prije računanja dubine drugog sloja. Izračunate brzine širenja seizmičkih valova kao reciprocitet nagiba krivulje vrijeme-udaljenost zovu se **efektivne brzine** koje <u>samo u slučaju horizontalnih slojeva ujedno predstavljaju i stvarne seizmičke brzine.</u>

- Na slici je prikazan način određivanja nagiba slojeva. Brzina širenja valova kroz gornji sloj je neporemećena s nagibom donjeg sloja i može se izračunati iz reciprociteta nagiba krivulje vrijeme - udaljenost. Nagib druge linije u krivulji vrijeme-udaljenost je m_d za profiliranje u smjeru pada i m_g za smjer profiliranja prema usponu donjeg sloja.





Refrakcijski kut β_c se tada izračunava prema izrazu: $\beta_c = \frac{1}{2}\left(\sin^{-1} V_1 m_d + \sin^{-1} V_1 m_g\right)$

te se **brzina širenja valova u donjem sloju** dobije kao: $V_2 = \frac{V_1}{\sin \beta_c}$

Kut pružanja donjeg sloja izračunava se prema izrazu:

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(\sin^{-1} V_1 m_d - \sin^{-1} V_1 m_g\right)$$

tako se, konačno, dubine do donjeg sloja na oba kraja seizmičkog profila izračunavaju prema izrazima:

$$Z_g = \frac{V_1 T_{i_g}}{(\cos\alpha)(2\cos\beta_c)} \qquad Z_d = \frac{V_1 T_{i_d}}{(\cos\alpha)(2\cos\beta_c)}$$

Slični, istina algebarski kompleksniji, izrazi, koriste se kod tri i više slojeva koji imaju nagib u pružanju.

- **Interpretacija seizmičkih površinskih istraživanja** usredotočena je na **opis litologije podzemlja**, te **geometrijskoj konfiguraciji slojeva**. Korištenjem opisane refrakcijske seizmike, **debljina nekonsolidiranih slojeva te nivo podzemne vode**, također se može procijeniti kao dodatna informacija korisna pri projektiranju i temeljenju hidrotehničkih građevina. Osnovni nedostatak površinske seizmike je uvjet da svaki dublji sloj mora imati brzinu širenja veću od gornjeg.

SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA U BUŠOTINAMA

- Slični principi seizmičkih mjerenja vrše se i **u bušotinama**. Tu se, također, mjeri brzina širenja valova i to uglavnom *P*-valova.

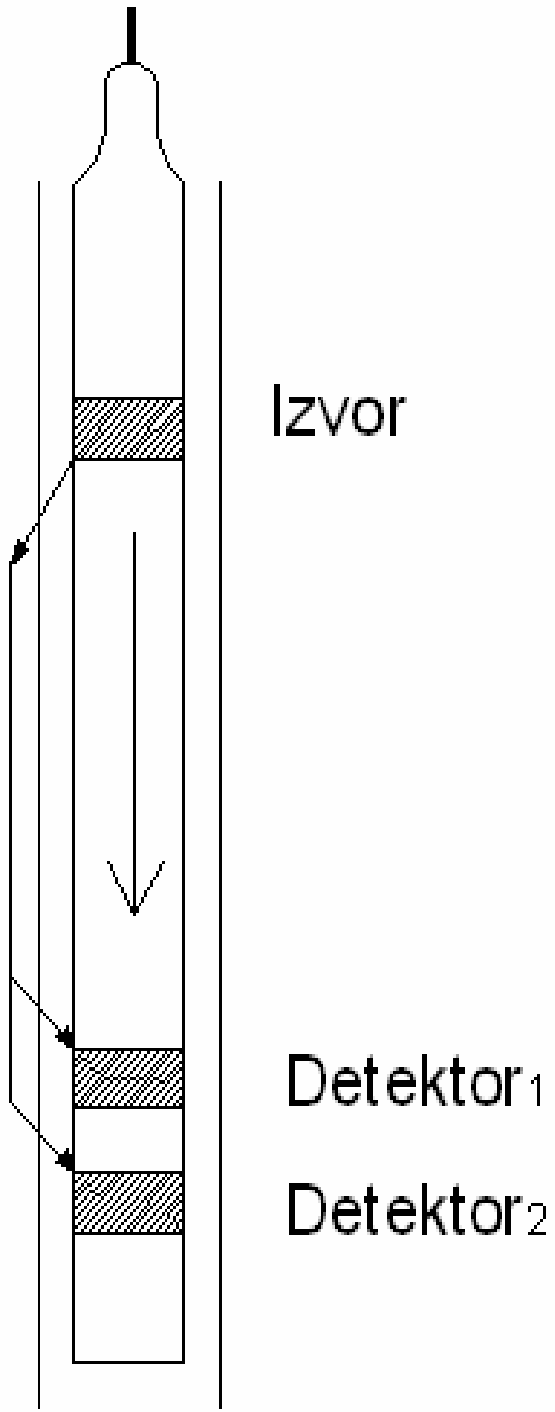
- Seizmički **valovi se mijenjaju ovisno o elastičnim svojstvima stijene i općenito porozne formacije**. Oni su funkcija stupnja zacementiranosti i brzina širenja manja je za nekonsolidirane materijale nego za čvrste stijene.

- **Seizmičke brzine opadaju s porastom poroziteta dok se uz prisustvo vode (saturirana sredina), valovi šire povećanom brzinom.**

- Mjerenjem brzine valova u formaciji moguća je (za saturiranu stijensku masu) procjena poroziteta korištenjem slijedećeg izraza:

$$\frac{1}{V_r} = \frac{\varphi}{V_f} + \frac{(1-\varphi)}{V_m}$$

pri čemu V_r označava brzinu formacije mjereno instrumentom, V_m je brzina same stijenske mase bez pora i vode, V_f je brzina tekućine u stijeni, dok φ označava porozitet.



- Instrument se najčešće sastoji od izvora zvuka te jednog ili više senzora koji registriraju vrijeme putovanja signala.

- Direktni valovi dolaze putujući kroz bušotinu, dakle, u funkciji su brzine širenja valova kroz tekućinu koja se nalazi u bušotini.

- Refrakcijski valovi prolaze kroz stijensku masu i njihova brzina širenja ovisi o tipu i sastavu stijene.

- Budući je dužina putanje kroz tekućinu u stijeni jednaka porozitetu, može se pisati:

$$\Delta t_r = \varphi \Delta t_f + (1-\varphi)\Delta t_m$$

gdje Δt označava vrijeme putovanja po jedinici dužine (npr. 1m). Iz toga slijedi izraz za procjenu poroziteta:

$$\varphi = \frac{\Delta t_r - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}$$

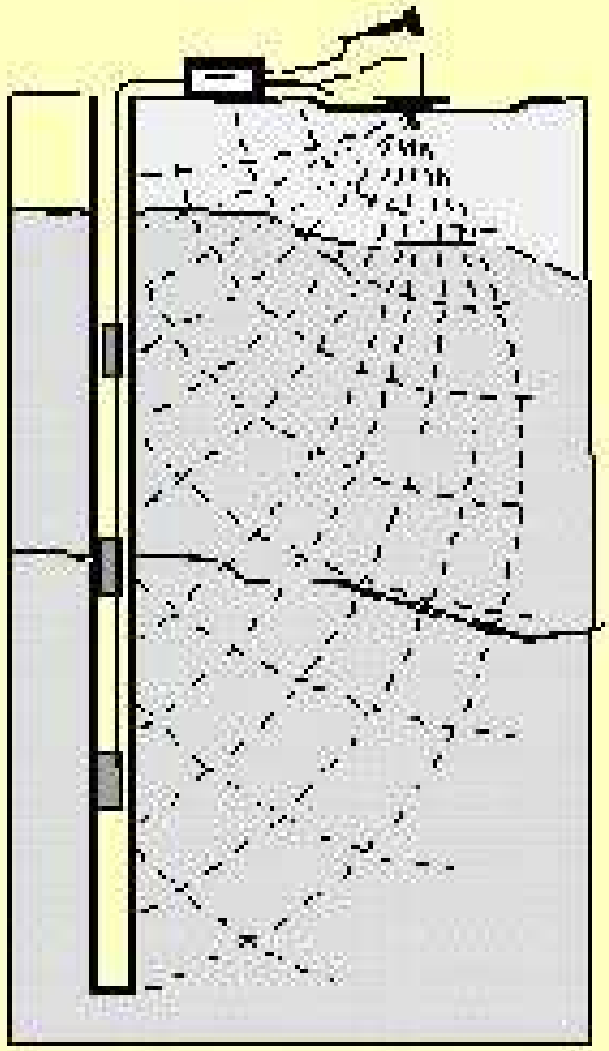
DOWNHOLE I UPHOLE ISPITIVANJA

- **Downhole** ispitivanje je seizmička metoda koja omogućuje direktno mjerenje intervalnih brzina elastičnih valova u geološkim formacijama **duž bušotine po dubini**.

- Metoda koristi kao izvor vala udarac čekićem po ploči uz ušće ili u neposrednoj blizini ušća bušotine. Valovi se šire kroz podzemlje do geofona koji su smješteni u bušotini. Geofoni su ekvidistantno razmješteni po dubini u optimalnim intervalima.

- Prednost metode pred refrakcijskom seizmikom je mogućnost dobivanja intervalnih brzina i u formacijama koje imaju inverzni raspored seizmičkih brzina sa dubinom ($V_1 > V_2$), a samim time i **otkrivanje tzv. slijepih zona**.

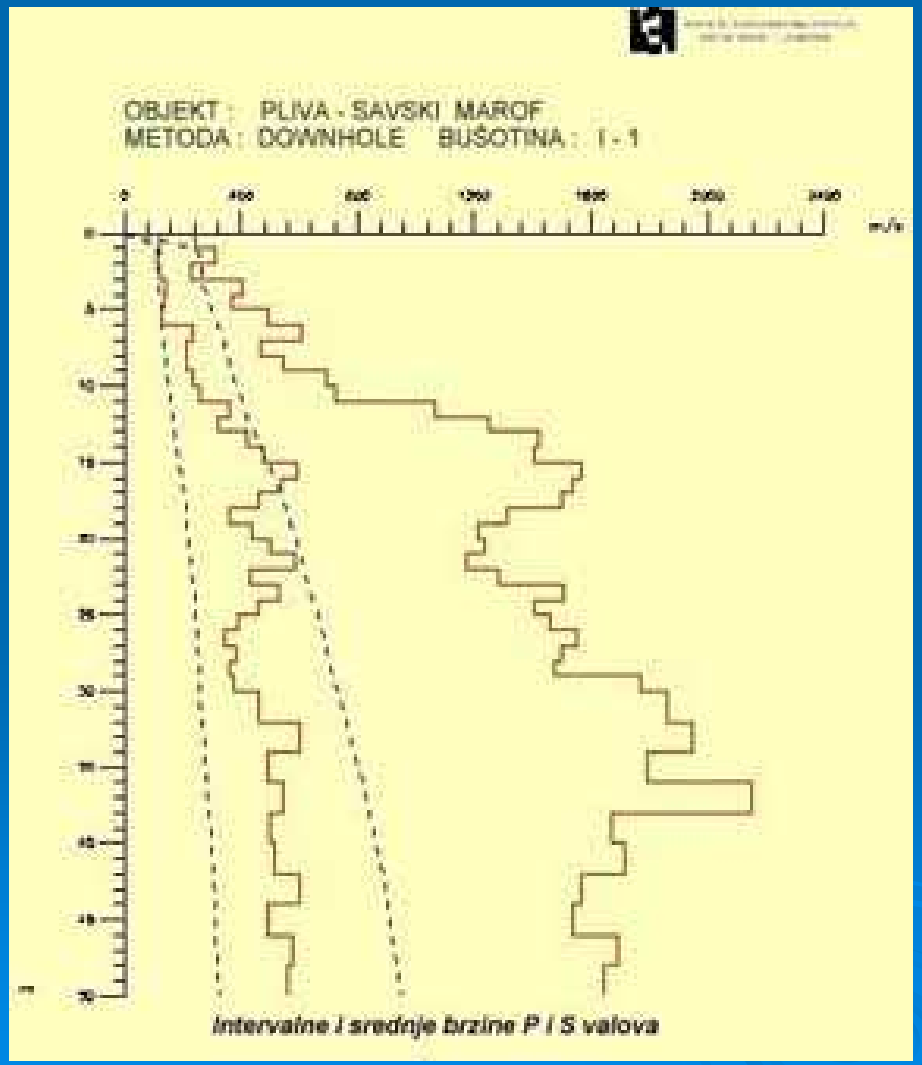
- Downhole ispitivanja rade se trokomponentnim geofonima vlastite frekvencije 14 Hz. Seizmički impulsi generiraju se čekićem mase 10 kg. Generiraju su uzdužni i poprečni valovi. Postupak generiranja kao i registracija valova radi se za svaku vrstu vala posebno.



Downhole metoda

- Kod dubljih bušotina koristi se obično **uphole metoda**, kod koje se seizmički impulsi generiraju eksplozivom u bušotini, a nailasci se snimaju na površini uz ušće bušotine.

- **Downhole metoda** zajedno **sa drugim seizmičkim metodama**, npr. refrakcijom urađenom u prvoj fazi ispitivanja, **predstavlja najprimjerenije sredstvo za stratigrafsko kartiranje i dobivanje informacija** o geološkom karakteru i mehaničkim karakteristikama tla.



- Rezultati seizmičkih downhole geofizičkih mjerenja pokazuju da se na lokaciji istraživanja **po dubini mogu izdvojiti** u intervalima po jedan ili dva metra **sredine različitih elastičnih karakteristika u vertikalnom smjeru**.

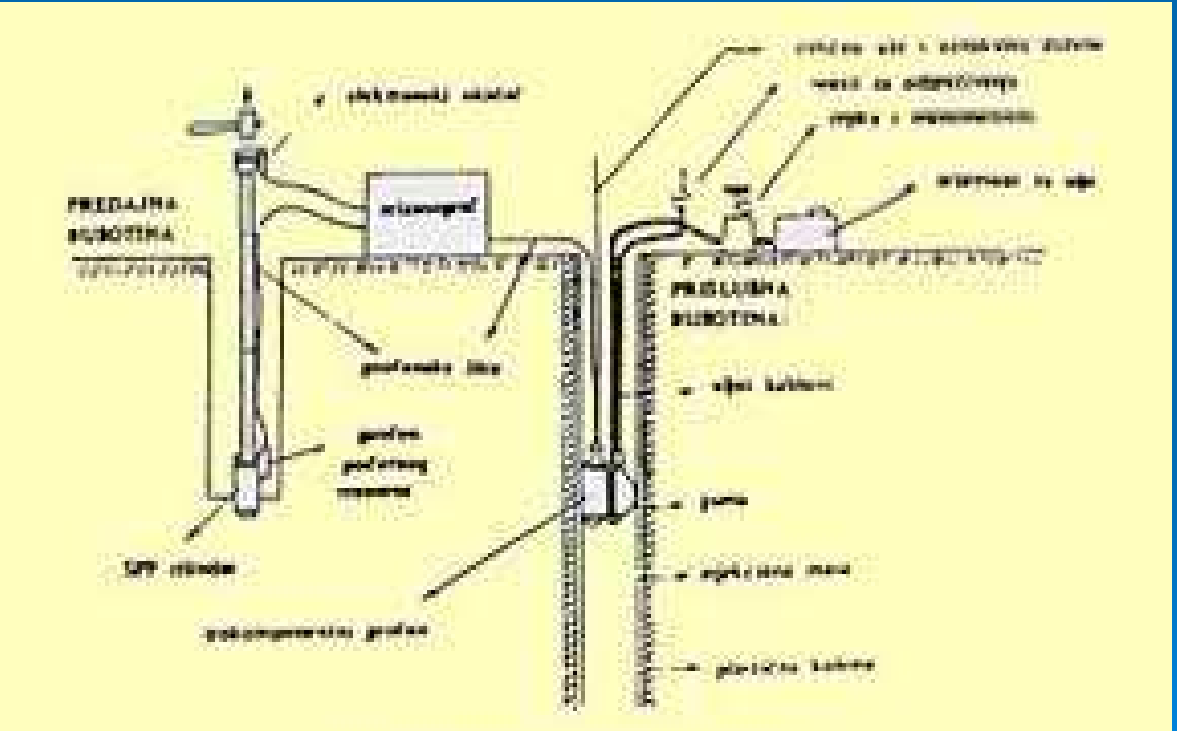
- **Inverzni rasporedi brzina sa dubinom upotpunjuju rezultate refrakcijskih ispitivanja** na mjestima gdje se mogu pojaviti slijepe zone.

- Rezultati se prikazuju dijagramom **intervalnih i srednjih brzina** P i S valova.

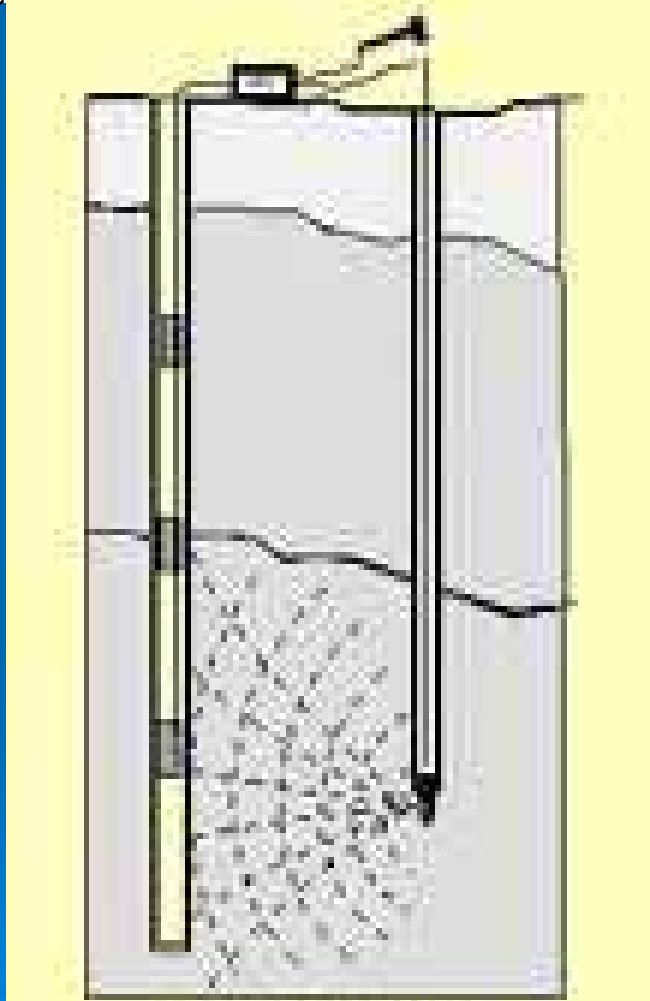
- Prati se kvaliteta tla i stijenske mase, kao i njihova promjena u ovisnosti o stupnju trošenja sa dubinom.

CROSS HOLE ISPITIVANJA

Crosshole ispitivanje je seizmička metoda koja omogućuje **direktno mjerenje intervalnih brzina elastičnih valova u geološkim formacijama između dvije bušotine** po dubini.



Crosshole-Michigen metoda



Crosshole metoda

- Postupak generiranja i registracije seizmičkih valova obuhvaća **iniciranje impulsa u** predajnoj bušotini **i registriranje prvih nailazaka** longitudinalnih i transverzalnih valova u prislušnoj bušotini.

- Dubine na kojima se ispitivanje obavlja jednake su u oba slučaja, a **udaljenost bušotina ne bi smjela biti veća od desetak metara**. Na taj način dobivaju se, posredno preko brzina, **najtočniji podaci o elastičnim modulima** u samim geološkim formacijama između bušotina.

Crosshole ispitivanje se koristi, kao **najtočnija seizmička metoda ispitivanja u bušotinama, za mjerenje vremena potrebnih da elastični valovi prijeđu put od mjesta predaje impulsa do mjesta opažanja**, i to na više dubinskih nivoa.

- Valovi se generiraju u pobudnoj bušotini, registracija se vrši istovremeno u jednoj ili više bušotina.

- Mjerenje se izvodi u zadanim intervalima uz uvjet da 3D geofoni i generator impulsa moraju biti na istim dubinama u svim bušotinama

- Rezultati se prikazuju u dijagramima brzina P i S valova.

3.2. GEOELEKTRIČNA ISPITIVANJA

MJERENJE ELEKTRIČNOG OTPORA U BUŠOTINAMA

- Jedno od najčešće mjerenih parametara u geofizici je mjerenje električnog otpora. Električni otpor je otpor određenog volumena materijala prolazu električnog toka. Električni otpor, *R* (“resistivity”), ima jedinicu [*ohm* · *m*] i inverzno je proporcionalan električnoj vodljivosti, *C* (“conductivity”), $R = 1/C$

- U idealnim okolnostima električni otpor je funkcija prisutne vode u stijeni (npr. stupanj poroznosti), električnog otpora vode u formaciji i geometrije pora. Četvrti bi faktor bio električni otpor stijene, ali je njegov utjecaj minimalan zbog tzv. “beskonačnog otpora” kojeg stijena pruža električnom toku.

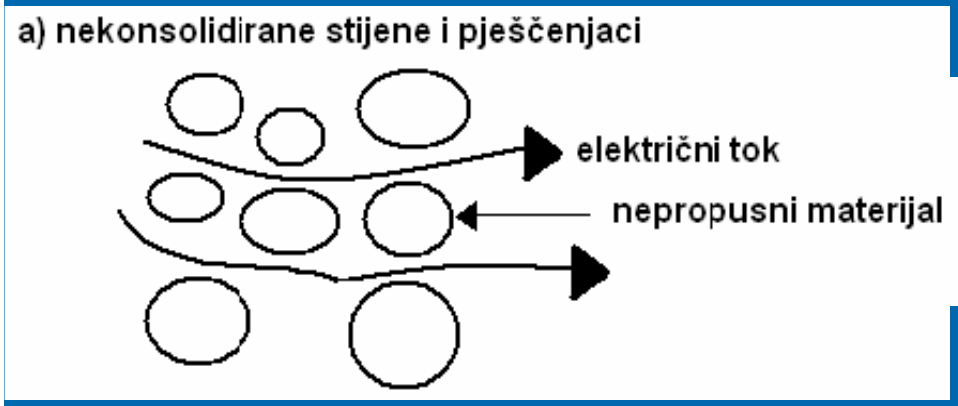
- Obzirom su stijene i čvrsta faza općenito velikog električnog otpora, voda u stijeni je ta koja određuje stupanj električnog otpora. Kako je količina vode u stijeni ujedno indikator poroziteta (totalnog), to se s povećanjem poroziteta smanjuje električni otpor.

- Također, važan faktor je i stupanj zasićenja, jer, na primjer, ako zrak ili ugljikovodici ispunjavaju pore, količina vode je smanjena i električni otpor je povećan.

Na slici 3.10 skicirane su dvije vrste električne vodljivosti u poroznim sredinama:

a) vodljivosti kroz nekonsolidirani materijal ili kroz pješčenjačke stijene i

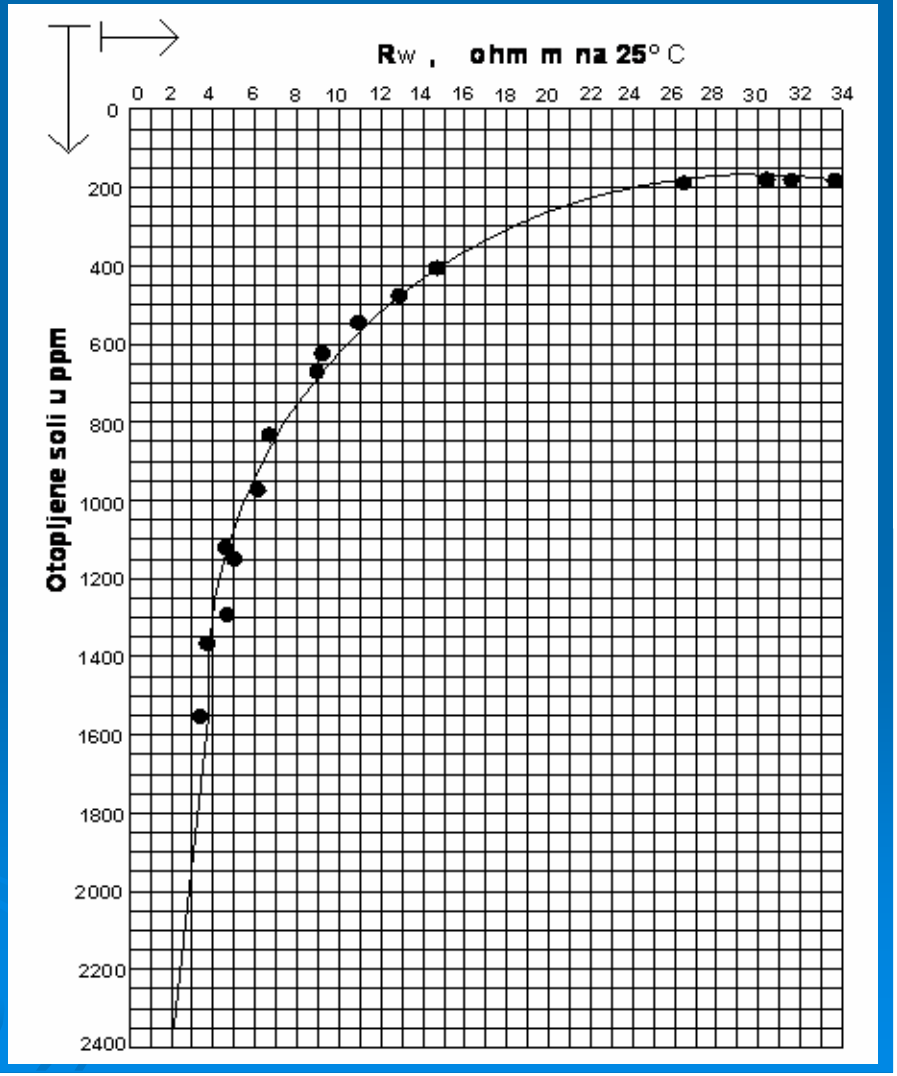
b) vodljivost kroz karbonatne stijene.



- Što je veća varijabilnost i heterogenost geometrije pora, to je teži prolaz električnog toka kroz stijenu i , naravno, registriran je veći otpor. Pješčenjaci, te posebno nekonsolidirani materijali (npr. aluvijalna porozna sredina) imaju međuzrnatu poroznost, dok karbonatne stijene imaju sustav pukotina povezan varijabilnim tokovima s velikim stupnjem heterogenosti. Zbog toga, pješčenjaci i aluvijalni materijali imaju manji električni otpor nego karbonatne stijene.

Električni otpor u formaciji stijene uglavnom je određen samim otporom vode, što opet primarno ovisi o stupnju otopljenih tvari (ili kako se često naziva - salinitetu vode). Otopljene tvari u vodi primarno su u obliku iona, koji se kreću pod utjecajem električnog polja i time provode električni tok. Količina otopljenih tvari ili koncentracija iona se mjeri u *mg* ili *ppm* ("parts per million" – dijelovi miliona)

$$1\,mg/l = 1\,ppm$$
$$1\,g/l = 1000\,ppm$$



Dakle, električna vodljivost vode je funkcija koncentracije iona te njihove mobilnosti.

$$C = \frac{1}{R} = f\left(\sum_{i=1}^{N} c_i v_i\right)$$

N=broj koji čini kemijsku kompoziciju vode

Vrsta vode	Koncentracija NaCl ekvivalent (ppm)	Otpor (ohm·m)	Električna vodljivost (μsiemens)
Pitka voda	500	12	833
Slabo pitka voda	1000-2000	6-2.8	1666-3571
Nepitka voda	8000	0.75	6666
Morska voda	35000	0.2	50000

Tablica prikazuje neke koncentracije iona u vodi, električni otpor i provodljivost.U tablici su jedinice za koncentraciju dane u tzv. ekvivalenatu za natrijev klorid, NaCl, i za temperaturu od 25℃ (Na + u koncentraciji 10 *ppm* ima faktor konverzije 1 i daje 10 *ppm* u NaCl ekvivalent). Na primjer,Ca++ u koncentraciji od 3 *ppm*, ima faktor konverzije 3.9 i daje 3.9 *ppm* u NaCl ekvivalent.

Općenito se može reći, da **električni otpor opada s povećanjem otopljenih tvari i koncentracije iona**. To je vidljivo na slici koja prikazuje varijaciju električnog otpora s koncentracijom otopljenih soli.

ARCHIE-ev EKSPERIMENTALNI ZAKON

- Za potpuno zasićenu sredinu, Archie (1942.god.) je postavio eksperimentalni odnos koji povezuje električni otpor stijene (porozne formacije), poroziteta i električni otpor vode u poroznoj sredini. Matematički se to može zapisati:

$$R_{st} = R_v \alpha \varphi^{-m}$$

faktor zacementiranosti (konsolidiranosti) porozne sredine (ovisi o varijabilnosti i općenito se kreće između 1.3 i 2.2)

električni otpor stijene [*ohm·m*],

je električni otpor vode u poroznoj sredini [*ohm·m*],

faktor koji ovisi o litološkoj strukturi porozne formacije i kreće se između 0.6 i 2

porozitet u postotku

Parametri u prethodnom izrazu koji opisuju karakteristike porozne formacije koja se mjeri, mogu se grupirati u tzv. *Faktor formacije F*: $F = \alpha \varphi^{-m}$

tako se Archiev izraz može pisati u obliku: $R_{st} = F R_v$

Na osnovi eksperimentalnih mjerenja raznih poroznih formacija, općenito su prihvaćeni slijedeći približni odnosi:

- Nekonsolidirani materijali i pješčenjačke stijene:

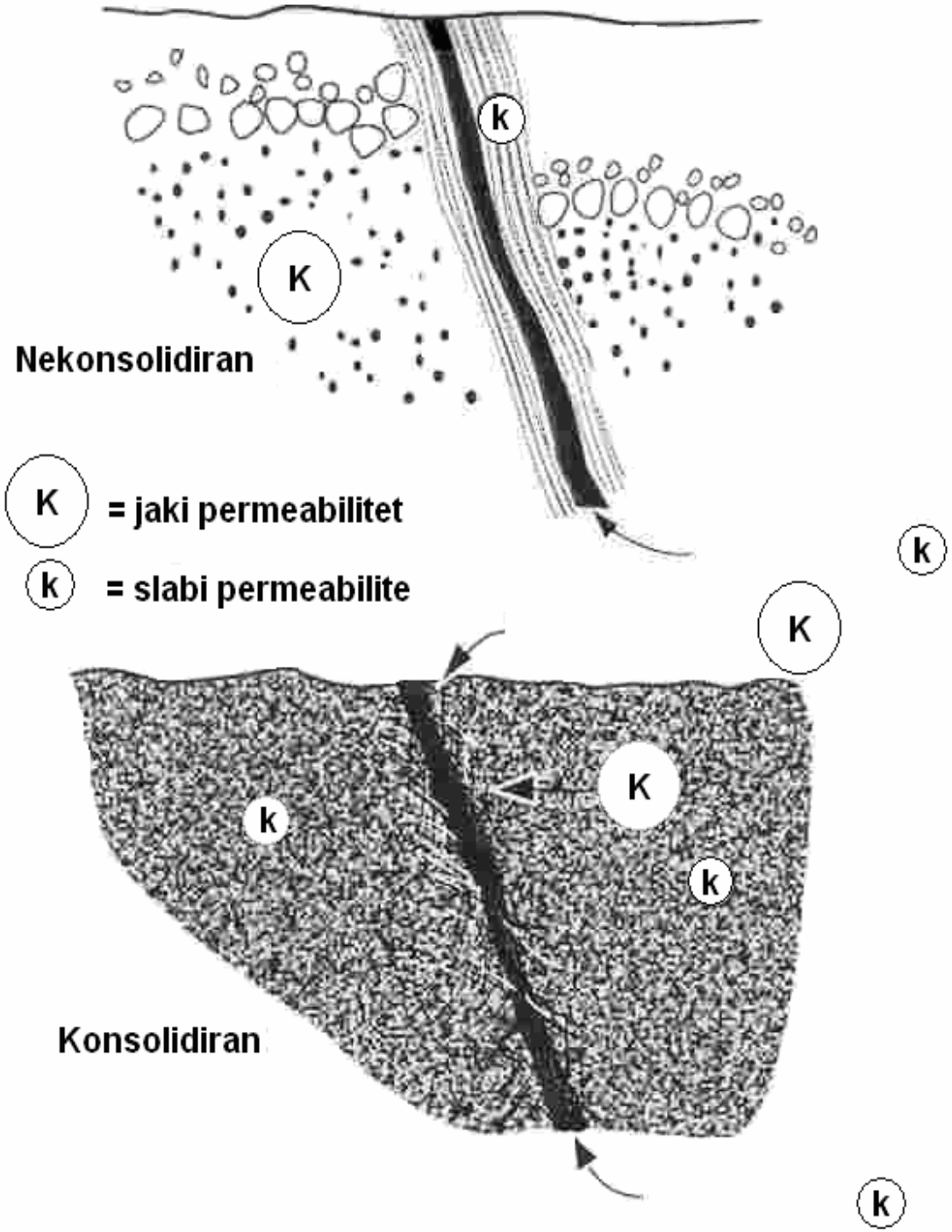
$$F = 0.62\varphi^{-2.15}$$ (Humble-ova formula)

$$F = 0.81\varphi^{-2}$$

- Konsolidirani materijali i karbonatne stijene:

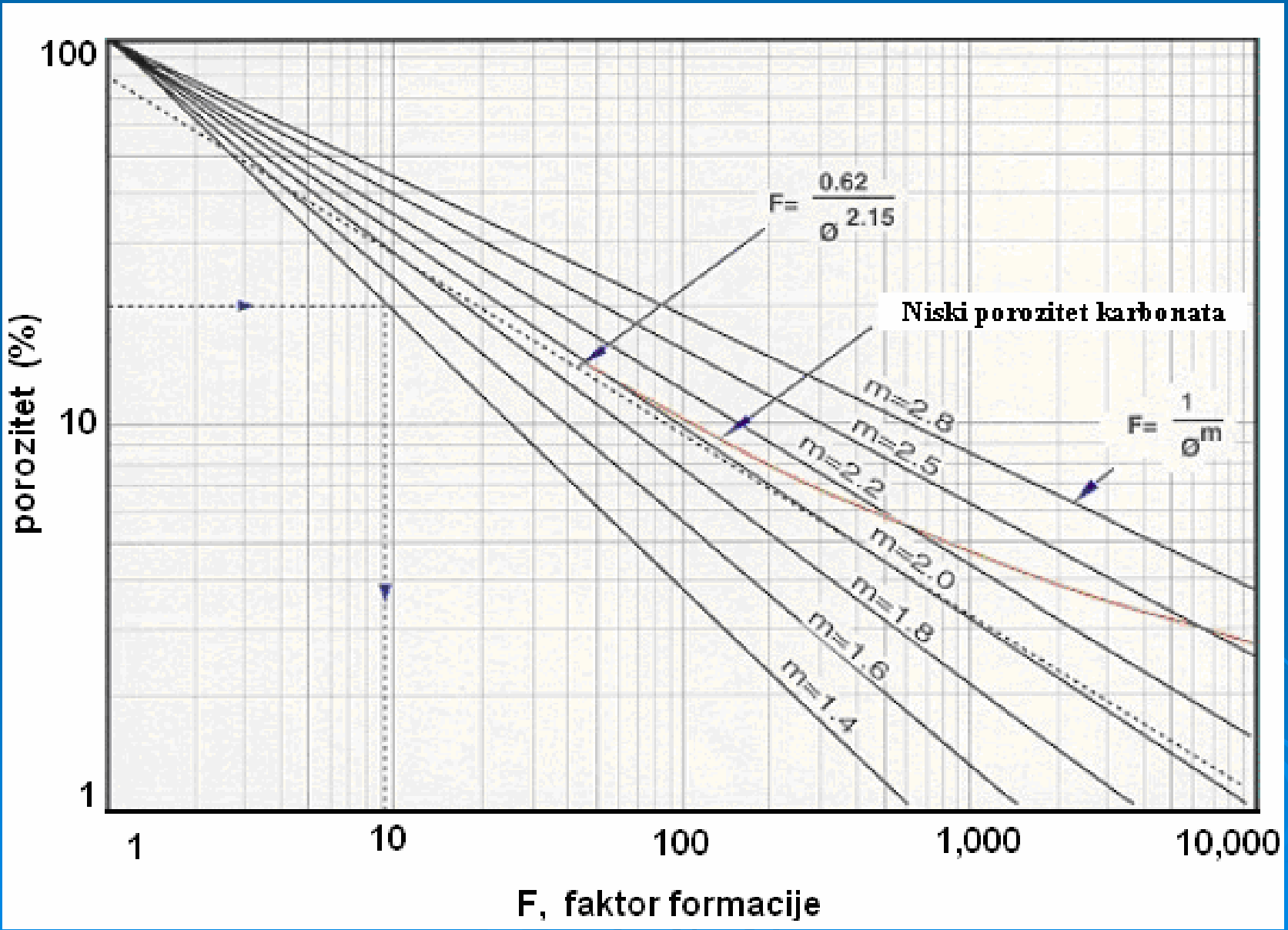
$$F = \varphi^{-2}$$

➡ Gore navedene empirijske relacije faktora formacije, pokazale su se u praksi kao prilično točne procjene, sve dok formacije u sebi ne sadrže primjese gline. U tom slučaju, potrebne su određene korekcije.



- Iako se Archieva relacija pokazala korisna u praksi, važno je napomenuti da (naročito u slučajevima dotoka svježe vode u formaciju) Archiev zakon nije uvijek važeći i potrebno je tada postaviti empirijske relacije od slučaja do slučaja.

Slika prikazuje kopiju dokumenata Schlumberger, koji opisuje odnos faktora formacije i poroziteta.

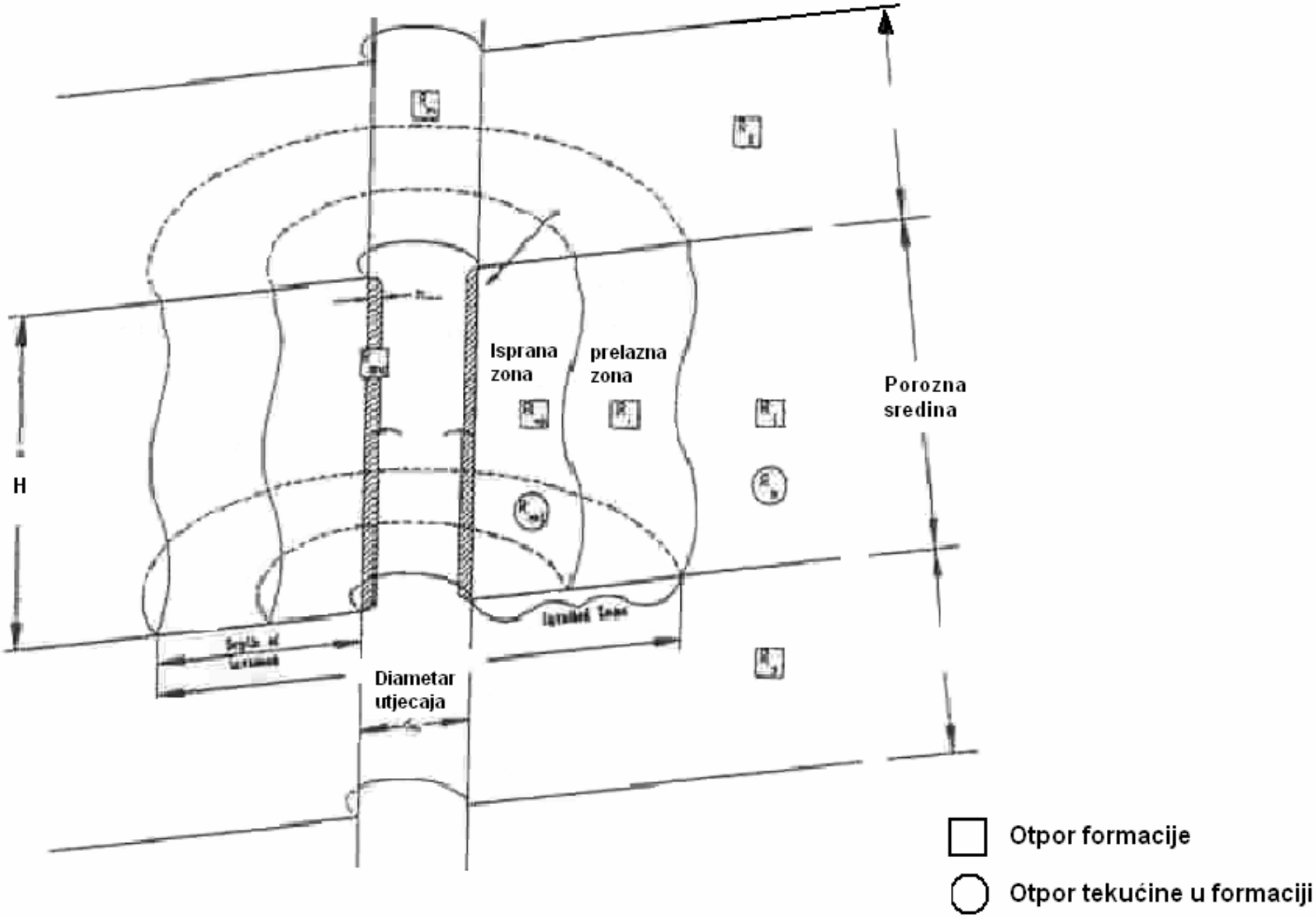


FENOMEN “INVAZIJE” TEKUĆINE KORIŠTENE PRI BUŠENJU

- Većina zdenaca se izvodi korištenjem tekućine pri bušenju koja se sastoji od mješavine prirodne gline ili aditivne gline te lokalno raspoložive vode.Uglavnom svi, a pogotovo **električni geofizički zapisi, ovisni su o interakciji između tekućine za bušenje i porozne formacije kroz koju prolazi bušotina. Prisustvo tekućine korištene pri bušenju, izaziva razliku pritisaka na stjenci zdenca.**

- Pritisak tekućine u zdencu, najčešće je veći nego pritisak u formaciji neposredno oko zdenca, te dolazi do penetriranja tekućine zdenca u porni volumen oko zdenca. Čestice iz tekućine zdenca (npr. aditivna glina i smrvljeni materijal) akumuliraju se na stjenci zdenca, formirajući naslagu.

- Ova vrst impregnacije (ili vrsta kolmiranja) je kontrolirana permeabilitetom porozne formacije i razlikom pritiska između tekućine u zdencu i okolne vode u poroznoj formaciji. Dakle, kod većeg permeabiliteta stijene, veća je penetracija i veći je stupanj impregnacije sa česticama materijala.


Isprana zona
prelazna zona
Porozna sredina
H
Diametar utjecaja
Otpor formacije
Otpor tekućine u formaciji

Slika prikazuje pojavu penetriranja tekućine zdenca u volumen okoline zdenca, te formiranje impregnacije na stjenkama zdenca. Za tzv. ispranu zonu gdje je penetrirala tekućina iz zdenca možemo pisati:

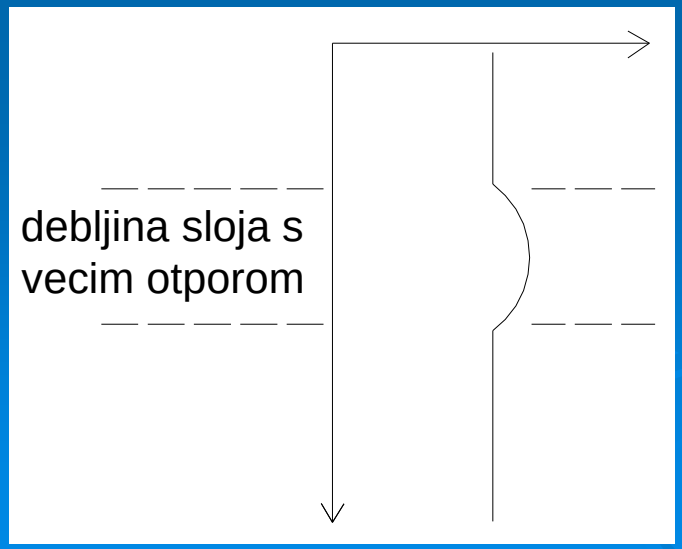
$$R_{pt} = FR_t$$

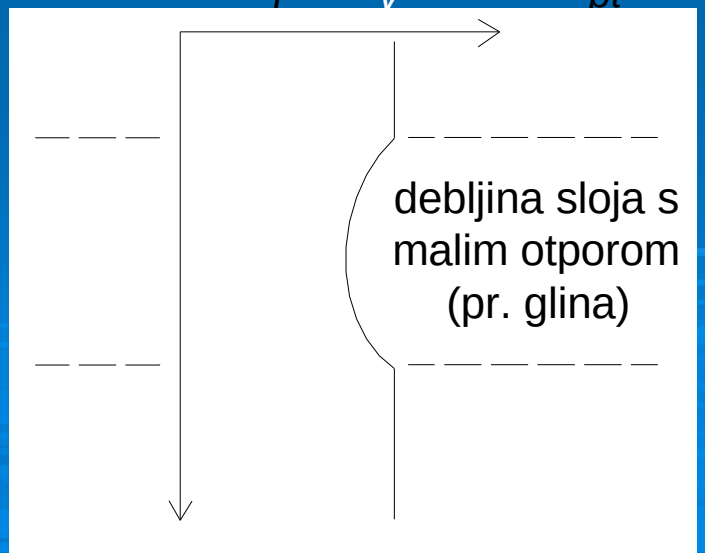
otpor tekućine korištene pri bušenju zdenca

električni otpor porozne sredine u zoni penetracije

Kako se najčešće pri geofizičkim istraživanjima koristi voda iz obližnjih izvora, ista ima uglavnom veći električni otpor nego voda u poroznoj sredini. To rezultira slijedećim nejednakostima:

$$R_t > R_v \Rightarrow R_{pt} > R_{st}$$





STUPANJ ZASIĆENOSTI

- U zonama porozne sredine koje su iznad hidrostatičkog nivoa (dakle zone negativnog hidrostatičkog pritiska), volumen pora je djelomično ispunjen zrakom. Tada tekućina korištena pri bušenju lako ispunja volumen pora i predstavlja brzu vodljivost električnog toka u području inače skoro beskonačnog električnog otpora.

Archie (1942) je postavio relaciju koja upravo opisuje taj odnos: $S_v = \sqrt[n]{\frac{R_0}{R_{st}}}$

$R_0 =$ otpor zasićene sredine

$R_{st} =$ otpor nezasićene sredine

$$\frac{R_{st}}{R_0} = S_v^{-n} \quad n \sim 2$$

$$R_{st} = S_v^{-n} R_0 = S_v^{-n} \alpha \varphi^{-m} R_v$$

pri čemu je R_0 električni otpor potpuno zasićene porozne sredine dok R_{st} predstavlja električni otpor nezasićene sredine, a *n* je faktor koji je za većinu stijena jednak 2.

Korištenjem faktora formacije, ova relacija se može pisati kao

$$R_{st} = R_v \alpha \varphi^{-m} S_v^{-n}$$

ili u zoni penetracije tekućine iz zdenca

$$R_{pt} = R_t \alpha \varphi^{-m} S_{v0}^{-n}$$

gdje je S_{v0} saturacija porozne sredine od tekućine korištene pri bušenju.

- U ovom kratkom prikazu mjerenja električnog otpora porozne sredine, mjerena veličina ovisi podjednako o tipu poroznog materijala i o tipu tekućine korištene pri bušenju. Vrlo je važno napomenuti da penetracija tekućine korištene pri bušenju pored ometanja dedukcije signala koji se mjeri, također daje dodatne informacije o poroznoj sredini tako da njen utjecaj treba analizirati od slučaja do slučaja.

METODE MJERENJA ELEKTRIČNOG OTPORA

- Mjerenje električnog otpora , općenito, **se vrši sondama koje se spuštaju u bušotine, a kablovima se zapis digitalno vrši na površini** zemlje. Sve električne sonde su temeljene na mjerenju tlaka električne struje od spuštene elektrode (jedne ili više) do druge fiksirane točke.
- Cijeli sistem mjerenja se temelji na principu Ohmovog zakona. Ohmov zakon kaže da je jakost struje razmjerna s naponom, a obrnuto razmjerna s otporom:

$$V = RI \quad \Rightarrow \quad R = \frac{V}{I}$$

V = voltaža-razlika potencijala

I = strujni tok, amperaža

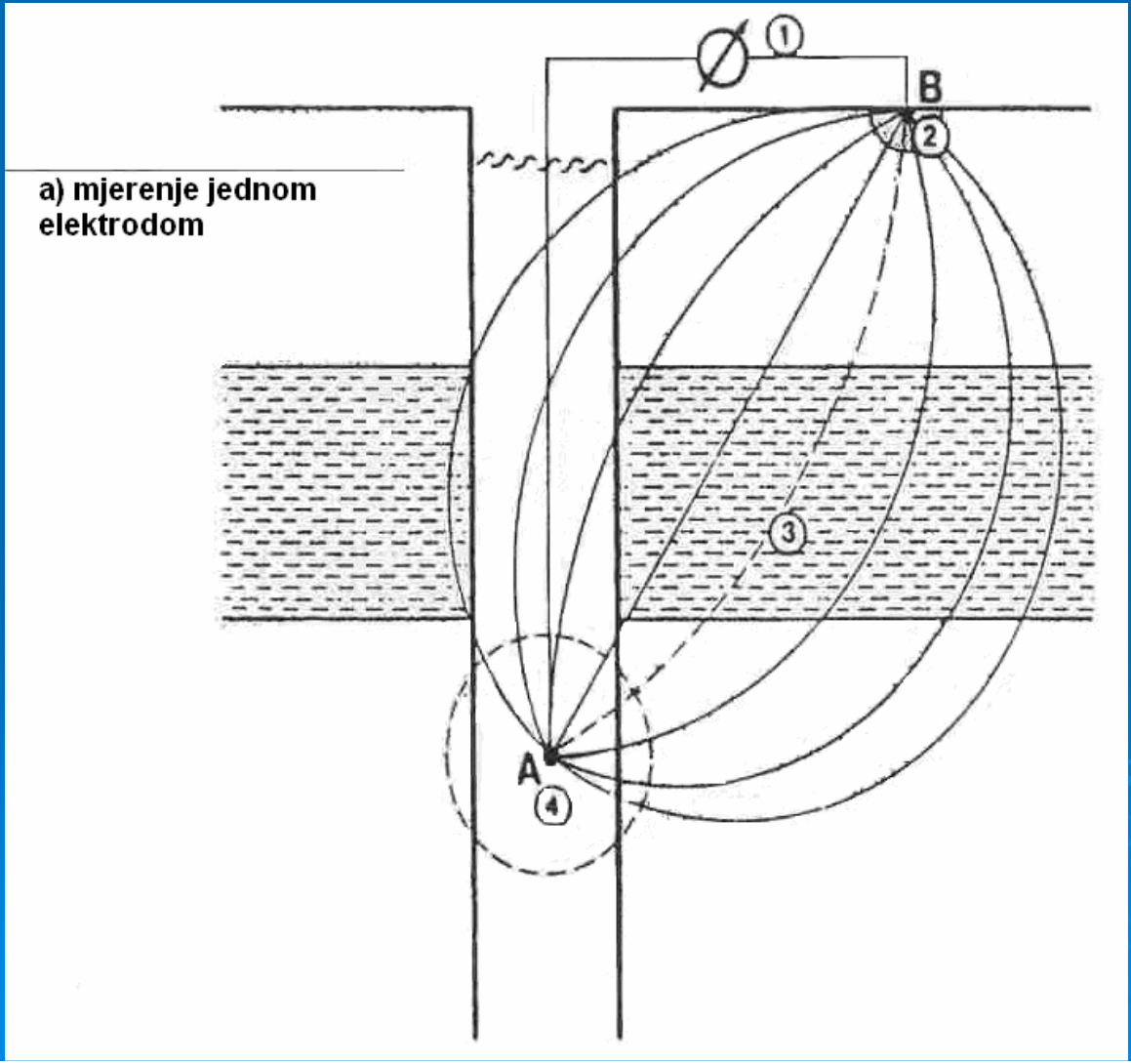
- Električni otpor žice, R, ovisi o materijalu te se povećava s duljinom žice, a smanjuje se povećanjem poprečnog presjeka žice

$$R = \lambda \frac{L}{A} = (ohm \cdot L)\frac{(L)}{L^2} = [ohm]$$

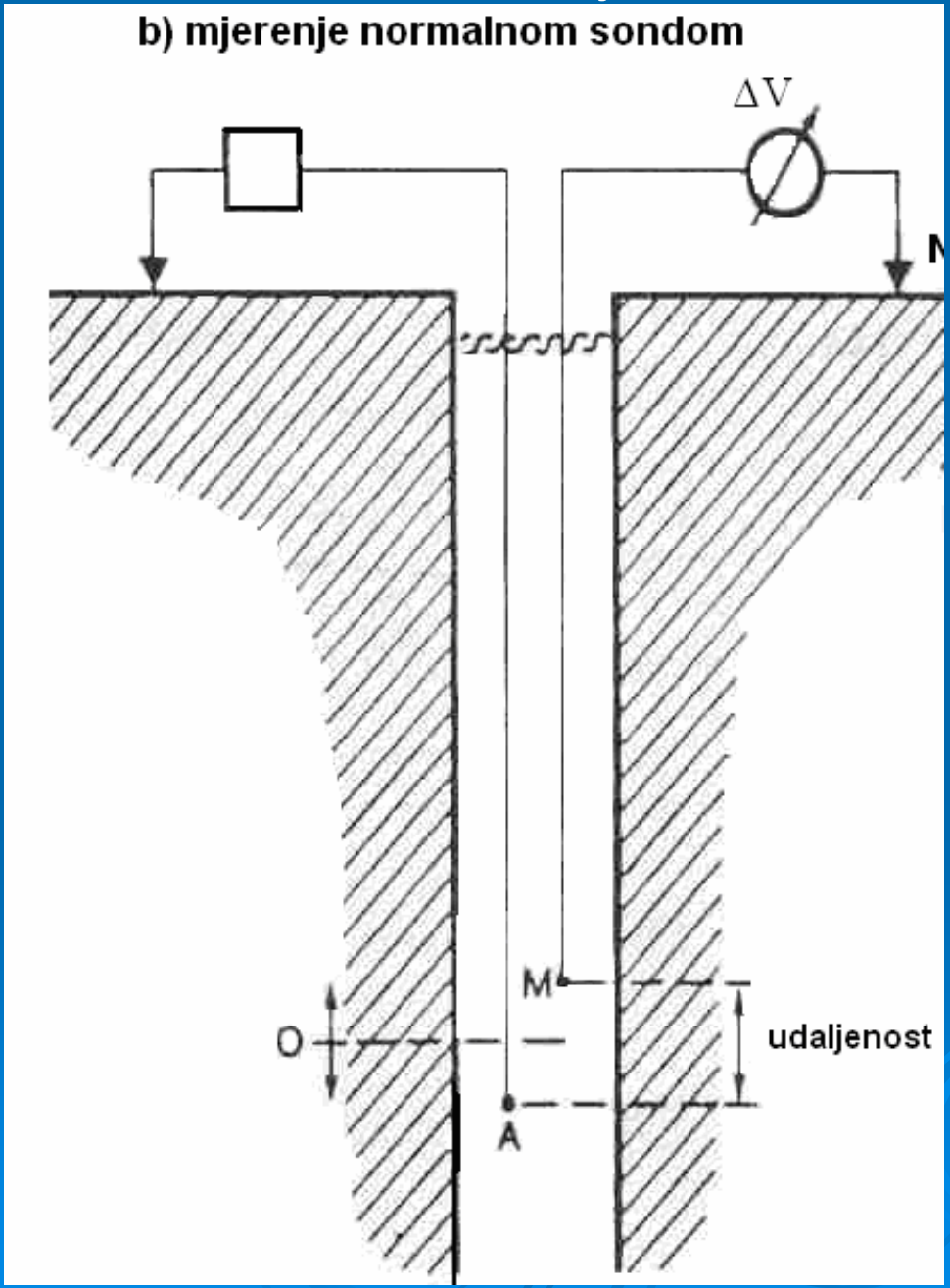
- Ako se uspostavi cirkularni konstantni tok struje jakosti *I*, varijacija potencijala *V*, direktno je proporcionalna otporu *R* između spuštene elektrode u bušotini i druge fiksne elektrode na površini, npr., $V = I R$.

U praksi se najčešće koriste tri vrste mjerenja električnog otpora koje su skicirane na slikama:

1. **mjerenje jednom elektrodom** – zapis je dat u relativnim vrijednostima i nagib na desno u zapisu pokazuje rast otpora



2. mjerenje normalnom sondom – uređaji s više elektroda



Normalnim sondiranjem se:

- **<u>određuje debljina slojeva s lokacijom po vertikali</u>**
- **<u>mjeri otpor: a) zone penetracije (kratko normalno sondiranje)</u>**
  <u>b) van zone penetracije (dugo normalno sondiranje</u>)
- **<u>dobiju informacije o porozitetu i permeabilitetu</u>**

Registrira se razlika potencijala između točke A i M uzrokovana tokom električne struje između A i B. Izmjerena **razlika potencijala ovisi o udaljenosti između A i M, te o karakteristici porozne sredine**. Jakost struje *I* drži se konstantnom, tako da izmjerenom razlikom potencijala električni otpor poroznog medija proizlazi iz izraza

$$R = K\frac{\Delta V}{I}$$

gdje *R* označava registrirani električni otpor (“apparent resistivity”), a *K* je faktor korištene sonde koji ovisi o geometriji sondiranja, npr. $K = 4\pi\overline{AM}$ ($\overline{AM}$ označava udaljenost između točaka A i M).

- Mjerena **vrijednost ovisi o udaljenosti A i M, promjeru bušotine, električnom otporu tekućine bušenja i debljini zone ispiranja oko bušotine.** Zapis je dan u apsolutnim vrijednostima, u jedinicama [ohm·m].

Korištenjem normalnog sondiranja može se odrediti poroznost prema izrazu

$$S_v^2 = \frac{F R_t}{R_{pt}}$$

U kojem S_v^2 predstavlja stupanj zasićenosti formacije tekućinom, R_t je otpor tekućine korištene pri bušenju (izmjeren na površini), a R_{pt} je otpor mjeren sondiranjem.

Ako se uzme: $F = \frac{1}{\varphi^2}$ dobiva se slijedeći izraz: $\varphi = \frac{1}{S_v}\sqrt{\frac{R_t}{R_{pt}}}$

Ako je formacija oko zdenca potpuno saturirana tekućinom iz bušenja vrijedi:

$$S_v = 1$$

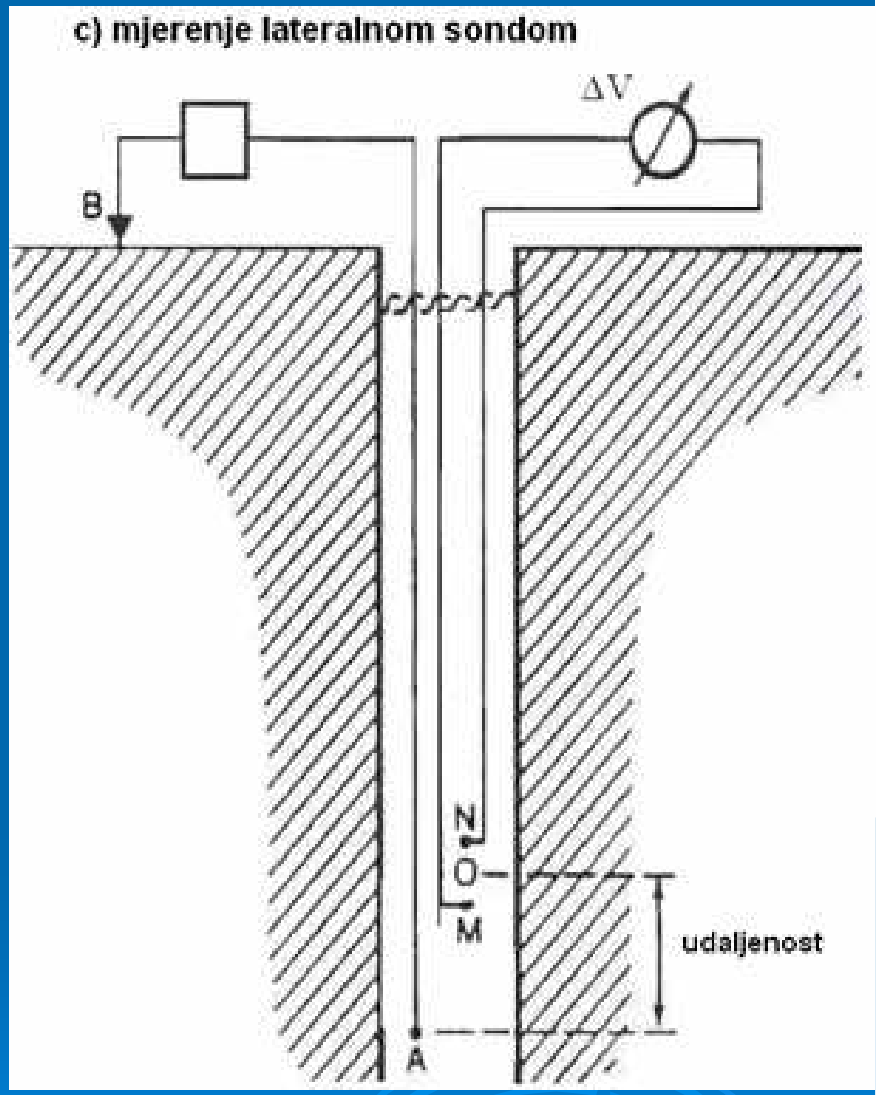
3. **mjerenje lateralnom sondom** – lateralne sonde, također, koriste više elektroda i mjere električni otpor poroznog medija kojeg bušotina presijeca. Slika 3.16 c pokazuje postavljanje lateralnih sondiranja. U bušotini se nalaze tri elektrode A, M i N. Razlika potencijala je uspostavljena između M i N prema izrazu

$$\Delta V = RI \frac{\overline{MN}}{4\pi \overline{AM}\,\overline{AN}}$$

iz čega se za konstantni *I* izračuna električni otpor.

- Lateralna sondiranja se **koriste za mjerenje električnog otpora porozne sredine izvan zone penetracije tekućine iz bušotine**.

- **Veća udaljenost elektrode A i centra** $\overline{MN}$ ima tu prednost što **izbjegava područje miješanja tekućine** iz bušotine i vode u poroznoj formaciji, ali za nedostatak ima težu interpretaciju mjerenog električnog otpora zbog mogućeg presijecanja slojeva porozne sredine s različitom provodljivosti.

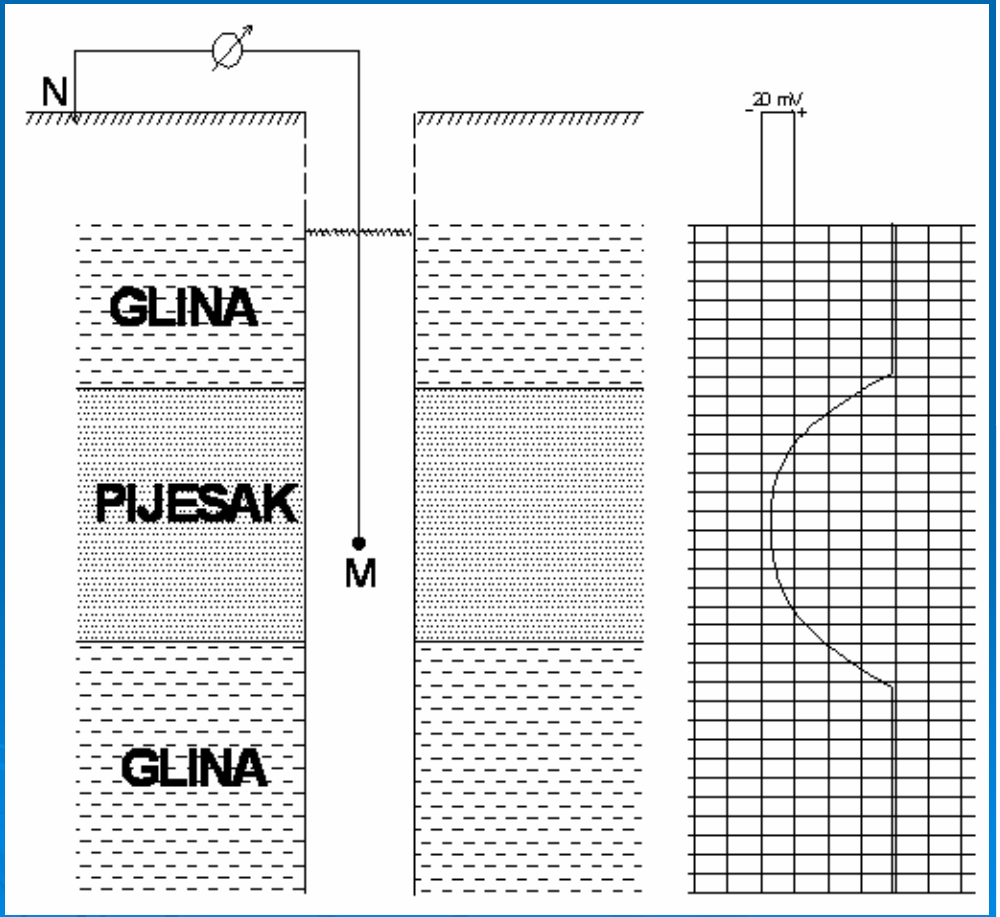


MJERENJE RAZLIKE POTENCIJALA

- Razlika potencijala mjeri se između jedne fiksne referentne elektrode postavljene na površini zemlje i druge pokretne elektrode koja se spušta u bušotinu.

- Mjerenje razlike potencijala vrši se korištenjem voltmetra.

- Nulta pozicija na krivulji potencijala proizvoljna je, jer se mjere relativne vrijednosti. Mjerilo je dano u milivoltima s pozitivnim vrijednostima desno, a negativnim vrijednostima lijevo.



Ovaj tip električnog zapisa vrlo je koristan u procjeni:

- poroznih i propusnih proslojaka
- nepropusnih zona
- postotka gline prisutne u stijeni
- električnog otpora vode u poroznoj formaciji

- Mjereni električni potencijal u velikoj mjeri ovisi o kvaliteti vode korištenoj pri bušenju. U slučajevima kada tekućina korištena pri bušenju ima manji salinitet nego voda u poroznoj formaciji (čest slučaj u praksi) dolazi do stvaranja električnog potencijala (odnosno polarizacije) prouzrokovanog električnim silama elektrokemijskog i elektrokinetičkog porijekla. Zabilježena razlika potencijala, u stvari, ovisi o razlici saliniteta između vode u poroznoj formaciji i vode korištene pri bušenju.
- Oblik i veličina zapisa razlike potencijala ovisi o više faktora, a među najvažnijima su:

1. odnos električnog otpora vode u poroznoj formaciji i vode u bušotini

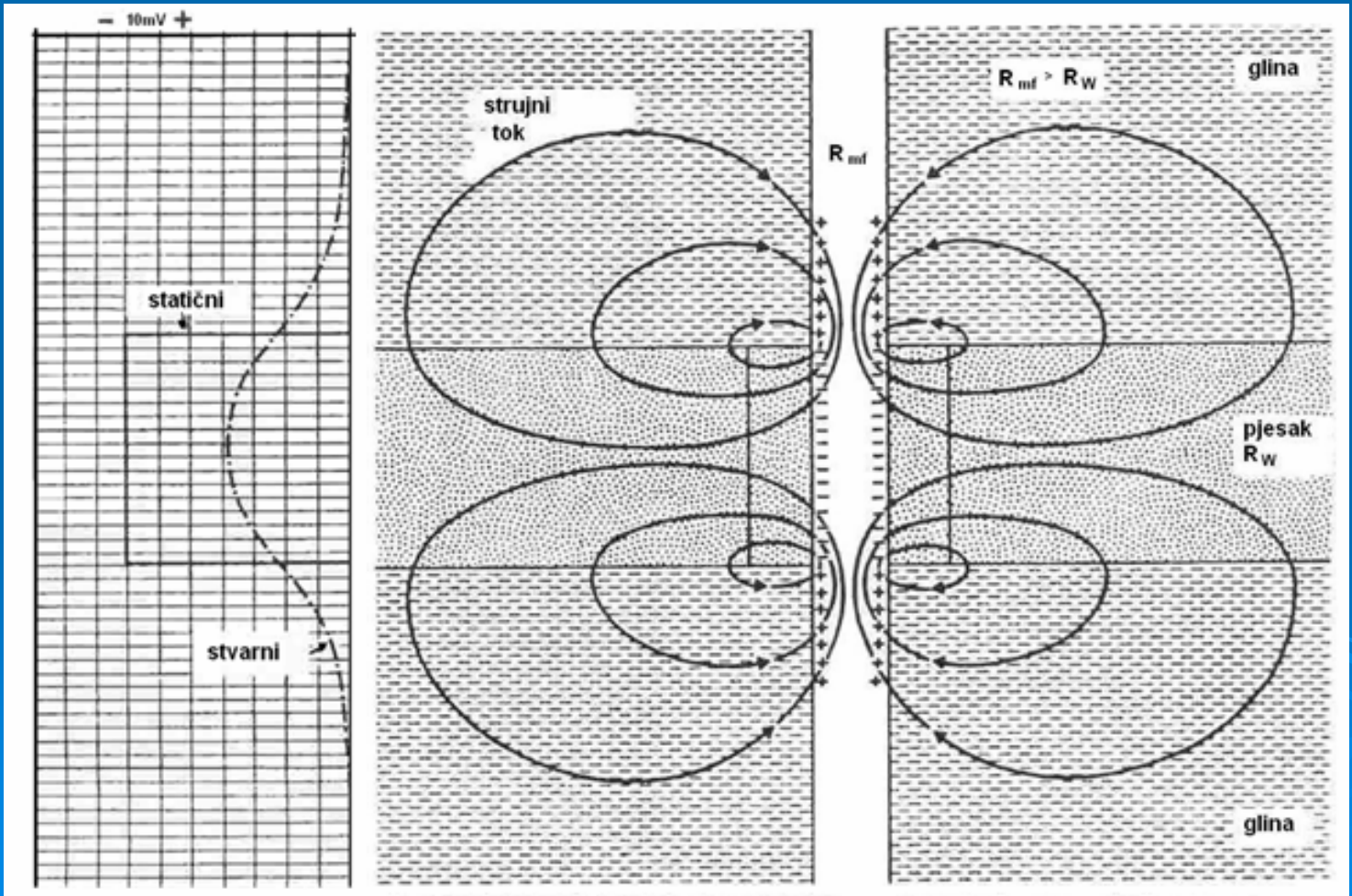
- $R_t > R_v$, **voda u poroznoj sredini ima veći salinitet nego voda u bušotini** (idućа slika). Nagib zapisa prema negativnom potencijalu pokazuje prisustvo poroznih zona. Veća razlika saliniteta rezultira većim nagibom zapisa potencijala.
- $R_t = R_v$, **otpor vode u bušotini sličan je otporu vode u formaciji**. Zapis razlike potencijala postaje ravan i nije moguće identificirati porozne zone ili zone gline.
- $R_t < R_v$, **voda u formaciji ima manji salinitet od vode u bušotini**. Zapis tada izgleda suprotan od onoga na idućoj slici. Kationi se formiraju uz više poroznu zonu (npr. zone pijeska) dok se anioni formiraju uz manje propusne proslojke (npr. zone gline).

2. utjecaj debljine poroznog sloja

Kod jako tankih poroznih proslojaka, zapis razlike potencijala postaje uzak i statički potencijal se teže uspostavlja.

3. utjecaj određenih minerala

Neki minerali, kao sulfidi i grafiti, mogu prouzrokovati anomalije zapisa razlike potencijala.



Permeabilitet se može procijeniti iz mjerenja razlike potencijala odnosno nagiba mjernog zapisa kada dolazi do prijelaza na zonu s jačim permeabilitetom. Također, u slučaju kada kratko normalno, dugo normalno i lateralno sondiranje daju slične vrijednosti otpora, označavaju da nema jake zone penetrirane tekućine iz bušotine te da se radi o zoni porozne sredine koja ima vrlo mali permeabilitet.

Porozitet se može kvantificirati iz mjerenja električnog otpora i to najčešće korištenjem kratke normalne sonde. Za poroznu formaciju koja u sebi sadrži penetriranu tekućinu iz bušotine, koristi se slijedeći izraz:

$$S_0^2 = \frac{FR_t}{R_0}$$

Ako se pretpostavi da faktor formacije $F = 1/\varphi^2$, izraz za porozitet tada postaje

$$\varphi = \frac{1}{S_0}\sqrt{\frac{R_t}{R_0}}$$

gdje je S_0 najčešće jedan u formaciji potpuno zasićenoj s tekućinom iz bušotine. Onda izraz za porozitet postaje $\varphi = \sqrt{R_t / R_0}$.

R_t se odredi mjerenjem električnog otpora tekućine koja se koristi pri bušenju.

R_0 se dobije iz zapisa mjerenja električnog otpora kratke normalne sonde.

GEOELEKTRIČNO SONDIRANJE I PROFILIRANJE

Geoelektrično sondiranje je metoda kod koje se koristi raspored s četiri elektrode, tako da se struja uvodi u tlo preko dvije strujne elektroda (AB), a između dvije mjerne elektrode (MN) mjeri se razlika potencijala nastala propuštanjem struje kroz tlo.

Podaci mjerenja odnose se na centralnu točku. Postupnim udaljavanjem strujnih elektroda od centralne točke, po točno određenom pravcu, dubina prodiranja struje se povećava, a samim tim i podaci mjerenja odnose se na sve dublje horizonte.

Razlika potencijala između unutarnjih elektroda (MN) ovisna je od geološke građe terena, vlažnosti tla, jačine struje koja se propušta kroz tlo i drugo, a preko odgovarajućih jednadžbi moguće je izračunati prividne specifične električne otpore (instrument ABEM - TERRAMETER SAS 300 omogućuje direktno mjerenje prividnog specifičnog električnog otpora).

Sukcesivno s mjerenjem prati se karakter krivulje ispitivanja, tj. operater odmah na terenu iscrtava krivulju ispitivanja. Na taj način kontrolira se kvaliteta mjerenja i dobivaju se osnovne indikacije o građi terena.

TERRAMETER SAS 300

Izlazna struja . . . . . 0.2,0.5,1,2,5,10 ili 20 mA

Preciznost izlazne struje . . . . . 1 %

Max.izlazni napon . . . . . .160 V (320 V peak to peak)

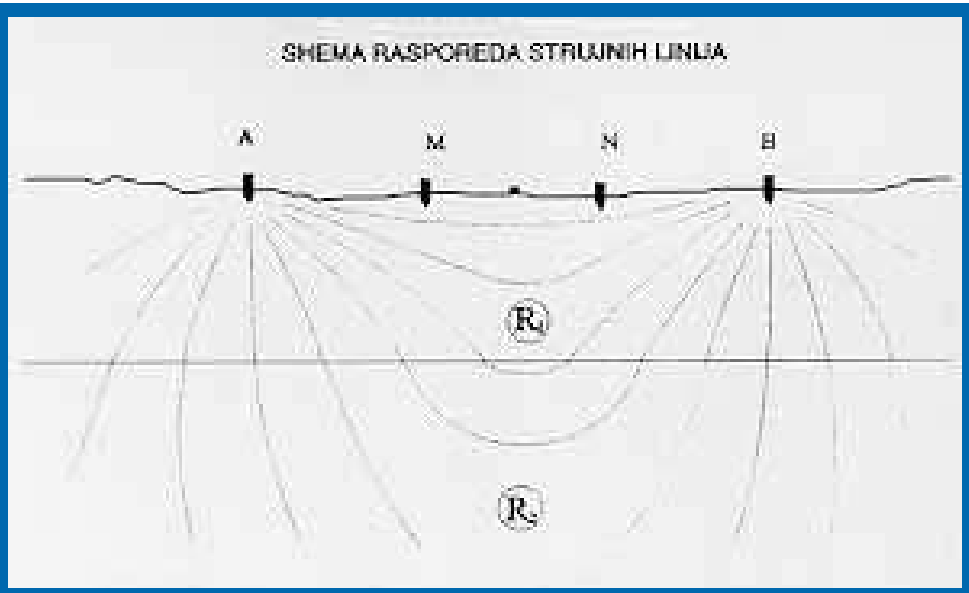
Ulazna impedanca . . . . . 100 MOhma minimum

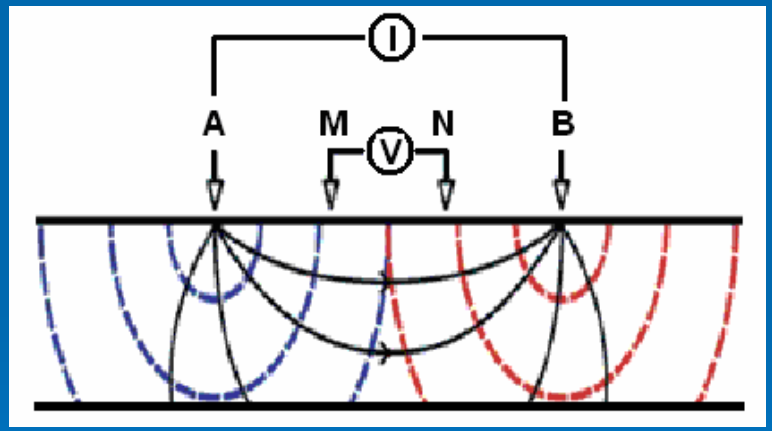
Ulazni napon . . . . . 0 - 500 V

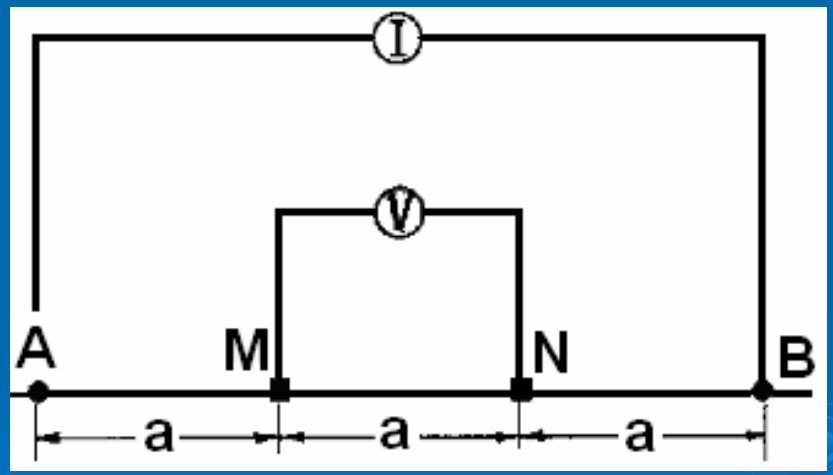
Prag šuma . . . . . > 95 dB kod 50 - 60 Hz

. . . . . > 85 dB kod 16 - 20 Hz

V/I preciznost . . . . . +/- 0.05 mOhma (20 mA, jedno čitanje)







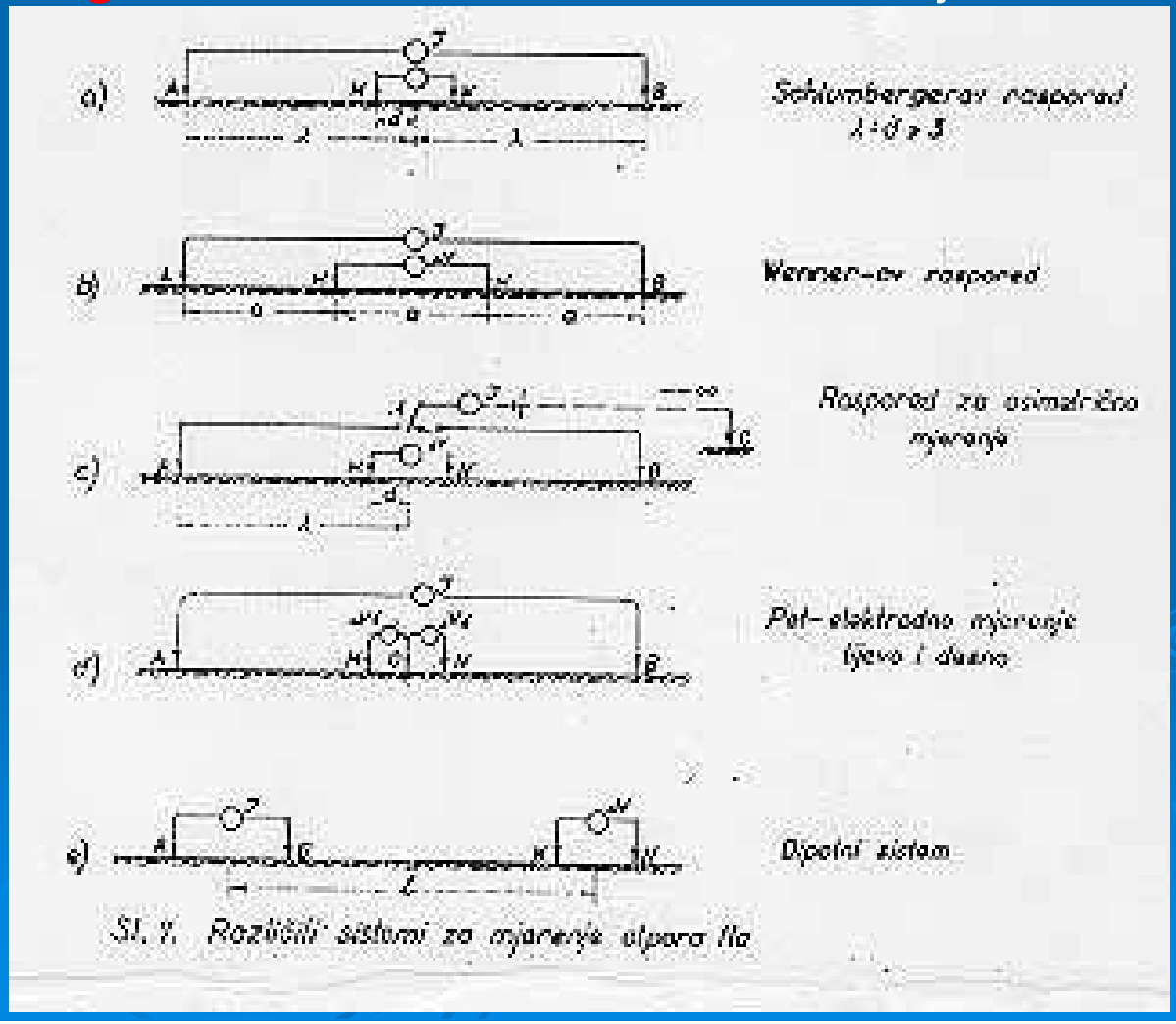
- Poznavajući električni tok i izmjereni potencijal moguće je preko odgovarajućih jednadžbi izračunati električni otpor formacije:

$$R = \frac{A}{L}\frac{\Delta V}{I}$$

- U praksi su najčešće korištene dvije metode za geoelektrična mjerenja sondiranjem: **1. Wenner-ova metoda** : sve elektrode se miču (mjerne i strujne)

$$\overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB} = a \qquad R = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

2. Schlumberger-ova metoda: miču se samo strujne elektrode A i B.



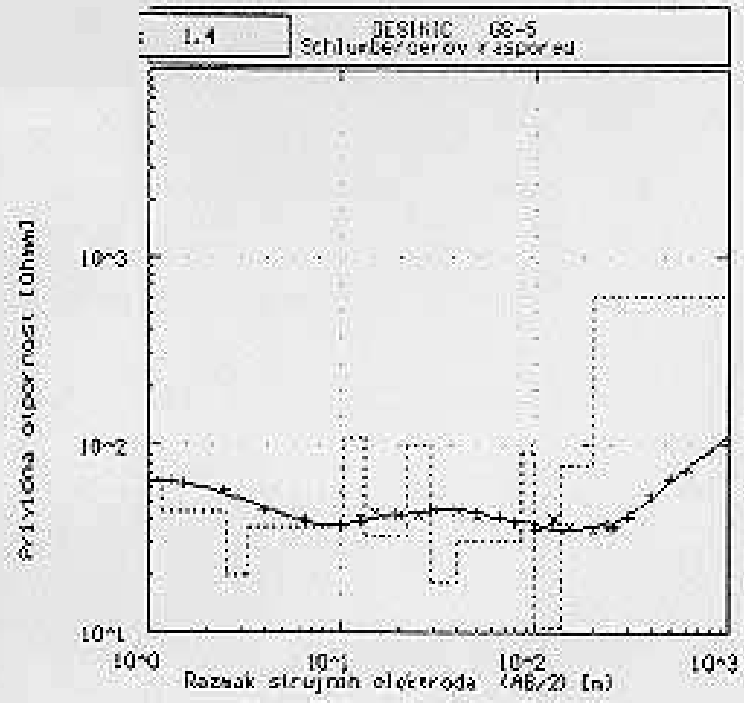
- Geoelektrično sondiranje se koristi za:
- slojevitost podzemlja (povećavanjem udaljenosti elektroda)
- trošnost stijene, vlažnost
- sistem pukotina te lokacije rasjeda
- vrlo korisno za određivanje zaslanjenja podzemlja

Definitivna je **obrada rezultata mjerenja geoelektričnog sondiranja** izvedena je pomoću troslojnih teoretskih krivulja i kompjuterskog programa za iteracije koji nam daje debljinu pojedinog sloja s pripadajućom otpornošću, a interpretator daje prognoznu litološku determinaciju na osnovu otpornosti.

KOŠNIČKA GORA

TRI PROGNOZNE LITOLOŠKE SREDINE PREMA GEOELEKTRIČNOJ OTPORNOSTI:

	OTPORNOST	PROGNOZNA LITOLOŠKA SREDINA
1.	0 - 250 Ohmm	KLASTITI PESKOVNJAK, PESKI, GLINE, LAPORI, SILTIT, ŠKRILJAVI
2.	250 - 470 Ohmm	IZMJENA KLASTIČNIH I KARBONATNIH STIJENA DOLOMIT, ŠKRILJAVI PEŠČENJAK, VAPNENCI, VAPNENI LAPORI
	250 - 470 Ohmm	PREVLADAVA KARBONATNA KOMPONENTA
3.	500 - 2000 Ohmm	KARBONATI DOLOMIT, DOLOMITNE BREČE, VAPNENCI



Sloj	Otp	Deblj	Dubina
1	47.0	1.2	1.2
2	14.5	1.4	2.6
3	20.2	0.7	3.3
4	35.4	6.8	10.1
5	108.7	3.2	13.3
6	32.9	8.7	22.0
7	101.1	7.0	29.0
8	18.4	10.3	39.3
9	31.2	15.6	54.9
10	94.7	13.7	68.5
11	10.5	17.5	136.0
12	79.6	65.2	201.2
13	410.7	-.-	-.-

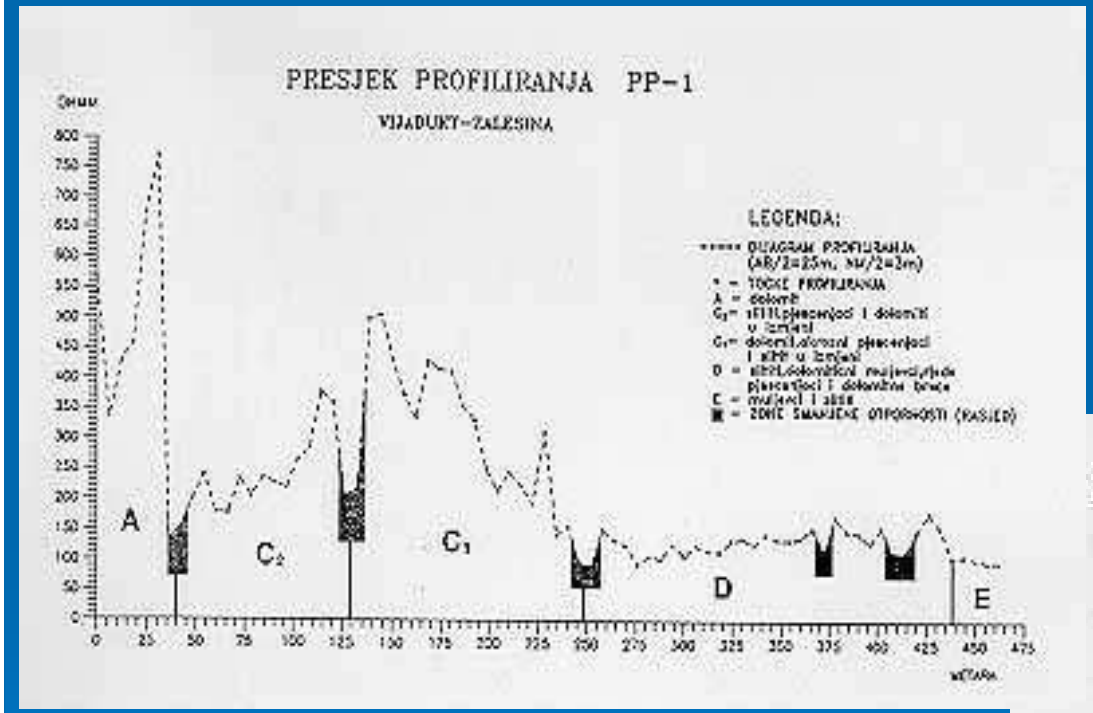
* RMS korisnih podataka

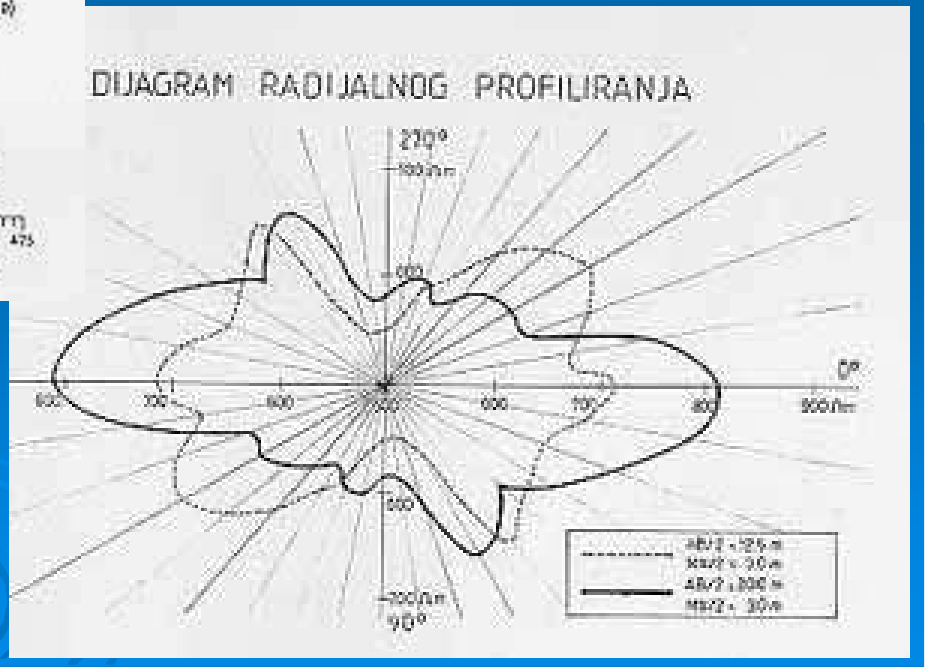
Geoelektrično profiliranje je metoda kod kojeg se koristi raspored s četiri elektrode. Kroz dvije se struja uvodi u tlo, a na druge dvije mjeri se razlika potencijala. O razmaku strujnih elektroda ovisi dubina mjerenja, veći razmak elektroda daje veću dubinu ispitivanja. Podaci ispitivanja odnose se na centralnu točku postava elektroda koji je stalan (tj. istražuje se uvijek istim dubinskim zahvatom), a mijenja se mikrolokacija mjerenja po točno određenom pravcu. Tom metodom dobije se lateralna promjena providnih otpora tj. lateralne promjene u materijalima i tektonici na ispitivanoj lokaciji.

Kružno geoelektrično profiliranje je metoda gdje se zadržava centralna točka i stalan raspored elektroda, a mijenja se azimut postava. Tom metodom određuje se smjer raspucalosti (pukotinske zone, rasjedi).

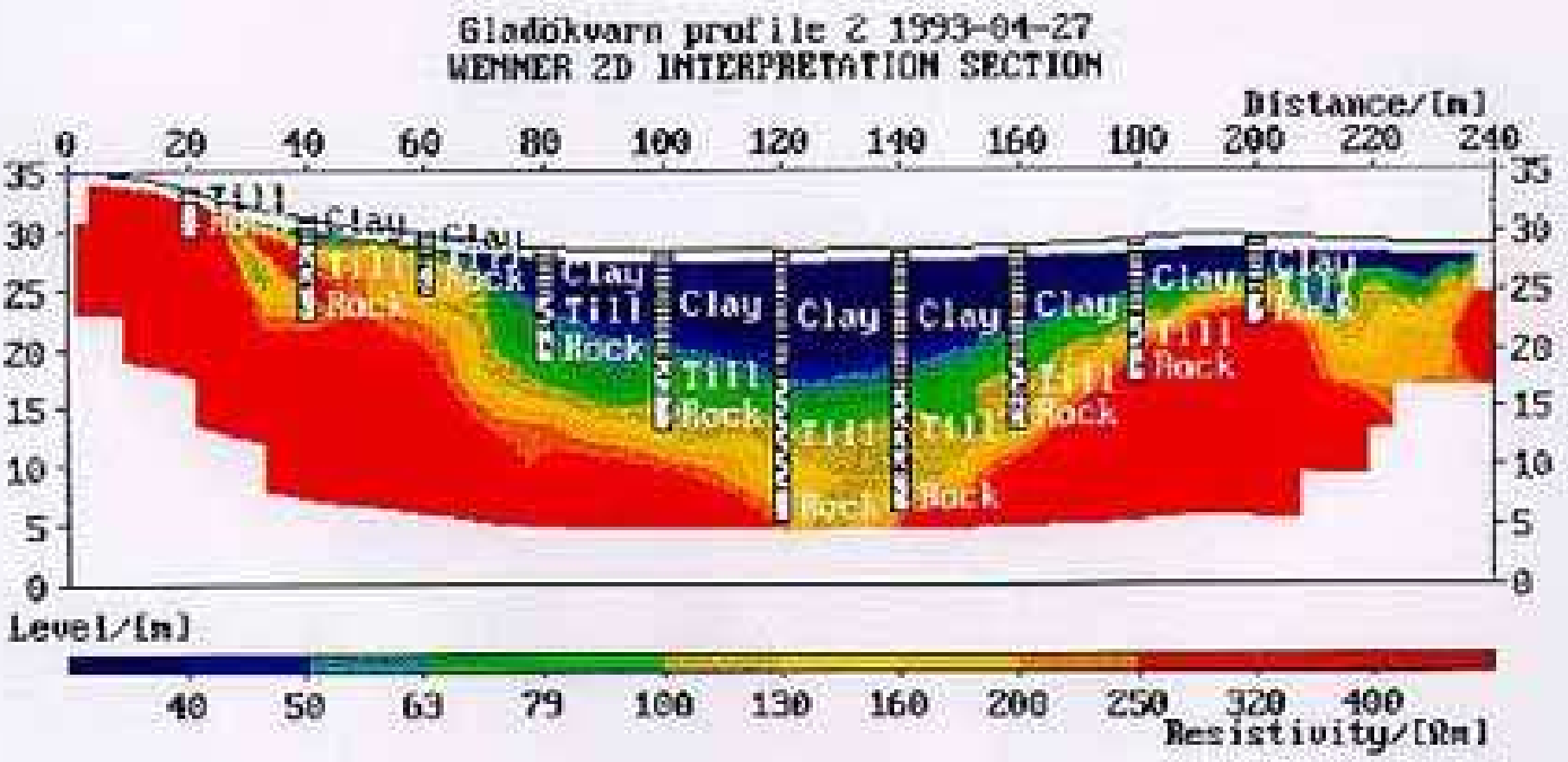
Geoelektrično profiliranje LIS metodom (Lund Imaging System) je multielektrodni sistem za dvodimenzionalno mjerenja otpornosti podzemlja, koji koristi Wennerov raspored elektroda. Kod tog mjerenja koristi se elektrodni raspored s više elektroda (42 i više), a selektor elektroda ES464 i notebook računalo vrše odabir aktivnih elektrode (četiri, dvije strujne i dvije potencijalne) za mjerenje. Podaci mjerenja odnose se na više dubinskih nivoa i spremaju se u toku mjerenja na disk notebook računala.

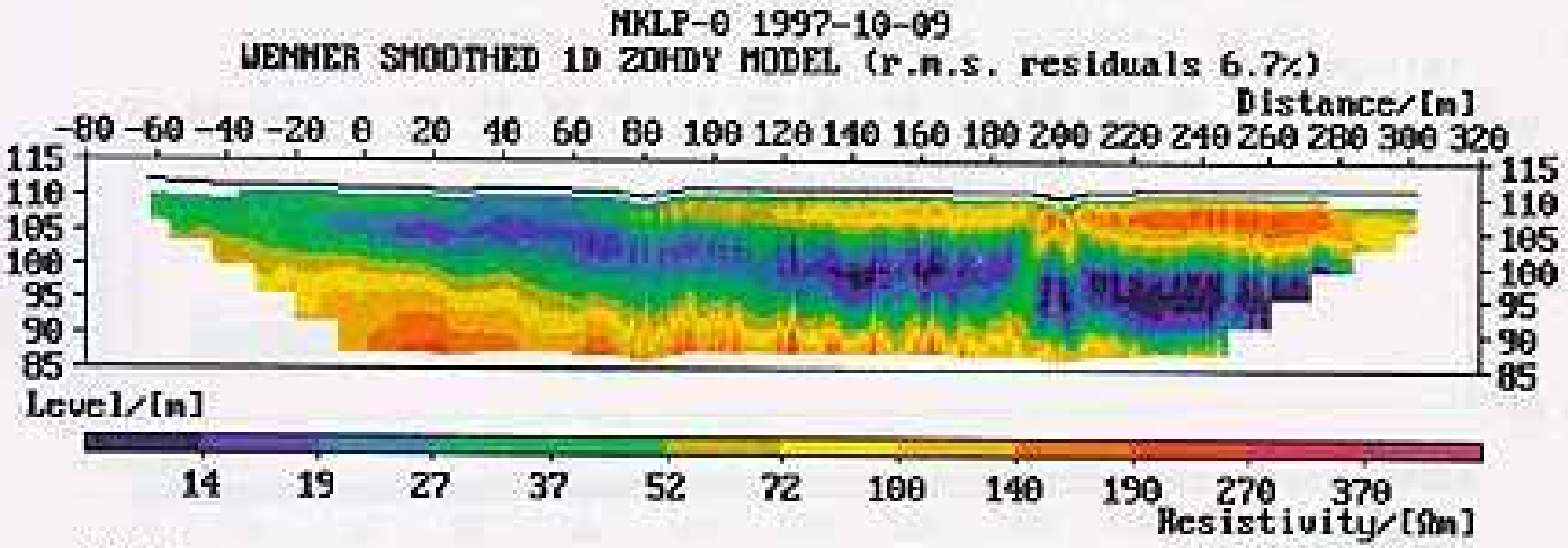
- Obrada rezultata mjerenja geoelektričnog profiliranja i kružnog profiliranja izvodi se kvalitativno.
- Mikrolokacije geoelektričnog profiliranja prikazuju se na situacionim nacrtima. Rezultati istraživanja prikazuju se dijagramima geoelektričnog profiliranja, kartama izooma geoelektričnog profiliranja.





Obrada rezultata **geoelektričnog profiliranja LIS metodom** izvršena je pomoću kompjuterskog programa koji nam daje dvodimenzionalnu sliku rasporeda otpornosti, a na temelju izračunate otpornosti interpretator daje prognoznu litološku determinaciju.




MKLP-0 1997-10-09
WENNER SMOOTHED 1D ZOHDY MODEL (r.m.s. residuals 6.7%)
Distance/[m]
-80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
115 110 105 100 95 90 85
Level/[m]
14 19 27 37 52 72 100 140 190 270 370
Resistivity/[Ωm]

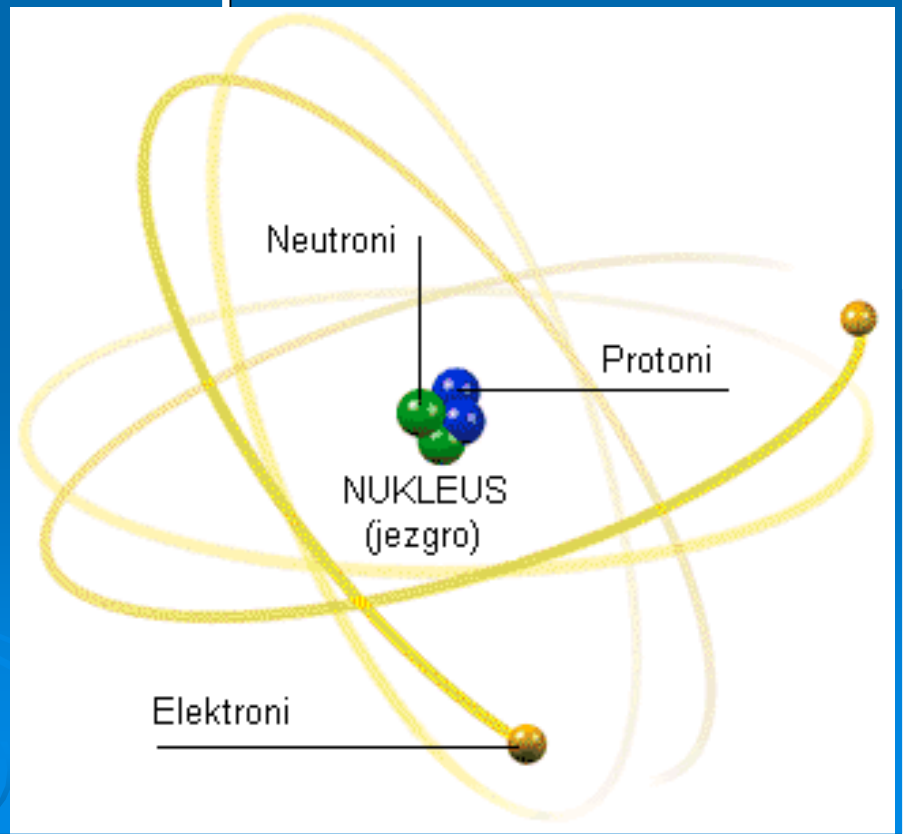
MKLP-0

3.3. SNIMANJA U BUŠOTINAMA

NUKLEARNO LOGIRANJE

- Mjerenje radioaktivnosti se vrlo često koristi u geofizičkim istraživanjima. Nuklearno logiranje ima izrazitu prednost zbog mogućnosti korištenja u zdencima čije su stjenke obložene. Tri najčešća načina mjerenja su: **mjerenje *gama* zraka (mjerenje prirodne radioaktivnosti**), **mjerenje *gama-gama* zračenja (mjerenje inducirane radioaktivnosti ili gustoće porozne formacije) i mjerenje inducirane radioaktivnosti putem neutrona.**

- **Atom** je predstavljen s centralnom jezgrom ("nukleus") koja se sastoji od pozitivno nabijenih protona i neutrona koji imaju neutralni električni naboj. Elektroni s negativnim nabojem kreću se po putanjama oko atomske jezgre.



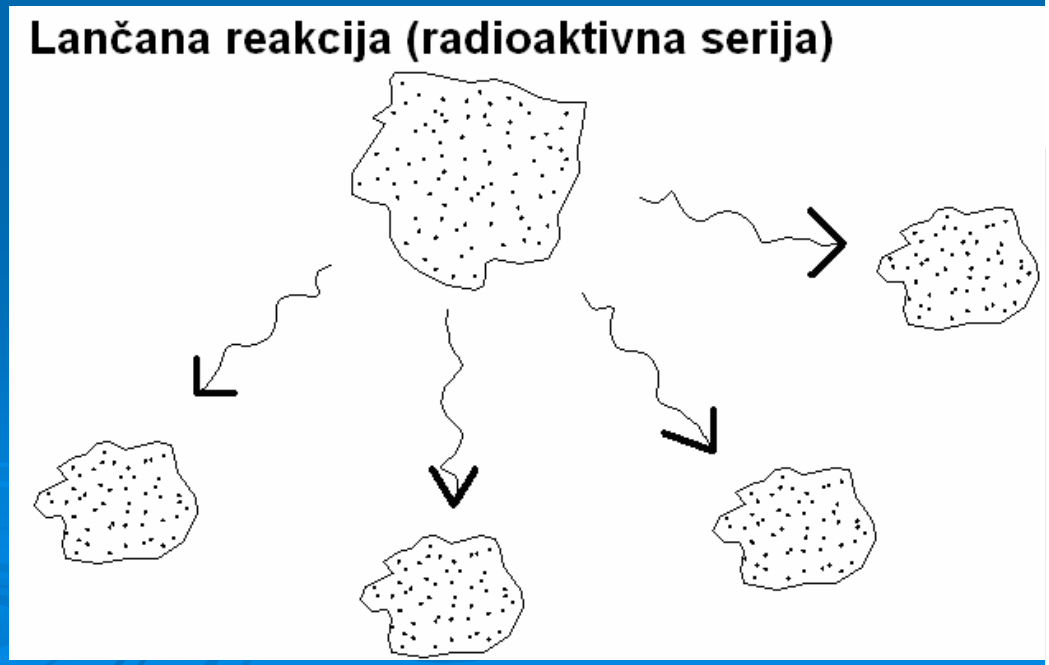
Broj atomske mase, A, zbroj je protona i neutrona koji se nalaze u jezgri, a atomski broj, Z, predstavlja broj elektrona koji se okreću oko jezgre.

- Prema dogovoru se broj atomske mase piše kao eksponent , a atomski broj kao indeks.

$$\text{Ugljik, } {}^{12}_{6}C = {}^{A}_{Z}C \Rightarrow C^{6\,protona + 6\,neutrona}_{6\,elektrona}$$

- Većina elemenata u prirodi postoji u formama raznih izotopa. Svi izotopi jednog elementa imaju isti atomski broj, a razlikuju se u broju atomske mase odnosno broju neutrona. Za primjer može se navesti prirodni uran sa svoja tri izotopa: ${}^{234}_{92}U$, ${}^{235}_{92}U$ i ${}^{238}_{92}U$

- Prirodna radioaktivnost se manifestira spontanom emisijom različitih čestica iz jezgre. To često rezultira dezintegracijom jezgre, odnosno njenom transformacijom u nove jezgre koje opet mogu biti stabilne ili nastaviti dezintegraciju.



Radijacija može biti u *formi alfa zračenja, beta zračenja i gama zračenja*.
Alfa zrake se sastoje od jezgri helija, ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, karakterizira ih slaba penetracija i mala snaga.
Beta zrake se sastoje od brzih elektrona, slabe su penetracije, a mogu se zaustaviti s nekoliko "mm" aluminija. Za razliku od *alfa* i *beta* zraka, *gama* zrake imaju stotinu puta jaču snagu penetracije.

Gama zrake imaju određenu energiju emisije koja se izražava u milionima elektron volti $[MeV]$.

Za svaki radioaktivni element, broj atoma koji odumire u vremenu, *t*, može se prikazati izrazom:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{\omega} t\right)$$

je broj atoma u trenutku t

broj atoma prisutan u trenutku to

predstavlja tzv. vrijeme polu-raspada.

The **electronvolt** (symbol **eV**) is a unit of energy. It is the amount of energy equivalent to that gained by a single unbound electron when it is accelerated through an electrostatic potential difference of one volt, in vacuo. In other words, it is equal to one volt (1 volt = 1 joule per coulomb) multiplied by the (unsigned) charge of a single electron.

One electronvolt is a very small amount of energy:

1 eV = 1.602 176 53(14)×10−19 J. [2] (or approximately 0.160 atto J)

One joule is the work done, or energy expended, by a force of one newton moving one meter along the direction of the force. This quantity is also denoted as a newton metre with the symbol N·m. Note that torque also has the same units as work, but the quantities are not the same. In elementary units:

$$1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

$$1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$$

One joule is also:

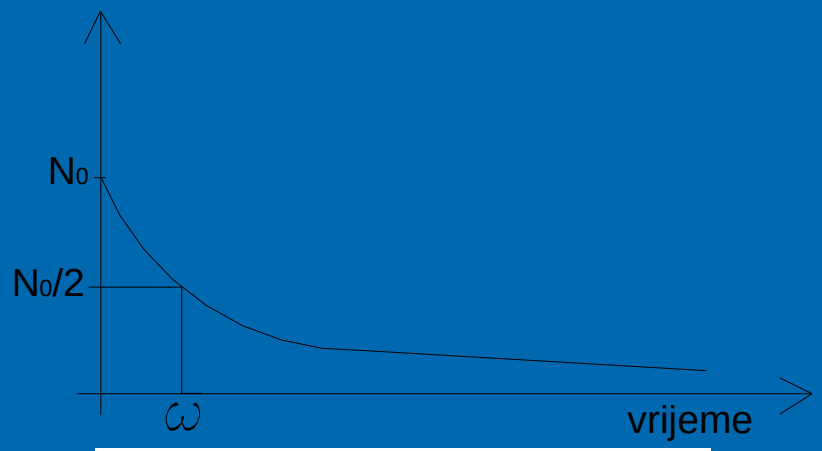
•The work required to move an electric charge of one coulomb through an electrical potential difference of one volt; or one coulomb volt, with the symbol C·V.

•The work done to produce power of one watt continuously for one second; or one watt second (compare kilowatt hour), with the symbol W·s. Thus a kilowatt hour is 3,600,000 joules or 3.6 megajoules

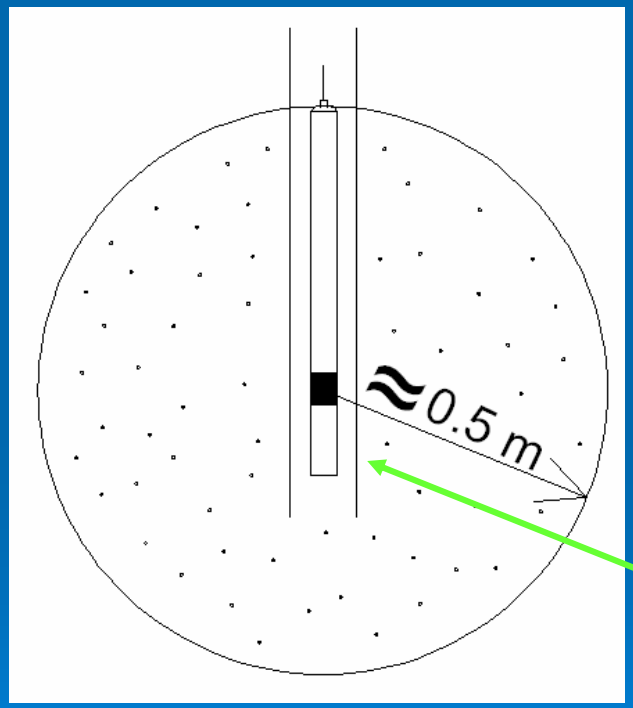
The newton is the unit of force in the SI system; it is equal to the amount of force required to give a mass of one kilogram an acceleration of one meter per second squared . Algebraically:

$$1\ \mathrm{N} = 1\ \frac{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}.$$

1000^n	10^n	Prefix	Symbol	Since[1]	Short scale	Long scale	Decimal equivalent in SI writing style
1000^8	10^{24}	yotta-	Y	1991	Septillion	Quadrillion	1 000 000 000 000 000 000 000 000
1000^7	10^{21}	zetta-	Z	1991	Sextillion	Trilliard (thousand trillion)	1 000 000 000 000 000 000 000
1000^6	10^{18}	exa-	E	1975	Quintillion	Trillion	1 000 000 000 000 000 000
1000^5	10^{15}	peta-	P	1975	Quadrillion	Billiard (thousand billion)	1 000 000 000 000 000
1000^4	10^{12}	tera-	T	1960	Trillion	Billion	1 000 000 000 000
1000^3	10^9	giga-	G	1960	Billion	Milliard (thousand million)	1 000 000 000
1000^2	10^6	mega-	M	1960		Million	1 000 000
1000^1	10^3	kilo-	k	1795		Thousand	1 000
$1000^{2/3}$	10^2	hecto-	h	1795		Hundred	100
$1000^{1/3}$	10^1	deca-	da	1795		Ten	10
1000^0	**10^0**	***(none)***	***(none)***	**NA**		**One**	**1**
$1000^{-1/3}$	10^{-1}	deci-	d	1795		Tenth	0.1
$1000^{-2/3}$	10^{-2}	centi-	c	1795		Hundredth	0.01
1000^{-1}	10^{-3}	milli-	m	1795		Thousandth	0.001
1000^{-2}	10^{-6}	micro-	µ	1960[2]		Millionth	0.000 001
1000^{-3}	10^{-9}	nano-	n	1960	Billionth	Milliardth	0.000 000 001
1000^{-4}	10^{-12}	pico-	p	1960	Trillionth	Billionth	0.000 000 000 001
1000^{-5}	10^{-15}	femto-	f	1964	Quadrillionth	Billiardth	0.000 000 000 000 001
1000^{-6}	10^{-18}	atto-	a	1964	Quintillionth	Trillionth	0.000 000 000 000 000 001
1000^{-7}	10^{-21}	zepto-	z	1991	Sextillionth	Trilliardth	0.000 000 000 000 000 000 001
1000^{-8}	10^{-24}	yocto-	y	1991	Septillionth	Quadrillionth	0.000 000 000 000 000 000 000 001



- Drugim riječima, ω, je vrijeme potrebno da se početni broj atoma reducira na pola te se često naziva u literaturi kao konstanta polu-raspada.



RADIOAKTIVNOST STIJENA

Mala radioaktivnosti	Srednja radioaktivnosti	Jaka radioaktivnosti
Vapnenci	pješčenjaci	granitne i bazaltne
Dolomiti	formacije pijeska	pješčenjaci bogati mineralima urana i torija
		većina glina

Uređaj za mjerenje radioaktivnosti stijena

- Radioaktivnost stijena mjeri se detektorom. Volumen mjerenja je kugla s centrom na detektoru čiji volumen generira 99 % prirodnog zračenja. Radijus ovisi o formaciji, a pogotovo o gustoći stijene (veća gustoća - radijus manji).

MJERENJE GAMA ZRAČENJA

- Ovo je najjednostavniji nuklearni zapis u geofizici i temelji se na mjerenju prirodne radioaktivnosti porozne formacije. Zapis s mjerenjem *gama* zraka, koristan je pri litološkom opisu porozne sredine te lociranju glinenih proslojaka u podzemlju, koji često označavaju granice vodonosnih slojeva.

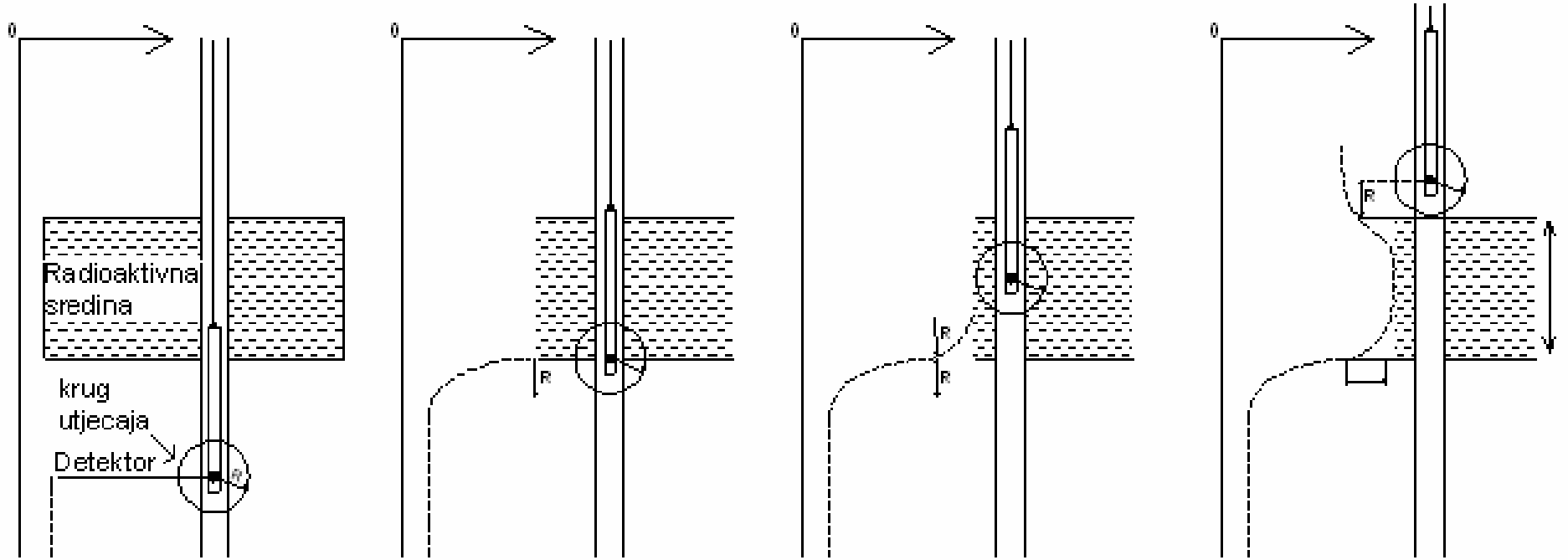
- Većina izotopa je radioaktivna, međutim samo tri izotopa su važna u prirodnoj emisiji gama zračenja koje dolazi od raznih stijena i minerala. Ostali izotop su rijetki i vrlo nestabilni. U geofizičkim istraživanjima koriste se:

Uran, $^{238}_{92}U$ - emitira *gama* zračenje do 2.446 MeV
; u Zemljinoj kori se nalazi u koncentraciji 2 do 3 *ppm* (mg l^{-1})

Torij, ^{232}Th - emitira *gama* zračenje do 2.6 MeV
; nalazi se u koncentraciji od 8 do 12 *ppm*

Kalij (Potaša- vrsta kalijevog karbonata) ^{40}K - nalazi se u znatnim količinama u stijenama - oko 3 *ppm.*
Energija zračenja je relativno mala i iznosi oko 1.46 MeV.

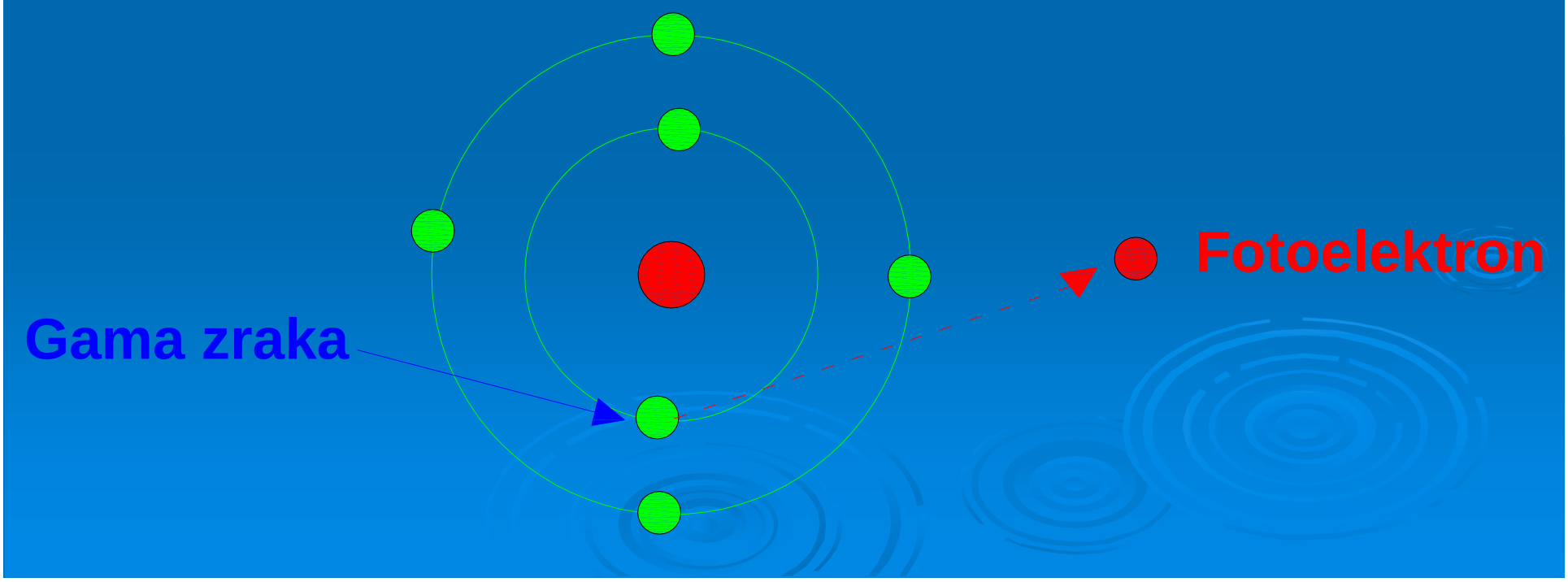
- Slika pokazuje tipičnu skicu jednog uređaja za mjerenje *gama* zračenja, te njegov zapis, koji na razlici mjerenja zračenja **identificira određene proslojke u poroznoj formaciji.**



Fotoelektrični efekt

- Fotoelektrični efekt nastaje kada gama zraka (energije ispod 1 MeV) prolazeći kroz tvar pogodi jedan elektron iz orbite atoma i preda mu svu svoju energiju. Samim time zraka prestane postojati, a elektron biva izbačen iz elektronskog omotača. Razlika između energije zračenja i energije kojom je dotični elektron vezan za jezgru poslužit će tom elektronu za kretanje kroz tvari. Elektron izbačen na ovaj način naziva se fotoelektron. Fotoelektrični efekt karakterističan je za gama zrake niske energije (ispod 1MeV).

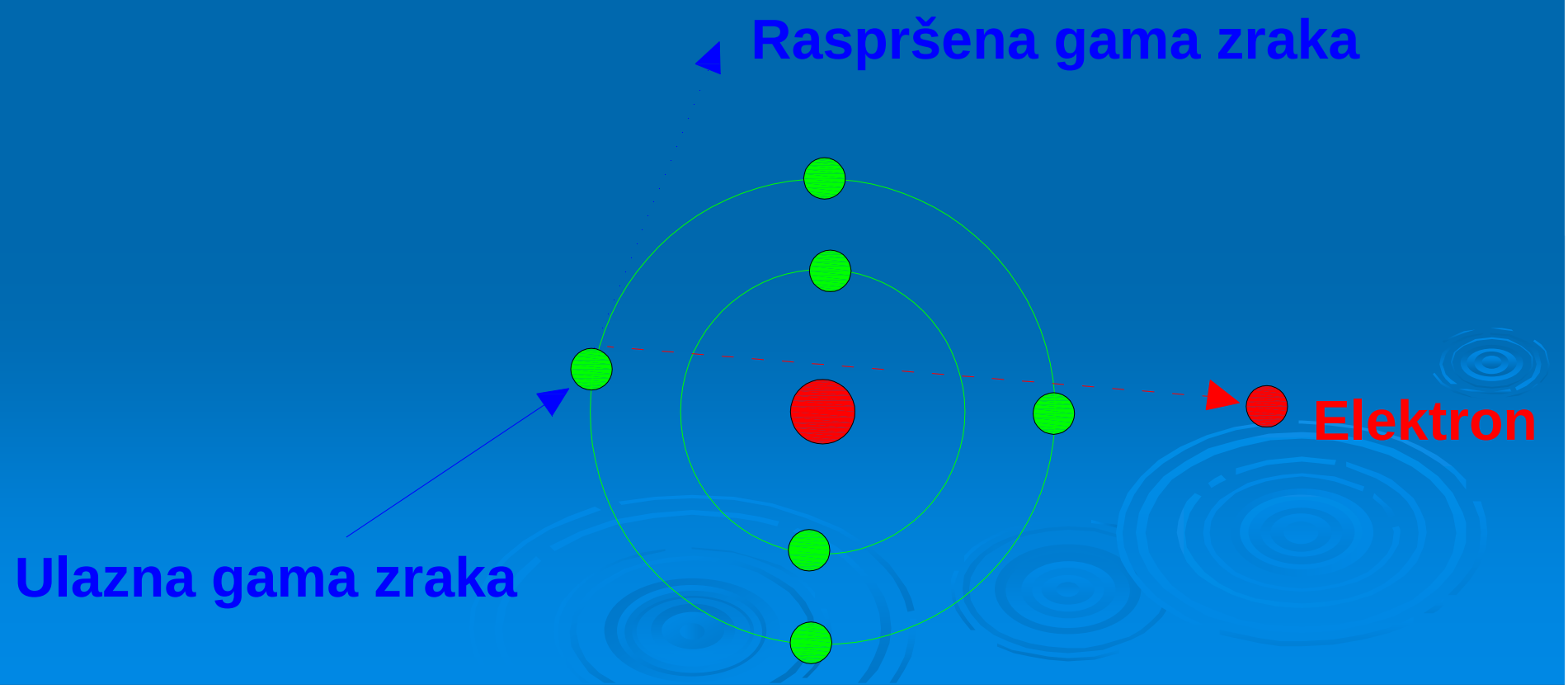
E < 0.1 MeV



Compton efekt

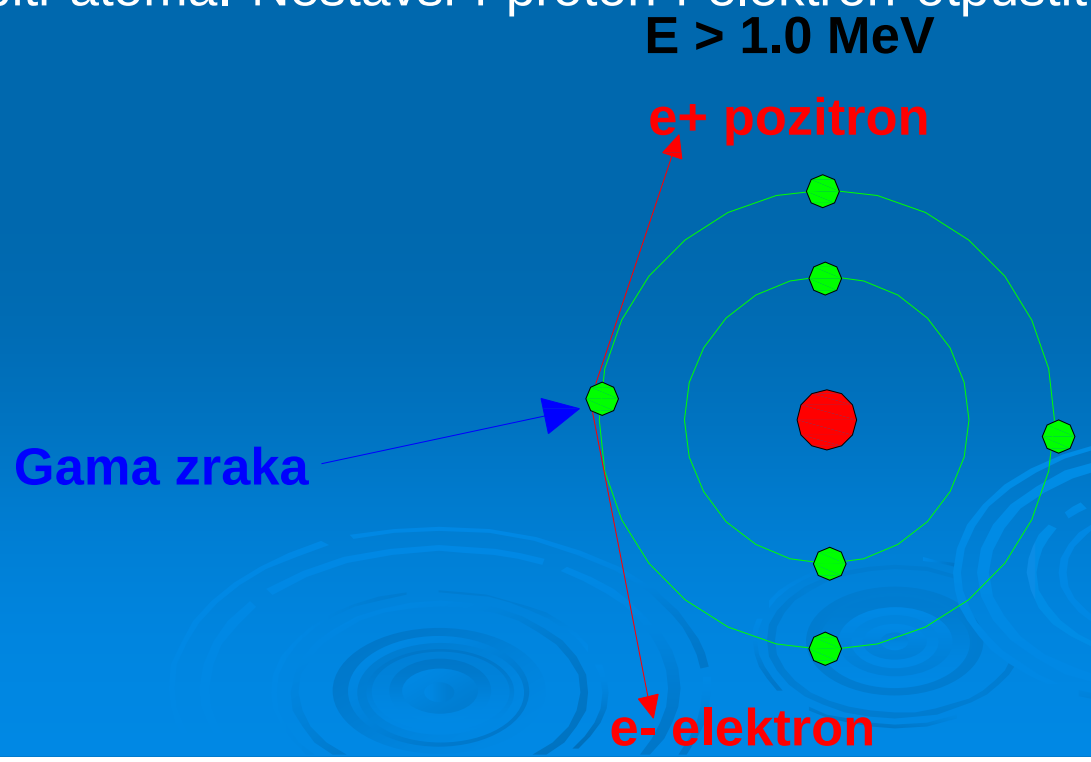
- Compton efekt je karakterističan za gama zrake srednje energije (oko 1MeV). Pri ovome procesu kvant gama zraka udari u elektron i predaje mu dio svoje energije i količine gibanja. Pri tome elektron izleti iz atoma, a gama zraka nastavlja svoj put u promijenjenom smjeru i sa smanjenom energijom. Oslobođeni elektron se kreće i ionizira okolnu tvar.

E = 0.1 - 1 MeV



Dvostruki efekt ("Pair production") – proizvodnja ionskih parova

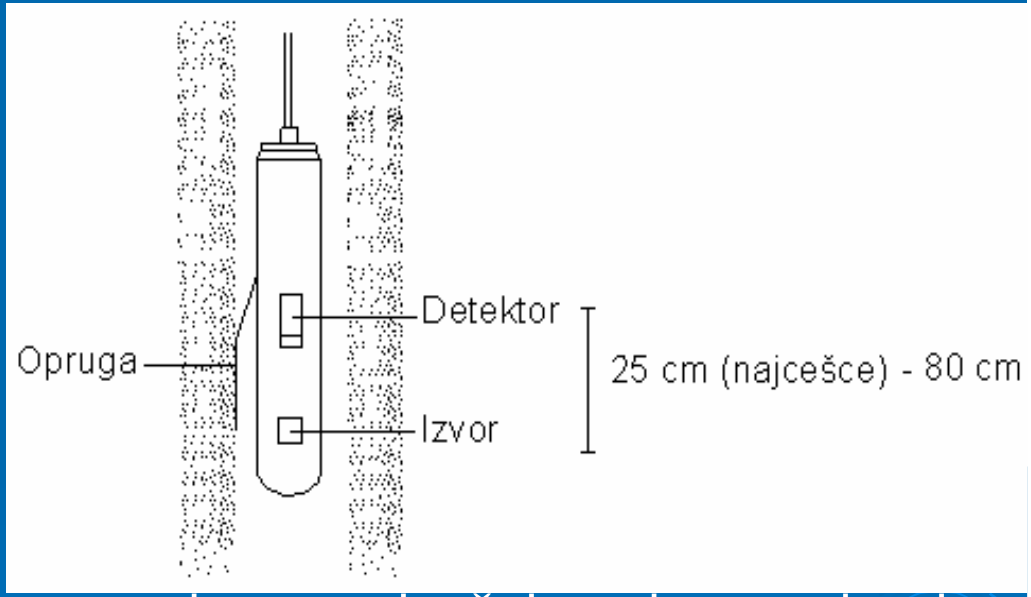
- Proizvodnja ionskih parova se može zbiti samo ako zraka s najmanje 1.02MeV (dva puta veća energija od energije mirovanja elektrona) prođe blizu ili kroz električno polje jezgre atoma. Gama zraka prošavši kroz polje prestaje postojati, pretvorivši se u par elektron - pozitron. Ukoliko dva novonastala elektrona posjeduju energiju za kretanje, oni će se kretati, sudarati s molekulama i elektronima i ionizirati tvar. Kad izgubi kinetičku energiju elektron će se prihvatiti za atom pa će atom postati negativan ion. Pozitron (pozitivno nabijeni elektron) će se i situaciji da nema kinetičke energije, spojiti s najbližim elektronom u orbiti atoma. Nestavši i proton i elektron otpustit će se 2 kvanta gama zračenja.



MJERENJE GAMA-GAMA ZRAČENJA ILI ZAPISI GUSTOĆE FORMACIJE

- Za razliku od mjerenja prirodnog gama-zračenja, **gama-gama mjerenje zasniva se na induciranom zračenju, odnosno mjerenju interakcije između inducirane radijacije i atoma u poroznoj sredini koji su izloženi radioaktivnom bombardiranju**. Glavna svrha ovog geofizičkog zapisa procjena je totalne gustoće formacije što kasnije olakšava procjenu samog poroziteta.

- Samo mjerenje se vrši pomoću uređaja skiciranog na slici. Koristeći točkasti izvor radijacije (najčešće kobalt - 60 ili cezij - 137) porozna formacija se bombardira *gama* zrakama energije u rasponu od 0.1 - 1.0 MeV.



- Prolazeći kroz porozni materijal *gama* zrake se prigušuju ovisno o tipu i atomskom broju radioaktivnih elemenata na poroznom materijalu. **Intenzitet *gama* zračenja registriran na detektoru proporcionalan je totalnoj gustoći formacije**. Mjerenje *gama-gama* zračenja u naftnoj industriji zapisano je izravno u jedinicama g/cm^3, dok se u hidrogeologiji koristi jedinica *cps* (“counts per second”).

- Povećanje *cps* odgovara smanjenju gustoće porozne sredine. *Gama* zračenjem se može vrlo precizno detektirati nivo podzemne vode također obzirom na izrazitu razliku u gustoći vode i poroznog materijala.

- Nivo podzemne vode odgovara oštroj promjeni u gustoći budući da se, ulaskom instrumenta u zasićenu formaciju, totalna gustoća povećava, dakle detektirana radijacija prigušuje (manji cps). (gustoća vode je 1.0 g/cm^3, gustoća pješčenjaka je 2.65 g/cm^3)

- Totalna gustoća mjerenog uzorka porozne sredine jednaka je zbroju gustoća svih sastojaka unutar uzorka (npr. voda i stijena) pomnoženih s postotkom učešća u totalnom volumenu uzorka. Dakle, za uzorak mjeren *gama-gama* zračenjem koji se sastoji od jedne vrste materijala i vode, slijedeća relacija se koristi za procjenu poroziteta:

$$\rho_b = \varphi \rho_t + (1-\varphi)\rho_m$$

gustoća čvrste faze (stijena)

prostorna gustoća $\left(\frac{M}{V}\right)$ detektirana *gama-gama* zračenjem

porozitet

gustoća vode u poroznoj formaciji

Iz gornjeg izraza proizlazi porozitet kao funkcija gustoće:

$$\varphi = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_t} = \frac{\text{gustoca zrna - prostorna gustoca}}{\text{gustoca zrna - gustoca tekucine}}$$

- U slučaju da se *porozna formacija sastoji od više materijala različite mineraloške strukture* (pogotovo ako sadrži proslojke gline), gornji izraz za totalnu gustoću se proširuje dodatnim članovima koji predstavljaju komponente prisutnog materijala u mjerenom uzorku:

$$\rho_b = \varphi \rho_t + \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2 + \ldots$$

$\rho_i =$ gustoća komponente *i* $\qquad$ $\varphi_i =$ proporcija volumena za komponentu *i*

Mjerenjem prigušenja između poznate radijacije na izvoru i registracije radijacije na detektoru, ρ_b , se može procijeniti:

$$I_{\text{detektor}} = I_0 \exp\left(\mu_m \times d_x\right)$$

$$\mu_m \propto \rho_b$$

$I_0 =$ radijacija na izvoru $\qquad$ $d_x =$ udaljenost detektora od izvora

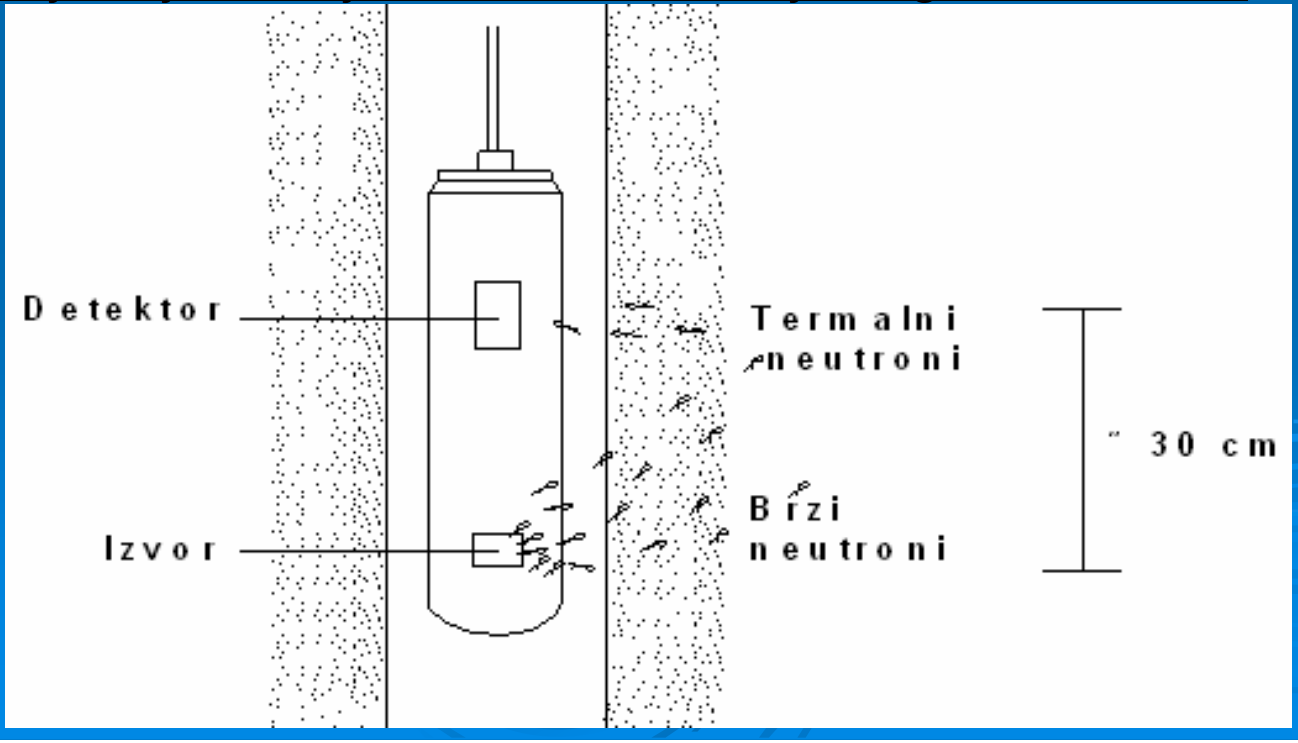
$\mu_m =$ koeficijent apsorpcije mase

- Za inženjersku praksu važno je napomenuti da ***gama-gama* zapis omogućava dobru procjenu litologije porozne sredine iz mjerenja gustoće** što može biti vrlo korisna informacija za temeljenje hidrotehničkih građevina. *Gama-gama* zapis iz bušotine može se koristiti za procjenu poroziteta te detekcije nivoa podzemne vode.

MJERENJE EMISIJE NEUTRONA

- Mjerenje emisije neutrona **registrira količinu vodika u poroznoj formaciji**. Za vrijeme mjerenja porozni medij je bombardiran vrlo brzim neutronima (10000 km/s) koji imaju energiju u rasponu od 4 do 6 MeV.

- Izvor **radijacije kontinuirano emitira brze neutrone u svim smjerovima**. Distribucija neutrona je u obliku kugle u kojoj energija i broj neutrona opadaju s udaljenošću od izvora. Brzi neutroni udaraju u atomske jezgre elemenata na poroznoj sredini i gube energiju i brzinu emisije. Neutroni koji su usporeni sukcesivnim kolizijama imaju energiju od 0.1 do 100 MeV te ulaze u toplinsko stanje koje se bilježi na detektoru mjernog instrumenta.



- Detektor u hidrogeološkim aplikacijama je **brojač osjetljiv na termalne neutrone i zapisuje neutrone usporene kolizijama s atomskim jezgrama vodika**. Takav zapis je mjerodavan za koncentraciju vodikovih atoma u poroznoj formaciji. **Gustoća termalnih neutrona varira ovisno o udaljenosti od izvora i broju vodikovih atoma koji su prisutni u poroznoj sredini.**

- Kako je u stijeni i drugim poroznim materijalima vodik prvenstveno prisutan u vodi i ugljikohidratima, mjerenjem količine vodika moguća je procjena poroziteta i stupnja zasićenja u poroznom mediju. Neutronski zapis vrlo dobro registrira plutajuće proslojke vode. Prilikom prolaska kroz takve slojeve povećava se naglo koncentracija vodika, odnosno opada kad instrument napušta tu zonu. **Pretpostavka neutronskog zapisa je da kompletan vodik dolazi iz vode.**

- Međutim kako mnogi minerali također sadrže vodik interpretacija i analiza mjerenja emisije neutrona nije lagan zadatak u geofizici.

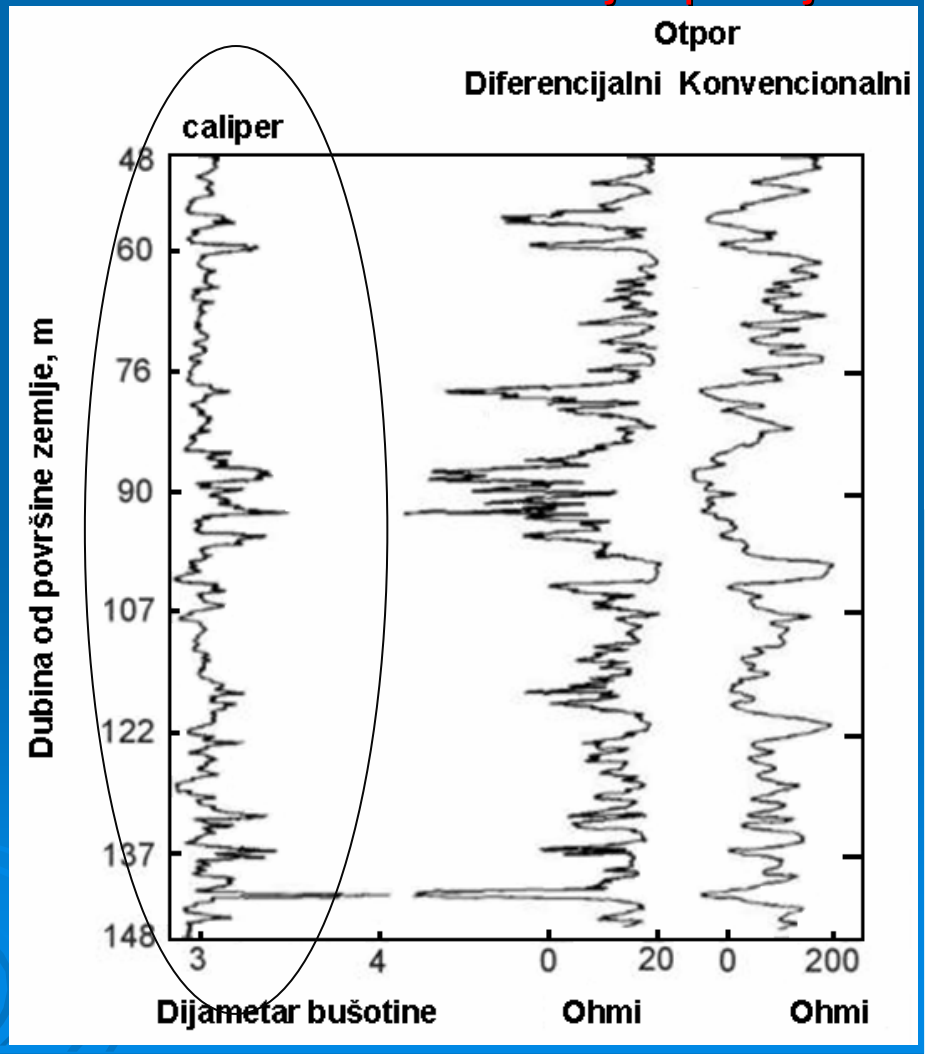
- Broj termalnih neutrona koji se registrira na detektoru obrnuto je proporcionalan koncentraciji vodika u poroznom mediju.

- Vodik prisutan u poroznoj sredini koji sudjeluje u prigušenju induciranih neutrona je uglavnom u vodi, tako da **povećanje količine vodika odgovara povećanju poroziteta**. U naftnoj industriji, geofizička istraživanja, putem zapisa emisije neutrona, su automatski kalibrirana u jedinicama za porozitet, dok je u hidrogeologiji zapis dan u *cps* .

DRUGI GEOFIZIČKI ZAPISI

Mjerenje dijametra bušotine ("caliper log")

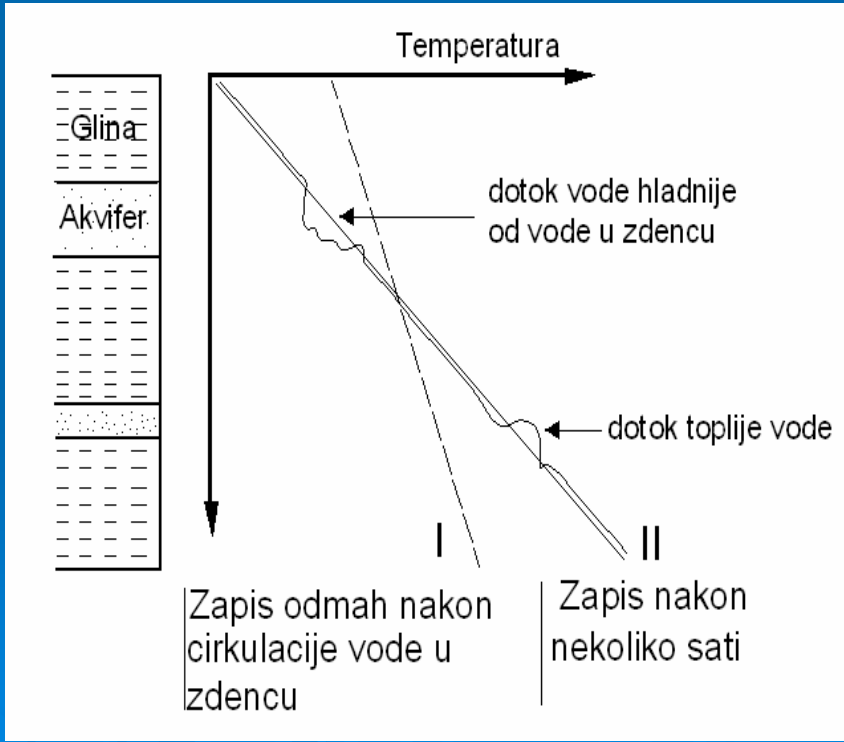
- Premda često zanemareno, mjerenje dijametra bušotine, u praksi može predstavljati vrlo važan podatak. Iz prijašnjih sekcija je vidljivo kako mnoga mjerenja trebaju biti korigirana ili dodatno kalibrirana u slučaju promjene dijametra bušotine.
- Mogućnost pravilne korekcije zahtjeva postojanje kontinuiranog zapisa o dijametru bušotine. **Dijametar bušotine se mijenja kao rezultat: promjene tehnike bušenja, erodiranja stjenke bušotine, bubrenja glinenih proslojaka ili formiranja sloja na stjenci bušotine kao rezultat akumuliranja čestica iz tekućine korištene pri bušenju.** Promjena dijametara bušotine **zapisuje se najčešće u centimetrima**. Zapis dijametra bušotine je koristan i vrlo važan za korekcije i kalibracije ostalih geofizičkih zapisa.



Mjerenje temperature

- Mjerenje varijacije temperature u bušotini također **spada u pomoćne geofizičke zapise koji se primarno koriste kao korekcija za zapise električnog otpora i potencijala.** Dvije vrste temperaturnih mjerenja su moguća. Kontinuirani zapis temperature korištenjem senzora koji se spušta u bušotinu li zapis temperaturnog gradijenta korištenjem dva senzora. U drugom slučaju, zapis se zove diferencijalni zapis temperature.

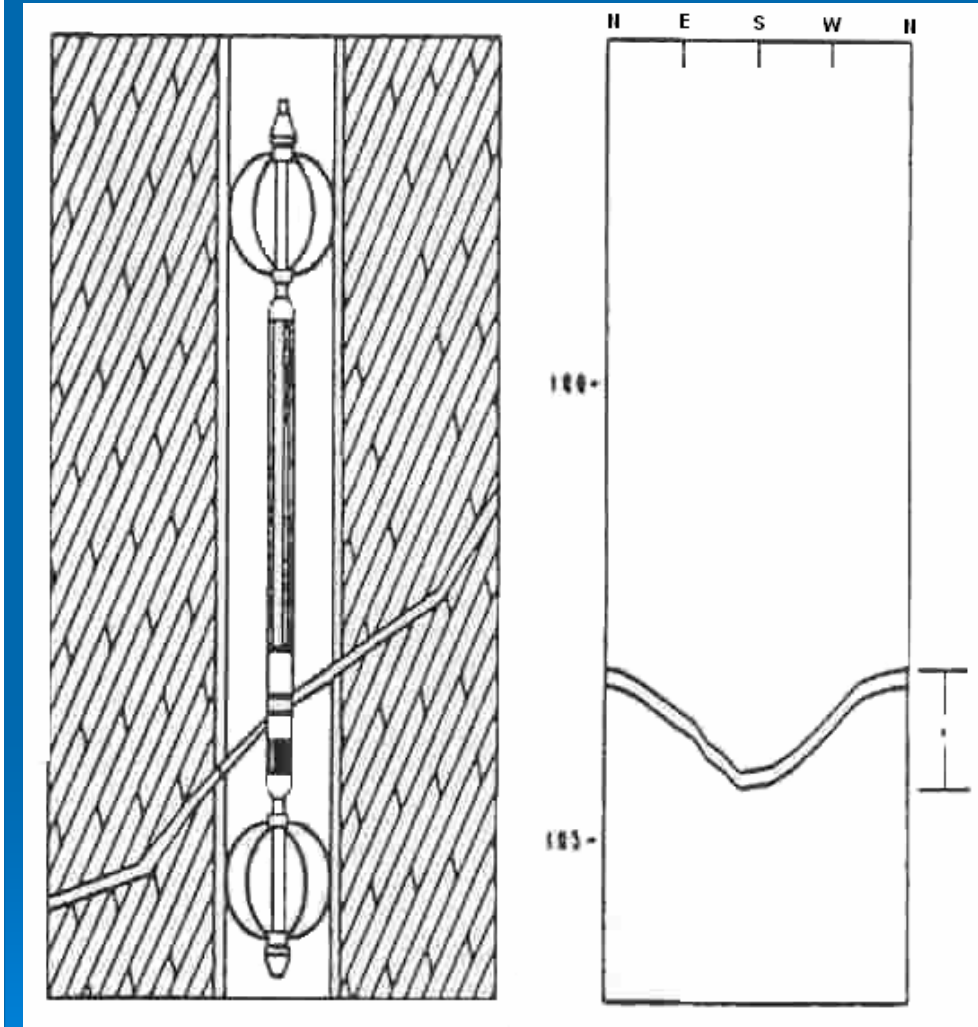
- Temperatura podzemne vode općenito se povećava s dubinom. U prosjeku povećanje od **1° C za svakih 30 m** zove se *geotermalni stupanj* koji inače varira od mjesta do mjesta i ovisi o tipu porozne formacije. Pri bušenju istražne bušotine, temperatura (zbog cirkulacije tekućine bušenja) stoji konstantna po vertikali. Nakon bušenja, voda u bušotini počinje ekvilibrirati na osnovu temperature porozne formacije te se formira geotermalni gradijent. Dakle, **temperatura se povećava s dubinom**. Slika pokazuje zapis temperature te moguća zapažanja s mjerenjem temperature.

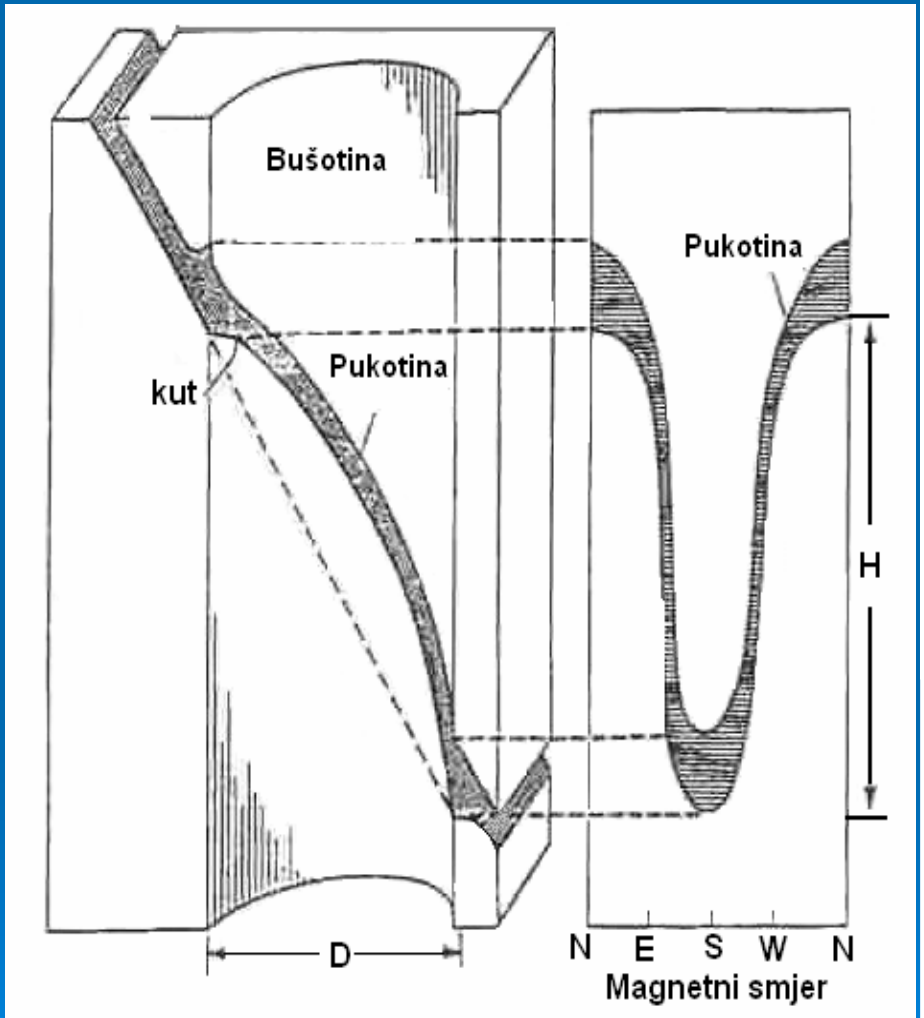


- **Temperaturna mjerenja u bušotini su potencijalno korisna u identifikaciji infiltracije i prihranjivanja s površine** te u korekciji mjerenja električnog otpora koji se mijenja s temperaturnim razlikama. Mjerenja temperature se, također, mogu vršti ubacivanjem tople ili hladne vode u bušotinu, a zapisi temperature mogu se dobiti u različitim vremenima poslije ubacivanja. Tim se eksperimentima, mogu utvrditi porozne zone u bušotini, kao i potencijalna komunikacija po vertikali između različitih proslojaka u podzemnoj sredini.

Mjerenje zvučnog signala ("borehole televiewer")

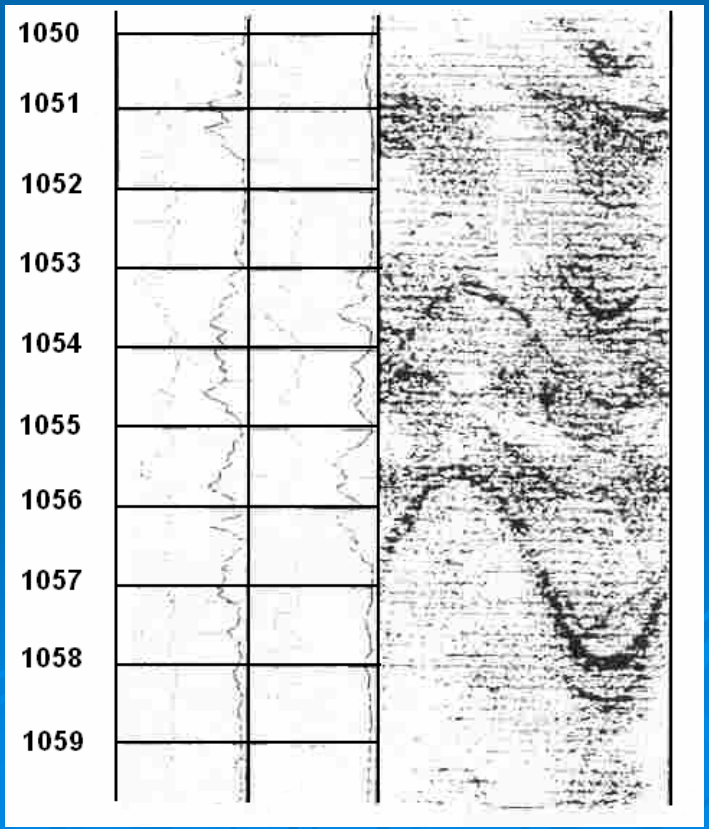
- Zapis mjerenja zvučnog signala u bušotini **zasniva se na transmisiji zvučnih pulsova, te mjerenju njihove refleksije od stjenke bušotine**. Sam instrument sastoji se od rotirajućeg dijela koji emitira oko 1500 pulsova zvuka u sekundi. Slika pokazuje skicu mjernog instrumenta i zapis koji registrira postojanje pukotine u poroznoj sredini. Mjerenje zvučnog signala u bušotini je vrlo korisno u identifikaciji položaja pukotina, njihovom nagibu, gustoći te veličini otvora. Što je čvršća stijena i bušotina pravog cilindričnog oblika to je veća amplituda reflektiranog zvučnog signala. Pukotine u stijeni značajno reduciraju amplitudu reflektiranog zvučnog signala i u zapisu (vidi sliku 3.34.) imaju sinusoidalni oblik.


N
E
S
W
N


Bušotina
Pukotina
Pukotina
kut
H
D
N
E
S
W
N
Magnetni smjer

ZAKLJUČNA ZAPAŽANJA

- Sigurno je da postoje mnogi aspekti geofizičkih mjerenja (pogotovo novija instrumentacija) koji nisu dotaknuti u ovom tekstu i za njihovo razumijevanje je potrebno koristiti druge izvore informacija, te **konzultirati stručnjake u geofizici**.
- Svako **individualno geofizičko mjerenje, samo za sebe, ne daje potpunu informaciju, ali povezano s nizom drugih mjerenja u skup geofizičkih zapisa, predstavlja vrlo važan izvor informacija** i povećava naše razumijevanje podzemlja.



4. GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

- **Geološka istraživanja izravno su povezana s geofizikom** i danas se praktički zajedno obavljaju. Teško je ponuditi dobar geološki model podzemlja bez interpretacije geofizičkih mjerenja.

- Istraživanja podzemlja najčešće se provode za potrebe izgradnje pa **sudjelovanje građevinskog inženjera predstavlja treću kariku u lancu koji vodi uspješnoj izgradnji građevinskih objekata.**

- **Vrsta i raspodjela vodonosnih i vodonepropusnih slojeva u geološkom sistemu je kontrolirana *litologijom, stratigrafijom* i strukturom naslaganog materijala**. Litologija je fizikalni opis porozne formacije koji u sebi sadrži prikaz mineralne kompozicije, veličinu i pakiranje zrnatog materijala. Stratigrafija opisuje geometrijsku relaciju, te starosnu razliku između različitih zona, proslojaka i ostalih identificiranih segmenata u geološkom sistemu.

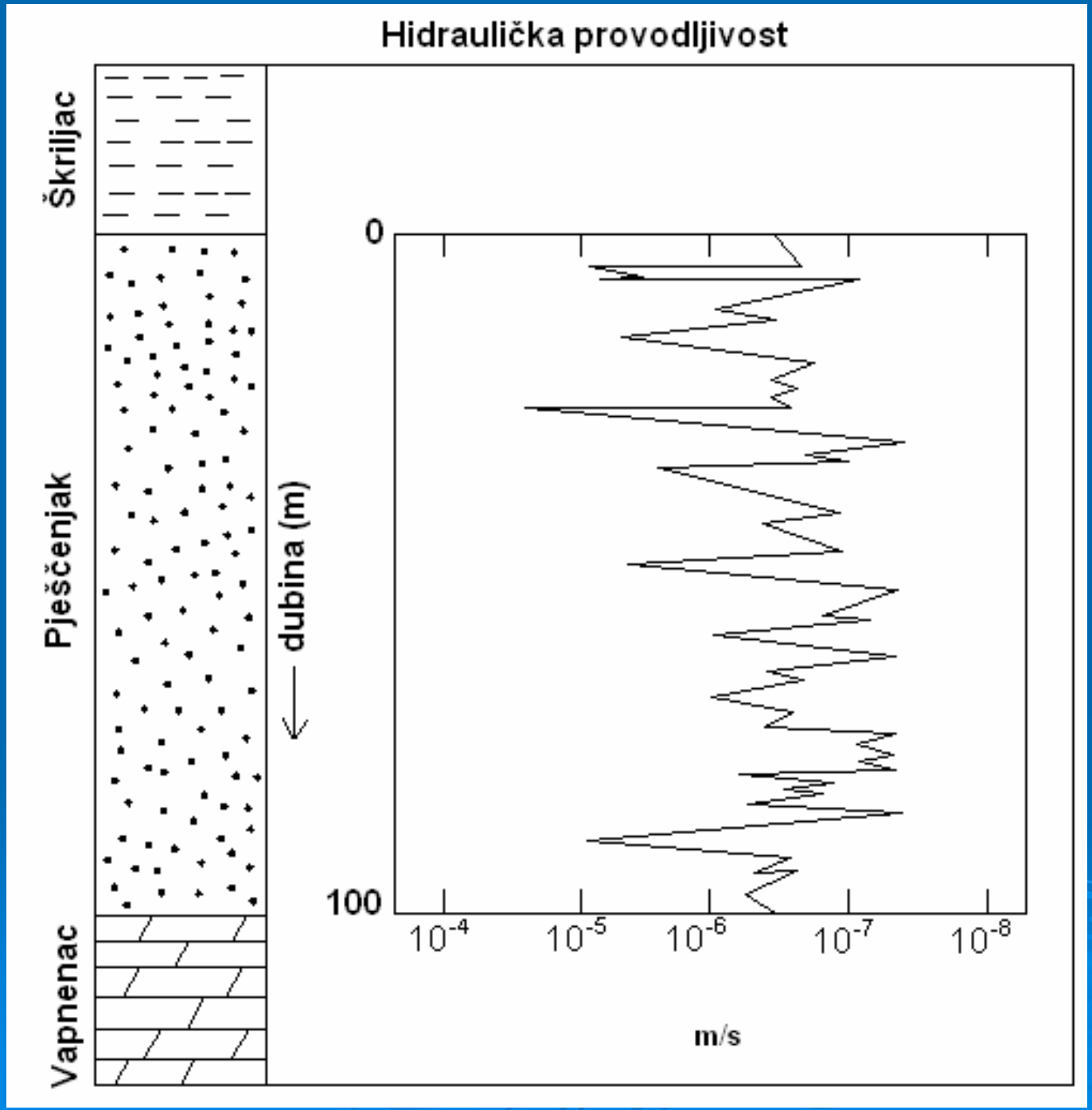
- **Litologija, stratigrafija, te strukturalne karakteristike, osnova su za kvalitetan opis distribucije vodonosnih i vodonepropusnih slojeva**.

4.1. ALUVIJ

- Aluvijalni materijali mogu se naći u skoro svim regijama. Oni su vrlo važni izvori za vodoopskrbu iz podzemlja. Aluvij **spada u nekonsolidirane formacije** koje su s vremenom deponirale šljunak, pijesak i sitnu prašinu s primjesama gline. To su materijali koji su se taložili fizikalnim procesima uz korita rijeka i na prostorima riječnih inundacija.

- Uslijed stalnog pomicanja (meandriranja) korita rijeka te promjenama brzina deponiranja, **aluvijalni depoziti imaju veliku varijabilnost teksture materijala koja se odmah odražava na heterogenost hidrauličkih karakteristika** čiji točni opis je preduvjet za kvalitetan opis protoka i pronosa materijala kroz poroznu sredinu.

- Veliki broj testova hidrauličke vodljivosti obavljen je u aluvijalnim formacijama i pokazao je da se varijacija u vodljivosti kreće više od 20 do 30 puta. Ovakva heterogenost u poroznoj sredini primarno je rezultat različite distribucije veličine zrnatog materijala te individualnih slojeva formiranih u procesu nastajanja kroz geološke epohe.


Hidraulička provodljivost
Škriljac
Pješčenjak
Vapnenac
dubina (m)
0
100
10-4
10-5
10-6
10-7
10-8
m/s

4.2. TALOŽENJE VJETROM

- Materijali koji su transportirani i deponirani vjetrom primarno se sastoje od pijeska i finog praha. To su formacije u područjima gdje su male oborine i gdje se nalazi dovoljno pijeska za transport vjetrom. Pješčane dine su primjeri takvih vrsta deponiranja. U sjevernoj Americi postoje formacije pješčane prašine koja formira depozite, tzv. prapor ili les, koji se nalaze plitko u podzemlju. Zbog primjesa gline i kalcijevog karbonata, ti slojevi su srednje kohezivni i imaju porozitet oko 40-50 %, dok im se provodljivost kreće od $10^{-5} - 10^{-7}\,[m/s]$.

4.3. TALOŽENJE LEDOM

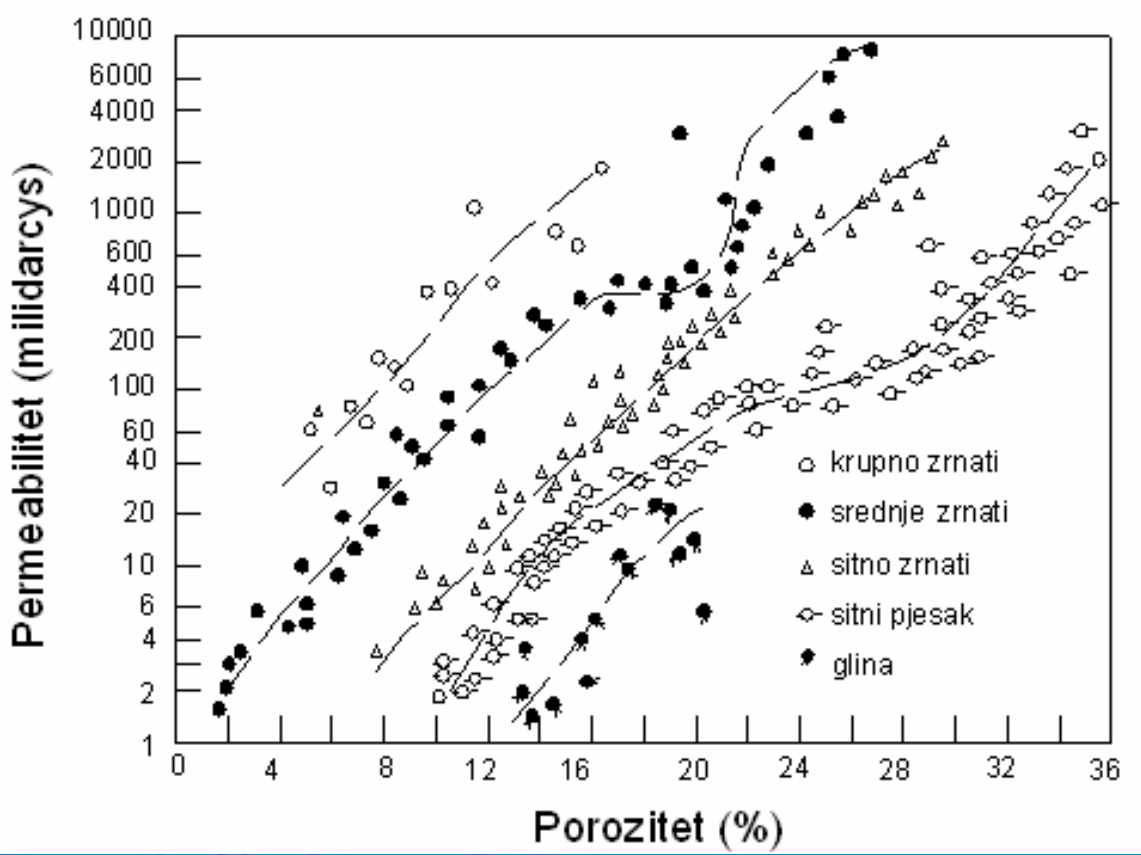
- Sjeverni dijelovi USA, Kanada, te sjeverna Europa ima geološke formacije koje su nastale od kontinentalnih ledenjaka. Najčešće su to formacije od ledenih sedimenata koje u sebi sadrže primjese pijeska, pješčane prašine, te gline. Takve formacije, tzv. “ledeni pokrovi ” su vodonosni slojevi ako u sebi nemaju veće količine prašine i gline. U protivnom im može naglo opasti provodljivost (slučaj sa Sjevernom Amerikom).

4.4. SEDIMENTNE STIJENE

Pješčenjačke stijene

- U mnogim zemljama pješčenjačke stijene su vodonosni slojevi bogati vodom i predstavljaju glavne izvore vodoopskrbe iz podzemnih rezervi. Raspodjela hidrauličke vodljivosti u pješčenjacima, veoma je bitna za pravilnu procjenu izdašnosti vodonosnih slojeva, kao i za odgovarajuću konstrukciju zdenaca.

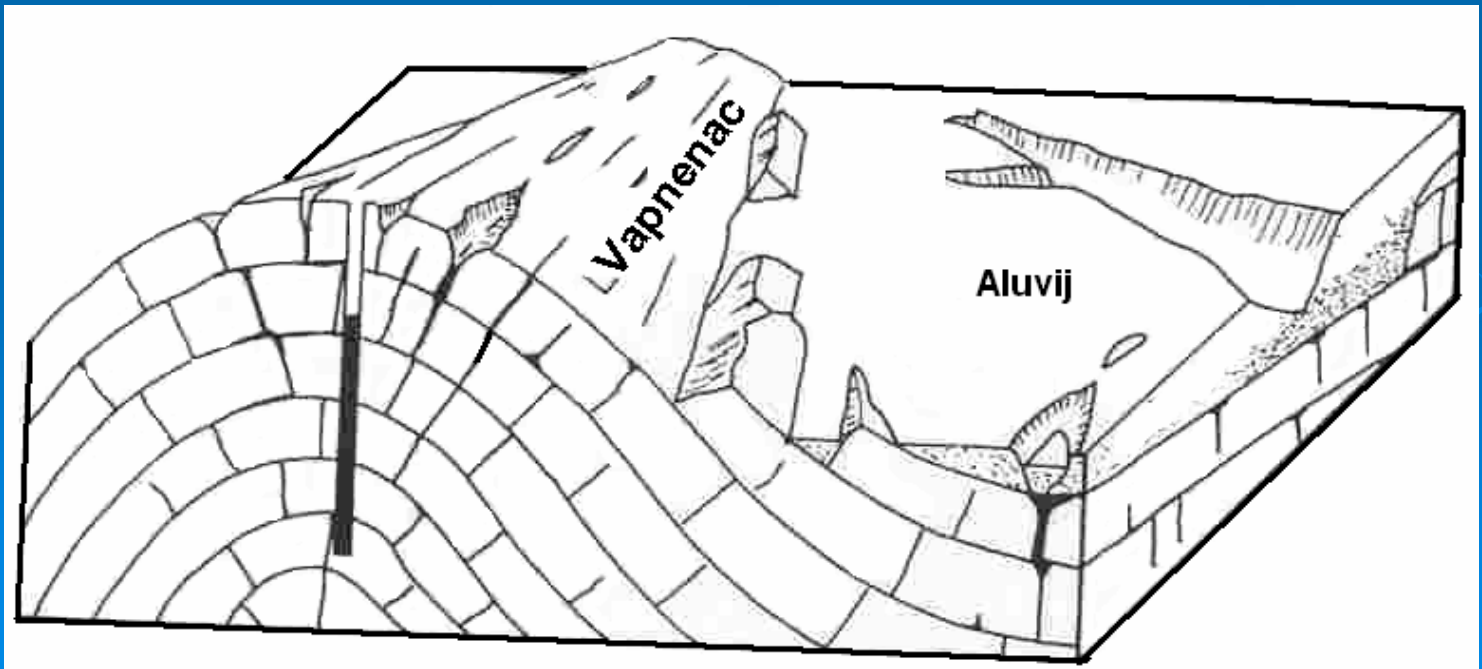
- Testovi permeabiliteta izvedeni na kolonama pješčenjaka pokazuju veliku heterogenost koja lokalno može iznositi 10-100 puta. Slika pokazuje odnos poroziteta i permeabiliteta za razne vrste pješčenjačkih stijena, grupiranih po veličini zrnatog materijala (Chilingar, 1963).

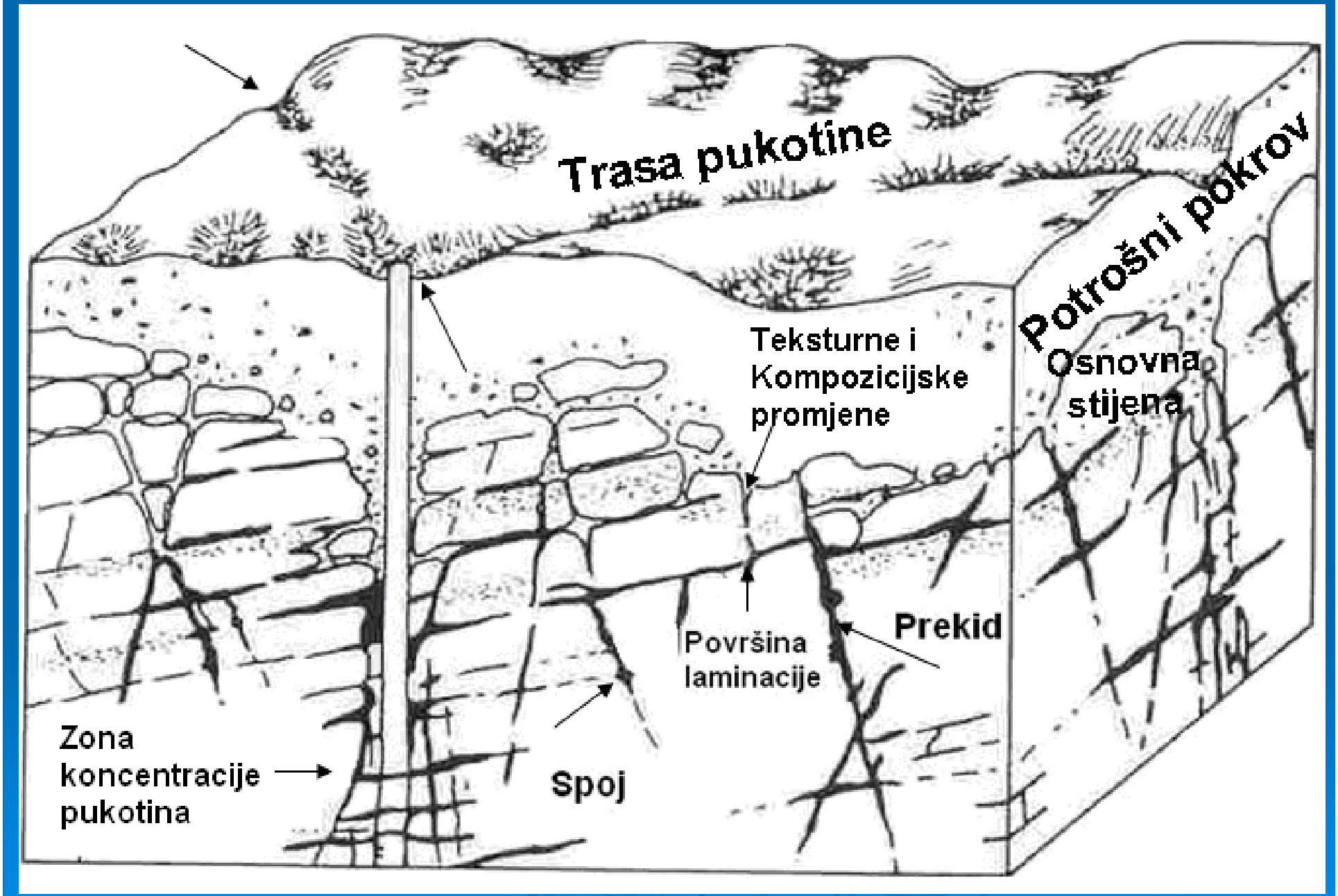


Karbonatne stijene

- Karbonatne stijene su najčešće u formi vapnenaca i dolomita i sastoje se od raznih minerala s primjesama gline. Dolomiti su, uglavnom, formirani u sekundarnom procesu geokemijskih reakcija transformacije kalcita. Ova mineraloška transformacija može lako uzrokovati značajno povećanje poroziteta i provodljivosti dolomita.. Vrlo često karbonatne stijene imaju porozitet od 20-50 % ovisno o izloženosti utjecaju vode.

- **Primarni porozitet i permeabilitet kod vapnenaca i dolomita relativno je mali**, dok sekundarni porozitet, koji nastaje geokemijskim djelovanjem vode i drugi faktorima, može biti vrlo velik, ovisno o procesima koji su djelovali na vapnence i dolomite.




Trasa pukotine
Potrošni pokrov
Osnovna stijena
Teksturne i Kompozicijske promjene
Prekid
Površina laminacije
Spoj
Zona koncentracije pukotina

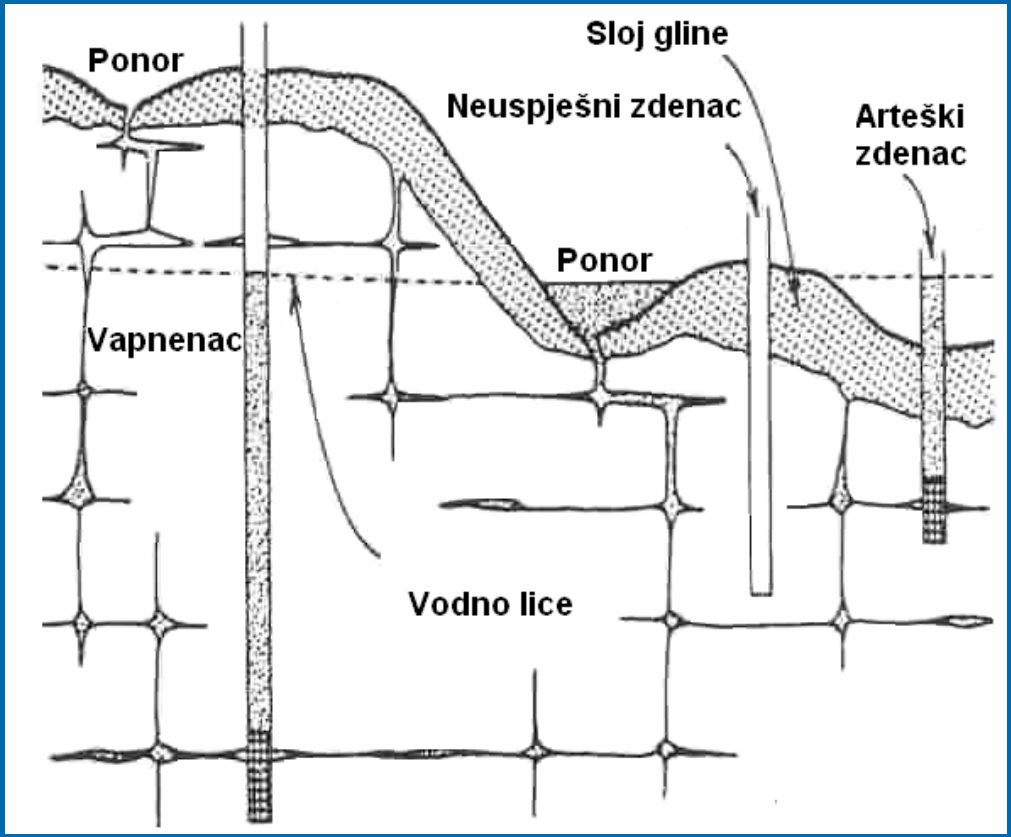
Krš

- Krške formacije uglavnom se **formiraju na vapnenačkim stijenama**, ali i na dolomitima, gipsenim stijenama i stijenama od soli. Nepravilnosti, pukotine, kaverne pa i same špilje u kršu, formiraju se odstranjivanjem stijenske mase disolucijom kalcita i dolomita, tzv. karstifikacijom.

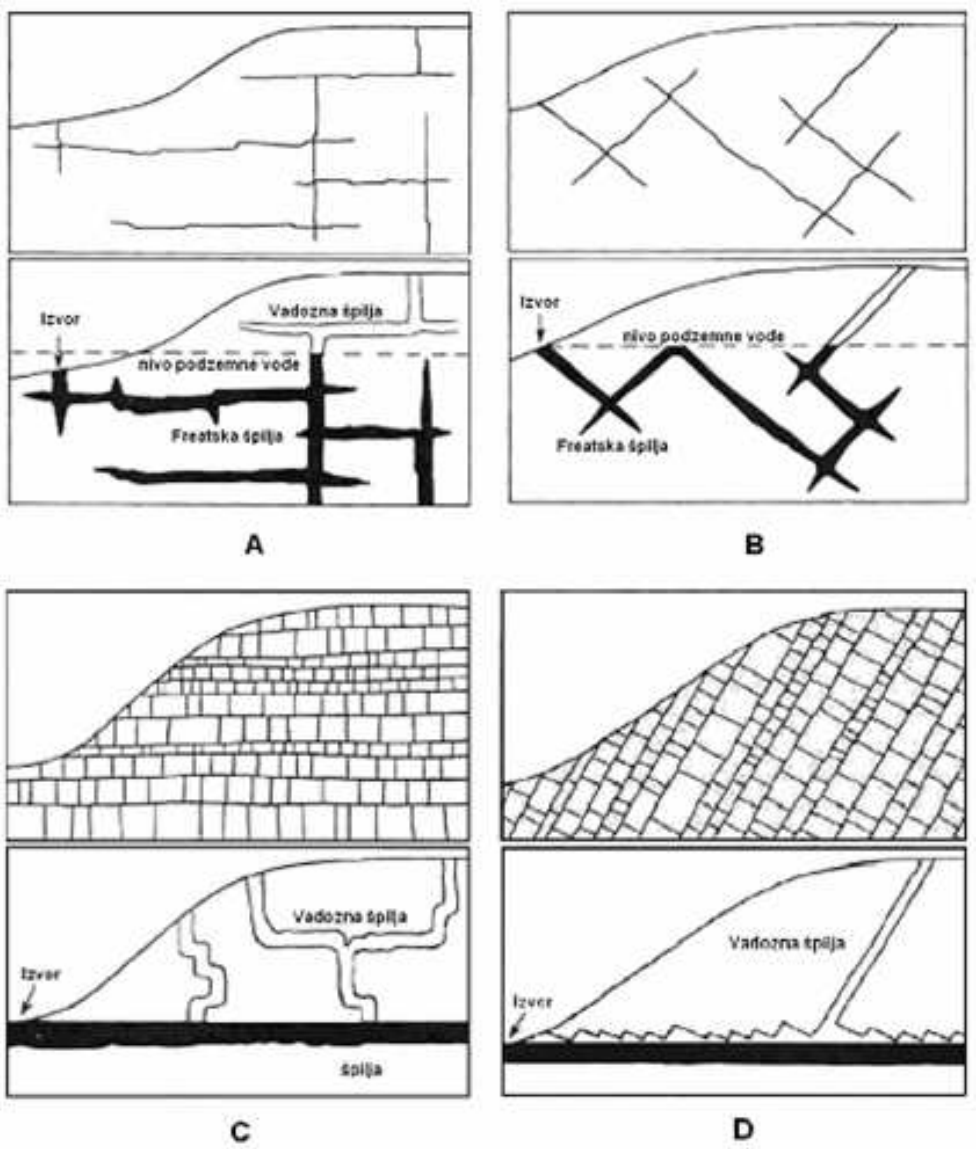
- Da bi se **procesom karstifikacije** u vapnenačkoj stijeni formirale kaverne i špilje, neophodno je postojanje otvorenih spojeva, pukotina ili vrlo dobro povezanog pornog sustava, koji će omogućiti kontinuirano kemijsko djelovanje voda.

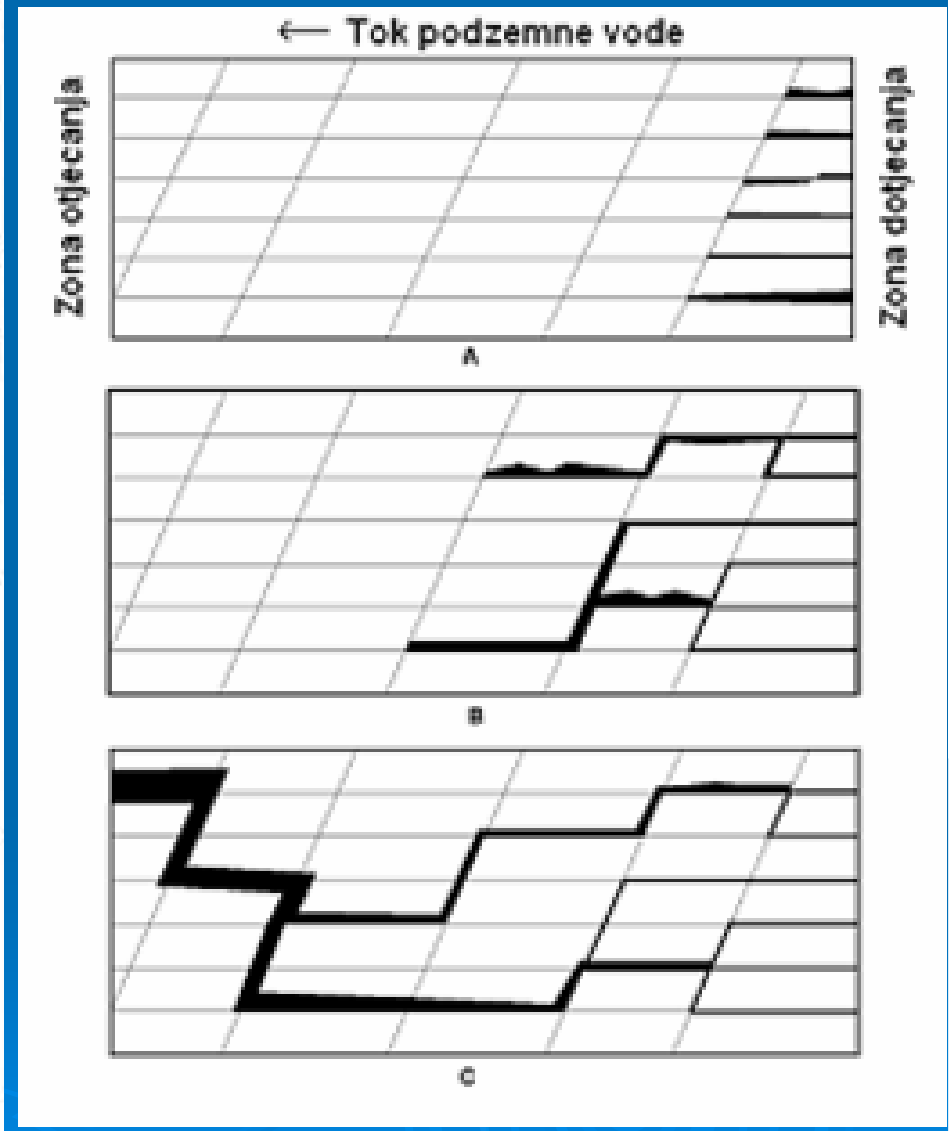
- U većim, dobro povezanim pukotinama, voda koja protječe nezasićena je kalcitima te se proces karstifikacije nastavlja, i u povoljnim uvjetima nastaju kaverne i špilje velikih dimenzija i prostorne rasprostranjenosti za što postoje brojni primjeri u Hrvatskoj duž planinskog dinaridskog krša.

- Korištenje krških područja za vodoopskrbu, vrlo je delikatno, jer se često jedan izdašni i drugi slabo izdašni zdenac mogu nalaziti u neposrednoj blizini, ovisno o frekvenciji i lokaciji pukotina i drugih otvora. Vrlo su često u karbonatnim stijenama vertikalne pukotinske zone velike hidrauličke vodljivosti. Slika pokazuje slučaj kada dobro postavljeni zdenac u karbonatnoj stijeni može imati dobru izdašnost.



- Zone gdje su pukotine koncentrirane su zone brze izmjene podzemne vode i tu je disolucija kalcita jaka te je permeabilnost veća. Lociranje zdenaca u područjima spojeva pukotina i ostalih otvora u karbonatnim stijenama, jest pravilan put konstrukciji zdenca sa zadovoljavajućom izdašnošću.


Izvor
Vadozna špilja
nivo podzemne vode
Freatska špilja
A
Izvor
nivo podzemne vode
Freatska špilja
B
Vadozna špilja
Izvor
špilja
C
Vadozna špilja
Izvor
D


← Tok podzemne vode
Zona otjecanja
Zona dotjecanja
A
B
C