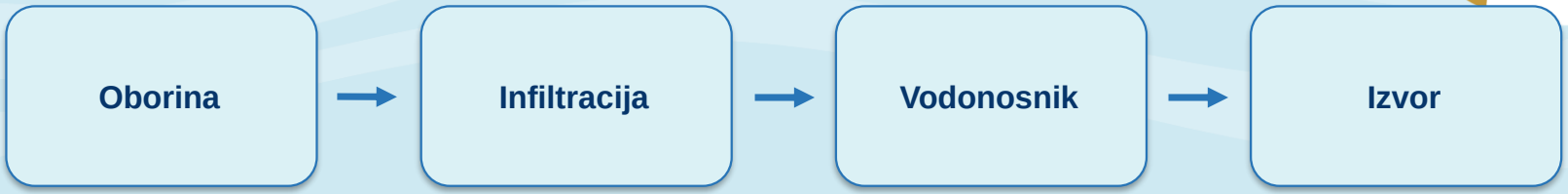


Izotopi kisika i vodika u istraživanju podzemnih voda

Zašto pratimo izotope same molekule vode?



Otopljeni ioni govore o interakciji vode i stijene;
$\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ i ^{3}H mogu otkriti prihranjivanje, miješanje i vremensku komponentu toka.

? **PITANJE** Što nam kemijski sastav vode ne može uvijek reći o njezinu podrijetlu?

Što ćemo naučiti?

- Razlikovati izotope vodika i kisika.
- Objasniti izotopnu frakcionaciju tijekom isparavanja i kondenzacije.
- Protumačiti $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ dijagram i meteorski pravac.
- Procijeniti udjele miješanja i područje prihranjivanja.
- Povezati tricij s vremenom zadržavanja.

! **ZAPAMTI** Stabilni izotopi opisuju izotopni potpis, a ^{3}H vremensku komponentu sustava.

Koje izotope imaju vodik i kisik?

Element	Izotop	Neutroni	Status
Vodik	^{1}H (protij)	0	stabilan
Vodik	^{2}H (deuterij)	1	stabilan
Vodik	^{3}H (tricij)	2	radioaktivan
Kisik	^{16}O / ^{17}O / ^{18}O	8 / 9 / 10	stabilni

POJAM Izotopi istog elementa imaju jednak broj protona, ali različit broj neutrona.

Što nam pojedini izotopi govore?

$\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$

Stabilni izotopni omjeri

Podrijetlo vode, sezona, nadmorska visina, evaporacija i miješanje.

^{3}H – tricij

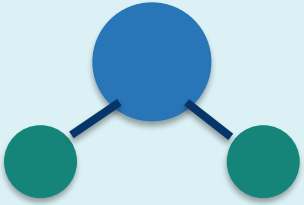
Aktivnost radioaktivnog izotopa

Pokazatelj recentne komponente i vremena zadržavanja, uz model.

ZAPAMTI ^{3}H ne mjeri se istom veličinom i ne odgovara na isto pitanje kao $\delta^{18}O$ ili $\delta^{2}H$.

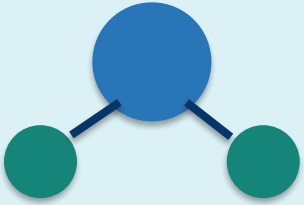
Izotopni sastav bez promjene kemijske formule

$H_2{}^{16}O$



dominantna molekula

$HD^{16}O$



sadrži ^2H

POJAM Izotopna zamjena mijenja masu molekule, a ne njezinu osnovnu kemijsku prirodu.

Kako zapisujemo stabilni izotopni sastav?

$$\delta = [(R_{uzorak} / R_{standard}) - 1] \cdot 1000\ ‰$$

$\delta^{18}O$

$R = {}^{18}O / {}^{16}O$

$\delta^{2}H$ (δD)

$R = {}^{2}H / {}^{1}H$

POJAM Vrijednosti δ izražavaju se u promilima (‰), u odnosu na referentni standard VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

Kako čitamo negativnu δ-vrijednost?

$$R_{uzorak} = 0{,}990 \cdot R_{standard}$$

$$\delta = (0{,}990 - 1) \cdot 1000 = -10\ ‰$$

Uzorak je izotopno „lakši” od standarda.

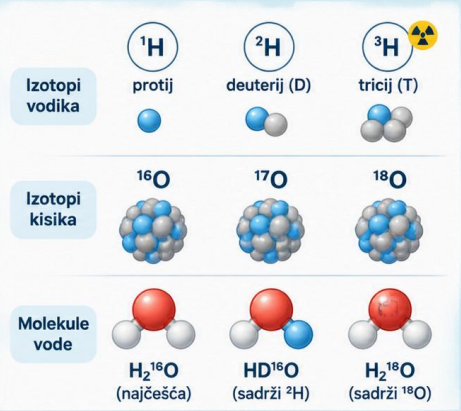
! **ZAPAMTI** Negativni δ znači manje teškog izotopa u odnosu na standard, ne negativnu koncentraciju.

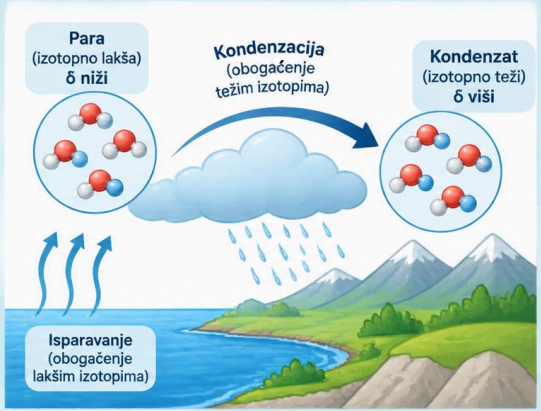
Što je izotopna frakcionacija?

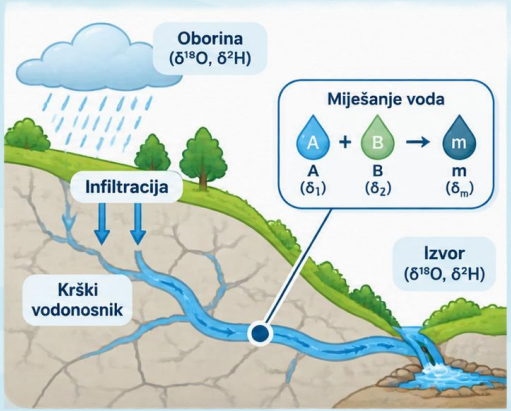
Kondenzat je pri ravnoteži obogaćen težim izotopima u odnosu na preostalu paru; pri isparavanju u paru lakše prelaze lakše izotopne vrste.

II. FRAKCIONACIJA

Ista voda → **Fazni prijelaz** → **Različiti δ u fazama**







POJAM Procesi razdvajaju lakše i teže izotopne varijante vode.

Dva mehanizma frakcionacije

II. FRAKCIONACIJA

Ravnotežna frakcionacija

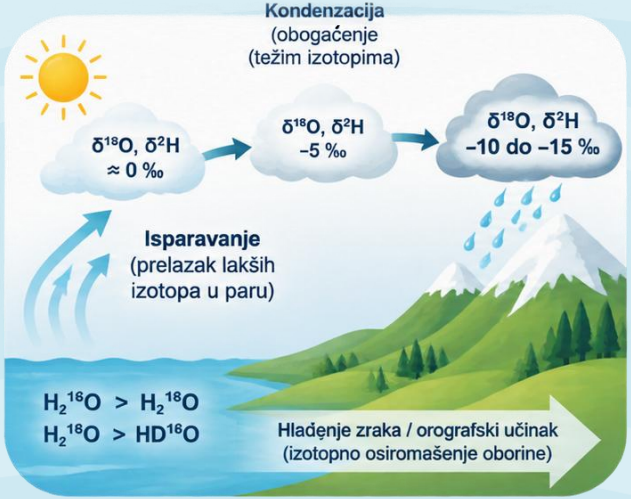
Različita raspodjela izotopa između faza u ravnoteži.

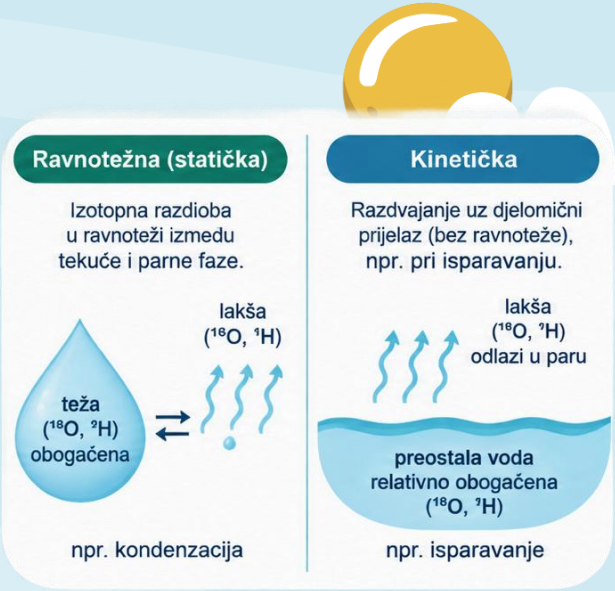
Izraženo ovisi o temperaturi.

Kinetička frakcionacija

Razlike u brzini prijenosa mase, npr. isparavanje u nezasićen zrak.

Ovisi i o relativnoj vlažnosti.

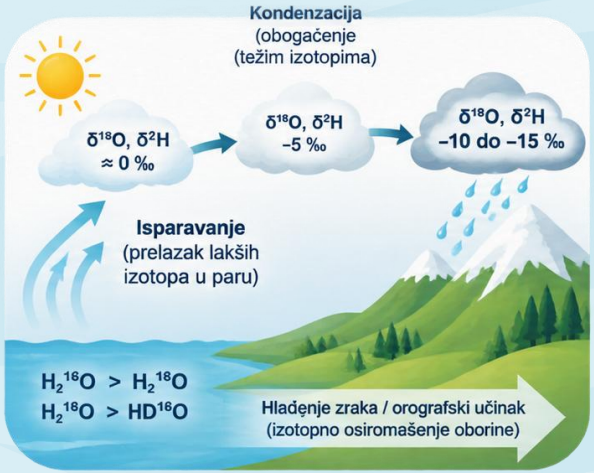


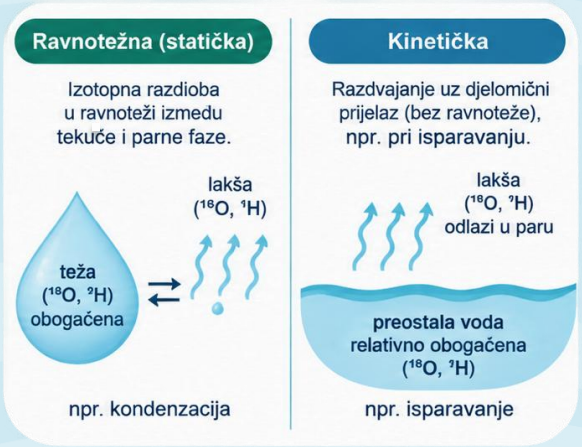


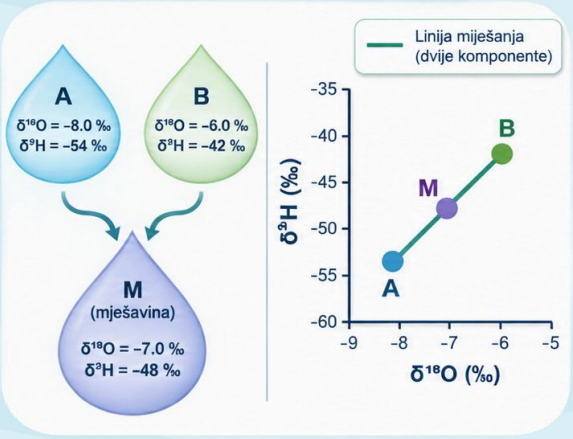
! **ZAPAMTI** Kinetički učinci osobito su važni kada isparavanje nije ravnotežno.

Dva mehanizma frakcionacije

II. FRAKCIONACIJA







! **ZAPAMTI** Kinetički učinci osobito su važni kada isparavanje nije ravnotežno.

Što predstavlja faktor frakcionacije α?

$$\alpha_{A/B} = R_A / R_B$$

R_A – tekuća voda

npr. $^{18}O/^{16}O$ u kiši

R_B – vodena para

npr. $^{18}O/^{16}O$ u oblaku

POJAM Za ravnotežu tekućina–para α > 1 za teške izotope vode.

Što se događa tijekom isparavanja i kiše?

II. FRAKCIONACIJA

ISPARAVANJE

Lakše izotopne vrste lakše prelaze u paru.

Zaostala površinska voda najčešće postaje obogaćenija ^{18}O i ^{2}H.

KONDENZACIJA

Teže izotopne vrste relativno lakše kondenziraju.

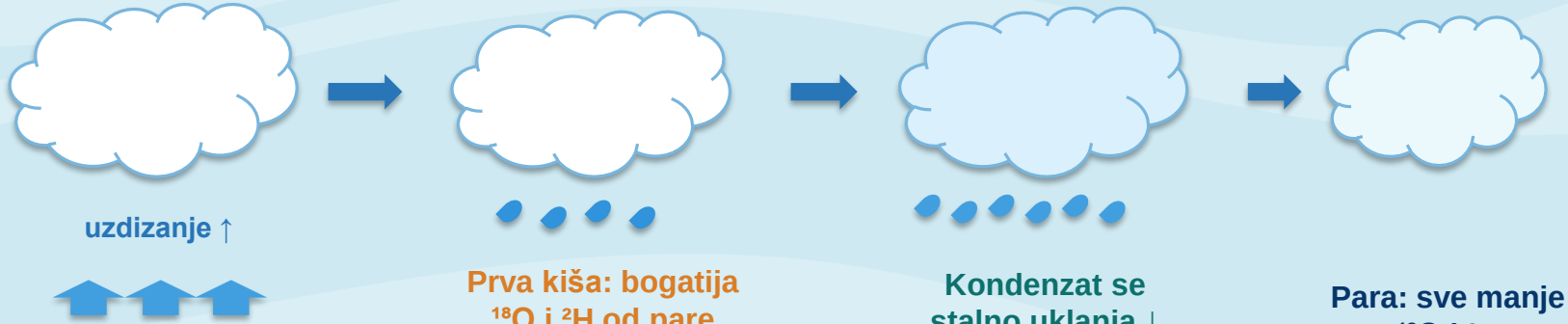
Para se postupno osiromašuje težim izotopima.

ZAPAMTI Smjer promjene δ ovisi o fazi i procesu koji promatramo.

Rayleighova destilacija u oblaku

II. FRAKCIONACIJA

1 Vlažna zračna masa → **2 Prva kondenzacija** → **3 Daljnje hlađenje** → **4 Preostala para**



uzdizanje ↑

Prva kiša: bogatija ^{18}O i ^{2}H od pare

Kondenzat se stalno uklanja ↓

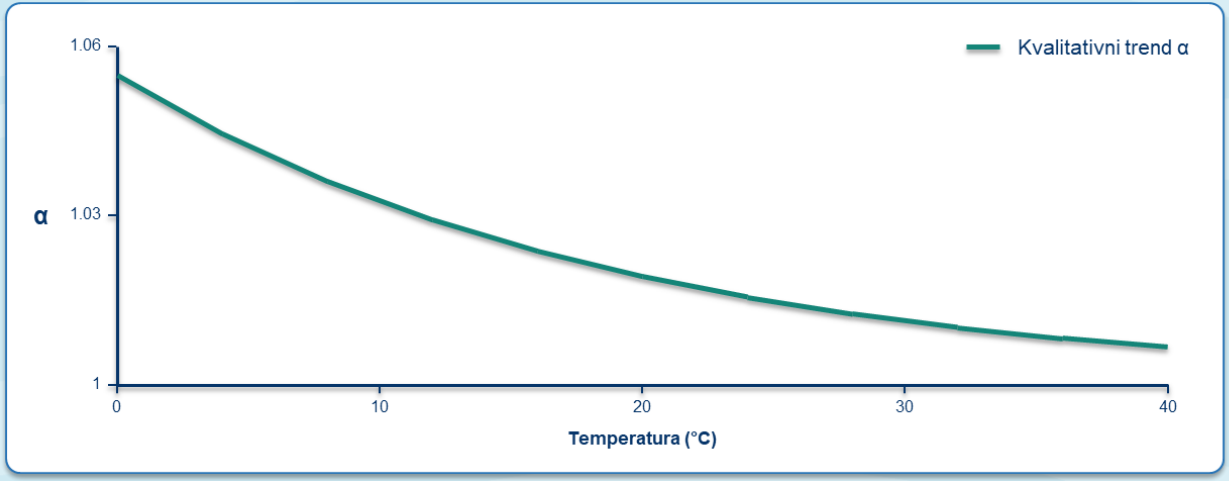
Para: sve manje ^{18}O i ^{2}H

Frakcionacija + uklanjanje kiše → sve negativniji $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u preostaloj pari

! **ZAPAMTI** Uzastopna kondenzacija i uklanjanje kiše osiromašuju preostalu paru u teškim izotopima.

Zašto je temperatura toliko važna?

II. FRAKCIONACIJA



! **ZAPAMTI** Za ravnotežnu frakcionaciju voda–para učinak je izraženiji pri nižim temperaturama.

Kako nastaje izotopni potpis oborine?

II. FRAKCIONACIJA



Isparavanje s mora → **Transport i hlađenje** → **Kondenzacija** → **Oborina / infiltracija**

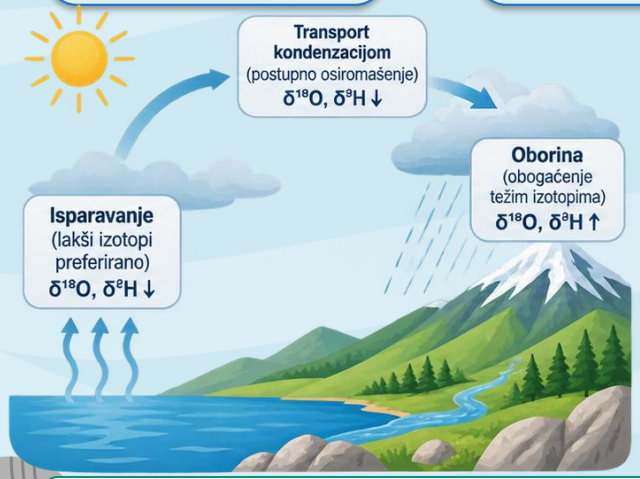
Put vlage, temperatura, količina kiše i ponovljeni ciklusi mijenjaju δ.

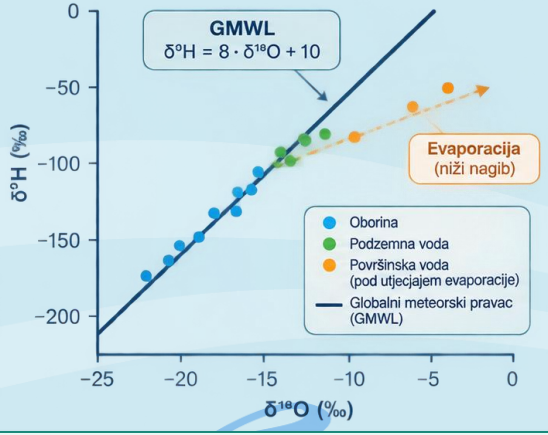
PRIMJENA Izotopni sastav oborina predstavlja rezultat niza povezanih procesa.

Kako nastaje izotopni potpis oborine?

II. FRAKCIONACIJA

Isparavanje s mora → **Transport i hlađenje** → **Kondenzacija** → **Oborina / infiltracija**







PRIMJENA Izotopni sastav oborina predstavlja rezultat niza povezanih procesa.

Šest čimbenika koji oblikuju δ u oborinama

III. OBORINSKA VODA

TEMPERATURA

hladnije → često negativniji δ

NADMORSKA VISINA

više → često negativniji δ

GEOGRAFSKA ŠIRINA

prema polovima → negativniji δ

KONTINENTALNOST

u unutrašnjost → negativniji δ

SEZONA I KOLIČINA

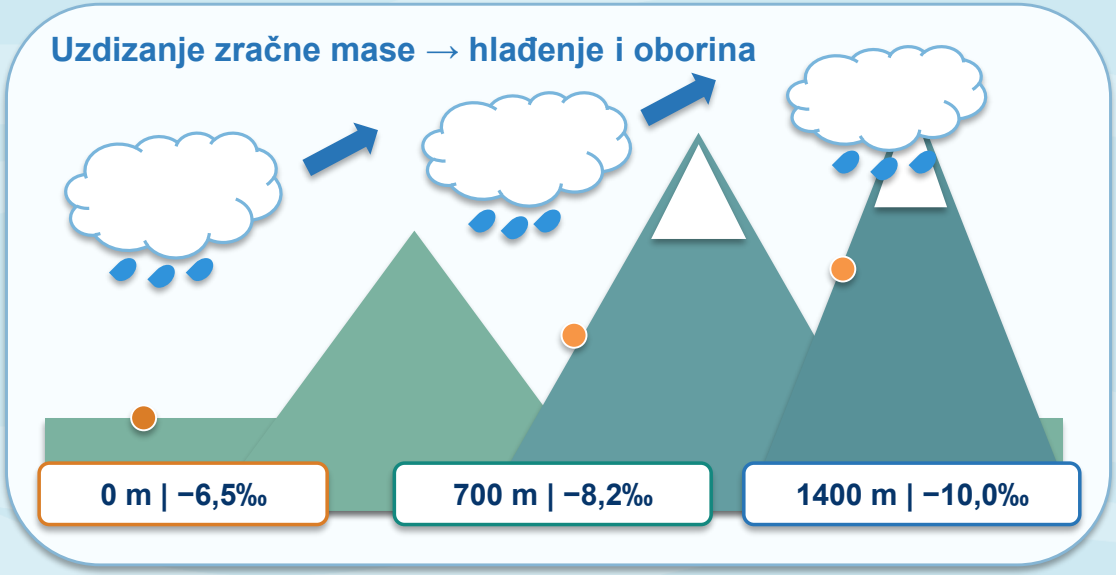
ovisno o klimatskom području

EVAPORACIJA

rezidualna voda → pozitivniji δ

! **ZAPAMTI** Nijedan efekt ne treba tumačiti bez lokalnog konteksta i vremenskog niza.

Visinski efekt: izotopni sastav i nadmorska visina





Ilustrativne vrijednosti (‰); stvarni visinski gradijent mora se odrediti lokalnim mjerenjima.

! **ZAPAMTI** Vrijednost lokalnog gradijenta određuje se iz mjerenja, ne preuzima se univerzalno.

Efekt geografske širine

Od toplijih prema hladnijim područjima: općenito negativniji $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$



TROPI

δ češće manje negativan



UMJERENE ŠIRINE

promjenjiv sezonski δ



POLARNE ŠIRINE

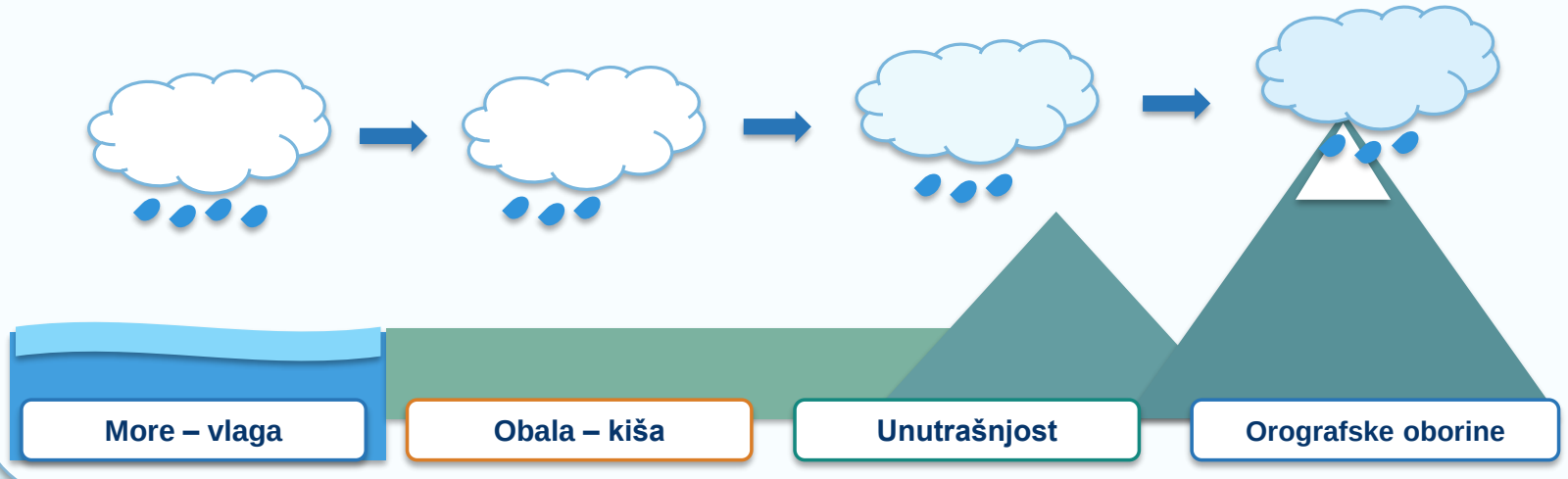
δ češće vrlo negativan

Uzrok: temperatura kondenzacije i povijest izdvajanja oborina tijekom transporta vlage.

! **ZAPAMTI** U prosjeku je oborina na većim geografskim širinama izotopno lakša.

Kontinentalni efekt: put vlage prema kopnu

Vlažni zrak dolazi s mora, hladi se i postupno gubi teške izotope oborinom

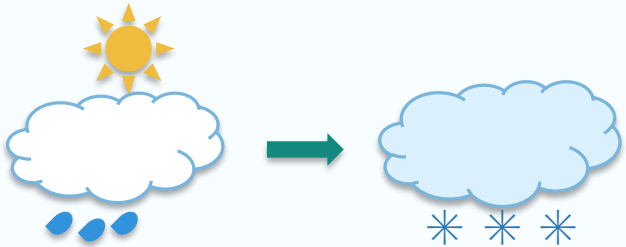


$\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ u oborini često se smanjuju prema kopnu i uz orografsko izdizanje.

! **ZAPAMTI** Pravilo je opće; izvori vlage i orografija mogu promijeniti lokalni obrazac.

Godišnja doba i količina oborina

SEZONSKI EFEKT

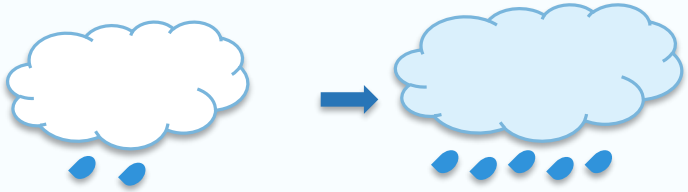


LJETO
δ često viši

ZIMA
δ često niži

U umjerenoj klimi (česta pojava)

EFEKT KOLIČINE



MANJE OBORINA
δ može biti viši

JAKA KIŠA
δ često niži

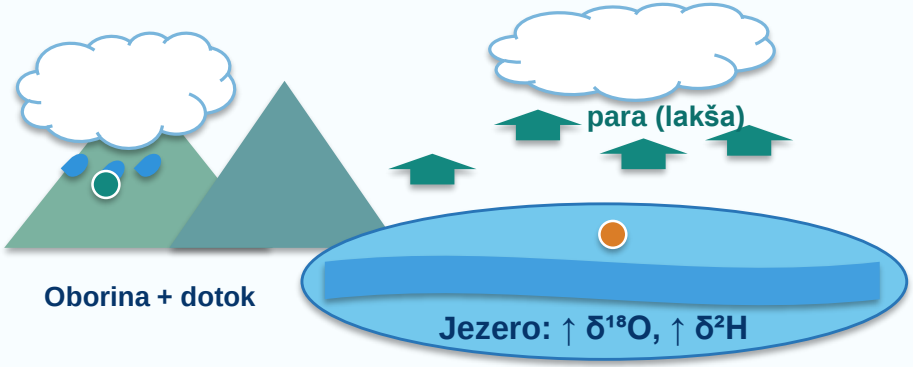
U mnogim tropskim područjima

Oba efekta ovise o meteorološkim uvjetima, izvoru vlage i lokalnoj klimi.

! **ZAPAMTI** Sezonalnost u pravilu odražava meteorološke i geografske uvjete mjesta.

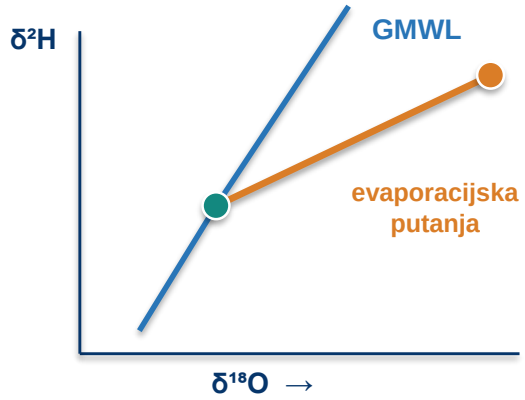
Evaporacija: zašto jezero odstupa od oborine?

Voda isparava – preostalo jezero postaje izotopno teže



Lakše izotopne vrste lakše napuštaju površinsku vodu.

δ²H prema δ¹⁸O

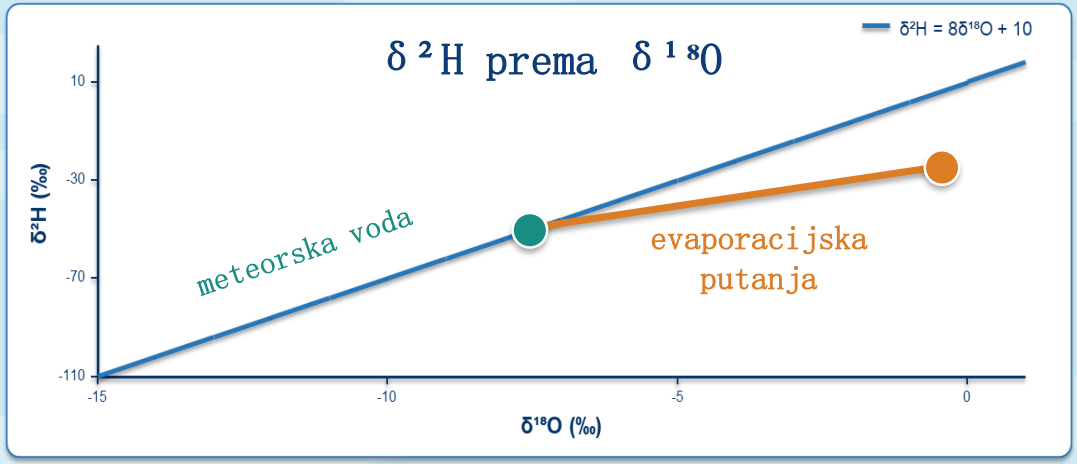


Nagib putanje obično je manji od 8.

PRIMJENA Zaostala jezerska voda često se obogaćuje ^{18}O i ^{2}H, a putanja ima manji nagib od GMWL.

Globalni meteorski pravac (GMWL)

IV. IZOTOPNI DIJAGRAMI



Meteorski pravac je referentna linija za oborinske vode, a odstupanje od njega pomaže prepoznati procese poput evaporacije.

POJAM GMWL je globalna referenca, a ne zamjena za lokalno izmjeren pravac oborina.

Zašto nam treba lokalni meteorski pravac?

IV. IZOTOPNI DIJAGRAMI

GMWL

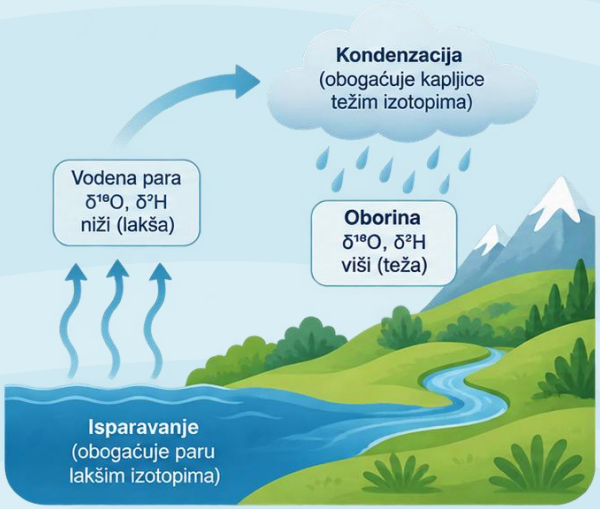
Globalno približenje:

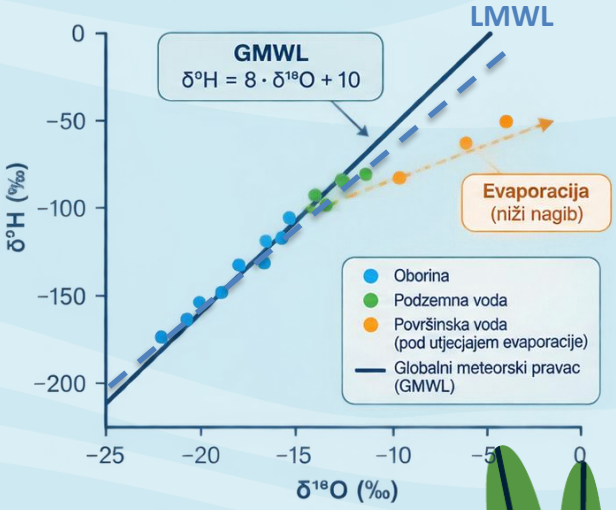
$\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$

LMWL

Lokalni regresijski pravac:

$\delta^2H = a \cdot \delta^{18}O + b$

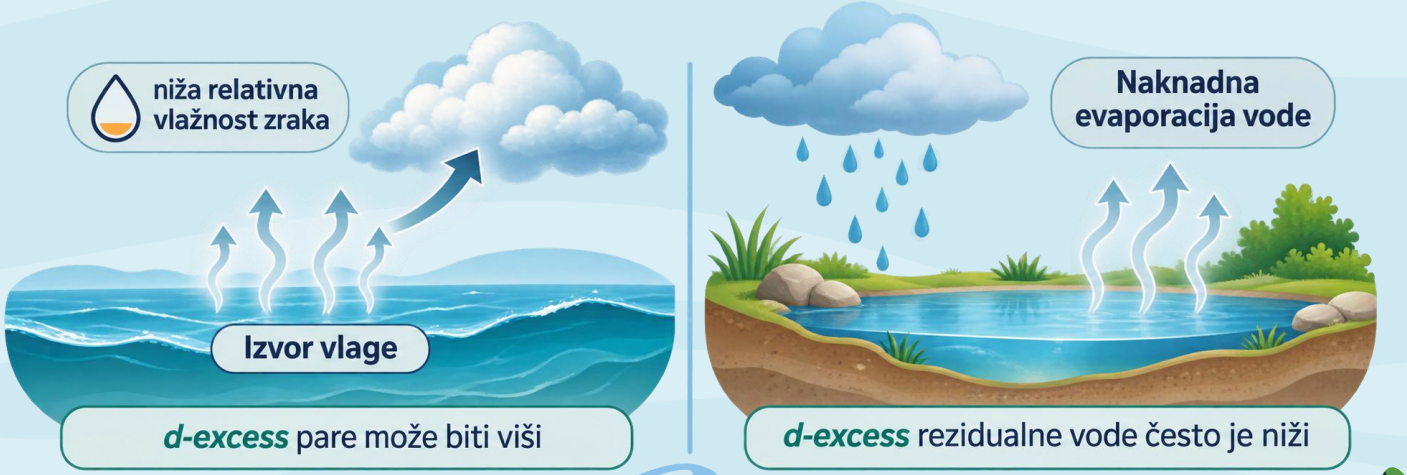




POJAM LMWL opisuje lokalno uzorkovane oborine i njihove specifične uvjete.

Što nam govori deuterijski eksces (d-excess)?

$$d = \delta^{2}H - 8 \cdot \delta^{18}O$$

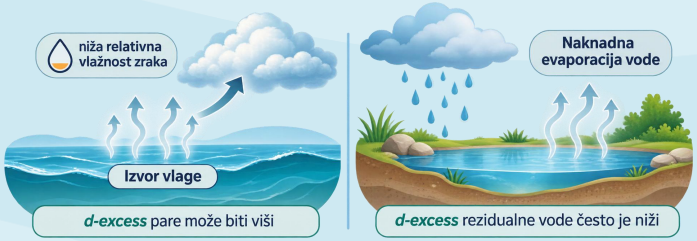


ZAPAMTI d-excess može pomoći u procjeni uvjeta evaporacije izvora vlage; nije jednoznačan pokazatelj.

Što nam govori deuterijski eksces (d-excess)?

$$d = \delta^{2}H - 8 \cdot \delta^{18}O$$

Ako je $\delta^{18}O = -8$ ‰ i $\delta^{2}H = -54$ ‰, tada je $d = 10$ ‰.



! **ZAPAMTI** d-excess može pomoći u procjeni uvjeta evaporacije izvora vlage; nije jednoznačan pokazatelj.

$$d = \delta^{2}H - 8 \cdot \delta^{18}O$$

Što nam govori deuterijski eksces (d-excess)?

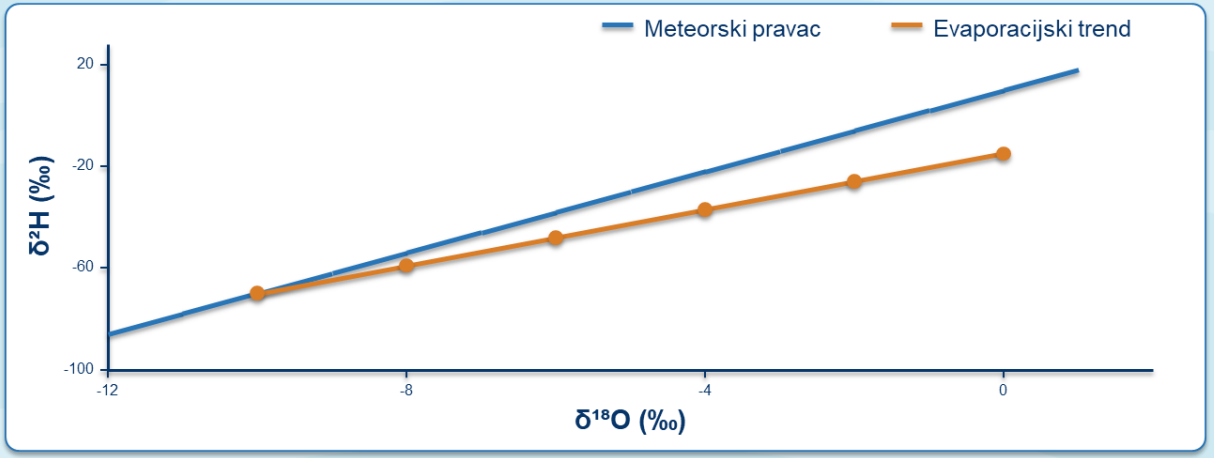
Kako se tumače vrijednosti u hidrogeokemiji?
Usporedbom d u uzorcima podzemnih voda ili lokalnih oborina s globalnim prosjekom, hidrogeolozi mogu rekonstruirati povijest vode:

1. Visoki d (d > 10)
Ukazuje na to da je vodena para nastala brzim isparavanjem iznad toplog mora uz nisku relativnu vlažnost zraka.
Mediteranski efekt: Savršen primjer je Sredozemno more zimi. Zbog suhog zraka i intenzivnog isparavanja, oborine koje dolaze s Mediterana imaju povišen d, često između **15‰ i 22‰**. Ako u podzemnoj vodi u Hrvatskoj (npr. u kršu Dalmacije ili Istre) izmjerite visoki d, to je direktan dokaz da ta voda potječe od zimskih ciklona s Jadrana/Mediterana.

2. Niski d (d < 10)
Ukazuje na to da su oborine nastale u uvjetima vrlo visoke vlažnosti zraka iznad oceana (npr. tropske zračne mase).
Efekt sekundarnog isparavanja (evaporacije): Ako kapljice kiše padaju kroz suhi zrak ispod oblaka, ili ako voda već stoji u jezeru/tlu prije nego što ponikne, dolazi do naknadnog isparavanja. To kinetičko isparavanje tekuće vode drastično **smanjuje** d (često pada ispod 5‰ ili čak u negativne vrijednosti).

! **ZAPAMTI** d-excess može pomoći u procjeni uvjeta evaporacije izvora vlage; nije jednoznačan pokazatelj.

Kako uočiti evaporaciju na $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ grafu?



PRIMJENA Primjer linije evaporacije i uzoraka je shematski, nije terenski skup podataka.

Kako planiramo izotopno uzorkovanje?

Oborine → **Izvori** → **Rijeke / jezera** → **Bušotine**

- Vremenske serije: sezonalnost, ekstremi, hidrološki događaji.
- Uz svaki uzorak bilježiti temperaturu, protok, vodostaj i vodljivost.
- Koristiti hermetične spremnike i minimizirati evaporaciju uzorka.

! **ZAPAMTI** Jedan pojedinačni uzorak rijetko je dovoljan za analizu cijelog sustava.

Zašto kombiniramo izotope i hidrogeokemiju?

V. METODOLOGIJA

IZOTOPI



$\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$

^{3}H i $^{3}H/^{3}He$

KEMIJA



Glavni ioni, pH

DOC, hranjive soli

HIDROLOGIJA



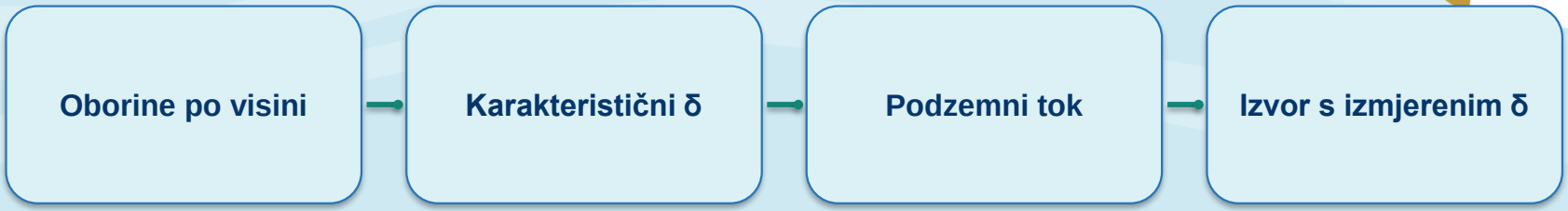
Oborina, protok

Vodostaj, sezona

PRIMJENA Mehanizam najbolje objašnjava usklađenost više neovisnih pokazatelja.

Kako izotopi otkrivaju područje prihranjivanja?

VI. PRIMJENE



Uspoređuju se prostorni i vremenski obrasci; izotopna podudarnost sama po sebi ne dokazuje hidrauličku vezu.

PRIMJENA Podrijetlo vode zaključuje se iz usporedbe oborina, izvora i hidrogeološkog modela.

Primjer I – visinski gradijent

Lokacija	Nadmorska visina	$\delta^{18}O$
Izvor Abrami	50 m	−6,10 ‰
Potok Odolina	600 m	−7,75 ‰
Razlika	550 m	−1,65 ‰

1,65 ‰ / 550 m × 100 m = 0,30 ‰ / 100 m

✓ **PRIMJENA** Gradijent ≈ −0,30 ‰ na 100 m; lokalna kalibracija vrijedi za opisani primjer.

Primjer II – podzemne vode Istre

VI. PRIMJENE

CILJ ISTRAŽIVANJA

Odrediti izvorišno područje i moguću povezanost krških izvora.

Usporediti $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ s meteorskom vodom.

POTREBNI PODACI

Geološke i hidrogeološke karte; protoci, sezona, kemijski sastav i izotopi vode.

PRIMJENA Izotopna mjerenja pomažu razlikovati hidrologijski povezane cjeline, ali zahtijevaju druge podatke.

Istra: izdvajanje hidrogeoloških cjelina

VI. PRIMJENE

Učka

Vela Učka, Bubić jama

Srednja Istra

Gradole, Rakonek, Funtana

Ćićarija

Sveti Ivan, Bulaž

Bujsko-savudrijsko

antiklinalno područje

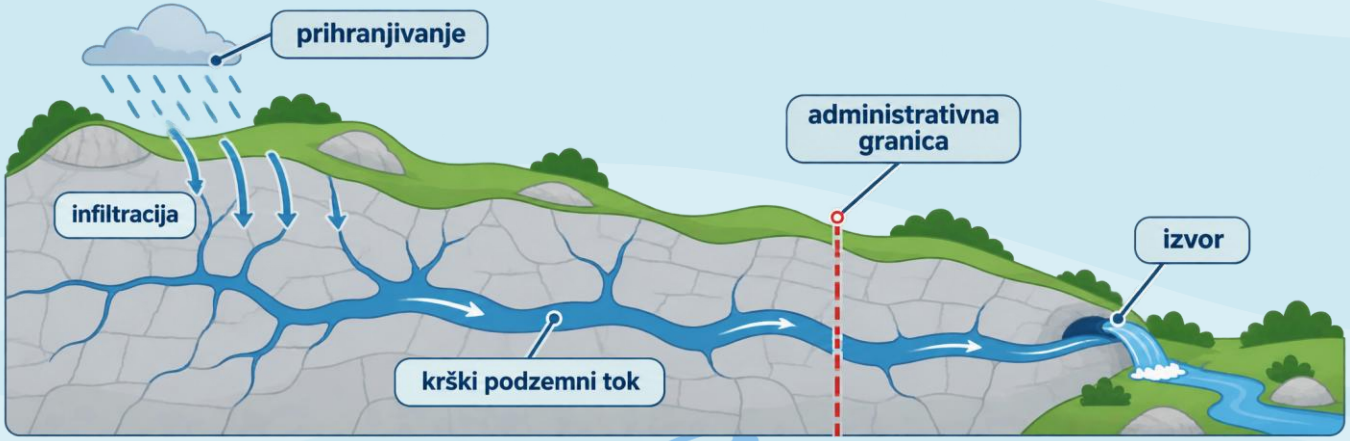


PRIMJENA Prikazani nazivi su iz izvornog predavanja; nisu prikazane nove izmjerene vrijednosti.

Primjer III – prekogranični krški vodonosnici

VI. PRIMJENE

Prihranjivanje u reljefu → **Podzemni tok kroz krš** → **Izvori u drugoj državi**



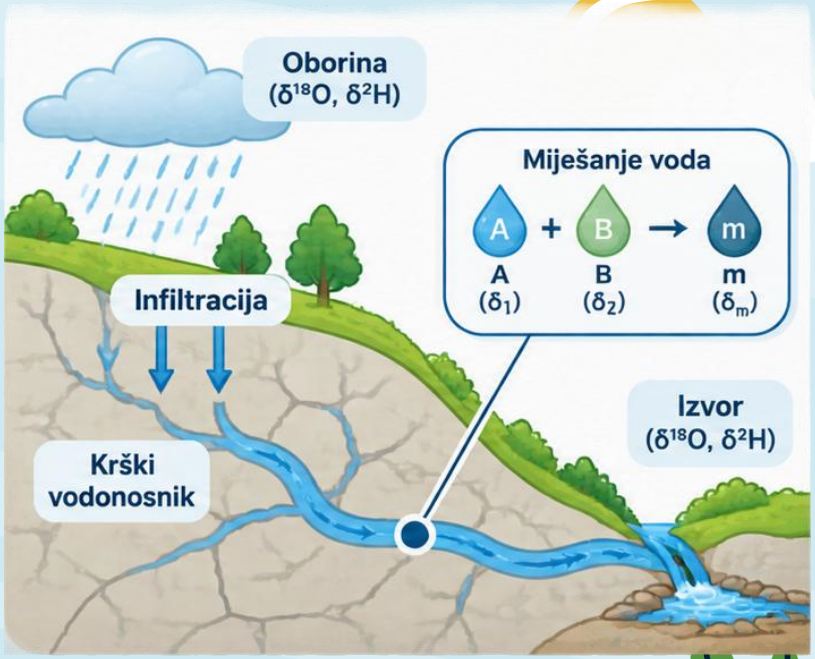
PRIMJENA Hidrogeološki sustavi prelaze administrativne granice; izotopi su komplementaran dokaz.

Izotopna ravnoteža mase pri miješanju voda

$$\delta M = f \cdot \delta A + (1 - f) \cdot \delta B$$

Što je f?

Volumni (odnosno molski, uz približno jednaki sadržaj vode) udio sastavnice A, $0 \leq f \leq 1$.



POJAM Jednostavan linearni izraz vrijedi za konzervativno miješanje dvaju endmembera.

Primjer miješanja dviju voda različite visine

Sastavnica	$\delta^{18}O$	Udio
A (viša prihrana)	−17,8 ‰	?
B (niža prihrana)	−12,8 ‰	?
Miješana voda	−15,8 ‰	100 %

$$f = (-15{,}8 + 12{,}8) / (-17{,}8 + 12{,}8) = 0{,}60$$

PRIMJENA Prema izvornom primjeru doprinos više prihrane iznosi 60 %.

Primjer miješanja jezerske i riječne vode

Sastavnica	$\delta^{18}O$
Jezerska voda	−4 ‰
Riječna voda	−7 ‰
Nizvodni uzorak	−6 ‰

$$f_{jezero} = (-6 - (-7)) / (-4 - (-7)) = 1/3 \approx 33\ \%$$

PRIMJENA Model daje oko 33 % jezerske i 67 % riječne vode – za navedene izotopne vrijednosti.

Primjer IV – Vransko jezero na otoku Cresu

IZOTOPNI SIGNAL

Izotopni sastav površinskih i podzemnih voda može ukazati na različite doprinose i evaporaciju.

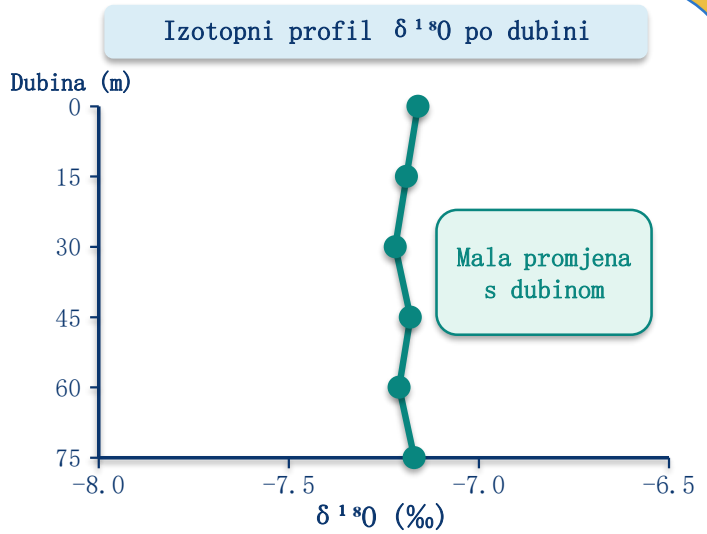
HIDROGEOLOŠKI KONTEKST

Otočni slatkovodni sustav, moguć utjecaj morske vode, sezonska dinamika i miješanje.

PRIMJENA Evaporacija i mogući morski utjecaj moraju se razlučiti integriranjem više pokazatelja.

Što znači ujednačen δ po dubini jezera?





Približno jednak δ po dubini upućuje na homogen izotopni sastav i moguće dobro miješanje.

PRIMJER Vransko jezero pokazuje približno ujednačene profile $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$.

Tricij ^{3}H – radioaktivni izotop vodika

OSNOVNE ZNAČAJKE

^{3}H: 1 proton, 2 neutrona
$T_{1/2} \approx 12{,}3$ godina
β^{-} raspad u ^{3}He

HIDROLOŠKA ULOGA

Prirodni i antropogeni doprinos
Kratkoročno do srednjoročno datiranje
Pokazatelj recentnog dotoka

TU označava **Tricijevu jedinicu (Tritium Unit)**.

To je standardna mjerna jedinica kojom se u hidrogeokemiji i nuklearnoj fizici izražava koncentracija tricija (^{3}H) u vodi.

Jedna tricijeva jedinica (1 TU) definirana je kao **prisutnost jednog atoma tricija na svakih 10^{18} (milijardu milijardi) atoma običnog vodika (^{1}H)**.

POJAM Tricij ulazi u molekulu vode i raspadom se mijenja njegova aktivnost.

Tricij ^{3}H – radioaktivni izotop vodika

OSNOVNE ZNAČAJKE

^{3}H: 1 proton, 2 neutrona
$T_{1/2} \approx 12{,}3$ godina
β^- raspad u ^{3}He

HIDROLOŠKA ULOGA

Prirodni i antropogeni doprinos
Kratkoročno do srednjoročno datiranje
Pokazatelj recentnog dotoka

Čemu služi TU u hidrogeokemiji?

Tricij je radioaktivni izotop vodika s vremenom poluraspada od oko **12,32 godine**. Budući da je sastavni dio same molekule vode ($^{3}H^{1}HO$), on je savršen alat za određivanje **starosti i brzine obnavljanja podzemnih voda**:

Detekcija "mlade" vode: Prije nuklearnih pokusa 1950-ih i 1960-ih, prirodna razina tricija u atmosferi (stvorena kozmičkim zračenjem) iznosila je tek između **2 i 6 TU**. Nakon testiranja hidrogenskih bombi, ta je vrijednost u oborinama skočila na nekoliko tisuća TU. Danas se razina u kišnici globalno vratila na stabilnijih **5 do 10 TU**.

POJAM Tricij ulazi u molekulu vode i raspadom se mijenja njegova aktivnost.

Tricij ^3H – radioaktivni izotop vodika

IX. TRICIJ

OSNOVNE ZNAČAJKE

^3H: 1 proton, 2 neutrona
$T_{1/2} \approx 12{,}3$ godina
β^- raspad u ^3He

HIDROLOŠKA ULOGA

Prirodni i antropogeni doprinos
Kratkoročno do srednjoročno datiranje
Pokazatelj recentnog dotoka

Procjena vremena poniranja (starosti):

- Ako uzorak podzemne vode ima **0 TU**, to znači da je ta voda poniknula u podzemlje prije više od 50–60 godina (prije ere nuklearnih pokusa) te da je vodonosnik izoliran i zaštićen od modernog zagađenja.
- Vrijednosti između **1 i 4 TU** obično ukazuju na mješavinu stare podzemne vode i novije kišnice.
- Vrijednosti iznad **5 TU** jasno pokazuju da se vodonosnik aktivno i brzo napaja modernom oborinskom vodom.

i POJAM Tricij ulazi u molekulu vode i raspadom se mijenja njegova aktivnost.

Kako tricij dospijeva u oborine?

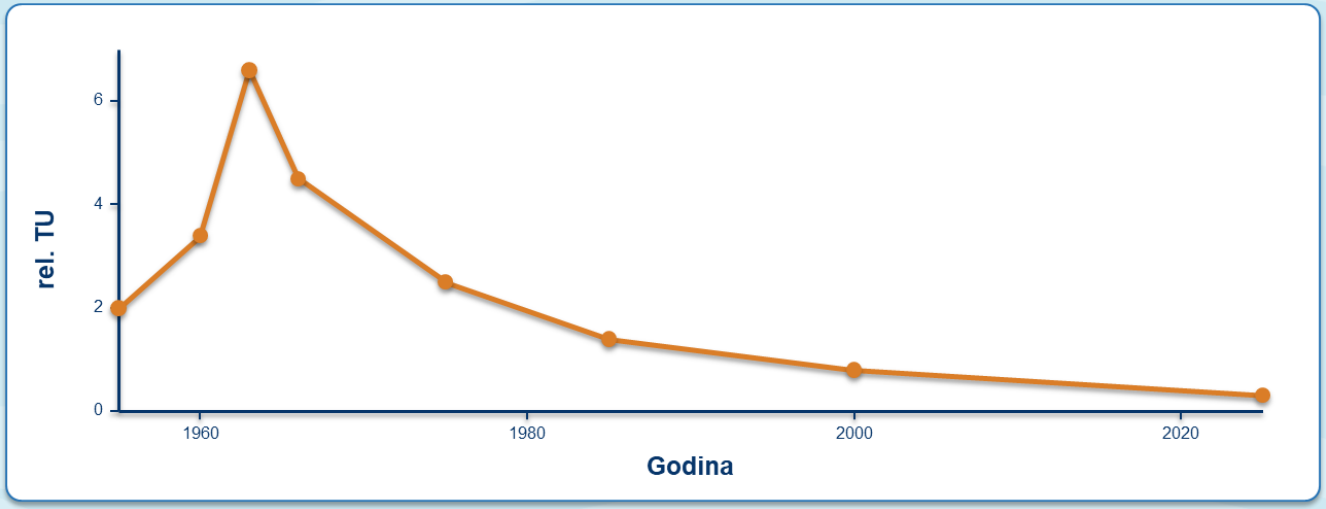
Kozmičko zračenje → **Atmosferski ^{3}H** → **HTO / oborine** → **Infiltracija**

Atmosferski nuklearni pokusi snažno su povećali razine tricija sredinom 20. stoljeća; danas je ulazni signal znatno niži.

ZAPAMTI Prirodna proizvodnja tricija i antropogeni izvori oblikuju ulazni signal u vodonosnik.

Povijesni porast tricija nakon nuklearnih pokusa

IX. TRICIJ



PRIMJENA Povijesni „bomb peak” predstavlja vremenski marker; graf je shematski i nije izmjerena serija.

Što mijenja aktivnost tricija u oborinama?

SEZONA

često viši ^{3}H kasno u proljeće

GEOGRAFSKA ŠIRINA

regionalne razlike

KONTINENTALNOST

različit morski i kopneni signal

ULAZNI IZVORI

prirodni i antropogeni ^{3}H

! **ZAPAMTI** Uspoređujemo lokalnu oborinsku seriju, a ne samo jednu referentnu vrijednost.

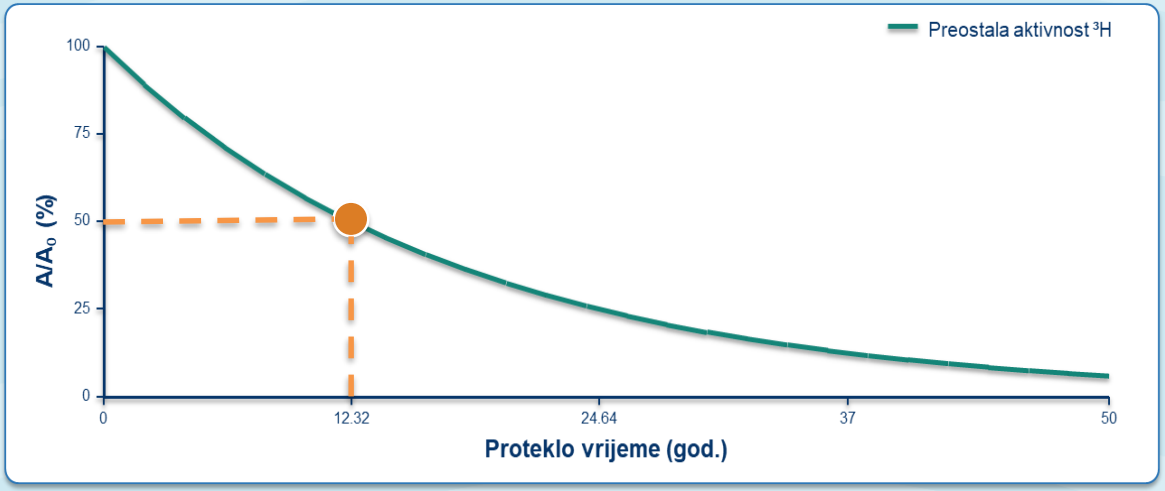
U kojim se jedinicama mjeri tricij?

Veličina	Značenje / veza
TU (T.U.; tricijeva jedinica; tritium unit)	1 atom ^{3}H na 10^{18} atoma H
Bq/L	aktivnost: raspad s^{-1} L^{-1}
Približna pretvorba	1 Bq/L ≈ 8,47 TU
Prirodni ulaz	ovisi o mjestu i razdoblju

POJAM Jedan becquerel znači jedan radioaktivni raspad u sekundi.

Radioaktivni raspad tricija kroz vrijeme

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA



! **ZAPAMTI** Poluraspad vrijedi za idealiziranu zatvorenu porciju vode bez miješanja i novih dotoka.

Možemo li jednostavno izračunati starost vode?

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \ln 2 / T_{½} \approx 0{,}0563\ \text{god}^{-1}$$

λ – konstanta poluraspada; $T_{½}$ - vrijeme poluraspada (12,32 god.)
Za datiranje su ključni početni ulazni signal i model toka.

! **ZAPAMTI** Jednadžba daje dob jedne zatvorene porcije vode, a ne nužno srednju dob miješanog uzorka.

Zašto tricij sam ne daje uvijek jednu starost?

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA

ULAZNI SIGNAL

Aktivnost ^{3}H u oborinama mijenjala se kroz desetljeća i godišnja doba.

MJEŠAVINA DOBI

Uzorkovana voda često je mješavina brzog i sporog toka kroz vodonosnik.

ZAPAMTI Nizak ^{3}H nije automatski dokaz vrlo stare vode; sastav može biti miješan.

Srednje vrijeme zadržavanja u kršu

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA

^{3}H u oborinama

ulazni signal kroz vrijeme

→

Raspodjela vremena toka

brzi i sporiji putovi vode

→

^{3}H na izvoru

mješavina voda različite dobi

ZAŠTO NIJE JEDNA „STAROST" VODE?

BRZI TOK → kraće zadržavanje

SPORIJI TOK → dulje zadržavanje

Zašto se kombiniraju ^{3}H i ^{3}He?

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA

Voda s ^{3}H → **Raspad $^{3}H \rightarrow {}^{3}He$** → **Mjerenje ^{3}H i tritiogenog ^{3}He**

Potrebno je razlikovati ^{3}He nastao raspadom od ostalih izvora helija; zatvorenost sustava za plinove nije zajamčena.

PRIMJENA Metoda $^{3}H/^{3}He$ može pomoći u procjeni vremena od infiltracije, uz korekcije plinskih komponenti.

Zašto se kombiniraju ^3H i ^3He? Starost vode u vodonosniku.

X. VRIJEME ZADRŽAVANJA

Voda s ^3H → **Raspad $^3H \rightarrow {}^3He$** → **Mjerenje ^3H i tritiogenog ^3He**

JEDNADŽBA STAROSTI ($^3H/^3He$)

$$t = (T_{½} / \ln 2) \cdot \ln (1 + {}^3He_{(trit)} / {}^3H)$$

$T_{½}$ = 12,32 godine

^3H = izmjereni tricij (TU)

$^3He_{(trit)}$ = tritiogeni ^3He (TU-ekv.)

PRIMJENA Metoda $^3H/^3He$ može pomoći u procjeni vremena od infiltracije, uz korekcije plinskih komponenti.

Kako povezati izotope u jednoj interpretaciji?

$\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$

Odakle dolazi voda?

Je li prije infiltracije evaporirala?

^{3}H i $^{3}H/^{3}He$

Postoji li recentna komponenta?

Kakva je raspodjela vremena?

Geokemija + hidrologija

Koji je put toka i reakcija?

Jesu li sustavi povezani?

PRIMJENA Jedan pokazatelj rijetko razrješava više procesa sličnih izotopnih potpisa.

Ponovimo: čemu služi koji izotop?

PONAVLJANJE

Pokazatelj	Glavno pitanje	Potrebno za tumačenje
$\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$	podrijetlo / evaporacija	LMWL i lokalne oborine
d-excess	uvjeti izvora vlage	klimatski kontekst
^{3}H	recentna voda / miješanje	ulazni signal i model
$^{3}H/^{3}He$	vrijeme od infiltracije	geokemija (plinova)

! **ZAPAMTI** Izotopni podatci najjači su kada postoji dobar model vodonosnika.

VJEŽBE

Četiri zadatka iz izotopne hidrogeologije

Meteorski pravac → Miješanje voda → Tricij / poluraspad → Visinski gradijent

ZADATAK Račune ćemo provjeriti na sljedećem slajdu, a interpretacije objasniti hidrološki.

Vježba 1 – položaj uzorka na meteorskom pravcu

VJEŽBE

$$\delta^{18}O = -8\ ‰$$

$$\text{Izmjereno } \delta^2H = -54\ ‰$$

Pripada li uzorak približno globalnom meteorskom pravcu?

ZADATAK Izračunajte očekivani δ^2H prema GMWL i usporedite s mjerenjem.

Rješenje vježbe 1 – GMWL

$$\delta^2H = 8 \cdot (-8) + 10 = -54\ ‰$$

Izračunata i izmjerena vrijednost jednaka je u ovom zadatku.

! **ZAPAMTI** Točka leži na idealnom GMWL; jedan uzorak ne dokazuje podrijetlo niti isključuje miješanje.

Vježba 2 – udio dva krajnja člana

VJEŽBE

Voda A	Voda B	Smjesa M
−17,8 ‰	−12,8 ‰	−15,8 ‰

$$\delta M = f \cdot \delta A + (1 - f) \cdot \delta B$$

ZADATAK Odredite udio vode A u smjesi ako nema evaporacije ni drugih procesa.

Rješenje vježbe 2 – miješanje

$$f = (\delta M - \delta B) / (\delta A - \delta B)$$

$$f = (-15{,}8 + 12{,}8) / (-17{,}8 + 12{,}8) = 0{,}60$$

A = 60 % · **B = 40 %**

! **ZAPAMTI** Omjeri vrijede za pretpostavljene dvije sastavnice bez naknadne frakcionacije.

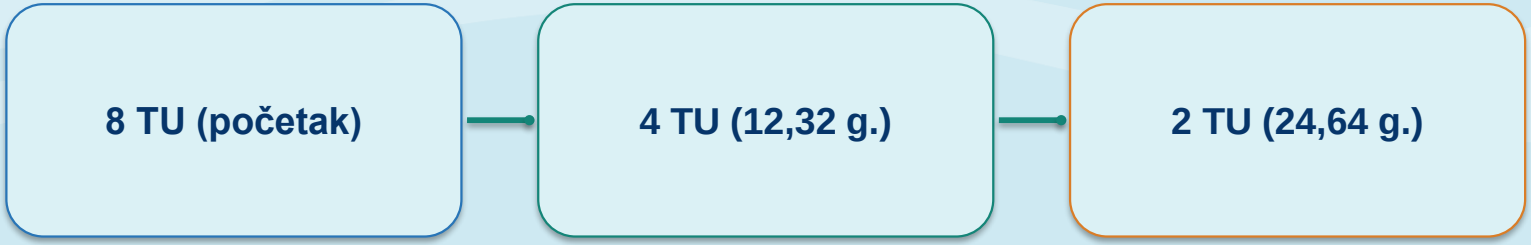
Vježba 3 – jednostavan raspad tricija

$A_0 = 8$ TU $T_{½} = 12{,}32$ god.

Kolika je aktivnost nakon 24,64 godine?

ZADATAK Primijenite zakon raspada za zatvorenu porciju vode s poznatom početnom aktivnosti.

Rješenje vježbe 3 – dva poluraspada



Nakon dva vremena poluraspada preostaje četvrtina početne aktivnosti.

! **ZAPAMTI** Stvaran uzorak vodonosnika može biti mješavina voda različite dobi.

Vježba 4 – izračun visinskog gradijenta

VJEŽBE

Točka	Visina	$\delta^{18}O$
Abrami	50 m	−6,10 ‰
Odolina	600 m	−7,75 ‰

ZADATAK Odredite apsolutni iznos gradijenta $\delta^{18}O$ na 100 m nadmorske visine.

Rješenje vježbe 4 – gradijent

$$\Delta\delta^{18}O = -1{,}65\ ‰;\quad \Delta h = 550\ m$$

$$\text{gradijent} = (-1{,}65 / 550) \cdot 100$$

$$\approx -0{,}30\ ‰ \text{ na } 100\ m$$

ZAPAMTI Visinski gradijent ima lokalno značenje; za drugi sliv treba novu kalibraciju.

Što treba zapamtiti?

ZAVRŠNO PONAVLJANJE

- $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$: izotopni potpis, prihranjivanje i frakcionacija.
- GMWL / LMWL: ključ za tumačenje meteorske vode i evaporacije.
- Miješanje: udjele možemo približno izračunati ravnotežom mase.
- ^{3}H: pokazatelj recentne komponente, uz vremenski promjenjiv ulaz.
- Nijedan izotop ne zamjenjuje hidrogeološki model.

! **ZAPAMTI** Izotopnu interpretaciju uvijek smjestiti u kontekst oborina, geologije i dinamike vodonosnika.