

PODZEMNE VODE (7)

Doc. Dr. sc. Igor Felja

**Predavanja iz kolegija Geologija zaštite okoliša
(44087)**

UVOD

- Dva su osnovna pitanja o podzemnoj vodi (**PV**):
 1. **Koliko je ima** i koliko se može koristiti?
 2. Kakve je **kvalitete/kakvoće**?
- U vezi s količinama podzemne vode:
 1. Ima li je dovoljno za piće?
 2. Što se događa kad je crpimo?

ŠTO JE PODZEMNA VODA?

- PV je gotovo svugdje prisutna. Od saturirane zone blizu površine Zemlje pa do nekoliko km duboko.
- Sustav podzemnih voda je interaktivni, kompleksni dio okoliša i dio hidrogeološkog ciklusa.
- U **kopneni dio ciklusa** vode ulaze kao oborine/ padaline (kiša, snijeg, tuča/grad i solika).
- Dio se vraća u atmosferu **evaporacijom** dio otječe površinom dok ostatak prodire u podzemlje. Dio te vode apsorbiraju biljke i vraćaju atmosferi **transpiracijom**.
- Dio vode koji prodire dublje kroz zemlju prolazi **prozračnom zonom** (*vadozna zona*) dolazi do **vodnog lica** te postaje **voda temeljnica** (*freatska zona*). U toj zoni sve su međuzrnske pore zasićene vodom a pritisak je viši od atmosferskog.

- **PODZEMNA VODA (PV)**

- voda u šuplinama podzemlja
- sveprisutna
- u sva tri agregatna stanja

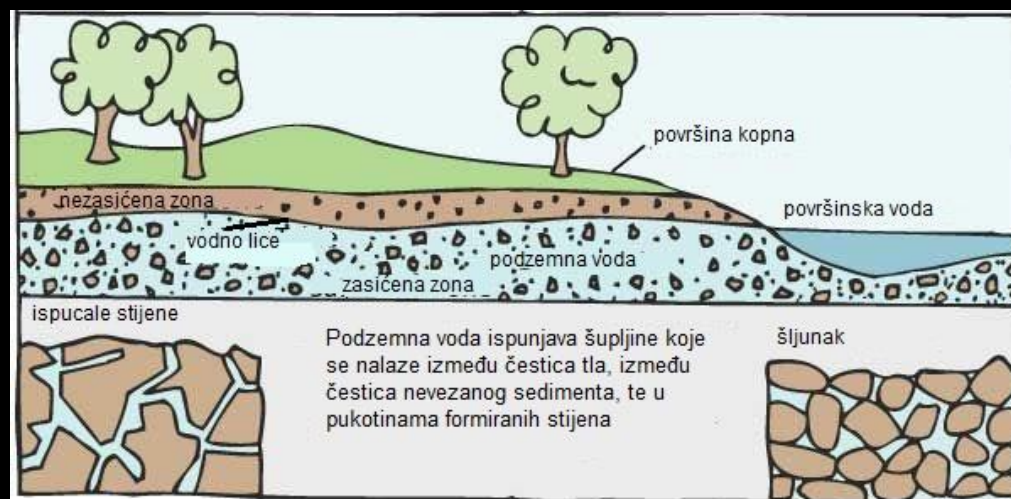
- u podzemlju je prisutna i:

- **higroskopna voda** – adsorbirana na pore u stijenama

- **opnena voda** – na površini zrna stijena, ne podliježe gravitaciji

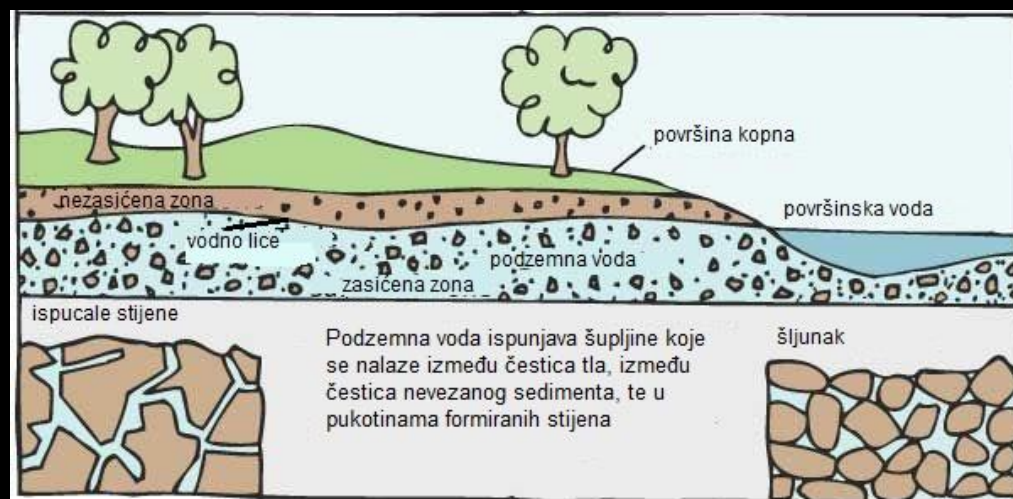
- **kapilarna voda** – na površini zrna je drži površinska napetost

- **slobodna voda** – slobodno cirkulira kroz podzemlje, podliježe gravitaciji (teče)



Podzemna voda (www.groundwater.org)

- **SLOBODNA PODZEMNA VODA**
- zanimaju nas **dva aspekta:**
- **Koliko je ima/koliko je dostupna?**
- dio hidrogeološkog ciklusa
- čini samo 1% ukupne vode na Zemlji → **ograničen resurs!**
- **Kakva joj je kvaliteta?**
- izoliranija (zaštićenija do neke mjere) od površinske vode
- obnavljanje traje do 9000 x sporije od površinske vode



Podzemna voda (www.groundwater.org)

PORIJEKLO PODZEMNE VODE

- **Meteorska (vadozna)** - nastala infiltracijom s površine
- **Juvenilna** – nastaje u podzemlju (pr. kondenzacijom)
- **Konatna** – u stijenama je od postanka

- za razumijevanje PV potrebno je poznavati karakteristike podzemlja

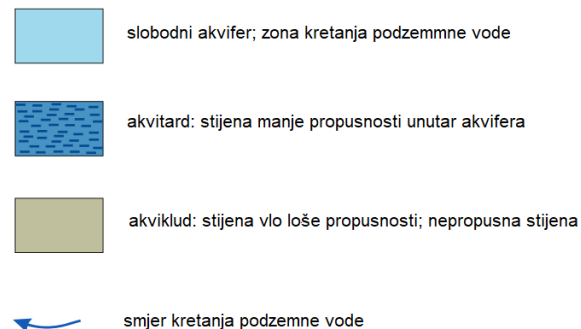
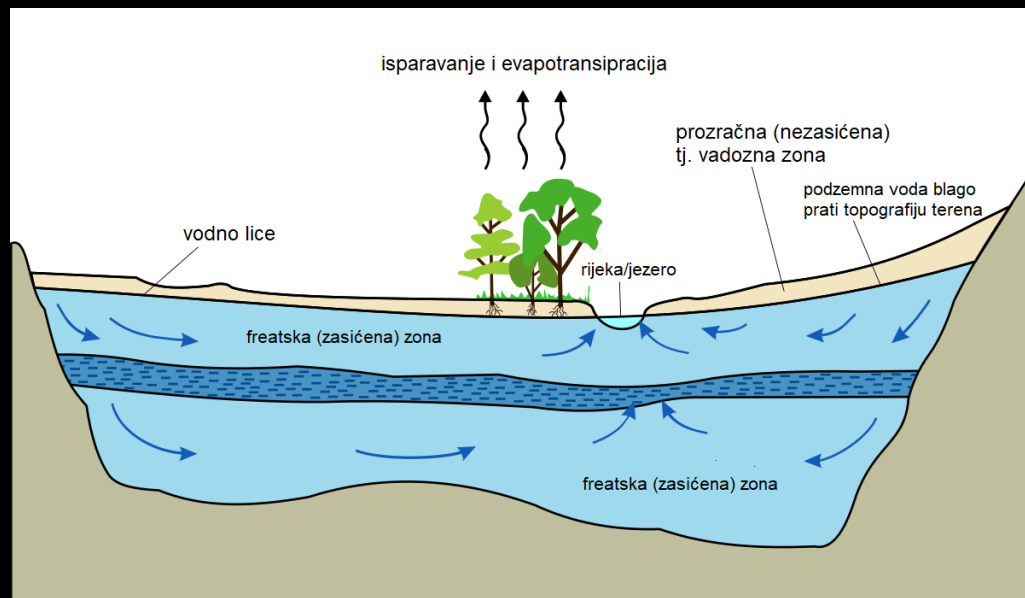
- podzemlje je kompleksan dio geo-okoliša
- PV je dio hidrološkog ciklusa

VODA U PODZEMLJU

- Zona gdje voda ulazi u vodonosnik je **zona prihranjivanja** akvifera. To može biti velika površina u kojoj oborine prodiru u tlo ali i linearna zona infiltracije iz površinskih voda (rijeka, jezera), te točkasti ulaz (ponor).
- Voda će se u akviferu kretati međuzrnskim porama polako i nezamjetljivo no ipak stalno.
- **Propusnost** ovisi o nizu fizikalnih faktora (veličina i povezanost pora) te o svojstvima fluida.
- Voda u vodonosniku kreće se uslijed *hidrauličkog gradijenta* (u smjeru nagiba vodnog lica) do **zone ili točke pražnjenja** (izvora, bunara, jezera, rijeka, gejzira, mora).
- **Starost vode** (vrijeme zadržavanja vode u podzemlju) ovisit će brzini tečenja i udaljenosti između zone prihranjivanja i pražnjenja, a može biti od svega nekoliko sati, dana (u kršu), godina, do više od milijun godina.

VODA U PODZEMLJU

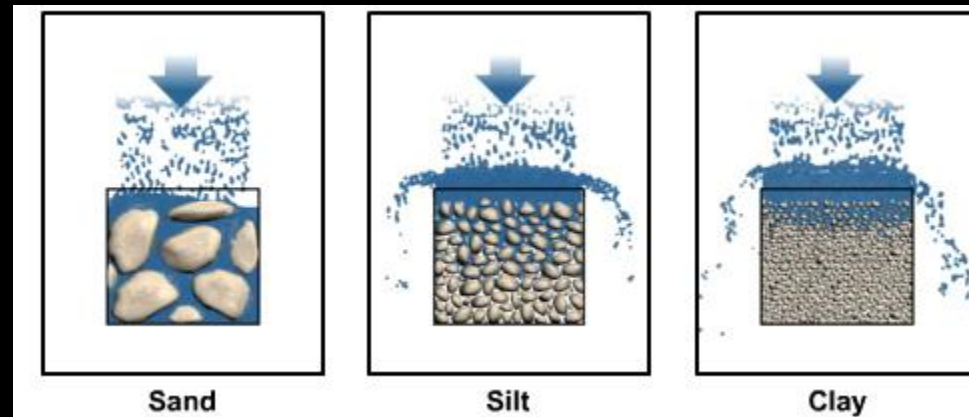
- slobodna meteorska PV ulazi s površine
- prolazi kroz **prozračnu**, odnosno **vadoznu zonu** (zona gdje su šupljine ispunjene zrakom i vodom)
- dolazi do dijela podzemlja koje je zasićeno vodom, odnosno do **freatske zone** – sve pore ispunjene vodom; tlak je veći od atmosferskog
- površina podzemne vode je **vodno lice**
- nagib vodnog lica blago prati konfiguraciju terena površine:
- vodno lice je često podzemni nastavak površine jezera ili rijeke



VODONOSNICI

- slobodna meteorska PV se u podzemlju nalazi u **vodonosniku (akviferu)** – paketu stijena koji može dati značajne količine vode
- **ključne su poroznost i propusnost stijena!**
- **Poroznost** – ukupni volumen/udio šupljina u stijeni u koju može stati voda
- **primarna poroznost** – nastala kad i stijena
- **sekundarna poroznost** – nastala nakon nastanka stijene
- **krška poroznost** – tip sekundarne poroznosti, nastaje uslijed topljivosti stijena

- **poroznost sedimenta i stijena:**
- šljunak i pijesak: 30-40%
- sitni pijesak: 25-35%
- glina: 45-55%
- pješčenjaci: <20
- vapnenci i dolomiti: do 50%

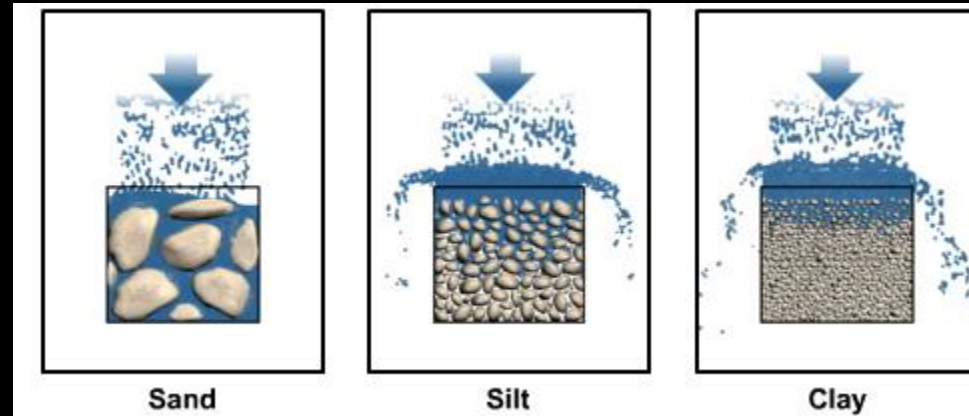


Poroznost i upojnost različitih vrsta sedimenta/stijena (Slideplayer)

VODONOSNICI

- **Propusnost** – mjera povezanosti šupljina; dobra propusnost omogućuje kretanje PV
- **vodopropusne stijene:** primaju vodu i propuštaju vodu – šljunci, krupni pijesci, okršeni vapnenici
- **polupropusne stijene:** primaju vodu, ali je teže propuštaju – sitni pijesci, glinovite sedimentne stijene, slabo raspucali magmati i metamorfiti
- **vodonepropusne stijene:** mogu primiti vodu, ali je njeno kretanje u stijenama zanemarivo – gline i kompaktne neraspucane stijene

- velika poroznost ne mora značiti i veliku propusnost
- pr. usporedba gline i vapnenca

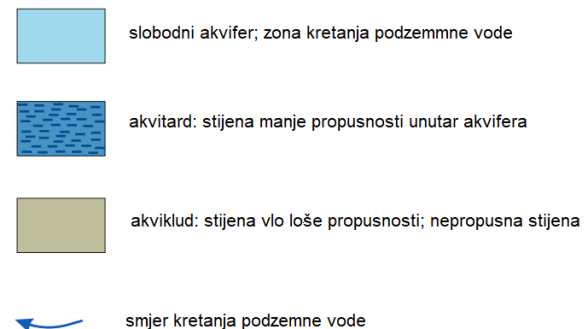
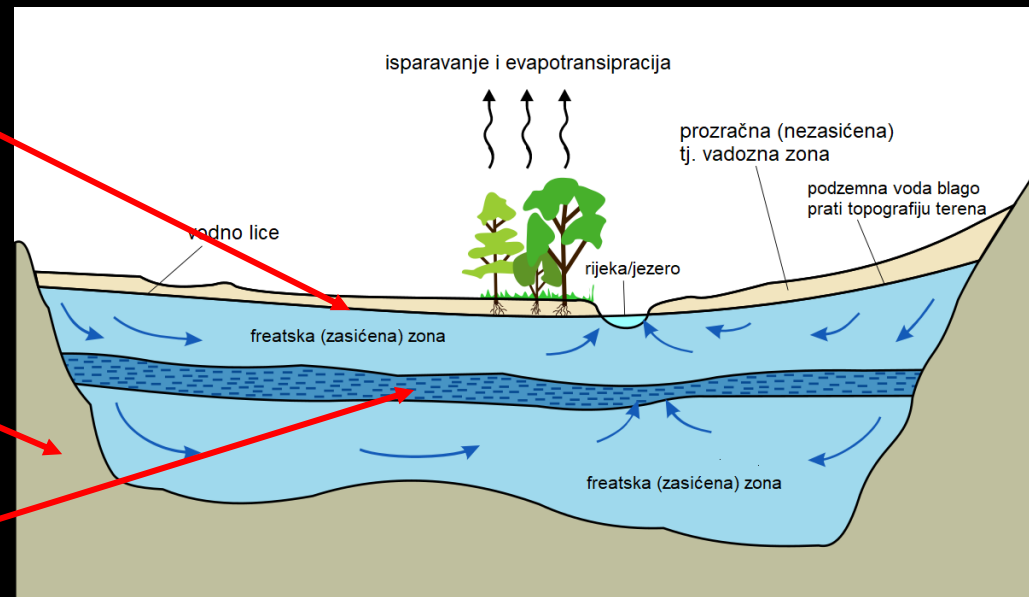


Poroznost i upojnost različitih vrsta sedimenta/stijena (Slideplayer)

VODONOSNICI

- Tri su tipa vodonosnika:
 1. S podzemnom vodom slobodnog vodnog lica (neomeđeni akvifer),
 2. Viseći akviferi,
 3. S ukliještenom podzemnom vodom (omeđeni /*confined* akvifer). Ti se akviferi nalaze između dva akvikluda te su stoga pod hidrostatskim i geostatskim tlakom. Zovu se i *arteški* ili vodonosnici pod tlakom. Mogu biti kontinuirani na velikim prostranstvima i prijeći u vodonosnik s slobodnim licem podzemne vode u zoni prihranjivanja.

- **slobodni akvifer** – voda u njemu komunicira s ostalim dijelovima podzemlja i površinom (pr. rijeka, jezero)
- **omeđeni akvifer** – PV je zarobljena i izolirana
- nepropusni paket stijena je **akviklud**
- **akvitard** – stijene manje propusnosti unutar akvifera



<https://www.youtube.com/watch?v=wx0w-Az5JOY>

VODONOSNICI U RH

- Hrvatska je bogata podzemnim vodama:
~ 100 milijardi m³ = 0,1 x 10¹⁵ kg
- Od toga je obnovljiva (koristiva) količina
~ 9 milijardi m³
(i u kontinentskom, aluvijalnom dijelu i u kršu)
- **Sjeverni dio**
- vodonosnici su primarno porozne stijene (**šljunak i pijesak** u dolinama većih rijeka i njihovih pritoka)
- slabopropusne naslage → **glinovito-prašinate naslage** u krovini i podini vodonosnika, kroz njih se voda može polako i dugo procjeđivati iz jednog vodonosnika u drugi
- **Južni dio**
- vodonosnici su sekundarno porozne stijene → **raspucali i okršeni vapnenci**
- slabopropusne naslage → **fliš**, koji može biti vodonosnik, ali i barijera ovisno o njegovom sastavu

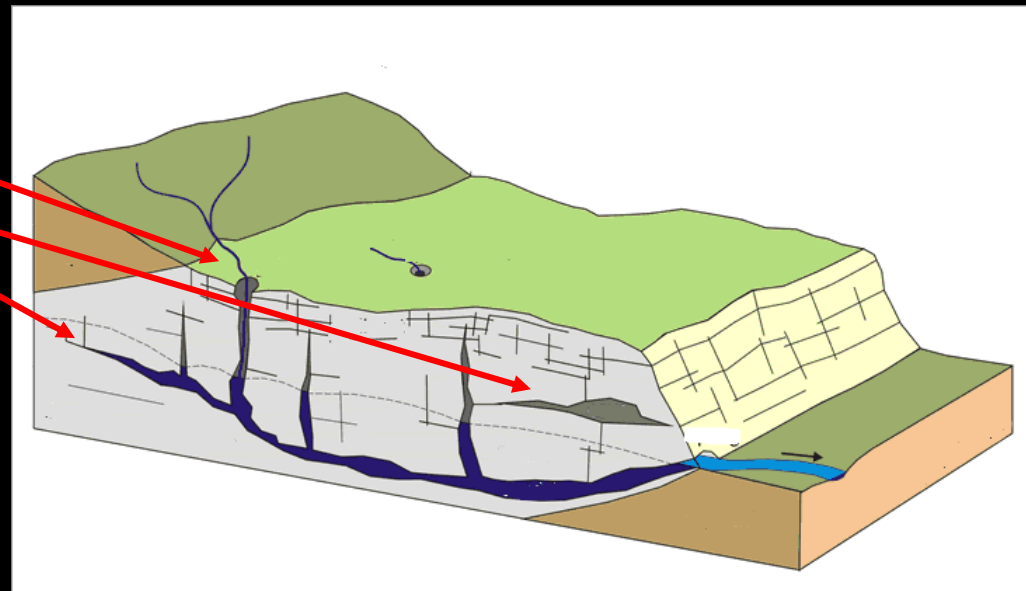


KRETANJE VODE U PODZEMLJU KRŠA

- Krške podzemne vode mogu biti međusobno povezane i imati zajedničku razinu, ali mogu biti i odvojene i teći izoliranim podzemnim putovima. Koja će od ove dvije mogućnosti karakterizirati neko područje ovisi o :
 - hidrogeološkim osobinama stijena i njihovom prostornom položaju
 - stupnju okršenosti karbonatnih naslaga
 - vodopropusnosti karbonatnih naslaga
 - ukupnim godišnjim količinama oborina
 - rasporedu ukupnih godišnjih količina oborina/padalina

KRETANJE VODE U PODZEMLJU KRŠA

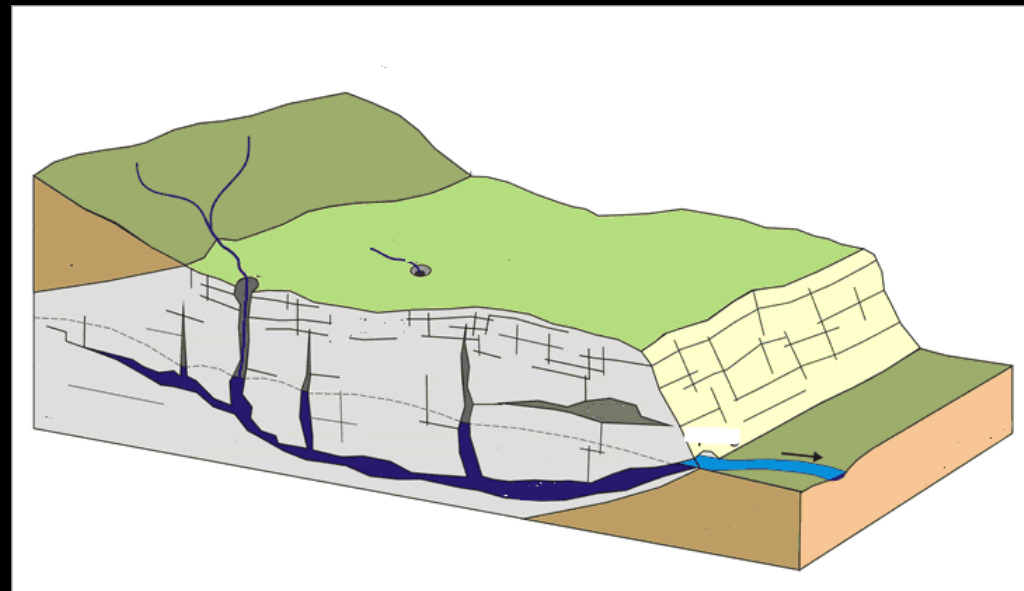
- specifičnost **krških** vodonosnika:
- poniranje vode s površine
- nekoliko razina vodnih lica
- široki kanali kojima voda teče
- različite brzine tečenja (veliki rasponi)
- > 50% površine RH je krš
- tok vode u kršu je nepoznanica
- nemoguće je mjeriti brzinu toka PV u kršu, jer se ne zna njen točan put



Tok vode u kršu (www.whymap.org)

KRETANJE VODE U PODZEMLJU KRŠA

- u kršu se mjeri **prividna brzina toka**:
- $v' = L/t$
- v' = prividna brzina
- L = najkraća udaljenost između dva mjesta određena s karte
- t = vrijeme putovanja između dva mjesta (mjeri se tako da se ubaci traser, te se mjeri vrijeme potrebno da se traser pojavi na određenim mjestima)
- u RH se ova brzina kreće između **0,002 – 54 cm/s**



Tok vode u kršu (www.whymap.org)

<https://www.youtube.com/watch?v=vAOcqHgwTfg>

KAKO DOĆI DO PV?

- **prirodni izvori**
- mjesta pojavljivanja vode na površini
- česti u kršu
- na kontaktu propusnih i nepropusnih stijena

- **silazni** – voda se pojavljuje pod utjecajem gravitacije

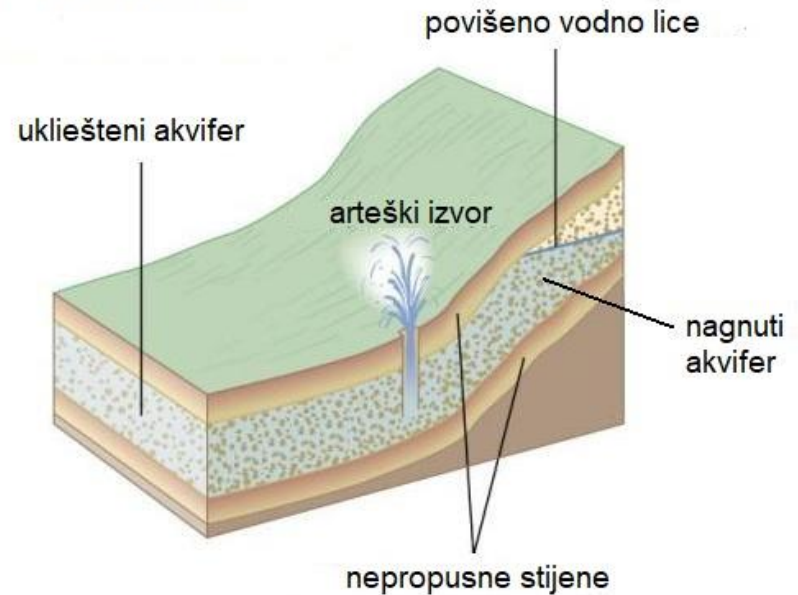
- **preljevni/uzlazni** – pojavljuje se kad se povisi vodno lice do izlaska na površinu ili na mjestu pukotina

KAKO DOĆI DO PV?

- **bunari** – u aluvijalnim terenima
- bunari sa slobodnim vodnim licem
- arteški bunari

- **arteški** – vrsta uzlaznog – PV iz ukliještenog akvifera pod tlakom izlazi na površinu; može se pojaviti i u drugim terenima; visina vodnog lica je viša od razine akvifera

Geološke karakteristike podzemlja u slučaju arteških izvora



Pojava arteškog izvora (modificirano prema:
www.geocaching.com)

KORIŠTENJE PODZEMNE VODE

- Za vodoopskrbu osim upotrebljive količine PV potrebno je i da njena kvaliteta bude odgovarajuća.
- U prirodi voda nikad nije čista (destilirana). Uvijek sadrži mikroorganizme, otopljene plinove, anorganske soli/ione i organske tvari.
- Prolaskom vode kroz tlo, te filtracijom kroz akvifer mijenja se njen sastav u dodiru s vodotopivim materijalima.
- Koncentracija otopljenih tvari ovisi o sastavu akvifera i o **vremenu zadržavanja** vode u podzemlju (kinetika otapanja).
- Ocjena kvaliteta vode ovisi o subjektivnim kriterijima kao i o namjeni. Razlikujemo:
 - vodu za piće (za ljude i stoku),
 - vodu za navodnjavanje (poljoprivredu),
 - tehnološku vodu (za industriju – hlađenje).

KORIŠTENJE PODZEMNE VODE

- mora zadovoljavati kvalitetom

- **temperatura:** odgovara prosječnoj temperaturi područja

- **boju, okus i miris** određuju različiti materijali. Anorganske i organske otopljene tvari određuju boju, dok otopljeni ioni, otopljeni plinovi i bakterije stvaraju okus i miris vode.

- **tvrdća:** koncentracija Ca i Mg iona; meka voda < 60ppm, tvrda voda > 120 ppm

- koja je voda tvrđa; u Zagrebu ili Splitu?

- **Salinitet** (ukupna koncentracija anorganskih soli otopljenih u vodi): poželjno da je <0,5 g/l (more je 35-38 g/l); mineralne vode imaju > 1 g/l

- **mutnoća:** koncentracija suspendiranog materijala; stupanj prozirnosti (mikroorganizmi, anorganski i organski materijal); poželjno < 5 NTU (engl. *Nephelometric Turbidity Units*)

- mjera raspršene svjetlosti pod 90° od ulazne zrake

- **pH:** pitke vode imaju 6-9, stijene utječu na pH (nizak u granitima, visok uz karbonatima)

PROBLEMI S PODZEMNOM VODOM

•2 osnovne grupe problema s PV:

•ONEČIŠĆENJE / ZAGAĐENJE

•pojavljuje se kad neka tvar uslijed djelovanja čovjeka uspije ući u podzemnu vodu, te ona postaje neupotrebljiva za ljudsku upotrebu

•*groundwater pollution*

•*groundwater contamination*

• PREKOMJERNO ISCRPLJIVANJE

• uklanjanje vode iz podzemlja tijekom perioda kraćeg od vremena nadomještanja

• narušavanje dinamičke ravnoteže

• *groundwater mining*

• *+ druge posljedice?*

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

- Što je to što čini vodu neupotrebljivom za korištenje (vodopskrbu)? Zagađenje ili onečišćenje?
- **Onečišćenje** je pojava neželjene supstancije u PV kao rezultat ljudske aktivnosti.
- Može biti **biološko, radiološko, kemijsko** (organsko/anorgansko, topljivo/netopljivo).
- **Zagađenje** je onečišćenje koje je dovelo do neupotrebljivosti vode za određenu svrhu.

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

- biološko
- radiološko
- kemijsko
- organsko/anorgansko
- otopljeno/suspendirano
- **izvori zagađenja:**
 - **odlagališta otpada** – procjedne vode, veliki problem, spaljivanje otpada – dioksin
 - injektiranje opasnog otpada u podzemne vode (50% tekućeg otpada u USA se tako odlagalo do 1980.ih)
 - **septičke jame** – bakterije, virusi, hormoni, mikroorganizmi, otapala, deterdženti, lijekovi, organski spojevi, teški metali
- **MDK (maksimalno dopuštene koncentracije) nekih tvari u vodi (NN 125/17):**
 - aluminij 200 µg/l
 - cink 3000 µg/l
 - živa 1 µg/l
 - kadmij 5 µg/l
 - nitrati 50 mg/l
 - nitriti 0,5 mg/l
 - arsen 10 µg/l
 - pesticidi (uk.) 0,5 µg/l

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

- **izvori zagađenja:**
- **poljoprivreda** – nutrijenti, dodaci tlu, herbicidi, pesticidi, sumpor,
- sol – natapanje u aridnim područjima
- životinjski otpad – farme i klaonice
- **industrija** – tekući i kruti otpad
- Pliva – potok Smrdljivka
- jame u Obrovcu – tvornica glinice
- Mađarska 2010. - curenje mulja u tvornici aluminijske
- Jama Sovjak – Rijeka – odlaganje naftnih derivata u ponikvu
- **MDK (maksimalno dopuštene koncentracije) nekih tvari u vodi (NN 125/17):**
- aluminij 200 µg/l
- cink 3000 µg/l
- živa 1 µg/l
- kadmij 5 µg/l
- nitrati 50 mg/l
- nitriti 0,5 mg/l
- arsen 10 µg/l
- pesticidi (uk.) 0,5 µg/l

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

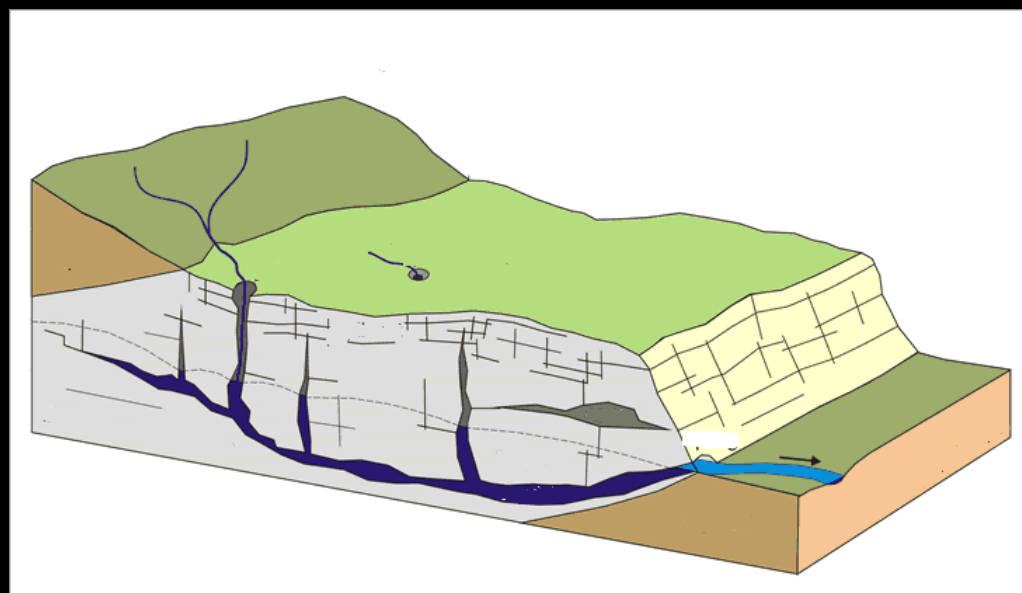
- **izvori zagađenja:**
- **prometne nezgode** – sve opasne tekućine koje se prevoze postaju opasnost ; curenje goriva
- **posipavanje cesta** – kloridi
- **donos atmosferom** – pr. eolskom erozijom tla

KONTAMINACIJA PODZEMNIH VODA:

- Zagađenje PV obično je lokalno ovisno o lokaciji, geološkim karakteristikama, klimi, dubini do PV, intenzitetu aktivnosti, upotrebi vode, gustoći stanovništva, obradi otpadnih voda, tipu zagađivala.
- Za razliku od površinskih vodotoka, veći dio podzemnih voda još je nezagađena.
- U Europi i Hrvatskoj znatan dio plitkih aluvijalnih vodonosnika je zagađen nitratima i nitritima.

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

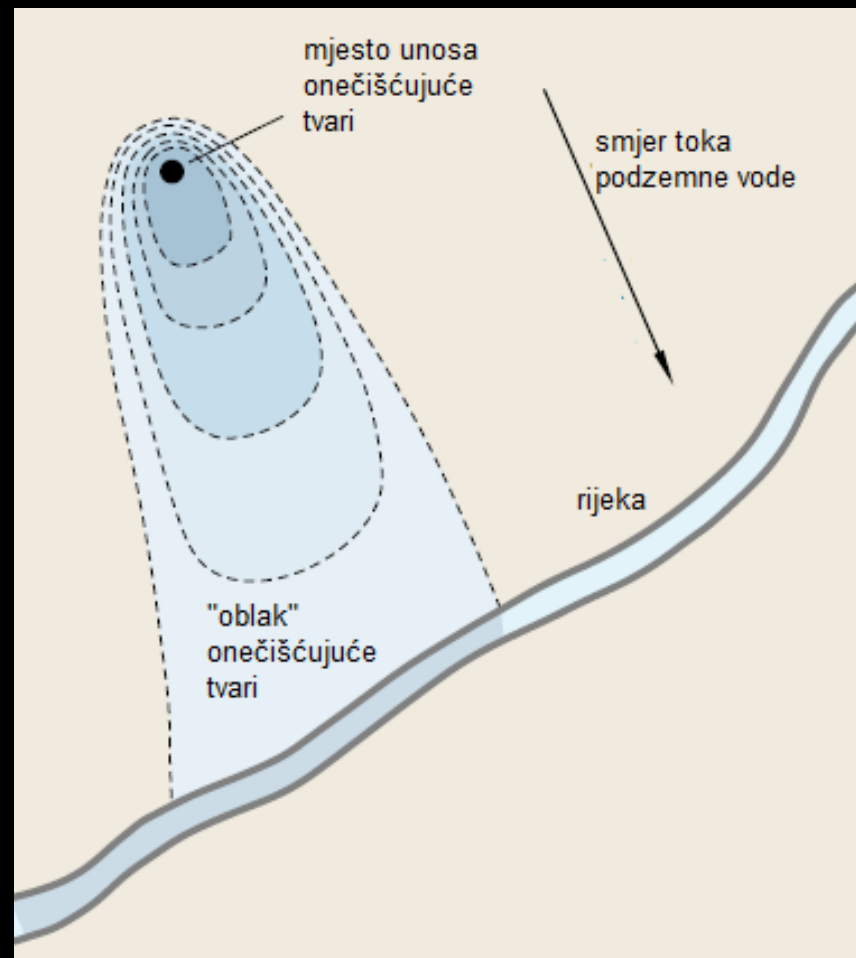
- **Krški tereni**
- kontaminacija se širi brzo jer PV teče brzo
- koncentrirani tokovi (kao kroz vodovodne cijevi)
- PV ne prati hidraulički gradijent ni konture reljefa
- nema vremena za infiltraciju, razrjeđenje, adsorpciju, precipitaciju, mikrobiološku razgradnju, otapanje...eventualno za ishlapljivanje



Tok vode u kršu (www.whymap.org)

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

- **Aluvijalni tereni**
- kontaminacija se širi polako u obliku oblaka (*plume*);
- koncentracije zagađivala su manje idući od izvora zagađenja
- izvori zagađenja mogu biti točkasti, linearni i difuzni
- tečenjem kroz PV i miješanjem s njom nastaje lepezasto proširenje zagađivala – *plume*
- **mehanizmi „čišćenja”:**
- u 3D se zagađivalo infiltrira, razrjeđuje, raspršuje, ishlapljuje, otapa, adsorbira, biodegradira, precipitira



Širenje onečišćenja u aluvijalnim terenima u obliku „oblaka” promjenjive koncentracije

KEMIJSKA TEMPIRANA BOMBA

- **KEMIJSKA TEMPIRANA BOMBA** je termin koji je vezan uz onečišćenje podzemlja, a uveo ga je Stigliani (1988):
- ***A chemical time bomb (CTB) is a concept that refers to a chain of events resulting in the delayed and sudden occurrence of harmful effects due to the mobilization of chemicals stored in soils and sediments in response to slow alterations of the environment.***
- Označava odloženi efekt otpuštanja kemikalija koje su prethodno nagomilane u podzemlju.
- To znači da i nakon prestanka onečišćavanja podzemlja može dolaziti do zagađivanja vodocrpilišta.
- Stigliani, W.M. (1988): Changes in valued "capacities" of soils and sediments as indicators of nonlinear and time-delayed environmental effects, *Environmental Monitoring and Assessment* 10:245-307.

PONAŠANJE ZAGAĐIVALA U PODZEMNOJ VODI I TLU

- U prirodi postoje i supstancije koje se gotovo uopće ne razgrađuju i vrlo se slabo adsorbiraju:
 - **poliaromatski ugljikovodici (PAH)**
 - **klorirani organski spojevi** npr. *polychlorinated byphenils (PCB)*
 - **dioksini** (npr 2,3,7,8-tetraklordibenzodioksin - nastaju nepotpunom oksidacijom PVC – polivinilklorida)
- Dugo ostaju u podzemnoj vodi i teško ih se riješiti
- No moguće je i **liječenje** jednom onečišćenog podzemlja. različitim pregradama, ispumpavanjem, izradom jaraka za drenažu, pojačavanjem biodegradacije, ili se vodu može koristiti nakon predobrade (predtretman), pa se rade tzv. tvornice vode.

ONEČIŠĆENJE/ZAGAĐENJE PV

- **Općenite posljedice vezane za onečišćenje PV:**
- upotreba kontaminirane vode
- prestanak snabdijevanja vodom
- degradacija površinskih vodenih sustava
- visoki troškovi čišćenja
- visoki troškovi alternativnih načina snabdijevanja vodom
- problemi sa zdravljem
- arsen – jedan od opasnijih metala
- javlja se uz vulkane (pr. arsenske fumarole, Afrika)
- u nevezanim holocenskim aluvijima
- pr. Slavonije
- **arsen u aluviju Dunava**
- konc. 1,3 - 491 ppm (dopušteno 10 ppm)
- vjerojatno pojava vezana za razgradnju organske tvari

POZNATE INDUSTRIJSKE NESREĆE

- **Bhopal, Indija - 2-3.12.1984.**
- iz tvornice pesticida *Union Carbide India Ltd* iscurilo ukupno 40 t metil izocijanata (plin korišten za proizvodnju pesticida naziva karbaril)
- 3.800 odmah poginulih
- do 20.000 umrlo od posljedica unutar dvadeset godina
- ukupno 550.000 s posljedicama
- izrazita kontaminacija tla i podzemne vode
- danas je na lokaciji oko 400 tona industrijskog otpada
- smatra se najgorom industrijskom nesrećom ikad



Spomenik poginulima
i osakaćenima u Bophalu (Wikipedia)

POZNATE INDUSTRIJSKE NESREĆE

- **Kolontar, Mađarska, 4.10. 2010.**
- izlivanje oko 1 000 000 m³ lužnatog crvenog mulja iz tvornice aluminija Ajka
- val mulja od 1-2 m
- 10 poginulih, 150 ozlijeđenih
- mulj stigao do Dunava nakon 3 dana
- velike štete



Toksični mulj razliven po selu (BBC)



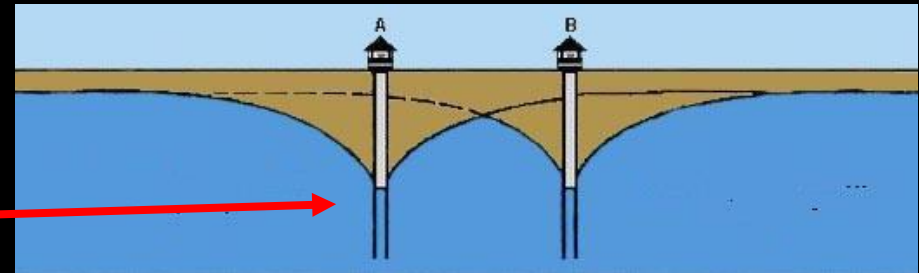
Puknuće spremnika crvenog mulja (mapio.net)

PREKOMJERNO ISCRPLJIVANJE PV

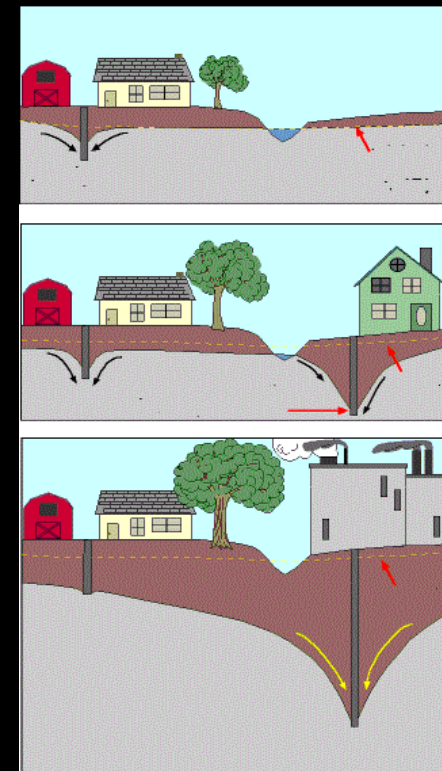
- **rudarenje vode** (*groundwater mining*)
- općenito snižavanje razine vodnog lica i stvaranja depresijskih konusa
- **slučajno:** radi crpljenja vode za upotrebu
- **namjerno:** radi dostupnosti podzemnih područja radi gradnje ili rudnika

- **Posljedice:**
- **1 – gubitak arteškog izvora** – snižavanje vodnog lica 100 m u Pariškom bazenu i regionalni gubitak arteških izvora

- **2 – površinsko snižavanje površine i rijeka i jezera**



Depresijski konusi (groundwater.sdsu.edu/)

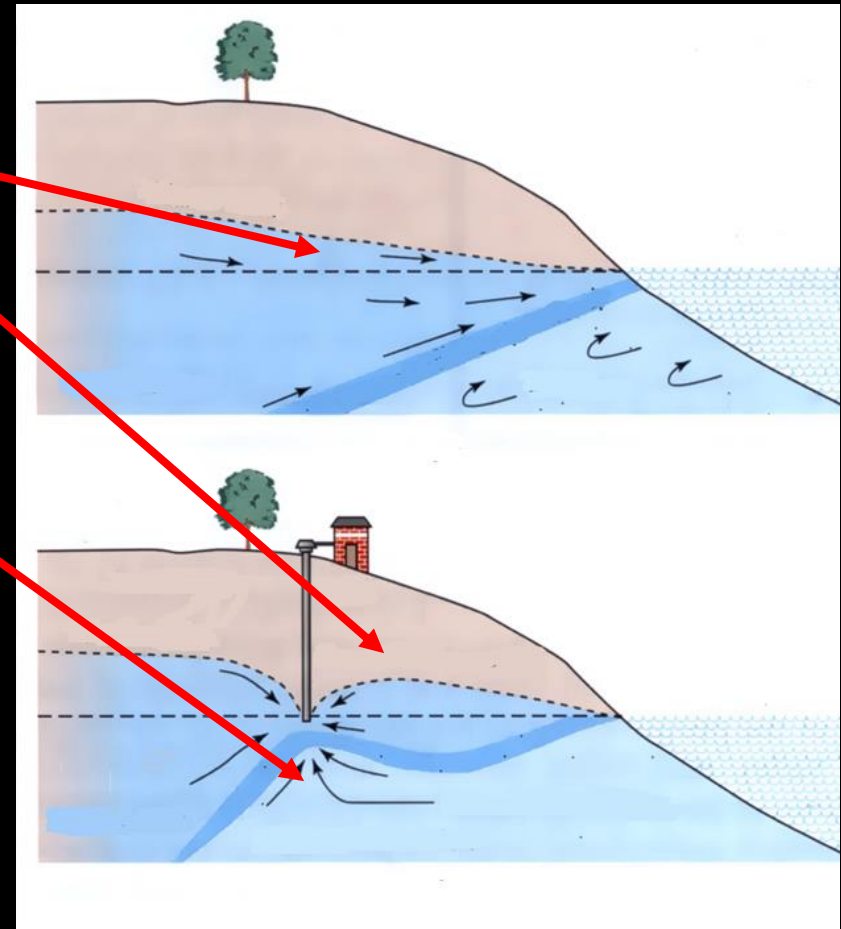


Prepumpavanje podzemne vode i snižavanje razine rijeke/jezera (http://geology.isu.edu)



PREKOMJERNO ISCRPLJIVANJE PV

- Posljedice:
- 3 – promjena smjera toka PV
- 4 – ubrzana kontaminacija – i inače je povećana vjerojatnost kontaminacije uslijed suše
- 5 – intruzije slane ili morske vode – slana voda je gušća i kod stabilnih uvjeta u poroznom akviferu je ispod slatke vode - kod nas u kršu



Promjena smjera tečenja PV i intruzija morske vode (vidljivo na donjoj slici u odnosu na gornju)

PREKOMJERNO ISCRPLJIVANJE PV

- **Posljedice:**
- **6 – slijeganje terena – šupljine** ispunjene vodom se isprazne i šestice se sliježu
- pogotovo karakteristično za glinovite terene
- s vremenskom odgodom

- pr. Mexico city – snižavanje 30-260 mm/g (7,5 m)
- Venecija – jedan od razloga tonjenja (5 m u zoni rijeke Po)
- Galveston, Texas (9 m) (radi vode i nafte!)

- urušne ponikve u kršu



Primjer urušne ponikve Merag, otok Cres (Wikipedia)

Primjer otvaranja rupa u podzemlju, Ogulin 2008 (www.24sata.hr)



UPRAVLJANJE PV

- **PV je kritični resurs**
- na dodiru geosfere, hidrosfere i atmosfere – čini ju ranjivom na kontaminaciju i smanjenje količine
- **smanjivanje iskorištenja i upravljanje PV – kako?**
- pročišćavanje vode nakon upotrebe
- iskorištavanje za sad nedostupne vode (more, led...diskutabilno)
- istraživanje dubljih akvifera
- premještanje vode
- optimum između kvalitete vode i upotrebe – mora li voda za navodnjavanje nužno biti pitka voda?