

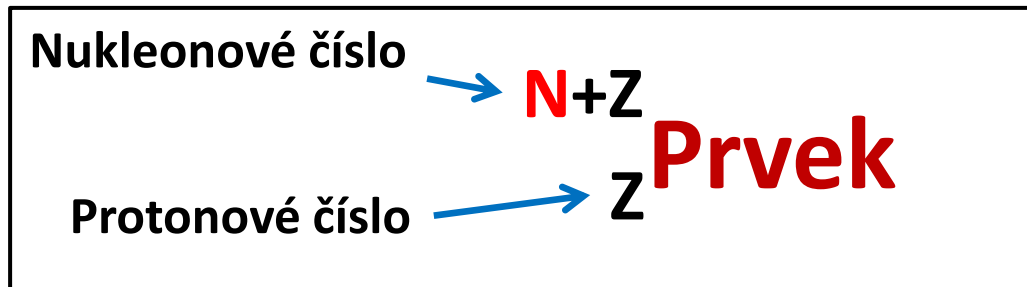
# Metody hydrogeologického výzkumu

VI.

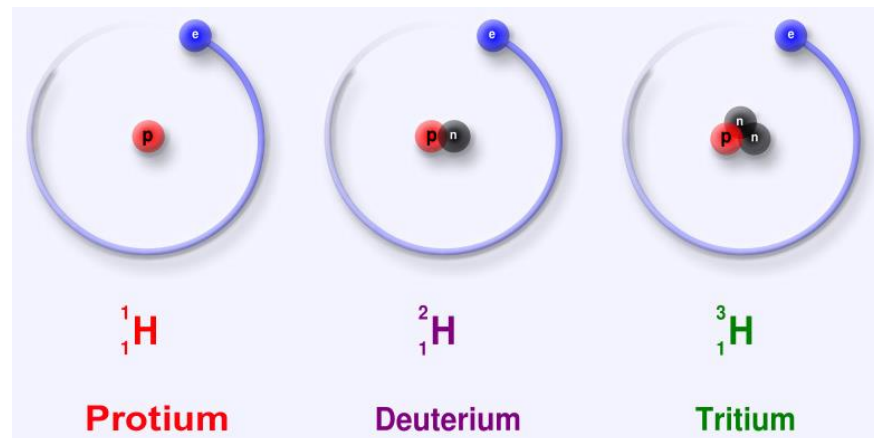
**Stabilní izotopy v hydrogeologii**

# Co je to izotop?

- Iso (stejno) + topos (místo) stejná pozice v periodické tabulce prvků
- Atom stejného prvku (stejný počet protonů) s odlišným počtem neutronů → rozdílné nukleonové číslo



např. izotopy vodíku



# Vlastnosti izotopů

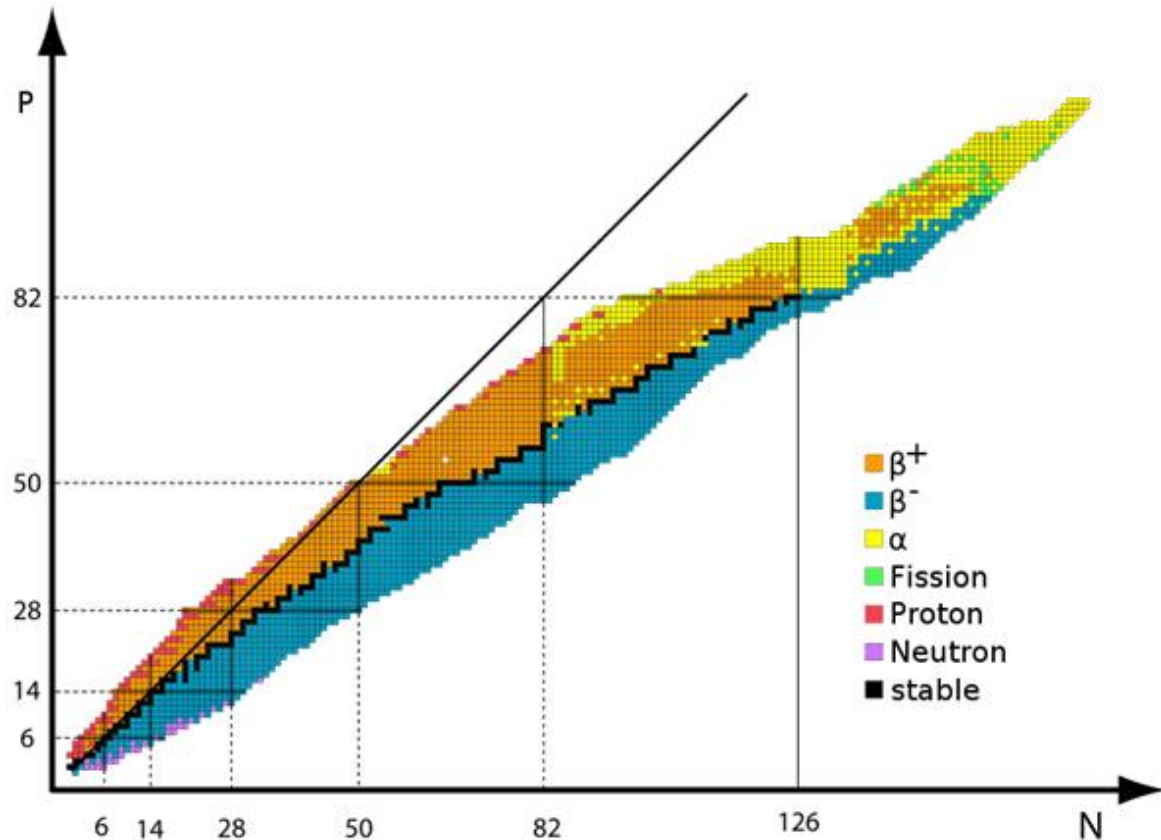
Existuje více než 2000 izotopů

## Stabilní izotopy

- pouze 264 je stabilních
- např.  $^{18}\text{O}$ ;  $^2\text{H}$ ;  $^{13}\text{C}$

## Nestabilní izotopy

- radioaktivní rozpad
- např.  $^3\text{H}$  (tritium);  $^{14}\text{C}$



# Využití izotopů

Tam kde tradiční nástroje HG výzkumu nepostačují nebo nedávají jednoznačnou odpověď

- **Stabilní izotopy** - využití jako stopovače:  
původ vody, klimatické a topografické poměry v době infiltrace vod (relativní datování vod), původ rozpuštěných látek
- **Nestabilní izotopy**  
datování doby vzniku podzemních vod

## Aplikace výsledků

Zpřesnění konceptu studovaného hydrogeologického systému:

- rozlišení odlišných typů podzemních vod – rel. stáří, geneze, ..
- detekce prostředí a intenzity infiltrace, posouzení hloubky oběhu podzemních vod
- propojení s jinými zvodněmi, atd.

# Využití izotopů

Izotopy běžně využívané v hydrogeologii

Isotope	Phase	Half Life	Use
Deuterium ( $^2\text{H}$ , D)	$\text{H}_2\text{O}$ (HDO)	stable	Marker, formation
Tritium ( $^3\text{H}$ , T)	$\text{H}_2\text{O}$ (HTO)	12.32 yr	Dating (input)
Helium-3 ( $^3\text{He}$ )	dissolved He	stable	Dating ( $^3\text{H}/^3\text{He}$ )
Helium-4 ( $^4\text{He}$ )	dissolved He	stable	Dating (accumulation)
Carbon-13 ( $^{13}\text{C}$ )	DIC, DOC,...	stable	Marker
Carbon-14 ( $^{14}\text{C}$ )	DIC, DOC,...	5730 yr	Dating (decay)
Nitrogen-15 ( $^{15}\text{N}$ )	diss. $\text{N}_2$ , $\text{NO}_3$ ,...	stable	Marker
Oxygen-18 ( $^{18}\text{O}$ )	$\text{H}_2\text{O}$ ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$ )	stable	Marker, formation
Sulfur-34 ( $^{34}\text{S}$ )	$\text{SO}_4$ ,...	stable	Marker
Chlorine-36 ( $^{36}\text{Cl}$ )	$\text{Cl}^-$	308'000 yr	Dating (decay)
Chlorine-37 ( $^{37}\text{Cl}$ )	CHCs,...	stable	Marker
Argon-39 ( $^{39}\text{Ar}$ )	dissolved Ar	269 yr	Dating (decay)
Argon-40 ( $^{40}\text{Ar}$ )	dissolved Ar	stable	Dating (accumulation)
Krypton-81 ( $^{81}\text{Kr}$ )	dissolved Kr	210'000 yr	Dating (decay)
Krypton-85 ( $^{85}\text{Kr}$ )	dissolved Kr	10.7 yr	Dating (input)
Radon-222 ( $^{222}\text{Rn}$ )	dissolved Rn	3.8 d	Dating (accumulation)
U-series ( $^{238}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ ,...)	dissolved $\text{UO}_2$	variable	Dating (disequilibrium)

# Zastoupení a původ izotopů

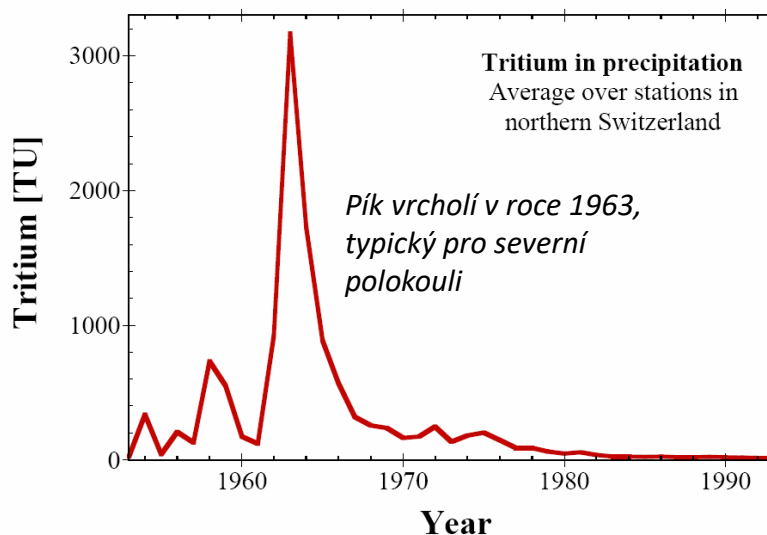
## Zastoupení stabilních izotopů

Element	Abundance of stable isotopes (%)					
Hydrogen	$^1\text{H}$	99.985	$^2\text{H}$	0.015		
Helium	$^4\text{He}$	99.9999	$^3\text{He}$	0.0001		
Carbon	$^{12}\text{C}$	98.89	$^{13}\text{C}$	1.11		
Nitrogen	$^{14}\text{N}$	99.63	$^{15}\text{N}$	0.37		
Oxygen	$^{16}\text{O}$	99.758	$^{18}\text{O}$	0.204	$^{17}\text{O}$	0.038
Neon	$^{20}\text{Ne}$	90.51	$^{22}\text{Ne}$	9.22	$^{21}\text{Ne}$	0.27

## Zastoupení nestabilních izotopů

Isotope	Abundance (%)	Half Life (yr)	Decay mode
$^{40}\text{K}$	0.0117	$1.28 \times 10^9$	$\beta^-$ , EC
$^{50}\text{V}$	0.250	$1.4 \times 10^{17}$	EC, $\beta^-$
$^{87}\text{Rb}$	27.83	$4.75 \times 10^{10}$	$\beta^-$
$^{144}\text{Nd}$	23.8	$2.29 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{148}\text{Sm}$	11.3	$8 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{176}\text{Lu}$	2.59	$4.0 \times 10^{10}$	$\beta^-$
$^{174}\text{Hf}$	0.162	$2.0 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{232}\text{Th}$	100	$1.45 \times 10^{10}$	$\alpha$ , SF
$^{235}\text{U}$	0.72	$7.038 \times 10^8$	$\alpha$ , SF, Ne
$^{238}\text{U}$	99.27	$4.468 \times 10^9$	$\alpha$ , SF

## Vliv člověka na zastoupení nestabilních izotopů



Isotope	Half-life (yr)	Origin
$^3\text{H}$	12.32	bomb tests
$^{14}\text{C}$	5730	bomb tests
$^{36}\text{Cl}$	308'000	bomb tests
$^{85}\text{Kr}$	10.7	fuel reprocessing

Zkreslení dat vlivem jaderných testů a spalování fosilních paliv

# Izotopické poměry

- rozdíly v zastoupení jednotlivých izotopů jsou velmi malé
- absolutní hodnotu koncentrace je obtížné analyzovat
- pro většinu studií je tak využíváno **poměrů v jejich zastoupení**
- mnohem přesnější je porovnání poměrů izotopů ve vzorku s poměrem izotopů ve srovnávacím vzorku - **standardu**

# Izotopové standardy

- ***V-SMOW*** – ***Vienna Standard Mean Ocean Water*** – oceánská voda uchovávaná v Rakousku – O and H standard
- ***PDB*** – ***Pee Dee Belemnite*** – fosilie belemnita z lokality Pee Dee formace v Kanadě – C a O
- ***CDT*** – ***Canyon Diablo Troilite*** – úlomek meteoritu v kráteru v Arizoně, obsahuje FeS minerál Troilite – S
- ***AIR*** – atmosférický vzduch - N



# Izotopový standard pro vodu V-SMOW

- V-SMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water
- jedná se o čistou neslanou vodu, která je směsí vybraných vod oceánů s průměrným zastoupením  $^{18}\text{O}$  a  $^2\text{H}$  vyskytujícím se v oceánech.



# Vzorkování vod na izotopovou analýzu

- důkladné naplánování míst odběru, četnosti vzorkování a volby analyzovaných izotopů
- vzorkování podzemních vod:
  - prameny – co nejbližší místu jejich vývěru
  - vrty – ne z hladiny, dynamické vzorkování (2-3 objemy vrtu)
- vzorkování podzemních vod – vodní toky v době hydrologického minima z hloubky 10-20 cm od hladiny v proudící vodě (eliminace vlivu výparu)
- vzorkování atmosférických srážek – srážky kumulovat pod tenkou vrstvou oleje k zamezení výparu
- vzorkovnice musí být suchá
- ve vzorku nesmí být vzduchová bublina, vzorkovnice musí dobře těsnit (závit lze zakapat voskem)
- vzorky se musí chladit, v plastové vzorkovnici je možné zmrazit (omezení výparu ale riziko porušení těsnosti vzorkovnice), požadované min. množství vody je 50 ml
- mineralizace vod – informovat laboratoř – volba metody stanovení
- filtrace vzorku

EPA vials (vialky)



# Měření stabilních izotopů

Vyjádření izotopového poměru jako počet částic na tisíc (per mil) v promile ‰:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{R_x}{R_s} - 1 \right] \times 1000 = \text{per mil (‰)}$$

kde:

$R_x$  = těžší izotop ( $^{18}\text{O}$ ) / lehčí izotop ( $^{16}\text{O}$ ) ve vzorku

$R_s$  = těžší izotop ( $^{18}\text{O}$ ) / lehčí izotop ( $^{16}\text{O}$ ) ve standardu

# Měření stabilních izotopů

Vyjádření izotopového poměru jako počet částic na tisíc (per mil) v promile ‰:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{R_x}{R_s} - 1 \right] \times 1000 = \text{per mil (‰)}$$

*(vzorek) (standard)*

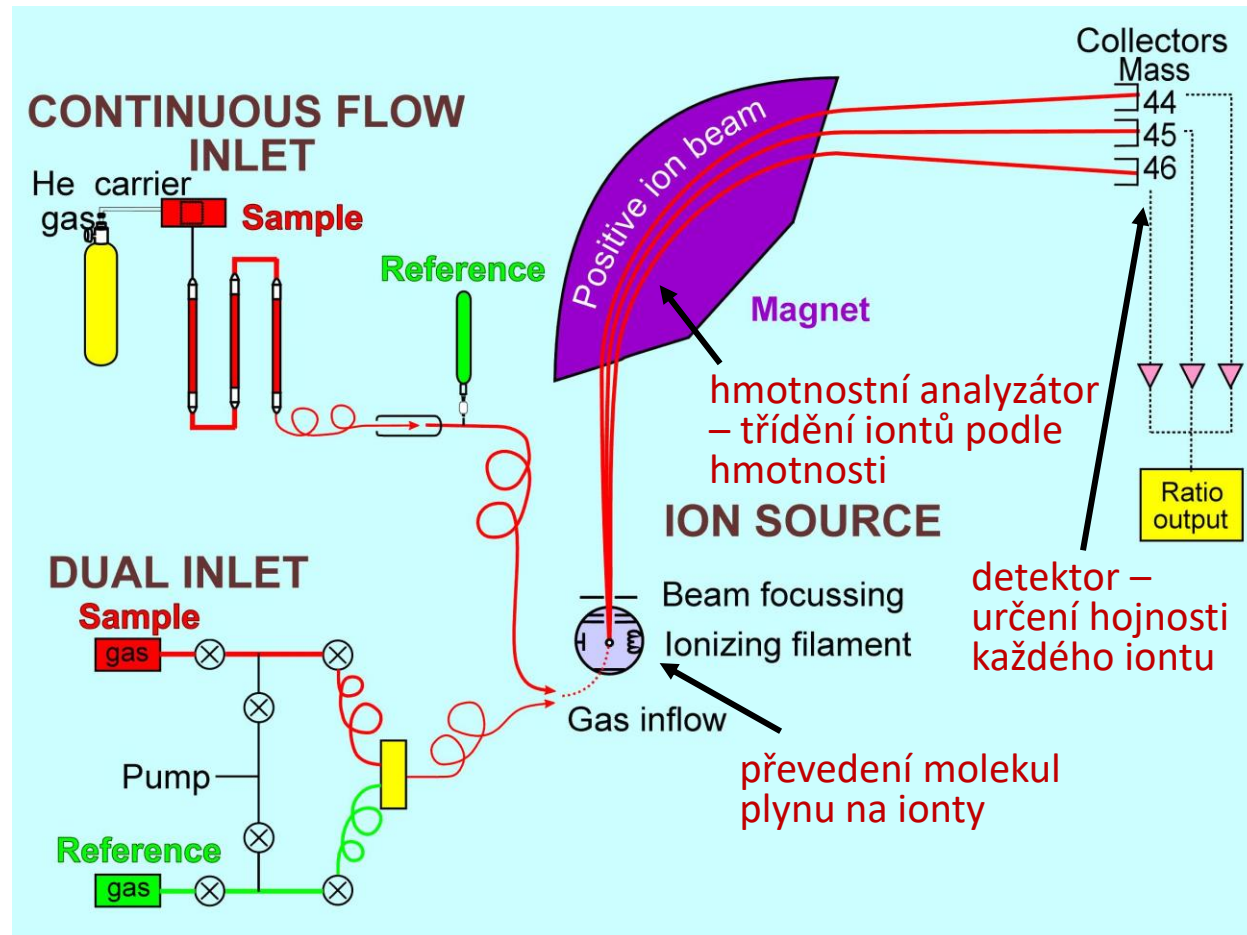
Např. delta  $^{18}\text{O}$  = -10 ‰ znamená, že v odebraném vzorku je o 10 částic izotopu  $^{18}\text{O}$  méně než ve srovnávacím vzorku (SMOW).

→ V analyzovaném vzorku je tedy deficit těžších izotopů oproti standardu, resp. vzorek je izotopicky lehčí...

# Měření stabilních izotopů

## Hmotnostní spektroskop – široké spektrum analyzovaných izotopů

- Vzorek je umístěn do přístroje a podstoupí odpařování.
- Složky vzorku jsou ionizovány například dopadem elektronového paprsku -- vytvoření nabitých částic – iontů.
- Ionty jsou odděleny podle  $m/Q$  poměru v analyzátoru elektromagnetického pole.
- Ionty jsou detekovány, obvykle kvantitativní metodou.
- Iont je zpracován hmotnostním spektrometrem.



# Měření stabilních izotopů

## Laserový spektroskop (Martin Šanda, ČVUT)

### Měření

- z vialky v autosampleru je napíchnut 1.2 mL stříkačkou vzorek a transportován do výparníku za septem pouze cca 700 nL ( $4 \times 10^{16}$  molekul vody)
- vypařený vzorek je po cca 1 min transportován podtlakovým čerpadlem do komory laseru
- v laseru probíhá měření (vpuštění světla las. diodou a měření útlumu – tzv. ringdown (vyznění)) – cca 6 ms – 20x
- komora je po každém měření vyprázdněna suchým vzduchem (1 měření a čištění ~ 2 minuty)



### Ekonomika provozu

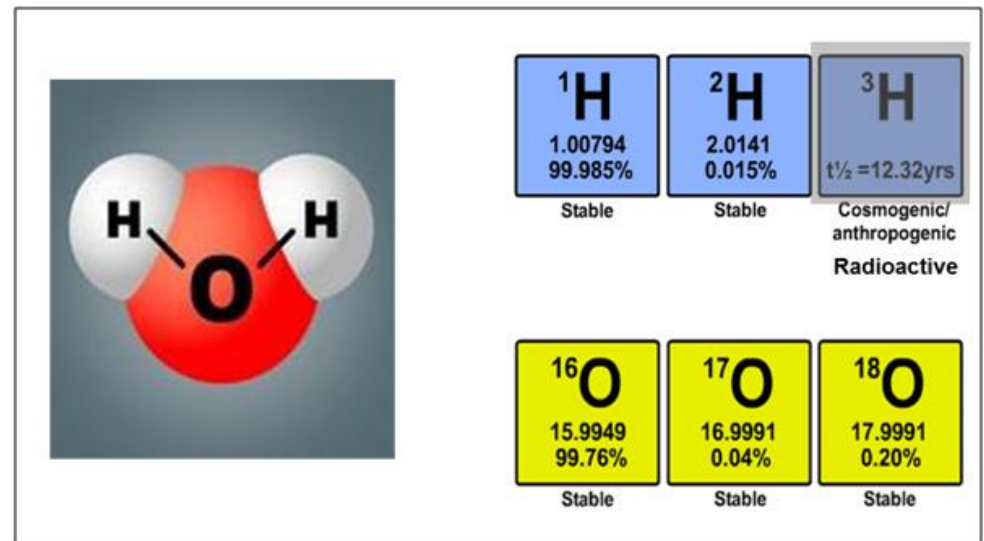
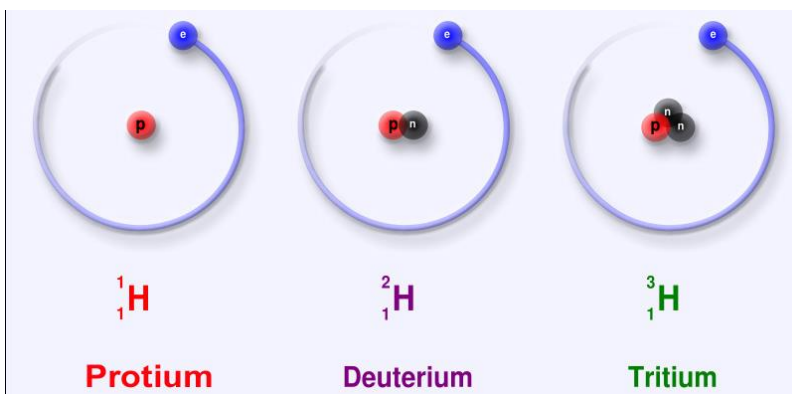
- každý vzorek je napíchnut 9x pro statistické zpracování měření (jedno měření 108sec) = 50 vzorků + standardy = cca 23.5 hodin denně získáme analýzy cca 50 vzorků bez průběžné obsluhy
- nákladová cena výsledku  $^{18}\text{O} + ^2\text{H}$  v jednom vzorku je cca 500 Kč
- (10x levnější než hmotnostní spektrometr) - 10x menší pořizovací cena (cca 2 mil Kč) a levnější provoz a obsluha – více vzorků za den

# Frakcionace izotopů

- proces při kterém dochází k selekci izotopů.
- pokud proces upřednostňuje těžší izotopy, dochází k reakci vedoucí k izotopicky těžšímu produktu, zbytek je naopak izotopicky lehčí.

## Izotopy vody:

- izotopy vody jsou vždy srovnávány se standardem V-SMOW
- využívány jsou nejčastěji radioaktivní izotop tritium  $^3\text{H}$  a stabilní izotopy deuterium  $^2\text{H}$ , protium  $^1\text{H}$  a kyslík  $^{18}\text{O}$  a  $^{16}\text{O}$





# Stabilní izotopy vody

**Izotopy kyslíku:** měření dvou nejhojnějších izotopů

- $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2.0052 \cdot 10^{-3}$  (V-SMOW)
- v hydrologii v rozmezí 1:500–1:507

**$^2\text{H}$  (Deuterium)**

- $^2\text{H}/^1\text{H} = 1.5576 \cdot 10^{-4}$  (V-SMOW)
- v hydrologii v rozmezí 1:6420–1:7400



# Proč dochází k frakcionaci izotopů vody?

- kinetická energie je pro těžké a lehké izotopy:

$$\frac{v_L}{v_H} = \sqrt{\frac{m_H}{m_L}}$$

- v případě např.  $^{18}\text{O}$  a  $^{16}\text{O}$  je:  $\frac{v_L}{v_H} = \sqrt{\frac{18}{16}} = 1.06$

- bez ohledu na teplotu je rychlost molekul lehčího izotopu  $^{16}\text{O}$  1,06krát vyšší než rychlost těžšího  $^{18}\text{O}$
- lehčí molekuly tak difundují a vypařují se rychleji než těžší
- to je příčinou typického deficitu těžších izotopů vody ve vzorcích – *voda se během vodního cyklu zlehčuje*

# Frakcionace izotopů ve vodním prostředí

- voda/pára – lehčí izotop  $^{16}\text{O}$  se vypařuje snadněji
- voda/hornina – frakcionace probíhá také mezi vodou a horninou, přednostní včlenění  $^{18}\text{O}$  do horniny, protože  $^{16}\text{O}$  má nižší vibrační energii (vibrační energie roste s atomovou hmotností) – obtížněji se včleňuje do horniny
- poměr izotopů v  $\text{CaCO}_3$  odráží poměr v mořské vodě, srovnávací standard je *PDB*
- **stopovač vodního cyklu:** určení zdroje vody, oblasti doplňování podzemních vod a klimatických poměrů panujících v době infiltrace

# Frakcionace jako odraz změn klimatu

## Vliv výparu

- preferenční výpar izotopicky lehčí vody, kapalná fáze se stává izotopicky těžší
- **zakomponování do deště a sněhu**
- během glaciálu odebráno více  $^{16}\text{O}$  z oceánu a uchováno na souši ve formě ledu
- poměr  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  vody „zbývající“ v oceánu se stává těžším (více  $^{18}\text{O}$ )
- stejně tak schránky mořských živočichů se obohacují o  $^{18}\text{O}$

# Frakcionace jako odraz změn klimatu

## Vliv teploty

- rozdíly ve vibračních energiích jsou zřetelnější při nižších teplotách
- vyšší ochuzení o těžší izotopy v chladném období
- změna klimatu či jen sezónní efekt (seasonal effect)
- schránky živočichů do sebe zakomponují více  $^{18}\text{O}$  když je chladněji

# Frakcionace jako odraz polohy hydro(geo)logického systému na Zemi

**Vliv na výsledný poměr izotopů  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  má:**

- teplota vzduchu v místě infiltrace srážek
  - nadmořská výška infiltrace srážek (altitude effect)
  - zeměpisná šířka (latitude effect)
- vzdálenost místa infiltrace od moře (continental effect)
- místo infiltrace vod se většinou nemění, může se však měnit zdroj vodních par (např. pohoří centrální Asie – část vod z kontinentální vlhkosti a část z změna proudění vzduchu – Sibiř/Indický oceán)

# Frakcionace jako odraz polohy hydro(geo)logického systému na Zemi

Vliv na výsledný poměr izotopů  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  má:

- různé zdroje vodních par

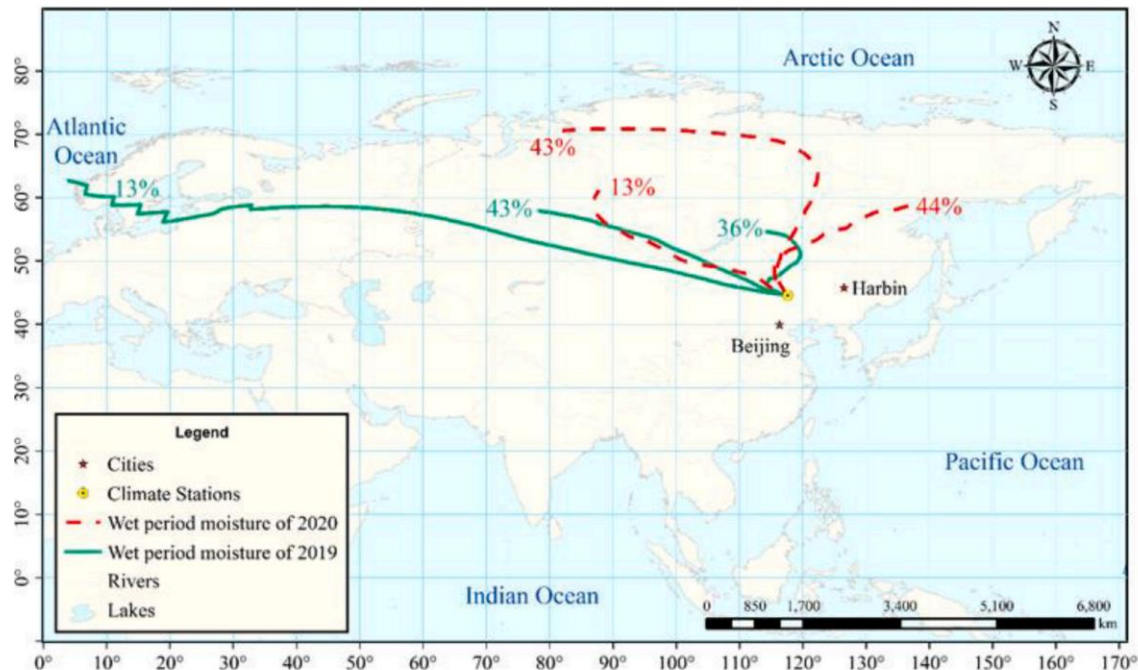
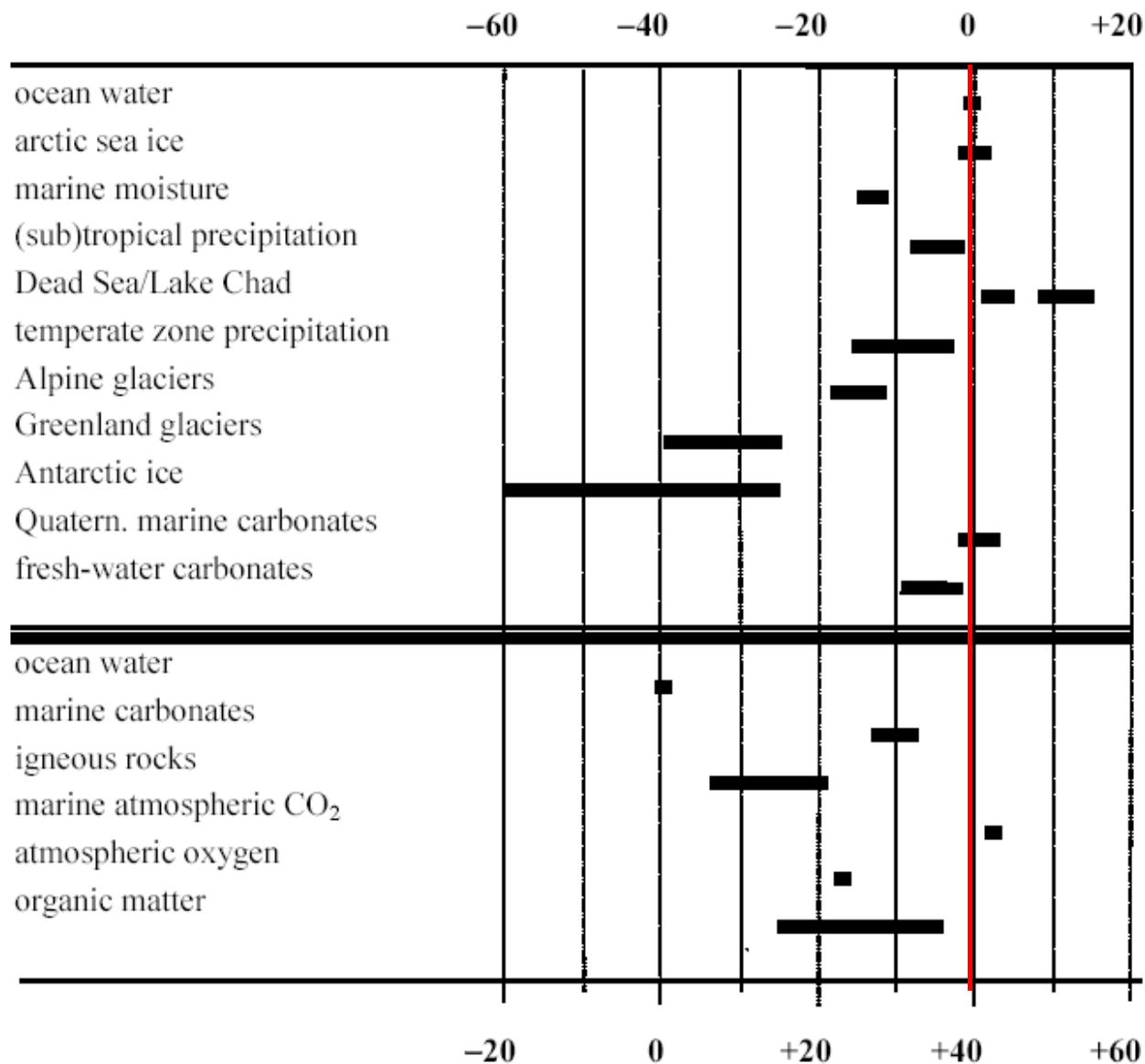


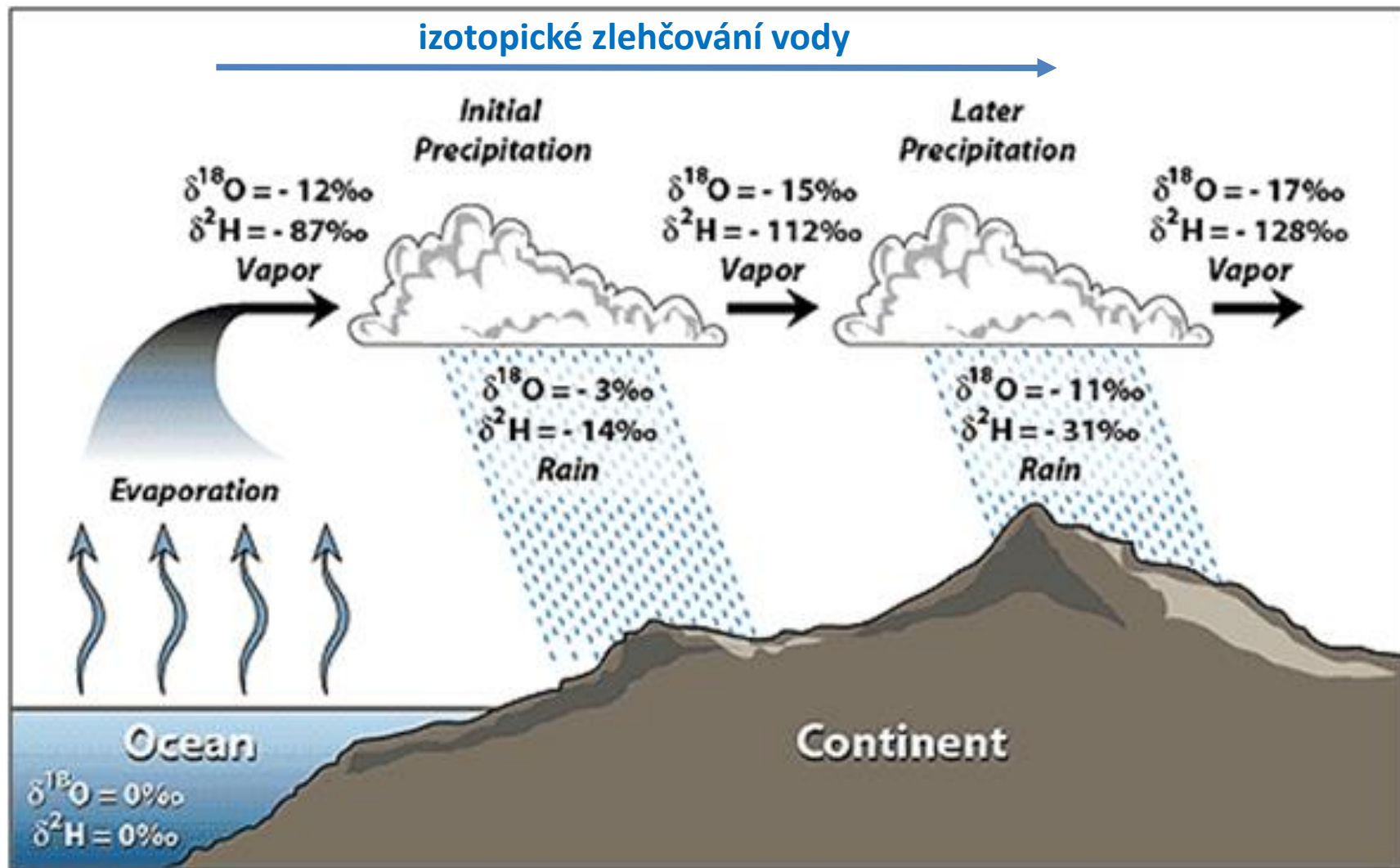
Fig. 9. Backward trajectories of air mass into the Balagaer River Basin during the wet seasons (June to September) of 2019 to 2020.

(Fang et al. 2022)

# Frakcionace izotopů ve vodním prostředí



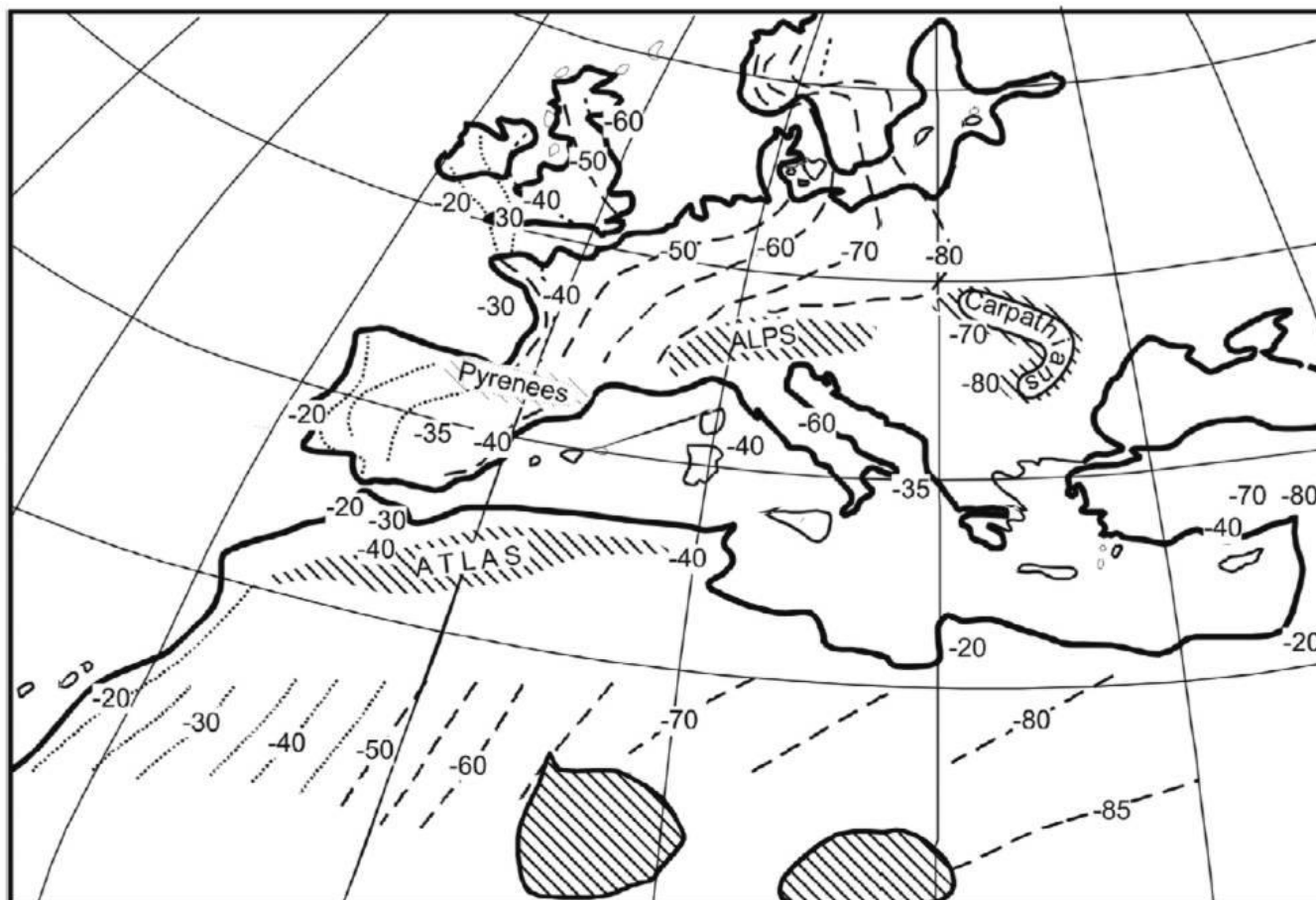
# Frakcionace izotopů ve vodním prostředí





# Kontinentální efekt

- během postupu oblačnosti nad kontinentem dochází ke kondenzaci par a vypadávání srážek (přednostní vstup těžších molekul  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  při kondenzaci)
- výsledná prostorová distribuce - morfologií terénu + vzdálenost od zdroje vodních par
- ČR – velký rozdíl mezi srážkami atlantické cirkulace a východním kontinentálním směrem



# Efekt množství srážek

- při intenzivních srážkách možnost ochuzení vody o těžší izotop O a H
- **DOPRACOVAT**

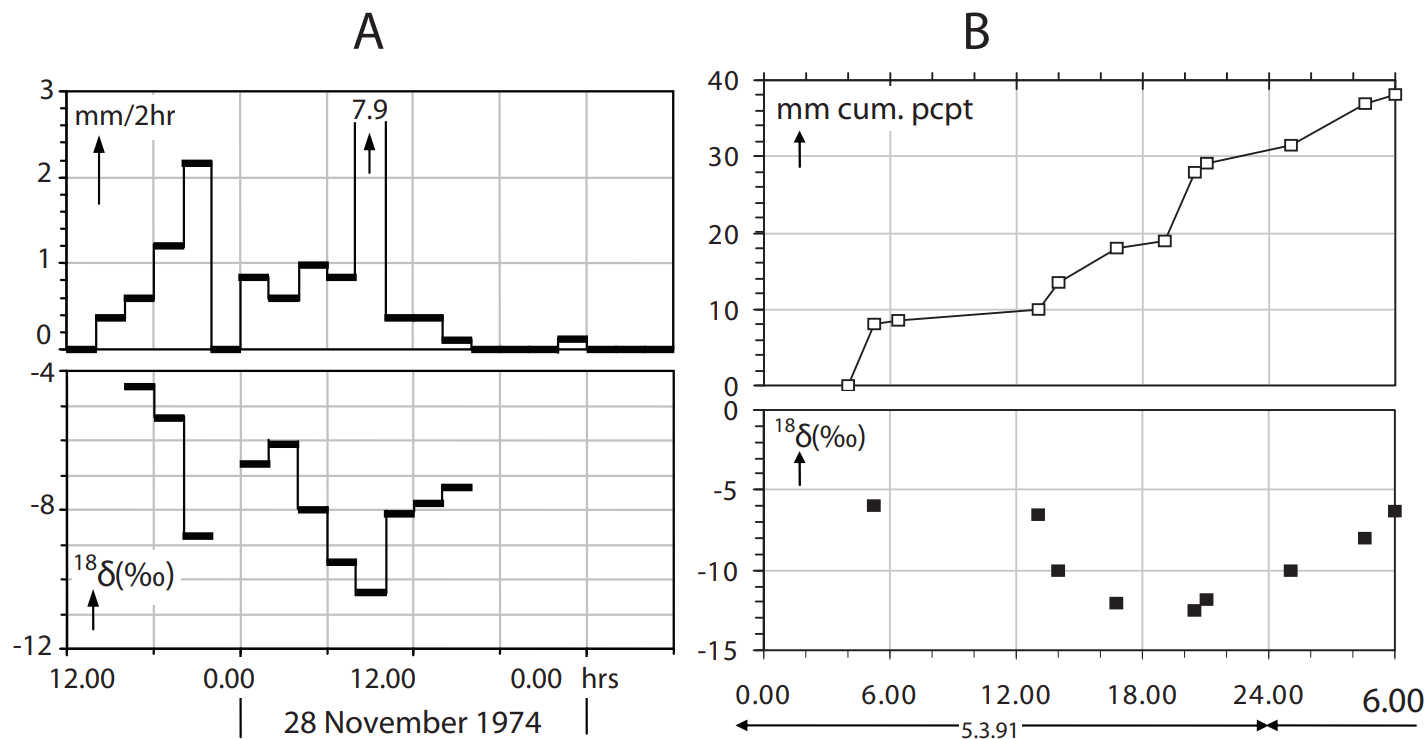


Fig. 4.8. Time sequence of the isotopic composition of precipitation during showers; examples are shown for two cases of convective storms: **A)** rain intensity in mm/2 hours [100]; **B)** cumulative rain over variable periods.

# Izotopové složení vody vs. teplota

Deficit  $^{18}\text{O}$  se snižuje s rostoucí teplotou vzduchu v mracích – určení teploty vzduchu v době infiltrace vod.

## Teplotní koeficient:

pro  $^{18}\text{O}$  je 0,58 ‰ na jeden  $^{\circ}\text{C}$  nebo méně (příbřežní oblasti 0,2)  
teplotní koeficient pro  $^2\text{H}$  je 5,6 ‰ na jeden  $^{\circ}\text{C}$  nebo méně

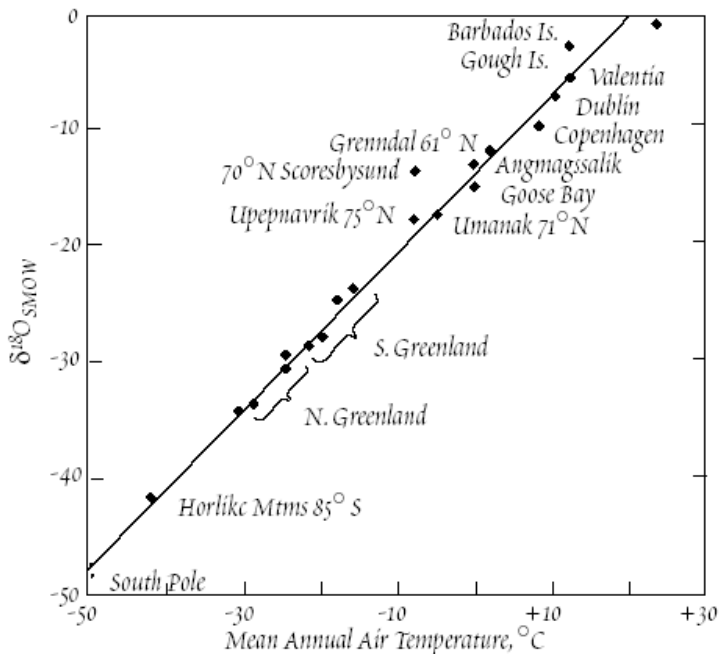


Figure 9.8. Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation as a function of mean annual temperature.

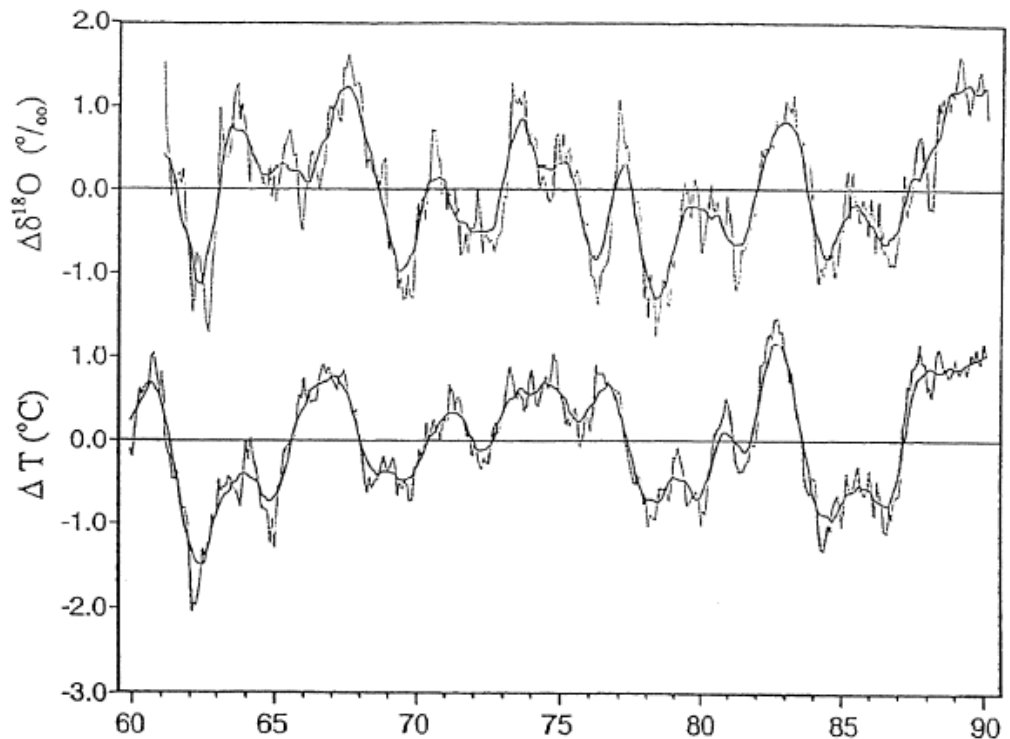
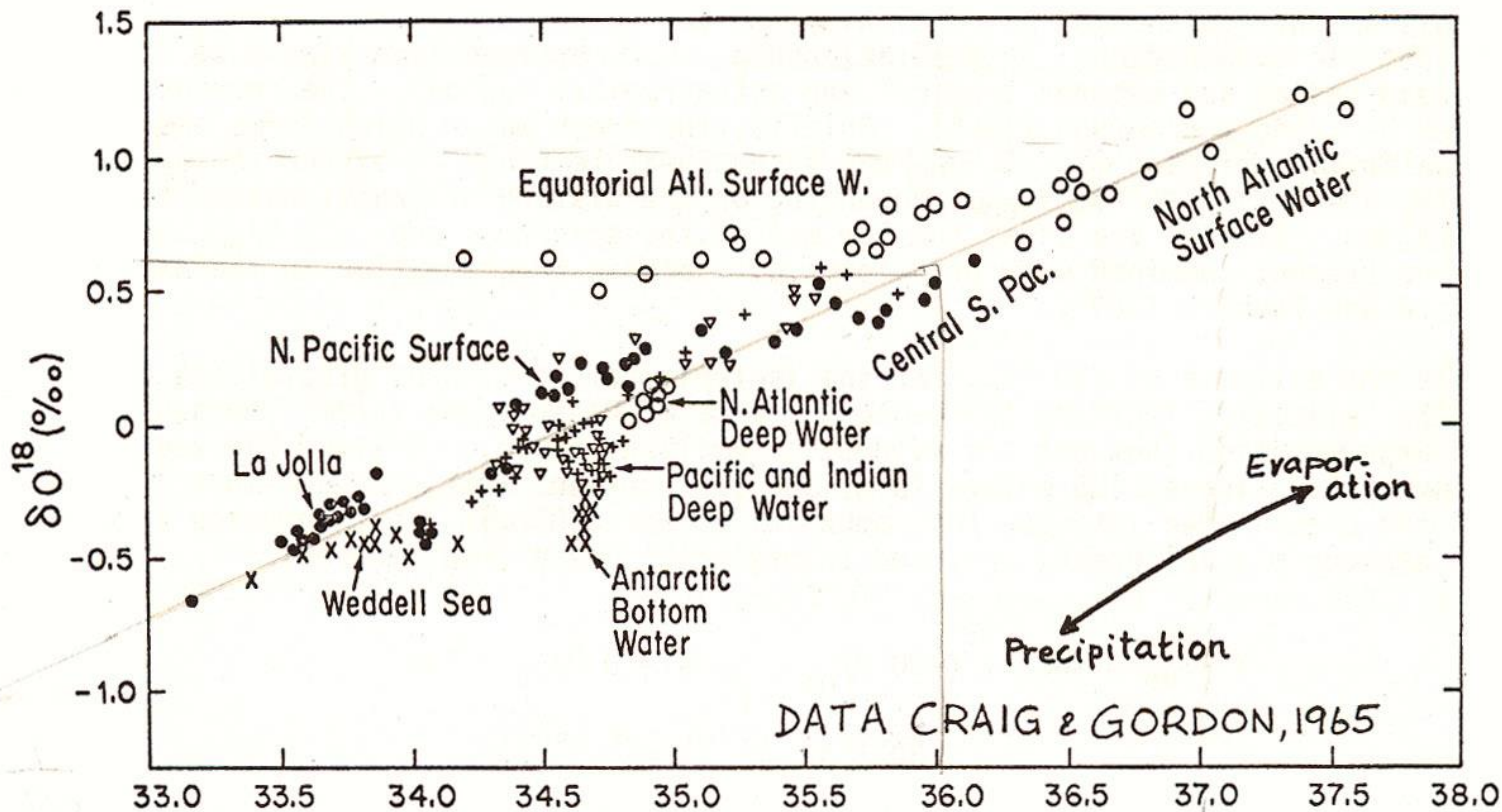


Fig. 20. Long-term trend curves of  $\delta^{18}\text{O}$  and surface air temperature for the Vienna station. The trend curves  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  and  $\Delta T$  were calculated by applying a 12-month running average over the monthly time series and subtracting the resulting curves from the long-term annual means of  $\delta^{18}\text{O}$  and temperature (broken lines). The resulting curves were then smoothed by applying again a 12-month running average (heavy lines).

# Izotopové složení vody vs. salinita

Deficit  $^{18}\text{O}$  se snižuje s rostoucí salinitou vody v oceánu.



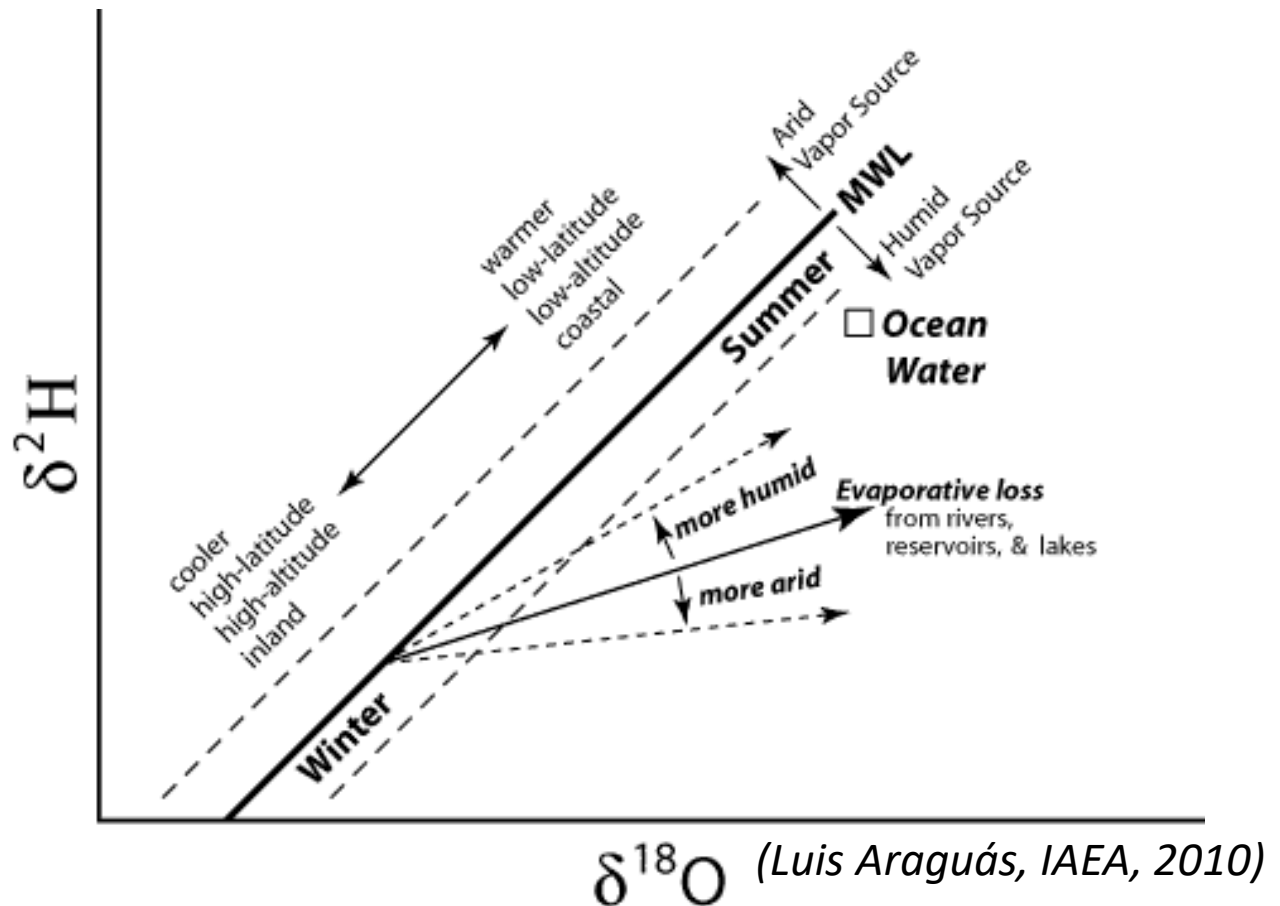
- x Antarctic Ocean
- o Atlantic Ocean
- Pacific Ocean
- + South Pacific
- ∇ Indian Ocean

SALINITY (‰)

10% some

# Global Meteoric Water Line (GMWL)

- dlouhodobé pozorování potvrdilo lineární korelaci mezi  $\delta^2\text{H}$  ( $\delta\text{D}$ ) and  $\delta^{18}\text{O}$  reprezentovanou rovnicí  $\delta\text{D} = 8(\delta^{18}\text{O}) + 10$
- pomocí této linie lze identifikovat prostředí v době infiltrace (vzniku) vzorkovaných vod
- **sklon 8** – poměr rovnovážné frakcionace pro  $^{18}\text{O}$  a  $^2\text{H}$  mezi deštěm a párou
- **posun linie o 10** od mořské vody při vlhkosti vzduchu 85 %

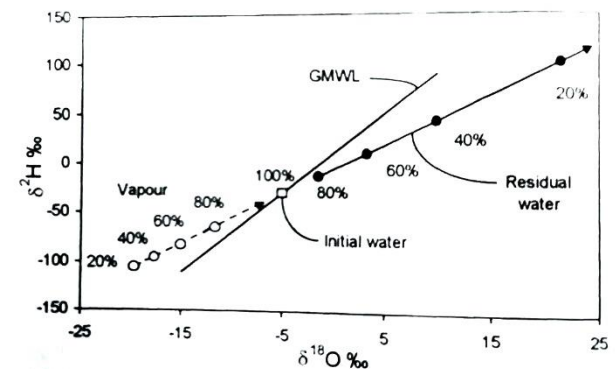
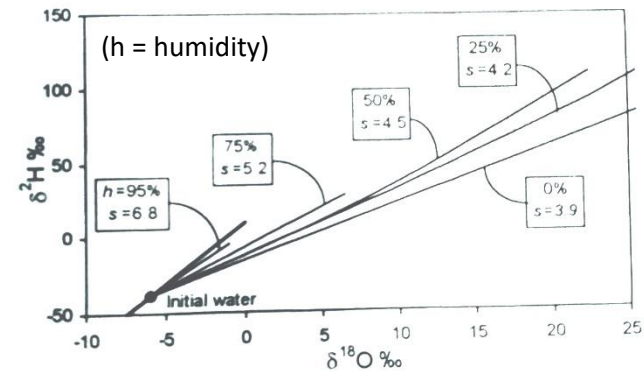
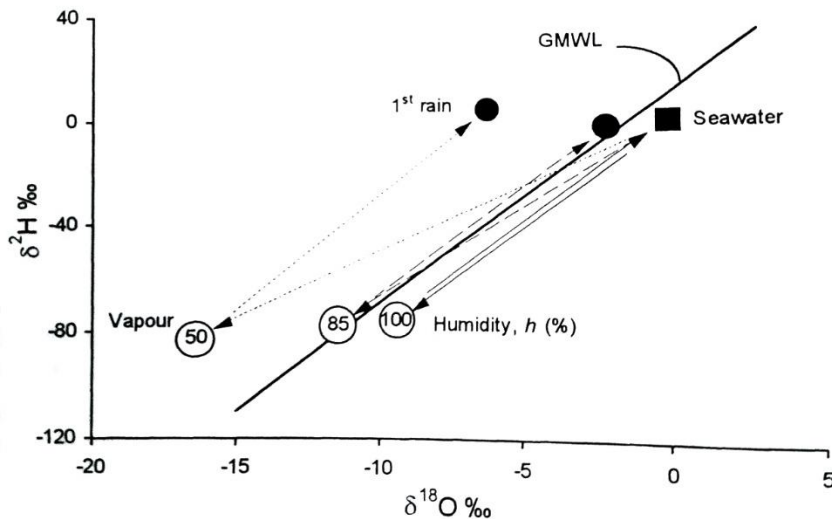


# Local Meteoric Water Line (LMWL)

- dlouhodobé pozorování potvrdilo lineární korelaci mezi  $\delta^2\text{H}$  ( $\delta\text{D}$ ) and  $\delta^{18}\text{O}$  reprezentovanou rovnicí  $\delta\text{D} = 8(\delta^{18}\text{O}) + 10$
- pomocí této linie lze identifikovat prostředí v době infiltrace (vzniku) vzorkovaných vod
- odchylky of GWML

➤ výpar ze vzorkované vody (frakcionace  $^{18}\text{O}$  převyšuje frakcionaci  $^2\text{H}$ )

➤ vlhkost prostředí při výparu



# Průměrné izotopové složení

- vážený průměr – váženo srážkovým úhrnem pro dané období
- eliminace extrémních hodnot z měsíců s malými srážkovými úhrny (větší vliv výparu – amount effect)
- vážený průměr:
  - násobení izotopového složení a srážkového úhrnu pro jednotlivé odebrané vzorky
  - podělení sumy součinu izotopy\*srážky se sumou srážek za celou epizodu

# Vliv evaporace

**Deuterium excess**       $d = \delta D - 8(\delta^{18}O)$

- posun od GMWL - nadbytek  $^2H$  při zastoupení  $^{18}O$  na WML 0,0
- je funkci relativní vlhkosti vzduchu v atmosféře
- posouzení zdrojové oblasti srážek (stopování atmosférické cirkulace vzduchu), např. východní středomoří +22 ‰ a nad Antarktidou 0 ‰
- indikace lokálních efektů – vlhkost během formování mraků a procesu sublimace sněhu a ledu či výparu z povrchových těles vody či mělké hladiny podzemních vod

## **Efekt evaporace**

- obohacení reziduální vody těžšími izotopy
- lineární regrese prokládající vody se sklonem 4 (evaporace z povrchových vod) až 2 (evaporace z nenasycené zóny)
- typické pro vody, které byly v době vzniku ovlivněny evaporací, sublimací sněhu a ledu

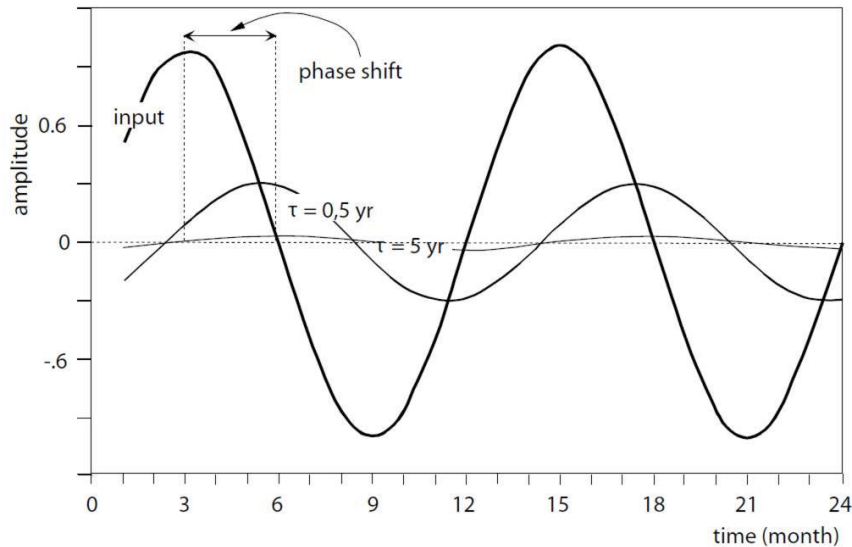


# Vliv teploty

## Určení absolutního stáří vody

### Sezónní kolísání izotopového složení

- sezónní trend lze popsat sinusoidou jejíž amplituda může u **mladých** podzemních vod určit jejich čas vzniku - do 5 let

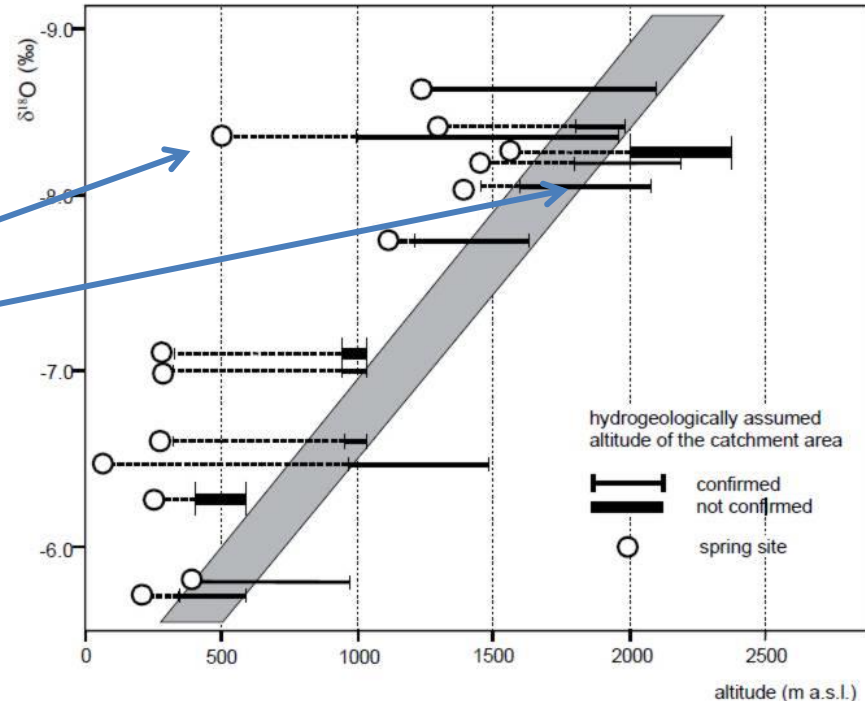


- separace podzemního odtoku z nýarogramu
- starší vody – sezónní kolísání setřeno hydromechanickou disperzí

# Vliv nadmořské výšky

- s rostoucí nadmořskou výškou klesá teplota a mění se izotopové složení
- ve vyšších nadmořských výškách jsou srážky izotopicky lehčí
- výškový gradient pro  $\delta^{18}\text{O}$  je od -0,15 do 0,4 ‰ na 100 m, pro  $\delta^2\text{H}$  cca 8krát vyšší
- podle této závislosti lze posoudit nadmořskou výšku oblasti infiltrace podzemních vod, vzorkované body však od sebe nesmějí být příliš vzdáleny, protože vliv nadmořské výšky by mohl být převážen tzv. kontinentálním efektem.

pozice míst drenáže  
je níže než pozice  
infiltračních oblastí

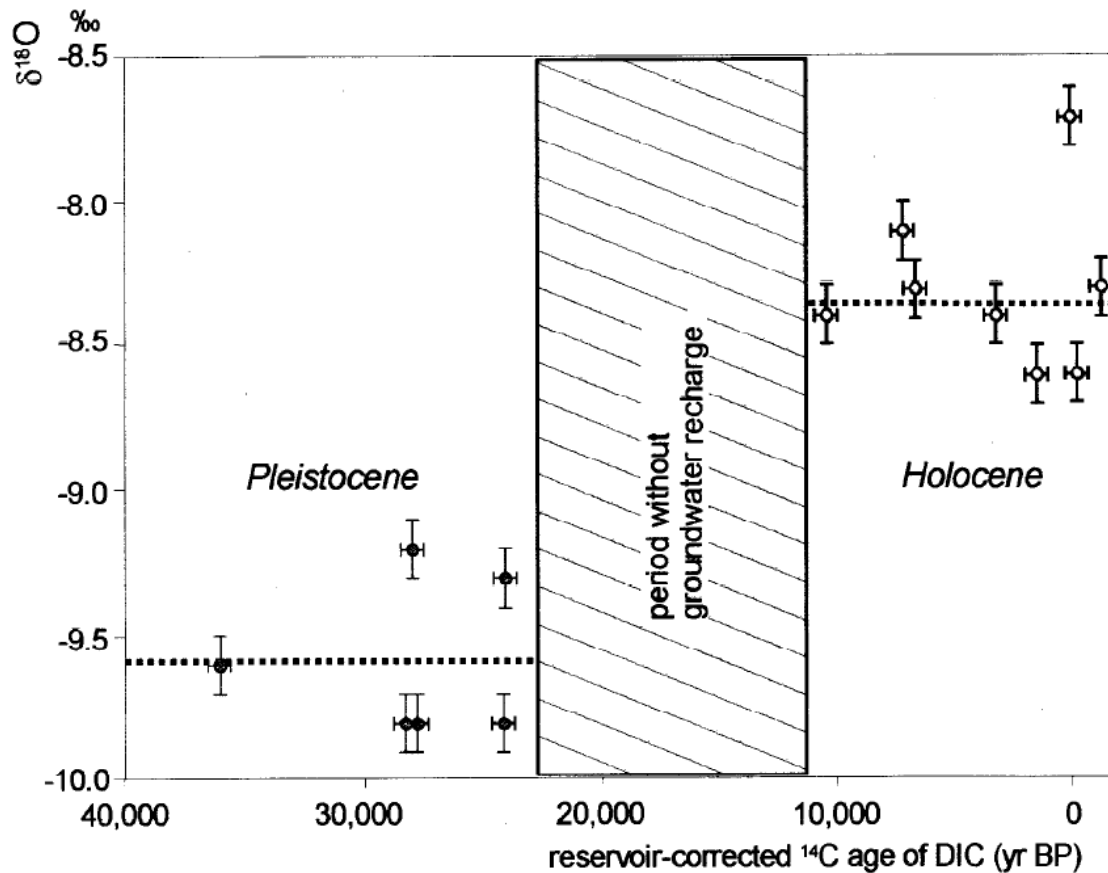


# Využití stabilních izotopů v hydrogeologii

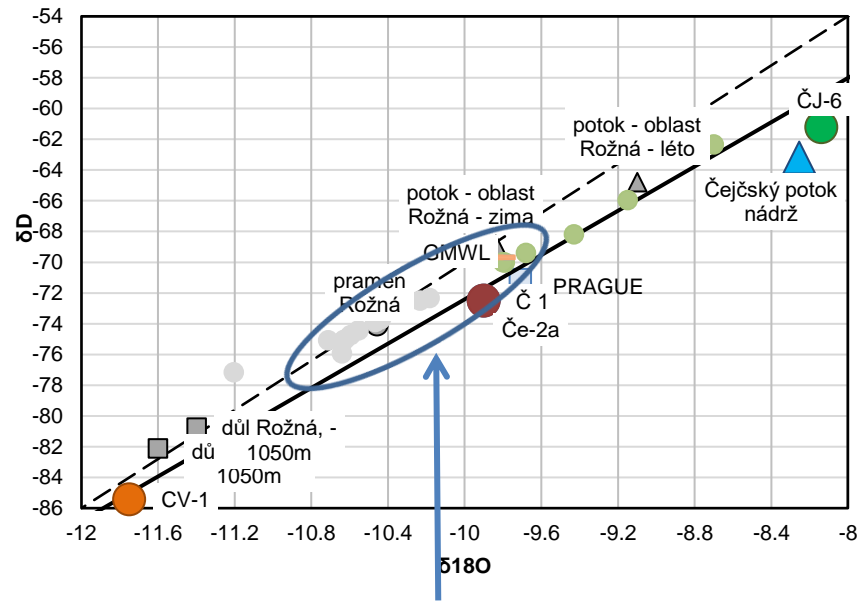
- Určení místa infiltrace podzemních vod
  - paleovody – izotopicky odlišné od současných srážek (databáze GNIP), důležitým ukazatelem je především **d-excess**
  - nadmořská výška oblasti infiltrace a vzdálenost od zdroje vodních par
- Určení doby infiltrace podzemních vod
  - velmi mladé vody – sezónní kolísání izotopového složení
  - určení klimatických poměrů v době vzniku vod a datování absolutního stáří podzemních vod podle studií pylů vs.  $^{14}\text{C}$ , jezerních sedimentů vs.  $^{14}\text{C}$  (Pleistocén až Holocén – období výrazných a četných klimatických změn)

# Relativní určení stáří vod

- odraz teploty v době vzniku podzemních vod
- deficit  $^{18}\text{O}$  v podzemních vodách pocházejících z Pleistocénu a Holocénu v jižní Anglii (podle Bath et al. 1979).

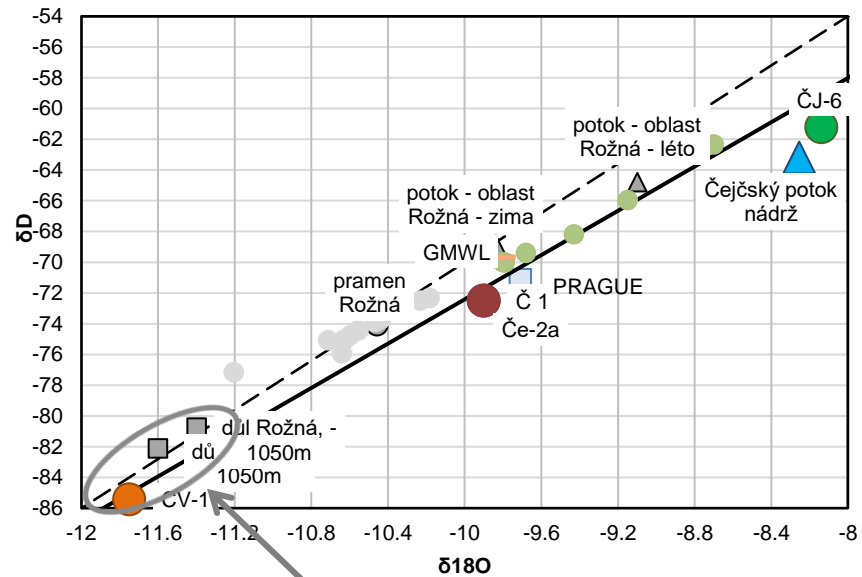


## Co se dozvíme o podzemních vodách v ČR?



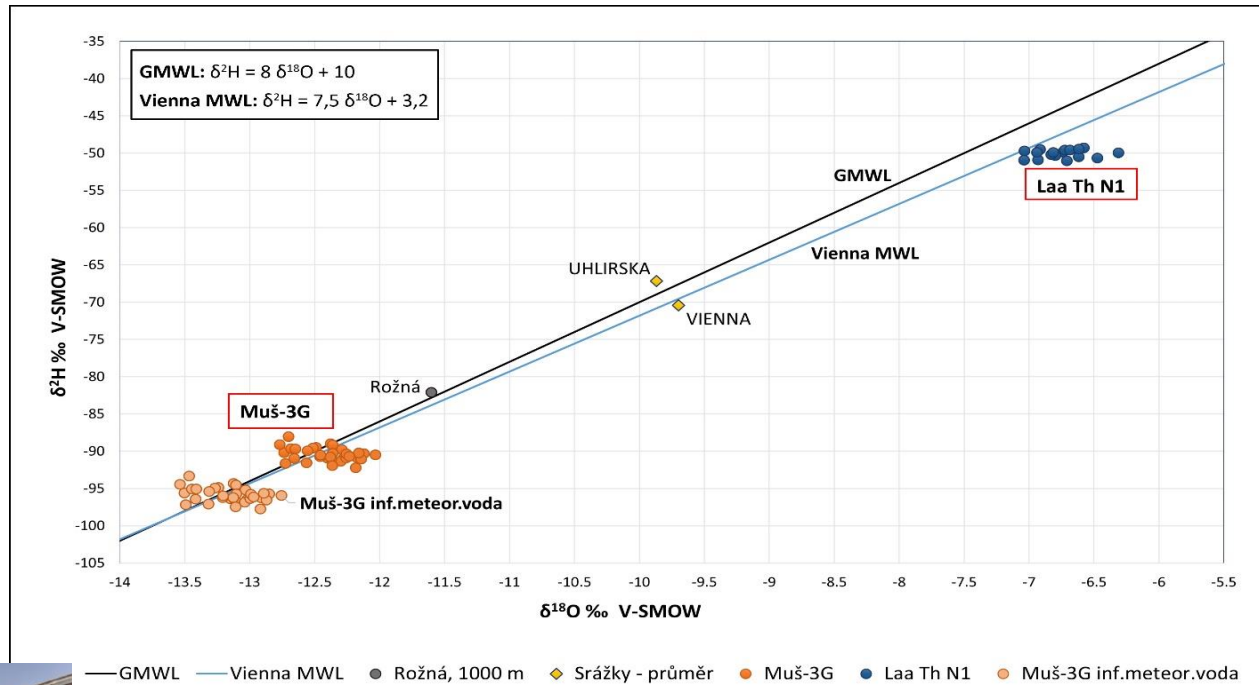
podzemní vody vznikající  
v současných klimatických podmínkách

## Co se dozvíme o podzemních vodách v ČR?



podzemní vody hlubokého oběhu  
formované v chladném klimatu  
na konci posledního glaciálu v důsledku tání permafrostu

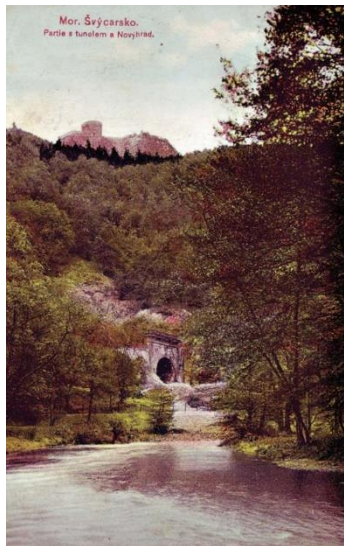
## Co se dozvíme o podzemních vodách v ČR?



Aqualand Moravia  
 infiltrace v době ledové před 40 - 50 kya



## zásobování Brna pitnou vodou – 1. březovský vodovod





# zásobování Brna pitnou vodou – 1. březovský vodovod

trasa březovský vodovod n x Microsoft Word - 00640\_7 x tunel\_2\_14\_newtunnel\_3\_06 x tunel\_2\_14\_newtunnel\_3\_06 x Svitava, km 30,1 - železnici x Geoprohlížeč x ČÚZK: Geoportál x Analýzy výškopisu x

ags.cuzk.cz/av/

Analýzy výškopisu | Zeměměřický úřad

Seznam vrstev | Vlastnosti reliéfu | Pole viditelnosti | Linie viditelnosti | Profil | Výpočet objemu | 2D | 3D

Najít adresu nebo místo

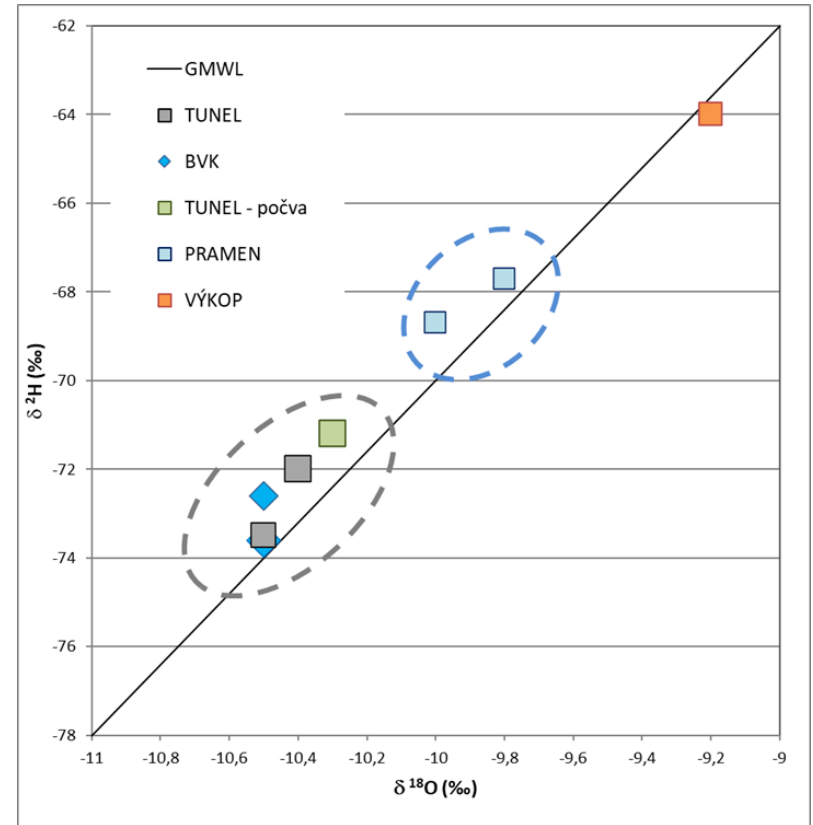
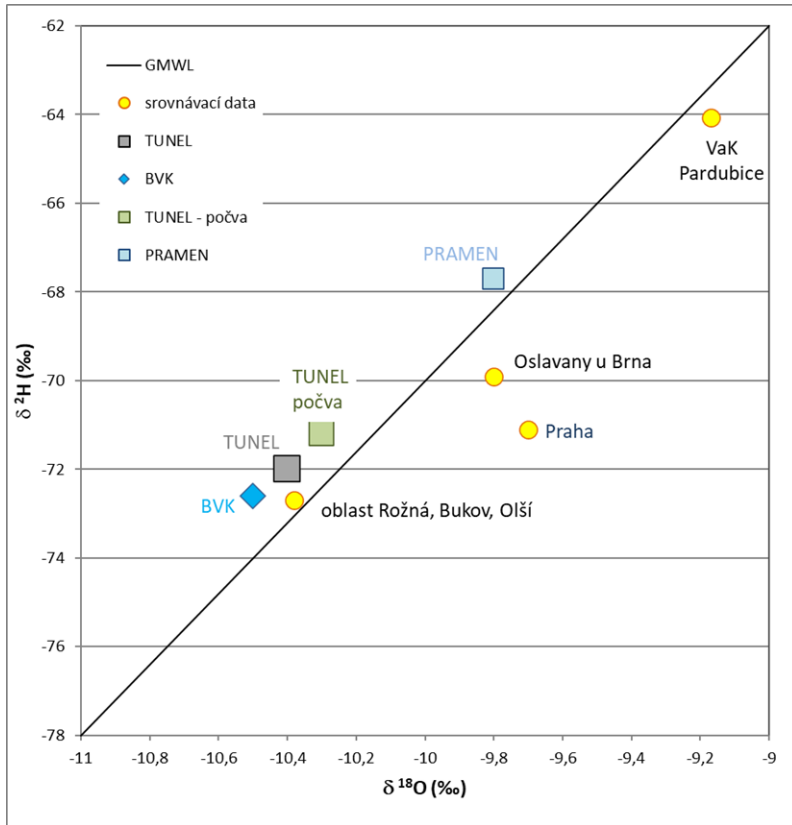
Zapněte režim Výpis souřadnic bodu

© ČÚZK

Powered by Esri

11:49  
09.03.2023

## Jak nám pomohou stabilní izotopy H a O?



# Databáze izotopů v meteorických vodách

International Atomic Energy Agency (IAEA) – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

## Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP):

- celosvětová síť pro monitorování izotopů vodíku a kyslíku ve srážkách
- dostupná izotopická data pro různé regiony
- nově nutná registrace
- <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>

## Dostupná literatura o izotopech od IAEA z roku 2000:

- Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications, Volume I - VI
- <https://gnssn.iaea.org/main/ncp/Tunisia/lrae/documents/tracers/>

