



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek



Ulica Vladimira Preloga 3, HR-31000 Osijek

tel.: +385 (0)31 540 070 | fax.: +385 (0)31 274 444, +385 (0)31 540 071

e-mail: gfos@gfos.hr

HIDROGEOLOGIJA



Hidrogeologija

- znanstvena disciplina koja pripada grani **geološkoga inženjerstva**
- **Hidrogeologija** je znanstvena disciplina koja se bavi izučavanjem podzemne vode, njenim rasporedom, gibanjem kroz poroznu sredinu (tlo ili stijenu), te njenim fizičkim i kemijskim značajkama kao rezultatom interakcije s poroznom sredinom i drugim segmentima okoliša uključivo i čovjeka.
- **Hidrologija** je znanstvena disciplina koja se bavi kretanjem vode po površini, infiltriranjem u podzemlje, te postotkom koji se neposredno vraća u atmosferu



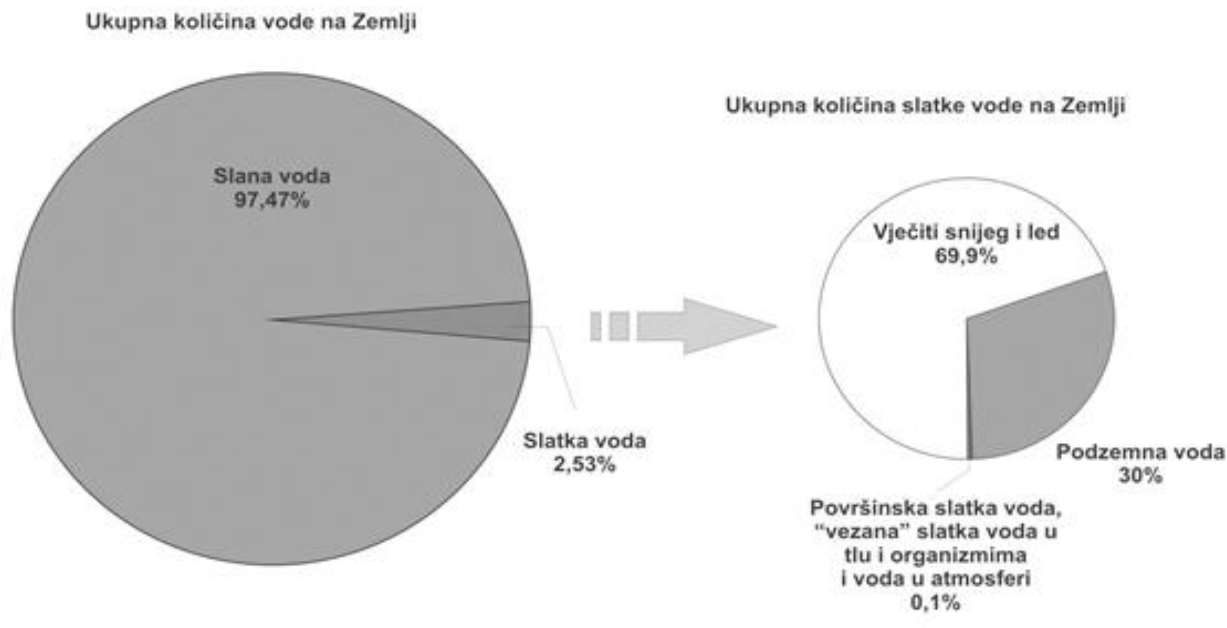
Hidrogeologija

Gdje su neophodna hidrogeološka istraživanja?

- za projektiranje zdenca odnosno crpilišta
- kao podloga u geotehnici kod sanacije klizišta
- u građevinarstvu kod odvodnja građevinskih jama
- u rudarstvu kod odvodnjavanja rudnih ležišta
- u hidroenergetici kod projektiranja podzemnih i površinskih akumulacija
- u regulaciji vodnih režima kada je u pitanju zaštita od poplava izazvana podzemnim vodama
- u zaštiti okoliša kod određivanja utjecaja različitih potencijalnih i aktivnih zagađivača podzemnih voda



Raspored vode na zemlji



Tablica: Raspored vode na zemlji

Područje	Površina (10 ⁶ km ²)	Količina vode (10 ³ km ³)	Dio od ukupne količine vode na Zemlji (%)	Dio od ukupne količine slatke vode na Zemlji (%)
ATMOSFERA:				
- vodena para		12,90	0,001	0,04
BIOSFERA:				
- voda u organizmima		1,12	0,0001	0,003
HIDROSFERA:				
- oceani i mora	361,3	1 338 000,00	96,54	0,000
- rijeke	148,8	2,12	0,0002	0,006
- slatka jezera	1,2	91,00	0,0066	0,260
- slana jezera	0,8	85,40	0,0062	0,000
- močvare	2,7	11,47	0,0008	0,031
- led na polovima	16,2	24 023,50	1,7300	68,580
- ostali led i snijeg	0,3	340,60	0,0250	0,970
LITOSFERA:				
- vlaga u tlu	82,0	16,50	0,0012	0,05
- slatka podzemna voda	134,8	10 530,00	0,7600	30,06
- slana podzemna voda	134,8	12 870,00	0,9280	0,00
UKUPNA KOLIČINA VODE NA ZEMLJI		1 385 984,61	100,0000	
- slana voda		1 350 955,40	97,4742	0,000
- slatka voda		35 029,21	2,5258	100,000
- slatka voda u krutom stanju (led i snijeg)		24 364,10	1,7550	69,550
- "vezana" slatka voda (vlaga u tlu i organizmi)		17,62	0,0022	0,053
- voda u atmosferi (vodena para)		12,90	0,001	0,266
- površinska slatka voda		93,12	0,0068	0,040
- podzemna slatka voda		10 530,00	0,7600	30,060

Izvor: D. Mayer, Voda od nastanka do upotrebe, (2004.)
Prosvjeta, Zagreb



Godišnje raspoložive količine slatke vode po stanovniku po državama (m³/god/stan)

- 14% zemalja: < 1000 m³ vode po stanovniku godišnje
- 37% zemalja: 1000 – 5 000 m³ vode po stanovniku godišnje
- 14% zemalja: 5 000 – 10 000 m³ vode po stanovniku godišnje
- 35% zemalja: >10 000 m³ vode po stanovniku godišnje
- **HRVATSKA: cca 30 000 m³ vode po stanovniku godišnje što je svrstava među 30 vodom najbogatijih zemalja u svijetu, odnosno prva zemalja među članicama u EU.**

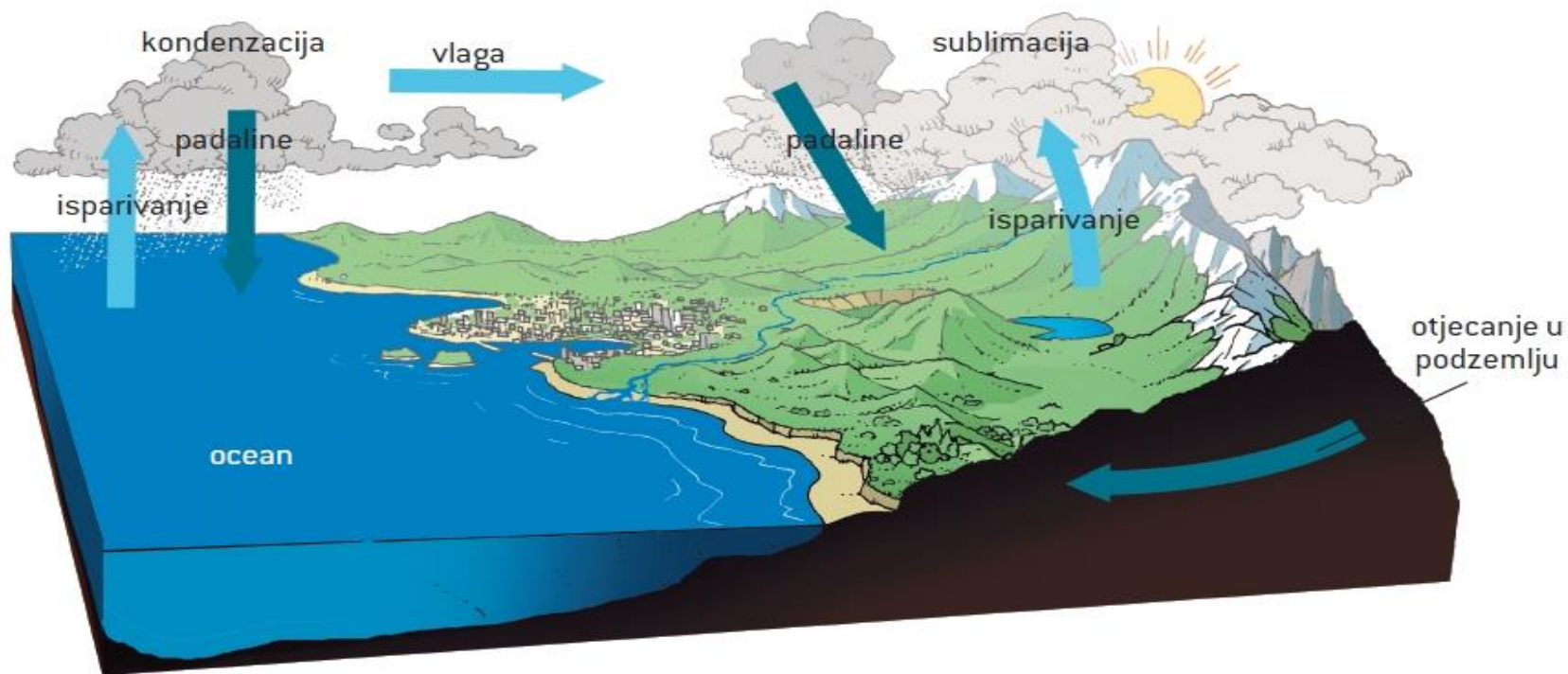


Potrošnja vode u svijetu

- Prosječna potrošnja vode po stanovniku u Hrvatskoj – 140 - 160 l/dan.
- Ukupna potrošnja vode u svijetu u 2023. g. – 2.148 milijardi litara
- broja ljudi koji nemaju pristup svježoj vodi za piće - 772 milijarde osoba (9%)
- Količina obnovljivih resursa u južnoj Americi – $12,2 \times 10^3$ km³/god (25%).
- Količina obnovljivih resursa na Zemlji (podzemne i površinske vode) - 47 000 km³/god.
- Količina obnovljivih resursa u Africi – $4,6 \times 10^3$ km³/god (<10%).

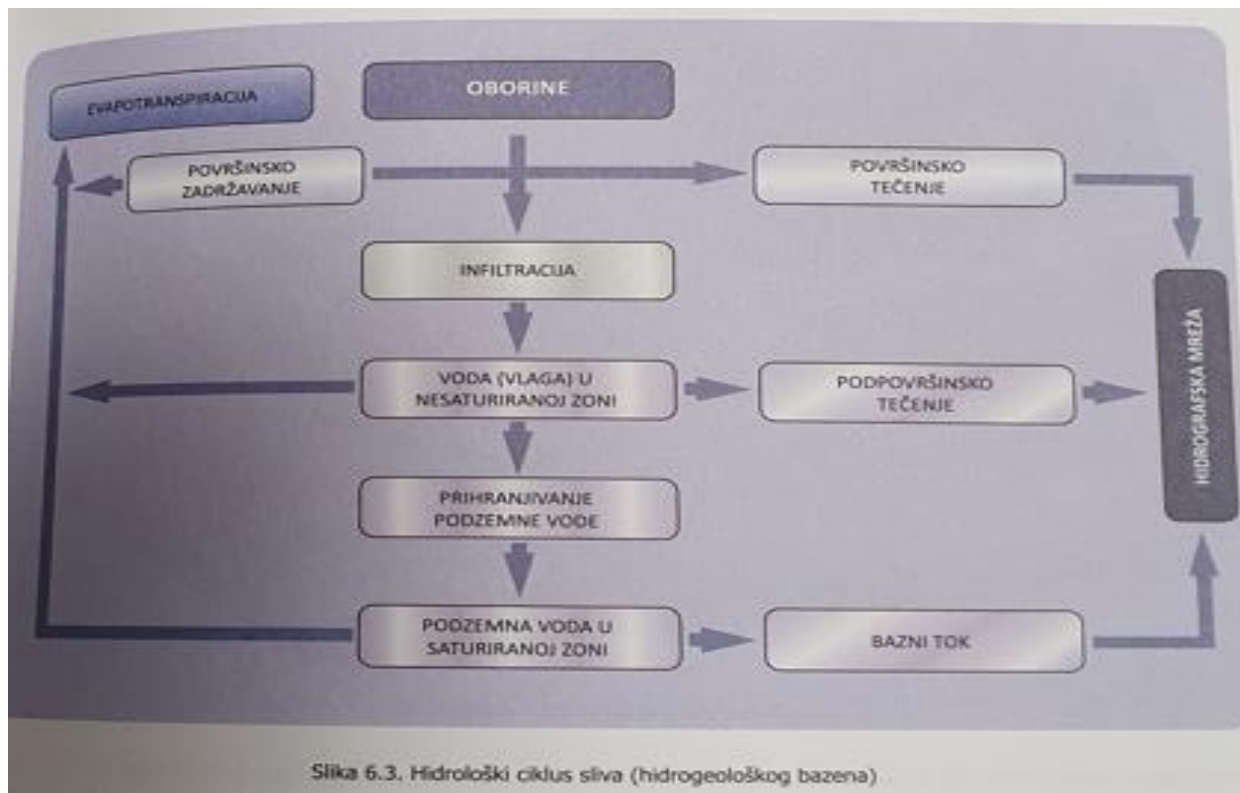


Hidrološki ciklus





- Ukupna količina vode na Zemlji je **nepromijenjena** kao i za neko ograničeno područje
- Voda prodire u Zemlju prosječno do dubine 1 km (krš 2-3 km), a u atmosferu do 15 km (amplituda 16 km)
- **Podzemna voda** samo dio vode koji se nalazi u hidrološkom ciklusu
- Glavni izvor podzemnih voda je **meteorska** ili **vadozna voda** nastaje infiltracijom oborina (kiša, snijeg, inje, rosa, tuča)
- U zemljinoj kori porijeklo vode može biti različito:
 - **juvenilna** koja nastaje sintezom vodika i kisika ili kondenzacijom vodenih para iz magmatskih izvora
 - **konatna** nastaje zajedno sa stijenama
- Količina vode koja se infiltrira u tlo ovisi o: količini i raspoređenosti oborina, odnosno klimi nekog područja, zasićenosti podzemlja, nagibu terena, propusnosti stijena i vegetaciji



Ulazne količine u sliv = oborine

Izlazne količine = evapotranspiracija i površinsko otjecanje

$$P = Et + O$$

P - oborine pale na sliv
Et – evapotranspiracija
O – površinsko otjecanje

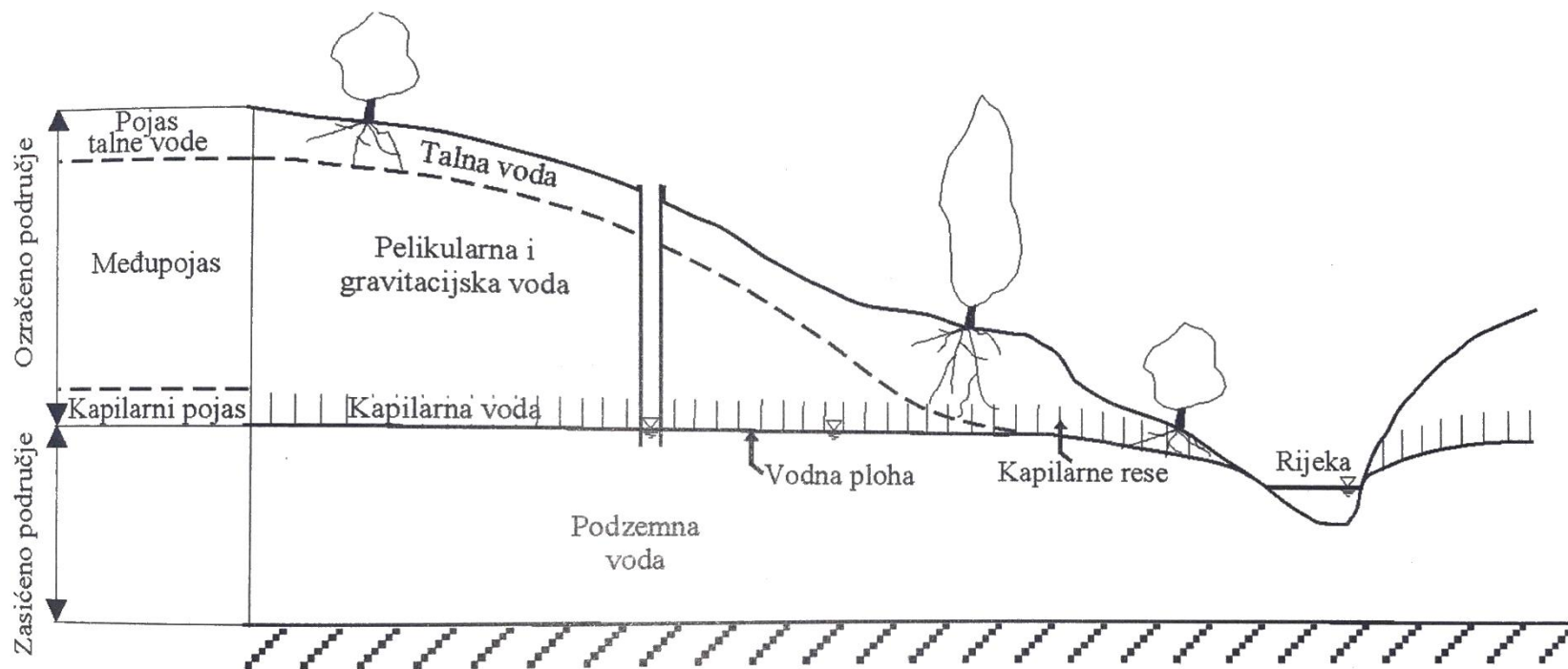


Podzemna voda

- Nalazi se ispod površine tla i ispunjava šupljine u stijenama
- Pojavljuje se u sva tri agregatna stanja
- Na vodnom profilu kroz tlo razlikujemo **nesaturiranu (vadoznu)** i **saturiranu (freatsku)** zonu
- **Stupanj saturacije** = omjer volumena vode prema volumenu pora izražen u postotcima
- Količina vode u tlu može se izraziti i kao **sadržaj vlage u tlu** = omjer volumena vode i ukupnog volumena stijena (%)



Način pojavljivanja vode u podzemlju



Slika: Shematski prikaz načina pojavljivanja vode u podzemlju
Izvor: K. Urumović, Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, (2000.), RGN-f, Zagreb



- U nesaturiranom dijelu podzemlja, prema pojavljivanju i načinu cirkulacije vode, razlikuju se tri zone:
 1. zona vode u tlu (pojas talne vode)
 2. prijelazna zona (međupojas)
 3. kapilarna zona
- **Vodno lice** – označava dno kapilarne zone ispod koje počinje potpuna saturacija, a predstavlja granicu između gornje zone i donje saturirane zone
- Tlak vode = atmosferskom tlaku
- Voda ispod vodnog lica je tlaka većeg od atmosferskog koji raste s dubinom (po iznosu $\rho_w \times g \times h$)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Jednadžba bilance** – u slučaju otvorenog hidrološkog/hidrogeološkog bazena sa mogućnošću površinskog i podzemnog dotjecanja/otjecanja



Slika 6.6. Oblik vodnog lica

$$(P + (Q_o + Q_{po}) + U) = (E_t + (Q_o' + Q'_{po}) + U')$$

P – količina oborina pala na promatrano područje

Q_o - površinski dotok u promatrani prostor

Q_{po} - podzemni dotok u promatrani prostor

U – umjetni dovod vode (kanali, vodovod)

E_t – ukupno isparavanje sa nekog područja

Q_o' – količina površinskog dotjecanja vode

Q'_{po} – količina podzemnog dotjecanja vode

U' – količina vode koja se odvodi umjetnim putem (kanalima, vodovodima)



Poroznost

- **Poroznost** – važna hidrogeološka značajka stijena, važan uvjet za nakupljanje podzemnih voda
- **Poroznost** - postotak šupljina/pora u ukupnom volumenu stijene.
- Razlikujemo **ukupnu** i **efektivnu poroznost**.

- **Ukupna poroznost**

- Predstavlja ukupan porni prostor bez obzira na to jesu li pore povezane i predstavlja:

$$n = \frac{V_P}{V_S} \cdot 100$$

Pri čemu je:

V_P - volumen pora

V_S - volumen stijene

- **Koeficijent poroznosti (e)** – odnos volumena pora prema volumenu čestica

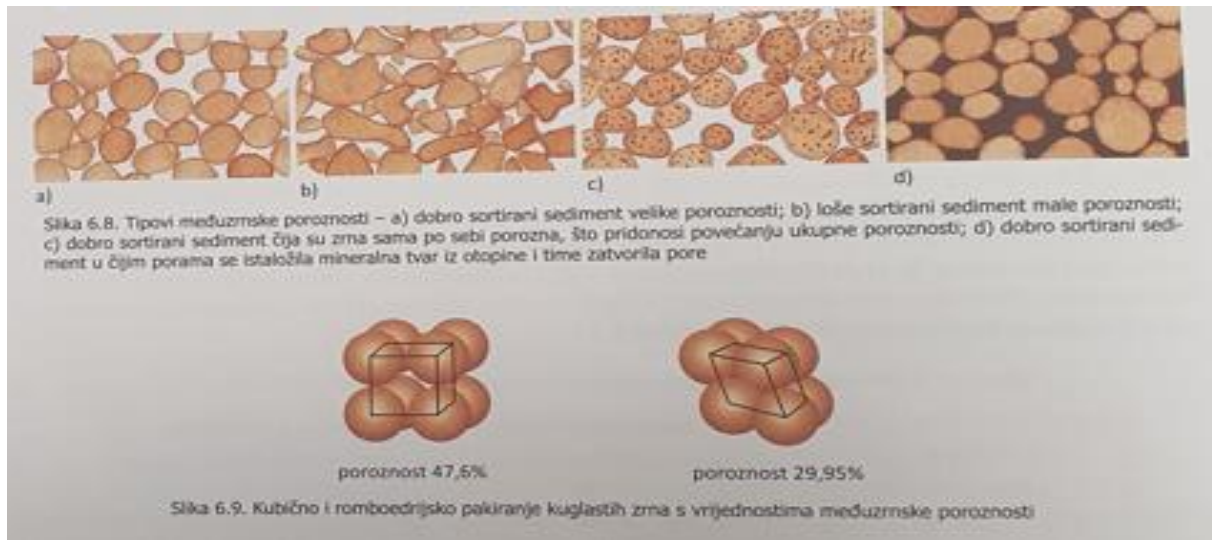


- **Efektivana poroznost** – odnosi se na pore koje su međusobno povezane
- Količina vode koja će se gravitacijski ocjediti iz uzorka stijene
- Efektivna poroznost nije stalna veličina nego je funkcija vremena, a na brzinu ocjeđivanja utječe veličina zrna, i veličina pora

	Ukupna poroznost (%)	Efektivna poroznost (%)
Anhidrit	0,5 -5	0,05 - 0,5
Vapnenac, dolomit	5 - 15	0,1 – 5
Pješčenjak	5 - 15	0,5 – 10
Glineni škriljavac	1 – 10	0,5 – 5
Sol	0,5	0,1
Granit	0,1	0,0005
Razlomljene kristalne stijene	-	0,00005 – 0,01



- Prema načinu postanka poroznost stijene može biti **primarna** ili **sekundarna**.
- **Primarna (međuzrnska)** – posljedica uvjeta pod kojim se neka stijena nastala i svih geoloških procesa koji su na nju djelovali od trenutka nastanka do danas.
- Ovisi o veličini, obliku i sortiranosti zrna te o načinu slaganja zrna i zbijenosti naslaga

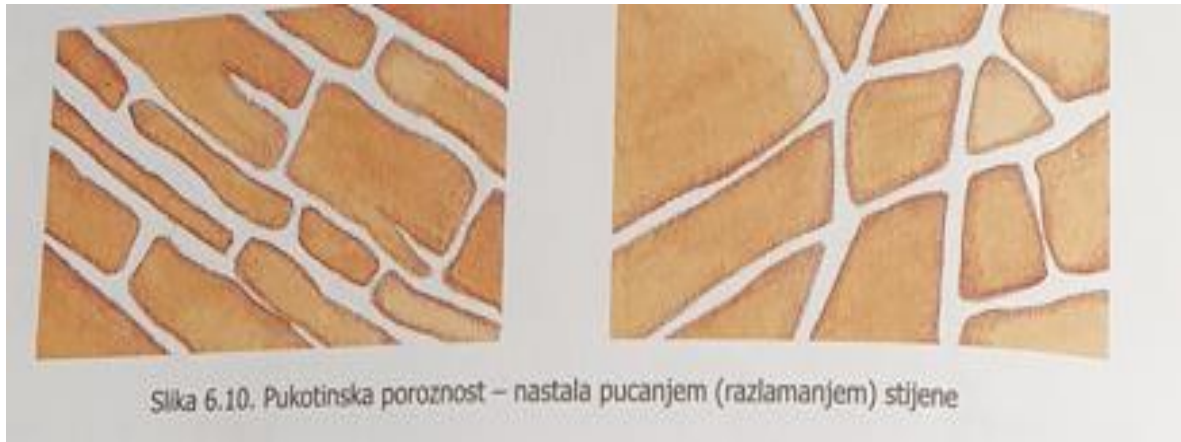




- **Sekundarna poroznost** – posljedica je mehaničkog naprezanja zbog djelovanja tektonskih sila na stijenu koja je već formirana, tada se naziva **pukotinska poroznost**

može nastati i otapanjem već formirane stijene djelovanjem otopina – **disolucijska poroznost**

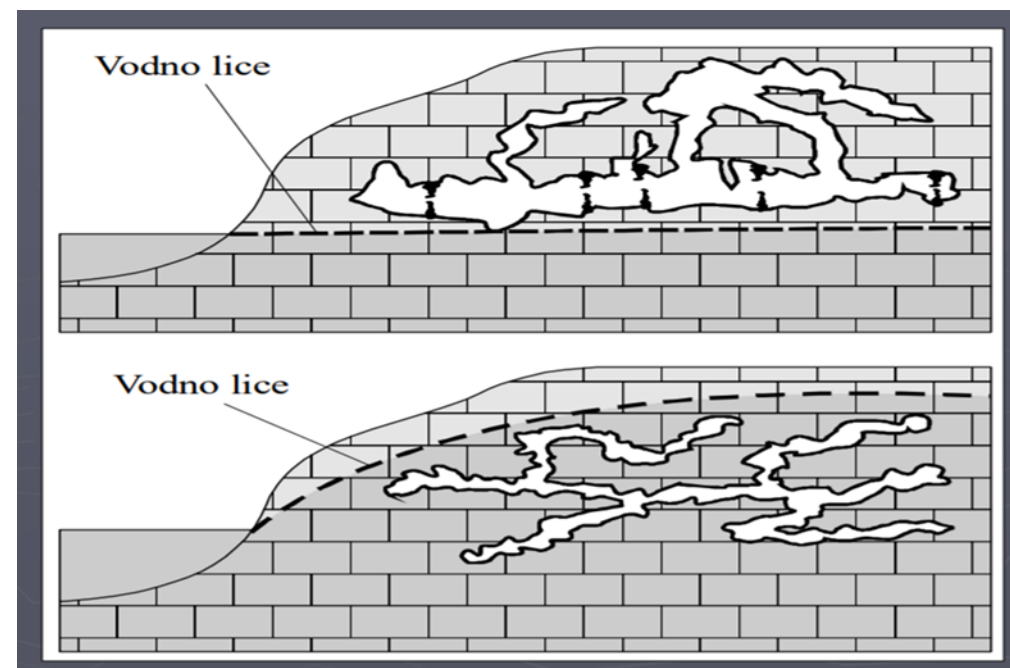
- **Pukotinska poroznost**
 - čine ju pukotine i prsline različitih oblika i dimenzija
 - pukotine su češće i šire bliže površini, a s dubinom širina i broj pukotina opada
 - **dijastreme** – međuslojne pukotine, imaju značenje u hidrogeologiji, jer usmjeravaju kretanje podzemnih voda



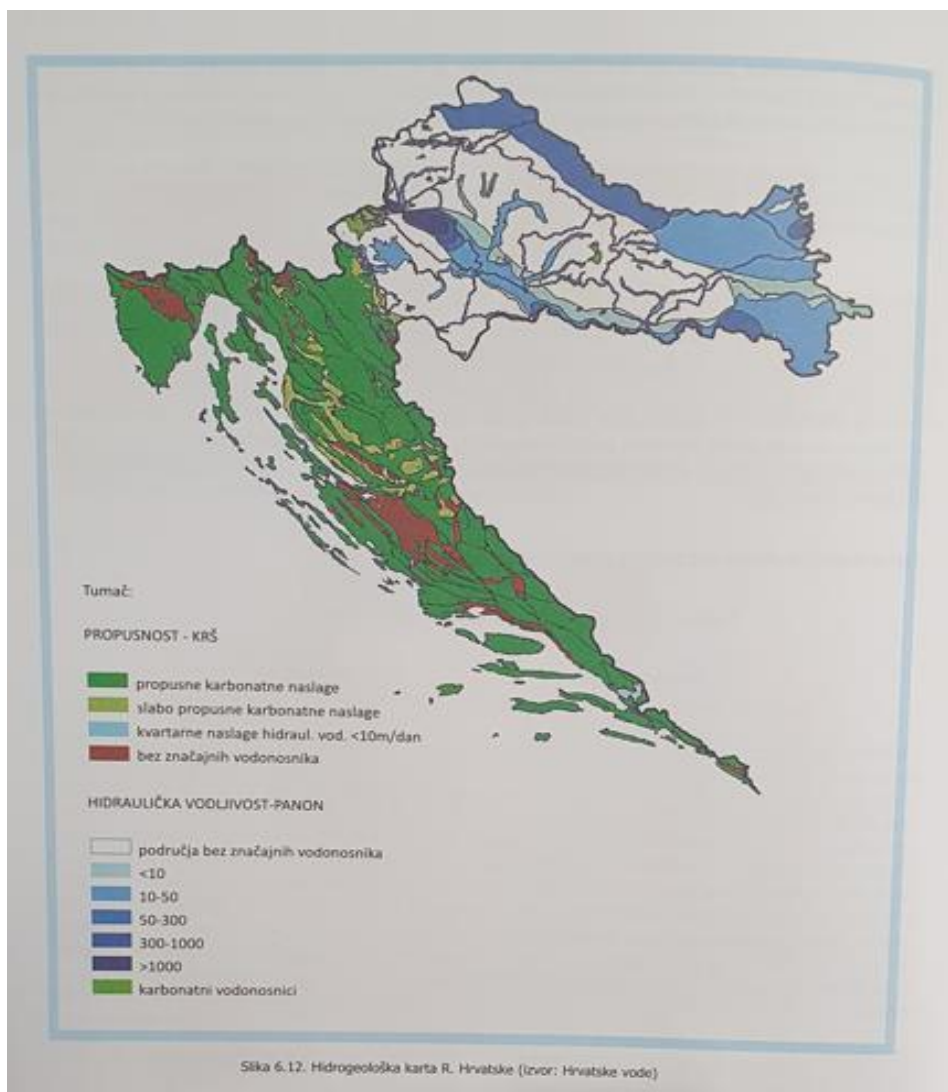


Disolucijska poroznost

- pojavljuje se u stijenama koje se otapaju u vodi (vapnenci, dolomiti, gips)
- stijene sa disolucijskom poroznošću mogu biti veliki rezervoari podzemne vode
- poroznost se kreće od 0 do 80 %



Slika: Primjer pukotinsko-disolucijske poroznosti u vapnencu koja je dovela do stvaranja pećine



Tablica 6.2. Poroznost stijena (prema Plummer, Ch.C. i McGeary, 1993)

MATERIJAL	POROZNOST (%)
SEDIMENTI*	
šljunak	25 – 40
pijesak (čisti)	30 – 50
prah (silt)	35 – 50
glina	35 – 80
STIJENE	
konglomerat	10 – 30
pješčenjak	
dobro sortirani, malo cementirani	20 – 30
prosječno sortirani	10 – 20
loše sortirani, dobro cementirani	0 – 10
šejl	0 – 30
vapnenac, dolomit	0 – 20
okršeni vapnenac	> 50
glineni škriljavec	0 – 10
kristalinske stijene	
guste kristalinske stijene	0 – 5
razlomljene kristalinske stijene	5 – 10
vulkanske stijene	0 – 50

*Za sedimente vrijedi opće pravilo: što su zrna manja, poroznost je veća.



Propusnost

- **Propusnost** - je sposobnost stijene da propušta vodu pod djelovanjem hidrauličkog gradijenta
- **Vodonosnik** je općenito stijena, propusni sloj ili skupina slojeva koja sadržava vodu i kroz koju u prirodnim uvjetima mogu protjecati znatne količine vode, odnosno kroz koju se voda kreće sa lakoćom u smislu dotoka vode u zdenac za potrebe vodoopskrbe
- **Propusnost** - lakoća kojom se fluid kreće kroz poroznu sredinu.
 - propusne naslage u sjevernoj Hrvatskoj su aluvijalno šljunkovito – pjeskovite naslage kvartarne starosti, južna Hrvatska raspucali i okršeni vapnenci kredne starosti
- **Slabopropusni sloj** je općenito stijena ili sloj ili skupina slojeva čija je propusnost znatno manja od propusnosti vodonosnika
- **Nepropusni sloj** je sloj ili stijena kroz koju ili iz koje voda ne može u zamjetnoj količini istjecati

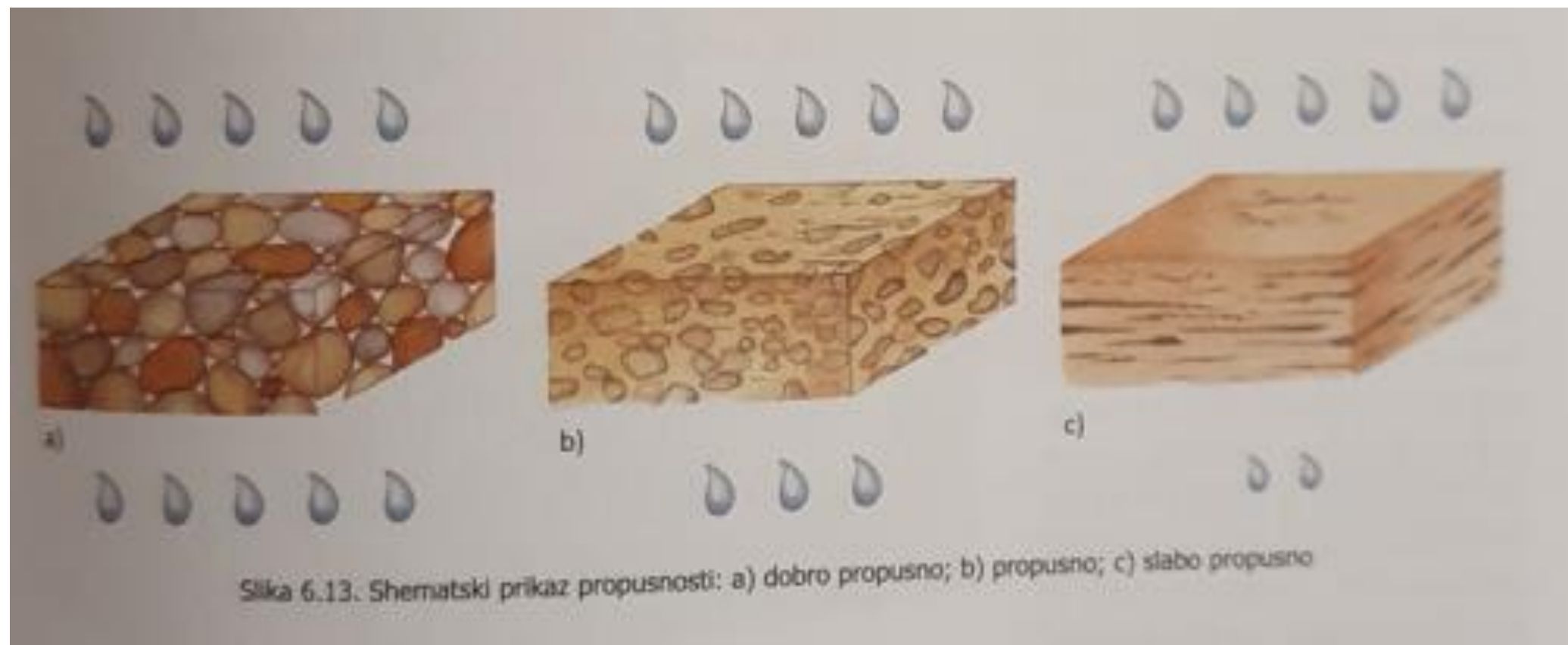


Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek



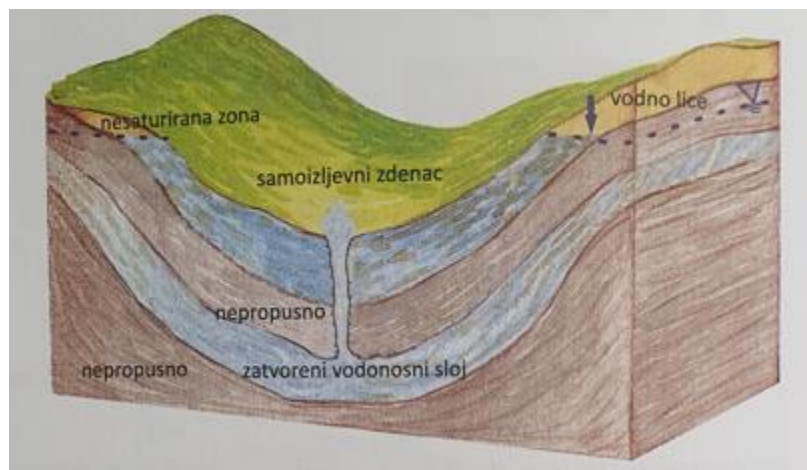


Tipovi vodonosnog sloja

- Vodonosni slojevi razvrstavaju se prema svojstvima u vertikalnom presjeku: **zatvoreni**, **poluzatvoreni** i **otvoreni ili slobodni** vodonosni sloj

1. *Zatvoreni vodonosni sloj*

- potpuno saturiran vodonosni sloj koji je u krovini i podini omeđen nepropusnim naslagama ($K'=0$)
- u sloju tlak vode je veći od atmosferskog tlaka (piezometarska razina viša od vodnog lica)
- Ako je piezometarska razina toliko visoka da nadvisuje razinu terena, voda će iz bušotine izljevati i bez crpljenja – **arteški zdenac** – **arteški vodonosnik**

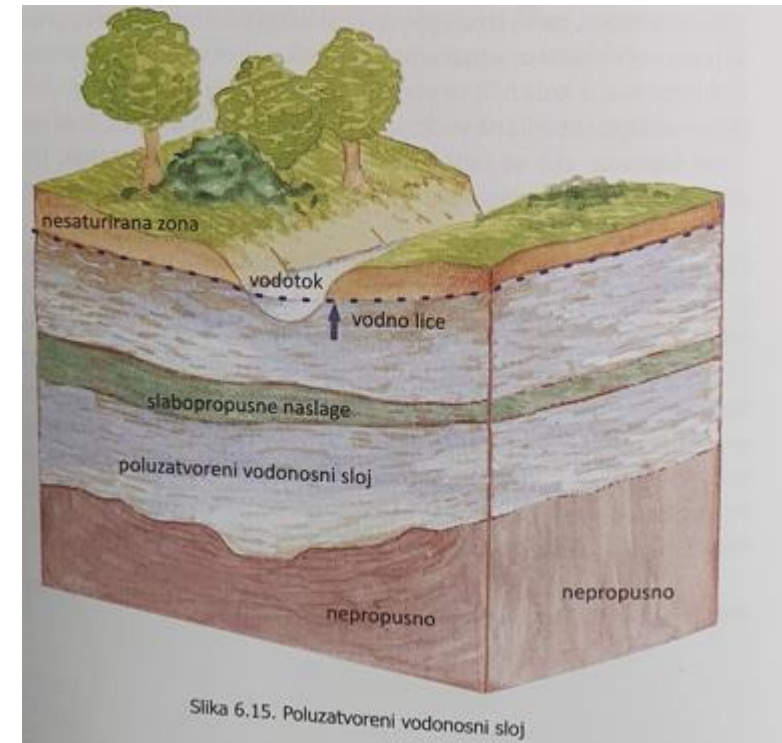


Zatvoreni vodonosni sloj



2. Poluzatvoreni vodonosni sloj

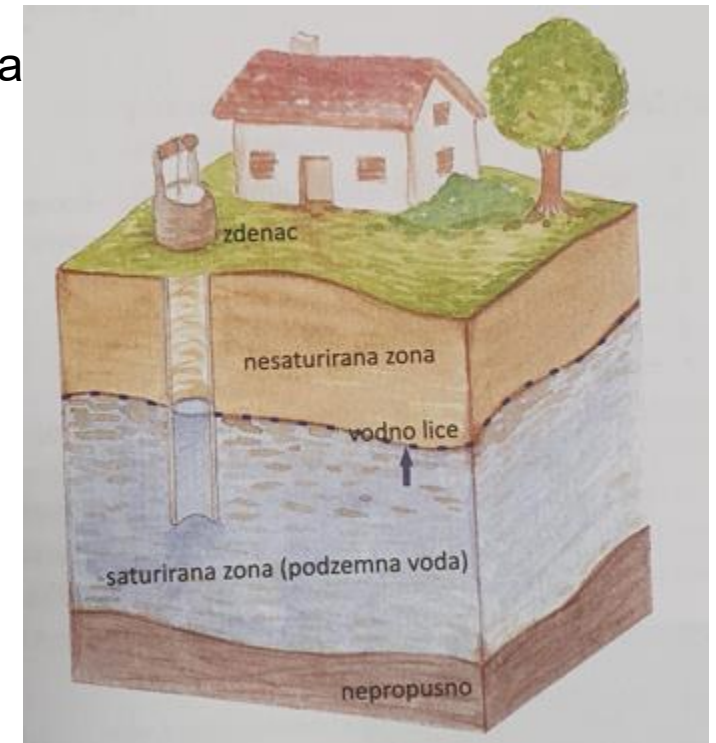
- Sloj koji u krovini ima slabopropusne naslage čija je hidraulička vodljivost veća od 0 ($K' > 0$), ali puno manja od one u vodonosnom sloju pa se horizontalna komponenta toka može zanemariti
- Voda u sloju je pod tlakom većim od atmosferskim





3. Otvoreni ili slobodni vodonosni sloj

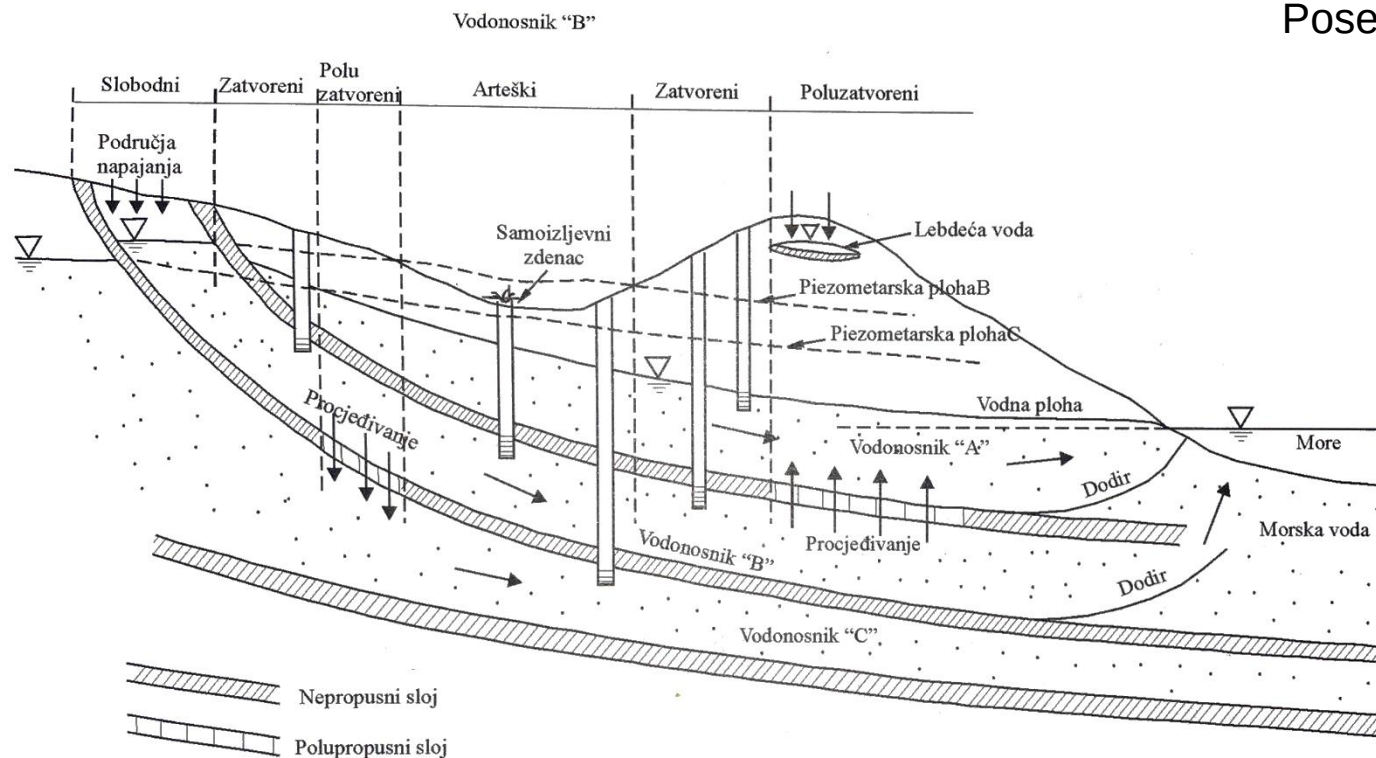
- propusni sloj koji je samo djelomice ispunjen vodom, u podini ima nepropusne ili gotovo nepropusni sloj, odnosno propusnost podinskog sloja je tako mala da nema zamjetnog utjecaja na strujanje u otvorenom vodonosniku
- Otvoren je prema atmosferi, izložen infiltraciji vode s površine terena
- Gornja granica saturiranog djela je vodno lice pod atmo. Tlakom
- Piezometarska razina se uglavnom podudara sa vodnim licem





Tipovi vodonosnog sloja

Posebni tip: *Lebdeći vodonosnik*



Slika: Shematska predodžba klasifikacije vodonosnika prema J. Bearu (1979.)

Izvor: K. Urumović, Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, (2000.), RGN-f, Zagreb



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Vrsta gibanja podzemnih voda

- Kada se voda nalazi u podzemlju ona se giba ovisno o: svojstvima stijene u kojim se nalazi, svojstvima tekućine i rubnim uvjetima na granicama vodonosne sredine
- Obzirom na silu koja uzrokuje to gibanje razlikujemo:
 - ***pelikularni tok***
 - ***kapilarni tok***
 - ***gravitacijski tok***
- ***perilularni tok*** – uzrokovan je molekularnim silama privlačenja između čestica tla i vode (širenje vlažnog omotača ili filma oko suhih čestica stijene ili tla)
 - prisutan je u vadoznoj (prijelaznoj zoni) i za njega ne vrijedi zakoni hidraulike



- **kapilarni tok** – uzrokovan je molekularnim silama privlačenja čestica tla i vode, površinskom napetosti fluida i gravitacijom
- odvija se u nezasićenoj sredini odnosno u kapilarnoj zoni iznad vodnog lica, na granici saturirane i nesaturirane zone
- ovisi o promjeru kapilara odnosno o veličini pora u tlu, temperaturi vode, mineralnom sastavu
- visine kapilarnog dizanja u tlu obrnuta su proporcionalne promjeru zrna
- podaci o kapilarnom dizanju bitni su zbog **djelovanja mraza** (razaranja prometnica i dubine temeljenja) i kod **dimenzioniranja nasipa**

Tablica: Visina kapilarnog dizanja u različitim materijalima (iz Miletić i Heinrich-Miletić, 1981)

Matereijal	Visina kapilarnog dizanja (cm)
Krupnozrni pijesak	2-5
Srednjezrni pijesak	12-35
Sitnozrni pijesak	35-70
Prah	70-150
glina	200-400



- **Gravitacijski tok** – je pod utjecajem hidrauličkog gradijenta i odvija se u saturiranom i nesturiranom dijelu vodonosnika kao: **a) laminarni** i **b) turbulentni tok**

a) Laminarni tok

- uvjetovan je malim brzinama, u poroznim i raspucalim stijenama, u kojim pukotine nisu velikih dimenzija
- trasirana staza čestica u toku je podudarna sa strujnicama (zamišljena linija u fluidu čija tangenta u svakoj točki pokazuje smjer brzine), te se značajka strujanja može interpretirati iz oblika strujanja
- Laminaran tok može biti: **jednolik i nejednolik, stacionaran i nestacionaran**
- **jednolik** – ako se fizikalne komponente ne mijenjaju u prostoru (zatvoreni vod.)
- **nejednolik** - fizikalne komponente se mijenjaju u prostoru (kontakt otvorenog vodonosnika s površinskim tokom)
- **stacionarni** – fizikalne komponente toka se ne mijenjaju u vremenu
- **nestacionarni** – fizikalne komponente tok se mijenjaju u vremenu
- Zakonitosti laminarnog toka određene su Darcyjevim zakonom



Slika: Shematski prikaz laminarnog toka



b) Turbulentni tok

- ima puno veću brzinu i karakterističan je za površinske tokove, cijevi ili za stijene sa pukotinskom poroznošću (krupnozrenatim materijalima, ispod brana, ustava, zdenaca)
- zbog velikih brzina tečenja strujnice nisu paralelne već postaju nepravilne, zavojite i rotirajuće linije
- Za ovu vrstu toka podzemne vode ne vrijedi Darcyjev zakon



Slika 6.20. Shematski prikaz turbulentnog toka



Darcyjev zakon

- Temeljni zakon hidraulike, koji opisuje laminarno gravitacijski tok vode u poroznoj sredini

$$Q = K \cdot F \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = - K \cdot F \cdot \frac{h_1 - h_2}{l}$$

Odnosno, količina vode koja protječe jediničnom površinom, tj. brzina filtracije iznosi:

$$\frac{Q}{F} = q = v = K \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = - K \cdot \frac{h_1 - h_2}{l}$$

Pri čemu su:

Q – količina vode koja protječe kroz poprečni presjek filtra od pijeska (m³/s)

F – površina poprečnog presjeka pješčanog filtra okomita na smjer toka (m²)

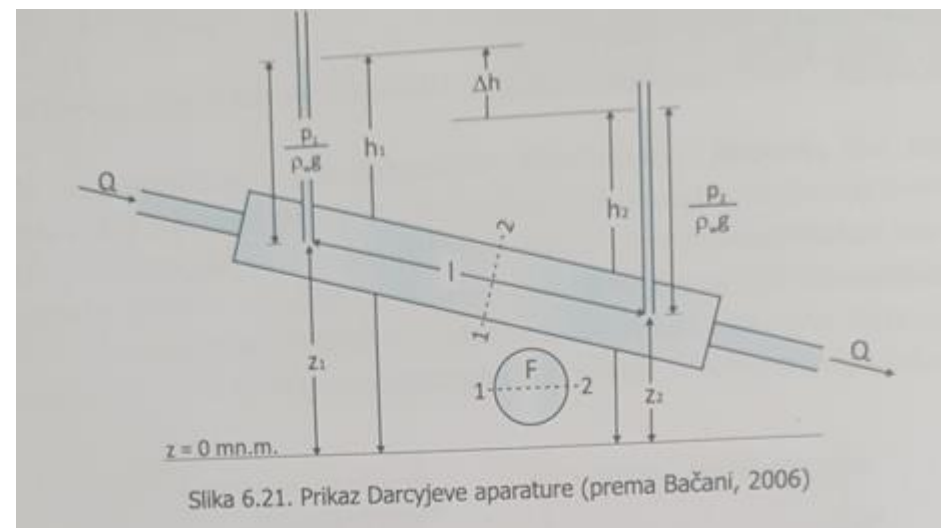
l – duljina toka kroz pijesak (m)

h₁, h₂, - visina vode (potencijali) iznad standardne usporedne visine (m)

q – specifični ili jedinični protok, tj. količina voda koja protječe kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka (m/s)

v – prividna ili Darcyjeva brzina tok (m/s)

K - faktor proporcionalnosti za kojeg Darcy navodi da ovisi o propusnosti sloja (m/s)



- minus označava da se voda uvijek kreće s mjesta većeg potencijala h₁ prema mjestu manje visine potencijala h₂



- Izraz u diferencijalnom obliku daje:

$$Q = -K \cdot F \cdot \frac{dh}{dl} = -K \cdot F \cdot i, \quad \text{odnosno} \quad q = -K \cdot \frac{dh}{dl} = -K \cdot i$$

pri čemu je:

$$\frac{dh}{dl} = i \quad - \text{hidraulički gradijent (bezdimenzijska veličina).}$$

- proizlazi da je Darcyjev zakon predstavlja odnos između hidrauličkog gradijenta **i** i specifičnog protoka **q**, odnosno brzine toka vode **v**, zbog čega je nazvan i **linearan zakon filtracije**.

Prividna ili Darcyjeva brzina filtracije - koja se dobije iz linearnog zakona filtracije, nije stvarna (efektivna) jer se odnosi na cjelokupnu površinu poprečnog presjeka filtra **F**, a voda se kreće samo kroz pore

- neto površina toka je manja pa je **efektivna brzina** protjecanja veća

- dijeljenjem Darcyjeve brzine s efektivnom poroznošću **n_{ef}** dobijemo efektivnu odnosno stvarnu b

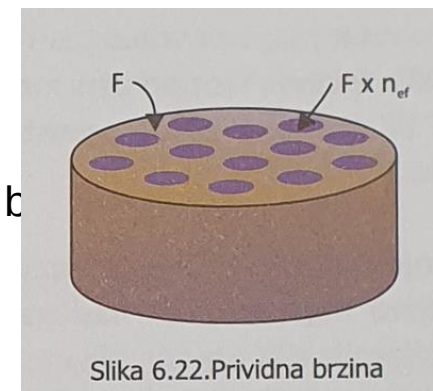
$$v' = \frac{Q}{F \cdot n_{ef}} = \frac{q}{n_{ef}} = \frac{v}{n_{ef}}$$

Pri čemu je:

v – Darcyjeva brzina (m/s)

v' – efektivna brzina (m/s)

n_{ef} – efektivna poroznost (u djelovima jedinice n_{ef} (%) 100)



Slika 6.22. Prividna brzina



Granice valjanosti Darcyjeva zakona

- Primjena Darcyjevog zakona ograničena je na linearni odnos specifičnog protoka q , odnosno brzine v i hidrauličkog gradijenta i (slika).
- Ako je hidraulički gradijent visok, linearni odnos ne vrijedi
- *Gornja granica valjanosti Darcyjevog* zakona je prijelaz iz laminarnog u turbulentno kretanje tekućine
- Kao indeks za procjenu prelaska režima toka iz laminarnog u turbulentni služi se **Reynoldsov broj**
- Reynoldsov broj ovisi o: tipu porozne sredine, brzini toka, efektivnom promjeru zrna i kinematičkom viskozitetu tekućina
- Linearni tok prelazi u turbulentni kada je vrijednost Re broja između 1 i 10.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Pri čemu je:

v – brzina toka (m/s)

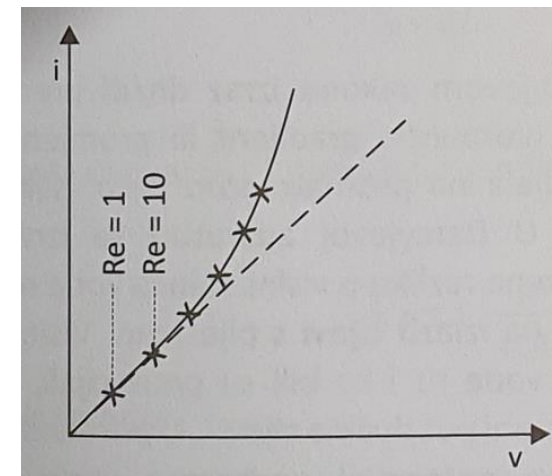
D – efektivni promjer zrna (m)

ν – kinematički viskozitet tekućine ($\nu = 10^{-4}$ m²/s)

Donja granica valjanosti Darcyjevog zakona se povezuje sa strujanjem u sitnozrnim, polupropusnim do gotovo nepropusnim naslagama

- i_0 - početni gradijent za pokretanje tekućine gravitacijskom toku

- za kompaktne plastične gline navodi se da je i_0 između 20 i 30 za masne, plastične gline i veći od 30



Slika: Prikaz odnosa hidrauličkog gradijenta i specifičnog protoka (prema Bear i Varruijt, 1987)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- Osnovni parametri vodonosnika su:
 - poroznost
 - propusnost
 - potencijal
 - hidraulički gradijent
 - hidraulička vodljivost
 - transmisivnost
 - elastične značajke (uskladištenje i specifično otpuštanje)



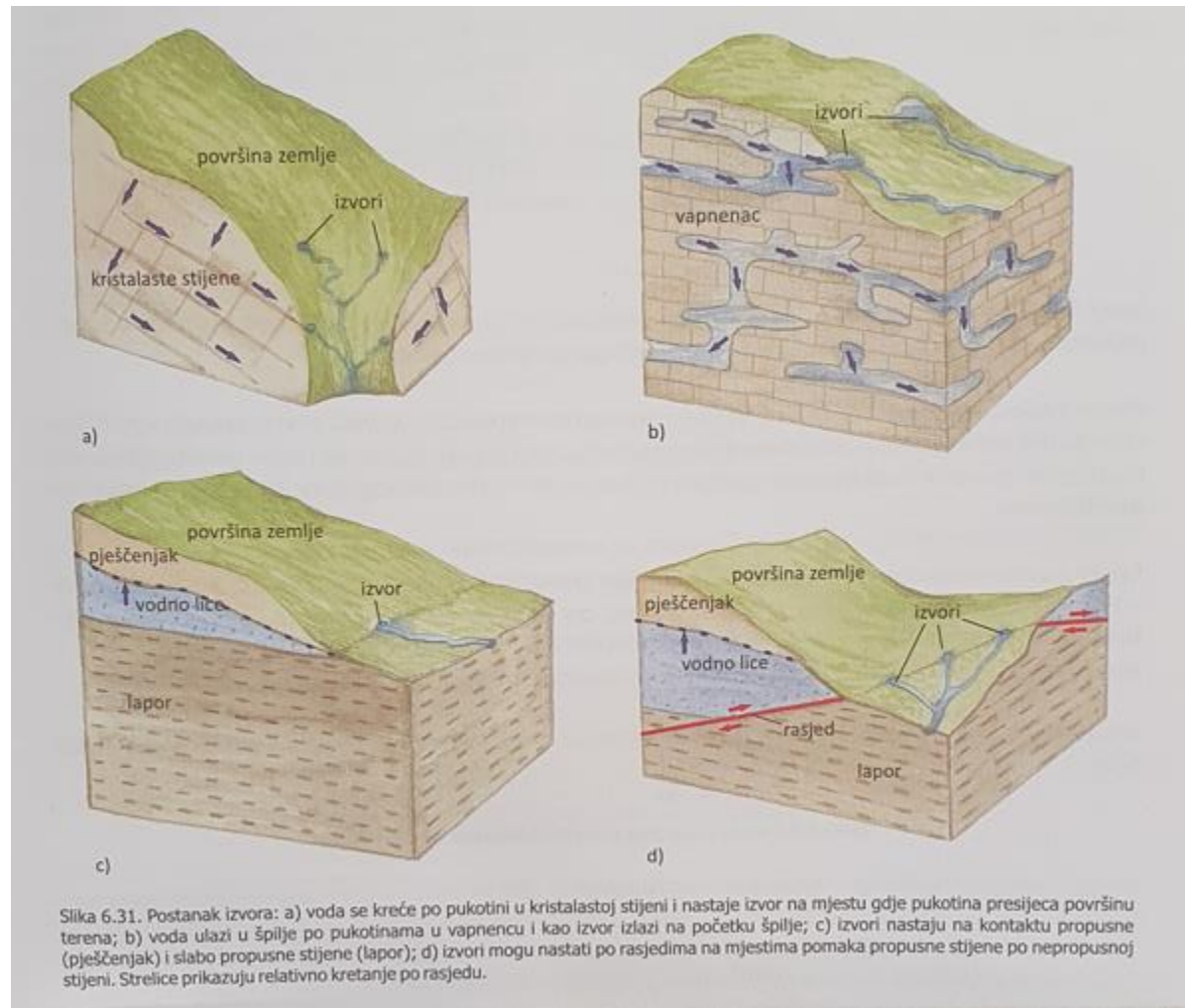
Izvori

- Prirodno izlaženje podzemne vode na površinu litosfere (pretvaranje podzemne vode u površinsku)
- Bitna pojava sa geokemijskog gledišta – voda sa sobom na površinu iznosi ogromnu količinu mineralnih tvari i na taj način ubrzava **kruženje i čvrstih sastojaka zemlje**
- Postojanje geoloških i morfoloških mogućnosti za izlazak vode
- Glavna mjesta ponovnog koncentriranog izlaska podzemnih voda na površinu nazivaju se **izvori ili vrela**.
- Mjesta gdje podzemna voda može izbijati na površinu litosfere na većoj površini stvarajući pritom zamočvarenje zemljiša - **difuzni izvori (pišteline)**



Postanak izvora

- Pojava vode na površini ovisi o:
 - kontaktu propusnih i nepropusnih naslaga
 - pukotinama povezanim s površinom terena
 - prostiranju priljevnog područja
 - reljefu terena i razini podzemne vode





Podjela izvora

- Klasifikacija izvora zasniva se na različitim kriterijima.
- Izvore možemo podijeliti prema:
 - ☐ **izdašnosti** (veliki izvori $10\text{m}^3/\text{s}$ – mali izvori $0,01\text{l/s}$)
 - ☐ **načinu istjecanja** (silazni (gravitacijski) i uzlazni (arteški))
 - ☐ **amplitudi kolebanja količine izviranja** (od jako postojećih do periodičnih izvora)
 - ☐ **kemijskom sastavu** (slatkovodni do mineralni – sadržaj mineralnih tvari veći od 1 g/l)
 - ☐ **temperaturi** (vrlo hladni ($0-4\text{ C}$) – izuzetno vrući (preko 100 C))



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- Prema **izdašnosti** dijele se u 8 skupina, mjerilo srednja izdašnost izvora

skupina	SREDNJA IZDAŠNOST IZVORA
I	10 m ³ /s i više
II	1-10
III	0,1 -1
IV	10-100 l/s
V	1-10
VI	0,1-1
VII	0,01-0,1
VIII	Manje od 0,01

Veliki izvori



Mali izvori





Podzemna voda

Magmatske i metamorfne

- **Vodonosnici u magmatskim i metamorfnim stijenama:**

- Važnu ulogu u: Brazilu, Argentini, Meksiku, SAD-u, Skandinaviji i u nekim dijelovima Afrike.
- U magmatskim intruzivnim i metamorfnim stijenama podzemna voda se javlja u pukotinskim sustavima i zoni trošenja.
- U magmatskim efuzivnim stijenama i piroklastičnim materijalima podzemna voda se nalazi u primarnim porama.

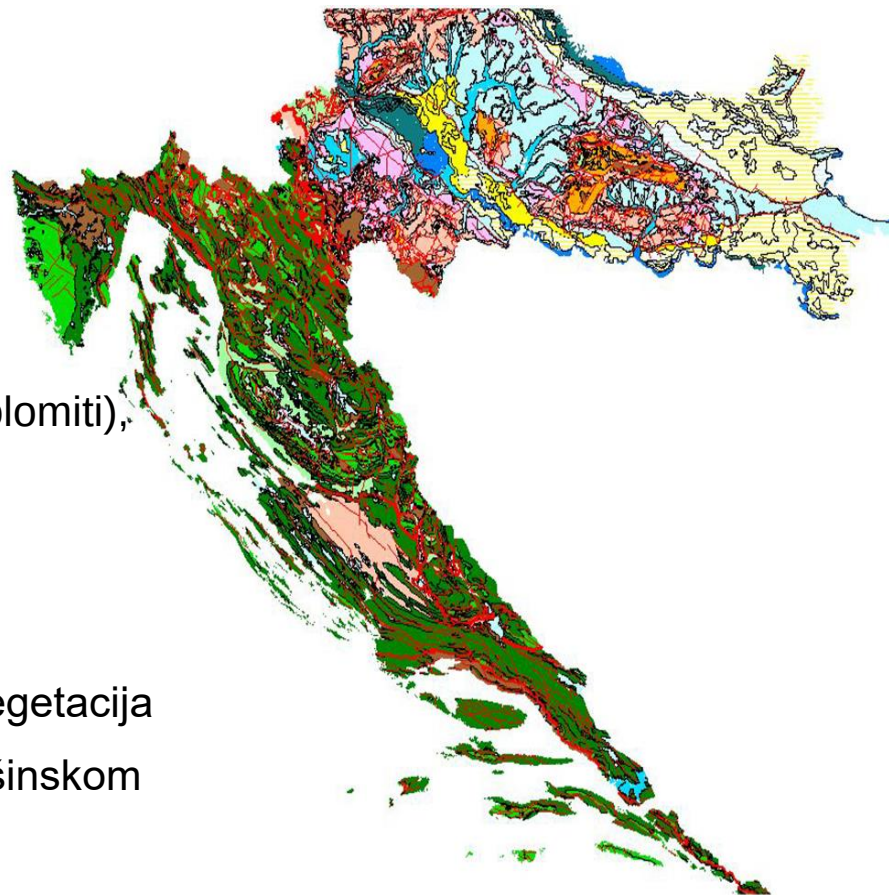
- **Vodonosnici u čvrstim sedimentnim stijenama**

- Klastične sedimentne stijene: pješčenjaci, konglomerati, breče, okršene karbonatne stijene (vapnenci i dolomiti)



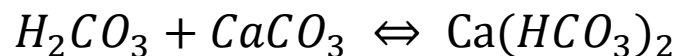
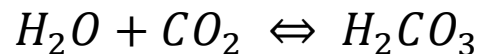
Podzemna voda u kršu

- **Krš** je naziv za skup morfoloških, hidroloških i hidrogeoloških značajki terena koji su izgrađeni od stijena topivih u vodi
- Stijene topive u vodi – karbonatne stijene (vapnenci i dolomiti), soli i gips te metamorfni mramori
- 50% površine Hrvatske je u kršu.
- Glavnu ulogu u oblikovanju krša imaju kemijski procesi (otapanje), tektonika i mehanički procesi, pedološke i vegetacija
- Bogatiji podzemnom hidrografskom mrežom nego površinskom

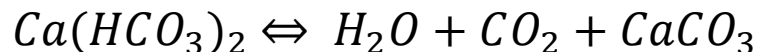




- Kemijski procesi otapanja (vapnenca/kalcita) ovisi o količini otopljenog ugljičnog dioksida u vodi, a odvija se prema slijedećoj formuli:



Kemijska reakcija je reverzibilna i otplinjavanje ugljičnog dioksida iz $Ca(HCO)_3$ uzrokovat će taloženje



- prijenos CO_2 vodom proširuje pukotine, što rezultira širenjem šupljina u karbonatnim stijenama



- otplinjavanje CO_2 iz vode koja ulazi u špilju u posljednjoj fazi i već otopljeni i kalcit taloži i formira špiljne ukrase: stalaktite i stalagnite



- kaskadni slapovi





- Morfološki oblici u kršu dijele se na **površinske** i **podzemne** krške oblike
- Površinski krški oblici su: škrape, vrtače ili ponikve, uvale ili suhe doline i krška polja
- Podzemni oblicu su: jame, špilje i kaverne
- **Škrape** – su najmanji, ali najbrojniji oblici na površini, veličine od 1cm do 10m, nastali erozijskim radom vode.
- Mogu biti u obliku **žljebova** i **mreža**.





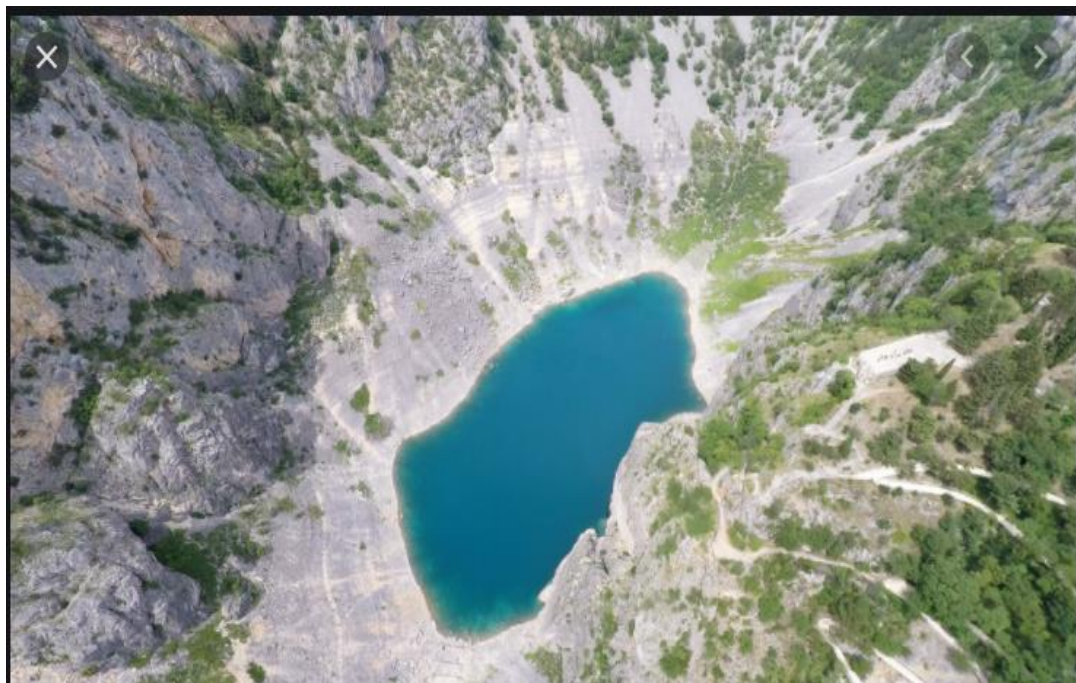
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Vrtače** ili **ponikve** – su ovalna udubljenja nastala korozijskim i mehaničkim djelovanjem površinske i podzemne vode (tavaste, ljevaste, bunaraste).



Modro jezero



Crveno jezero



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Uvale ili suhe doline** – su veće, izdužene zatvorene forme s podzemnim odvodnjavanjem.



Limska draga



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Krška polja** – su najveća morfološke forme u kršu i predstavljaju ravne obradive površine u području „dubokog“ dinarskog krša.
- Velike depresije dužine do nekoliko kilometara, a znatno manje širine.



Ličko polje – mjesto Žir



- **Jame** – su pretežito vertikalni krški kanali (nagib veći od 45°) koji se spuštaju duboko u karbonatni masiv.
- To su najmoćniji kontaktni mehanizmi kroz koje voda cirkulira s površine u krško podzemlje.
- Kapacitet ponora ovisan je o ulaznom dijelu, ali i o pukotinskom sustavu u zaleđu ponora, te o dotoku vode sa strane.



Lukina jama



Pazinska jama



- **Špilje** – su pretežito horizontalne/subhorizontalne podzemne šupljine (nagib kanala manji od 45°), otvorom spojene s površinom, koje nastaju erozijskim i korozijskim radom podzemne vode.
- Naslage kalcita koje izgrađuju špilje a nastale kapanjem vode, nazivaju se **sige**.
- Stalaktiti su sige koje vise sa stropa špilje.
- Stalagmiti su stožasti oblici siga koje nastaju na dnu špilja, a uglavnom su usmjereni suprotno od stalaktita.



sige



stalaktiti, stalagmiti, stupovi



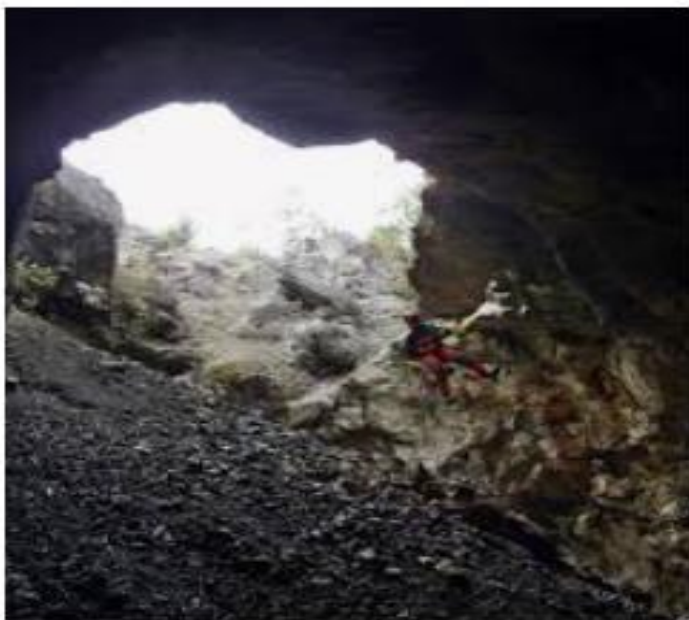
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Kaverne** – su podzemne šupljine u kršu koje nemaju prirodnog ulaza u površine, već se na njih često nailazi pri bušenju, primjerice pri bušenju tunela te pri iskorištavanju mnogobrojnih kamenoloma.



Špilja u kamenolomu Tounj



Izložba slika Špilja u kamenolomu – ...



Hidrogeološki oblici

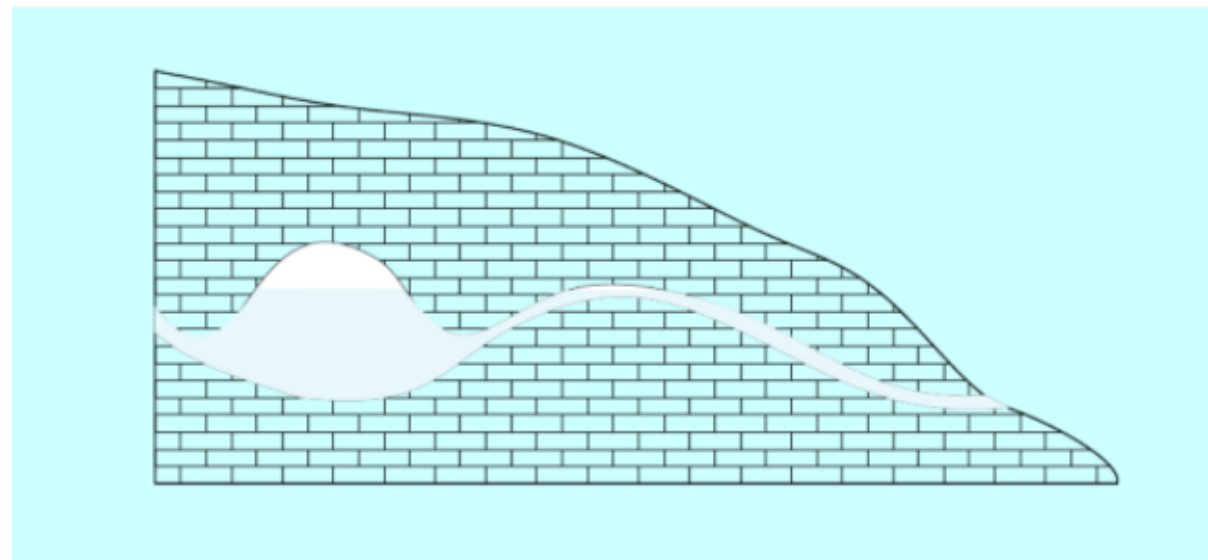
- Specifični **hidrogeološki oblici** u kršu su: **krški izvori, estavele, sifonalna vrela, rijeke ponornice, vrulje i bočati izvori.**
- **Krški izvori** – nastali kao rezultat prelijevanja podzemnih voda na površinu, pojavljuju se na hipsometrijski najnižim dijelovima terena.
- Prema načinu kretanja vode u odnosu na horizontalnu ravninu razlikujemo dva tipa krških izvora **silazni i uzlazni.**
- Prema vremenskom toku istjecanja krški se izvori dijele se na **stalne, povremene i periodičke izvore.**



Izvor rijeke Jadro



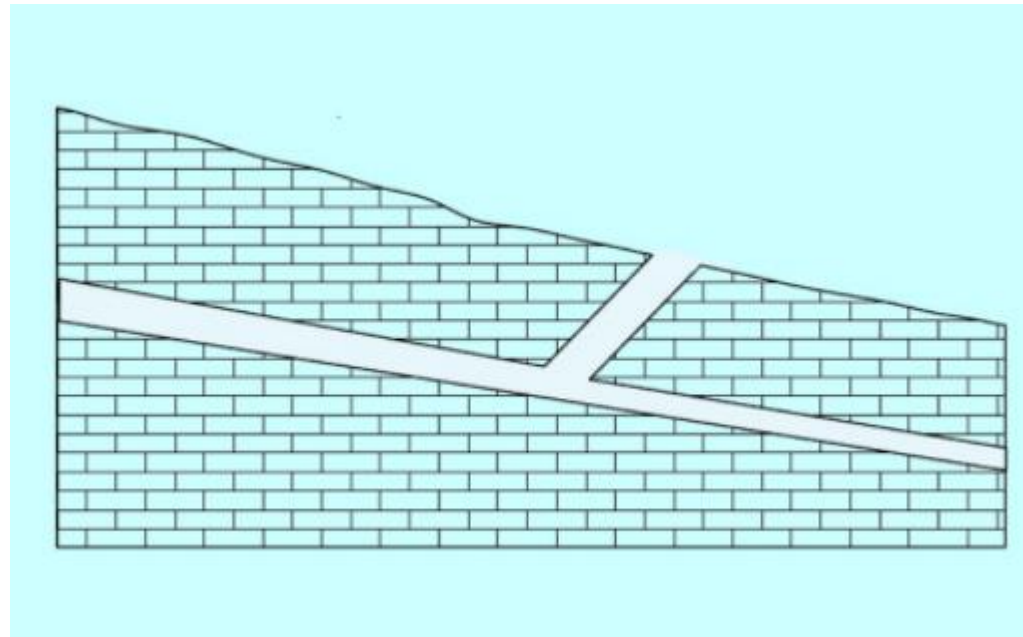
- **Sifonalna vrela (potajnice)** – poseban su tip krškog izvora u kojemu voda istječe u određenim vremenskim intervalima.
- Istjecanje vode traje od nekoliko minuta do nekoliko sati
- Sastoji se od spremnika, ulaznih i izlaznog kanala
- Kada se razina podzemne vode izdigne da dosegne pregib između ulaznog kanala i izlaznog kanala počinje preljevanje i gravitacijsko istjecanje podzemne vode
- Vakuum isisava vodu iz spremnika nakon čega vrela prestaje raditi, dok se spremnik ne napuni vodom



Sifonalno vrelo



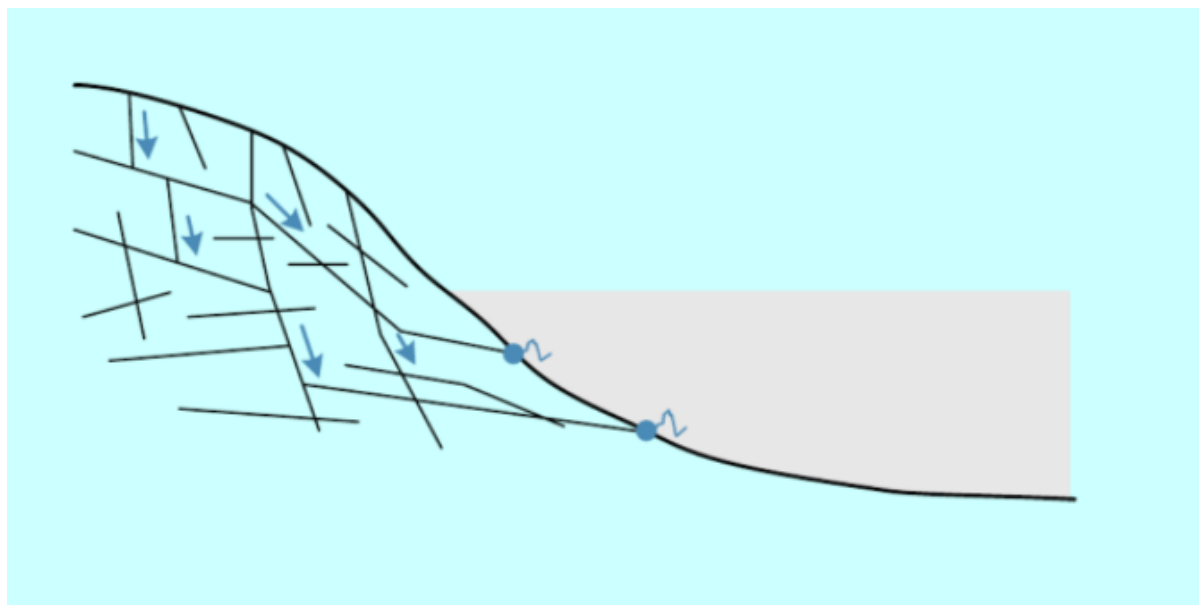
- **Estavele** – su specifični izvori, odnosno kombinacija krškog izvora i ponora.
- U njima se za vrijeme visoke podzemne vode voda izvire kroz istu pukotinu kroz koju za vrijeme niskih voda ponire.
- Estavele se pojavljuju u periodički plavljenim poljima i uvalama, a ima ih i u koritima nekih krških rijeka (Cetina, Zrmanja)



Estavela



- **Ponornice** – su najčešće manje tekućice (rijeke ili potoci) koje se nakon kratkog površinskog toka, s velikim kolebanjem u protoci, gube u podzemlje kroz jedan ili više ponora. (Dobra, Zagorska Mrežnica, Lika, Gacka, Paklenica)
- **Vrulje** – su stalni ili povremeni krški izvori slatke vode ispod mora. Primjećujemo ih po koncentričnim krugovima ili vidljivoj razlici od površine morske vode.



Vrulje



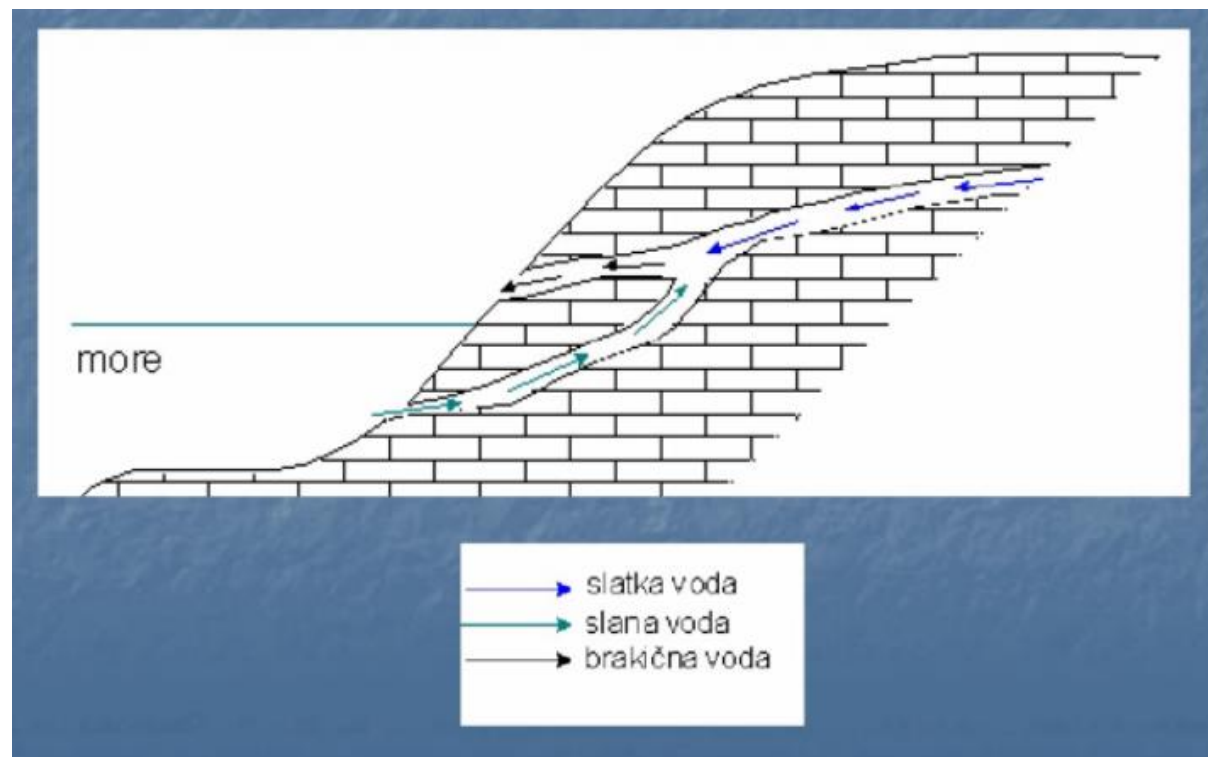
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- **Bočati izvori** – pojavljuju se u krškom priobalnom pojasu, duž morske obale.
- Intenzitet zaslanjenja vode na izvoru ovisi o mogućnostima miješanja slatke i morske vode i režimu voda koji vlada u neposrednoj okolini izvorišta.





Podjela krša u Hrvatskoj

- Na temelju morfoloških i hidrogeoloških osobitosti, područje Dinarskog krša dijelimo na:
 - **jadransko područje (otoci i obalni pojas)**
 - **područje visokog krša (središnji pojas)**
 - **unutrašnje područje**
- Tektonske predispozicije, tj. intenzitet tektonike različiti su u ove tri zone.



Jadransko područje

- Obuhvaća sve otoke i jadranski priobalni kopneni pojas (Istra, Vinodol, Ravni kotari, Zabiokovlje)
- Prestaje u zoni izrazitog strmijeg morfološkog izdizanja
- Zastupljeni su mezozoiski i paleogenski vapnenci, te paleogenski fliš
- Teren je boran, reverzno rasjedan, ljuskav, a zbog podvlačenja Adriatika pod Dinarik prisutne su i navlake
- U hidrogeološkom pogledu ovaj pojas karakteriziran je postojanjem velikog broja slatkih izvora, bočatih, priobalnih izvora, podmorskih izvora (vrulja)



Središnji pojas

- Područje visokog krša (središnji pojas) obuhvaća najviše predjele Dinarskog krša, odnosno visoko uzdignute teren, debelog i visokog krša
- Uzdignut teren s kompliciranom tektonikom (navlačna tektonika, rasjedi i bore)
- Razlikuju se vapnenci, laporoviti vapnenci ili dolomiti
- U hidrogeološkom pogledu odlikuje se estavelama, ponornicama, te velikim depresijama koje se dreniraju isključivo podzemno



Slika: Ponornica



Unutrašnji pojas

- Unutrašnji pojas je područje unutrašnjih Dinarida, a obuhvaća područje sjeverno od Kupe i Plitvičkih jezera, jednog od najpoznatijih krških fenomena
- Krš znatno plići, površinski vodotoci su mnogobrojni
- U svojoj građi ima više nekarbonantnih komponenti te se naziva i fluviokrškim pojasem
- U morfološkom pogledu zbog mnogobrojnih ponikava, naziva još i „boginjavi krš”



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Hidrogeološke značajke krša

- Pojave vode u kršu i fenomene krša moguće je istražiti samo interdisciplinarnim istraživanjima
- Raspored i dinamika podzemnih voda ovisi o sustavima pukotina i njihovim značajkama
- Kretanje podzemne vode može sagledati samo na osnovi velikog broja mjerenja razina podzemnih voda, protoka, brzina, kemijskog sastava i temperature (mjerna mjesta – velik broj)
- Krš se odlikuje primarnom (mala) i sekundarnom poroznošću (daleko važnija)
- Pukotine krša su velikih dimenzija pa je poroznost krša do 45%
- Raspucala površina omogućuje veliku infiltraciju oborina te se velika količina vode nalazi u podzemlju nego na površini
- Propusnost je veća i bliže površini terena (u gornjoj okršenoj zoni vodonosnika) a smanjuje se prema dubini (eksponencijalno)
- Razina podzemnih voda (RPV) u kršu ovisi o reljefu terena i propusnosti sijena
- U propusnim stijenama ispod visokog reljefa, RPV je duboko, dok je u niskim terenima RPV plitko pod površinom



- Kako je krš dinamička pojava i razvija se prema dubini, istraživanja su rezultirala izdvajanjem nekoliko hidrodinamičkih zona po vertikali:
 1. **Prozračna zona** (zona aeracije) – voda teče pod utjecajem gravitacije, prevladava vertikalno kretanje vode
 2. **Prijelazna zona** – pri niskom vodostaju u podzemlju prevladava vertikalna cirkulacija vode, a pri njegovom povišenju nastaje horizontalna cirkulacija
 3. **Zona stalne horizontalne cirkulacije s laganim padom** – voda teče pod utjecajem gravitacije
 4. **Zona sifonalne cirkulacije** – gdje voda silazno teče u području podzemne razvodnice i uzlazno teče, pod utjecajem hidrostatskog tlaka, u području izlivanja na površini
 5. **Zona usporedne dubinske cirkulacije** – u kojoj postoji hidrostatski tlak, a voda teče polako
- U pojedinom krškom vodonosniku ne moraju biti zastupljene sve zone



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

- Kapacitet krškog podzemlja ovisi o dubini okršavanja i promjenama njezinih kvantitativnih vrijednosti po dubini
- Raspored i dinamika podzemnih voda u kršu može biti od lokalnih podzemnih rijeka i slapova s turbulentnim kretanjima do laminarnog toka u šupljinama malih dimenzija a to ovisi o:
 - hidrogeološkim osobinama stijena i njihovom prostornom položaju
 - stupnju okršenosti karbonatnih naslaga
 - vodopropusnosti karbonatnih naslaga
 - ukupnim godišnjim količinama vode
 - rasporedu ukupnih godišnjih količina vode
- Podzemne vode u kršu teško je obuhvatiti jednom uopćenom predodžbom koja bi se mogla primijeniti na sve krške terene zbog različitosti po sastavu i strukturi



Podzemna voda u kršu

- U kršu se nalaze značajne strateške rezerve podzemne vode R. Hrvatske



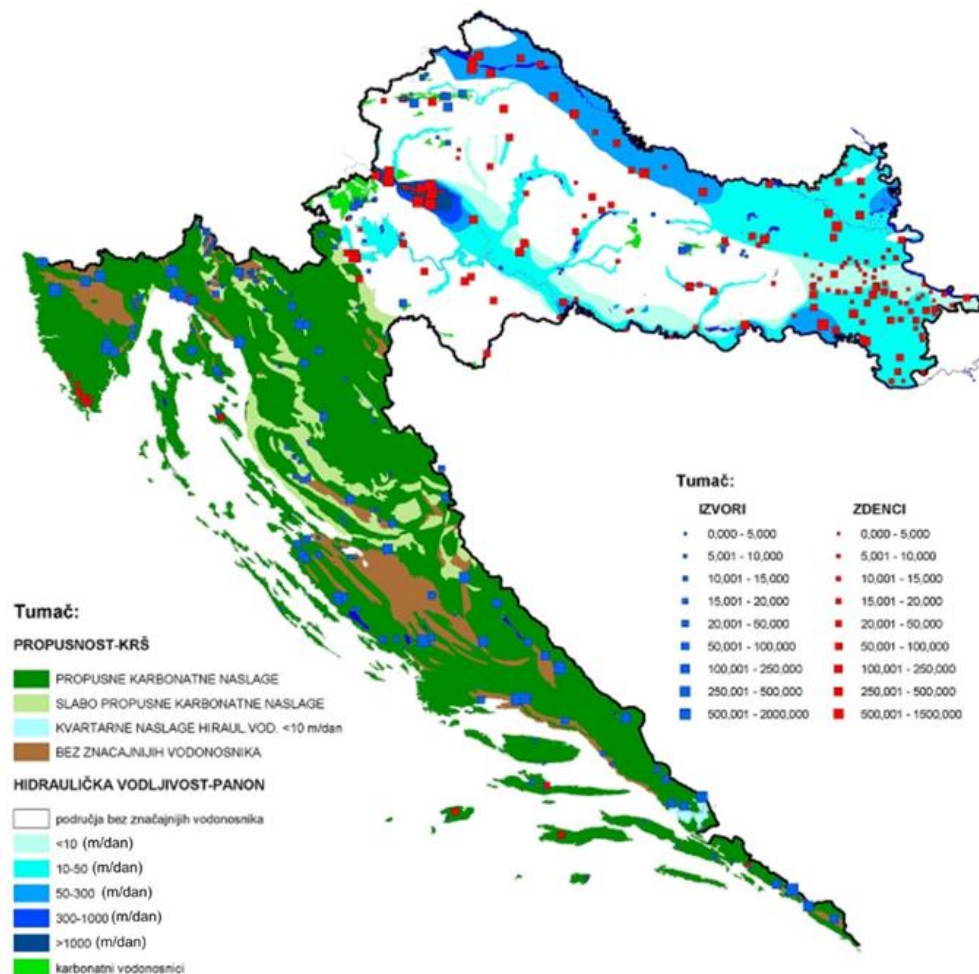


Podzemna voda

Nevezane sedimentne stijene

(šljunak, pijesak i prah):

- Područje sjeverne Hrvatske (doline Save, Drave i brežuljkasto-brdovito područje u međurječju):
 - Prva hidrogeološka zona do oko 200 m dubine (slatka voda);
 - Druga hidrogeološka zona (brakična ili slana voda povišene mineralizacije i veće temperature).



Izvor: Plan upravljanja vodnim područjima (2016. - 2021.)



Podzemna voda na otocima

- Na velikim otocima količina i dinamika p.v. ovisi o klimatskim uvjetima te hidrološkim i hidrogeološkim značajkama.
- Na malim i vrlo malim otocima količina slatke podzemne vode uvjetovana je klimatskim, topografskim, geološkim, hidrogeološkim, pedološkim i vegetacijskim značajkama na otoku.
- Svi hrvatski otoci prema UNESCO-ovoj klasifikaciji spadaju u male i vrlo male otoke – otok Krk, naš najveći otok, ima površinu od 410 Km².
- Miješanje slane i slatke vode
- Zaslanjenje otočnog vodosnika



Korištenje voda

- **Vodoopskrba** – javni interes
- Ostali vidovi korištenja vode:
 - proizvodnja električne energije,
 - navodnjavanje,
 - uzgoj riba,
 - plovidba i plovni putovi,
 - korištenje mineralnih i geotermalnih voda,
 - korištenje vode za sport i rekreaciju i
 - korištenje vode u pogonske svrhe,





Efekti urbanizacije na vodne zalihe

- Promjene hidrološkog režima - Kombinirani efekti urbanizacije, industrijalizacija i rast stanovništva
- Promjene koje su uzrokovane procesima urbanizacije uključuju:
 - klimatske promjene;
 - promjene u površinskom otjecanju;
 - promjene u kakvoći voda;
 - promjene u okolišu i ekosustavima, uključujući smanjenje bioraznolikosti.