

Izotopová hydrologie

doc. Ing. Martin Šanda, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Obsah přednášky

- **Podpovrchová hydrologie**
- **Stabilní izotopy vody v hydrosféře**
- **Laserová spektroskopie pro inženýry**
- **Využití stabilních izotopů v hydrologii**
- **Závěry**

Hydrologie - voda v prostředí

Sledování hydrologických veličin

především srážka, odtok, hladina podzemní vody, půdní vlhkost

Popis prostředí

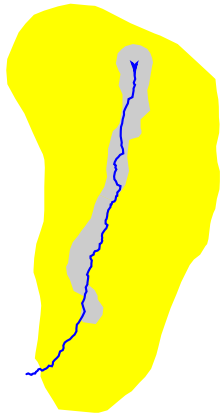
především topografický, pedologický, geologický, a geofyzikální průzkum

Sledování pohybu vody

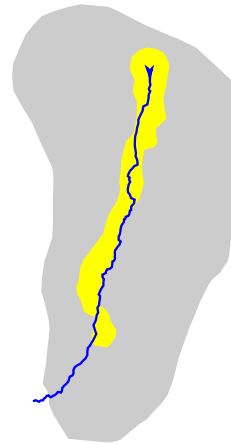
především přirozené látky ve vodě

Experimentální povodí Uhlířská

- v Jizerských horách: 776-886 m n.m., plocha: 1.78 km²
- humidní (1200 mm/rok) a studené (5°C) klima
- smrková monokultura (do 20 let věku) po odlesnění
- na svazích – mělké kambisoly, podzosoly (<1 m)
- v údolí – organosoly (1-3 m)



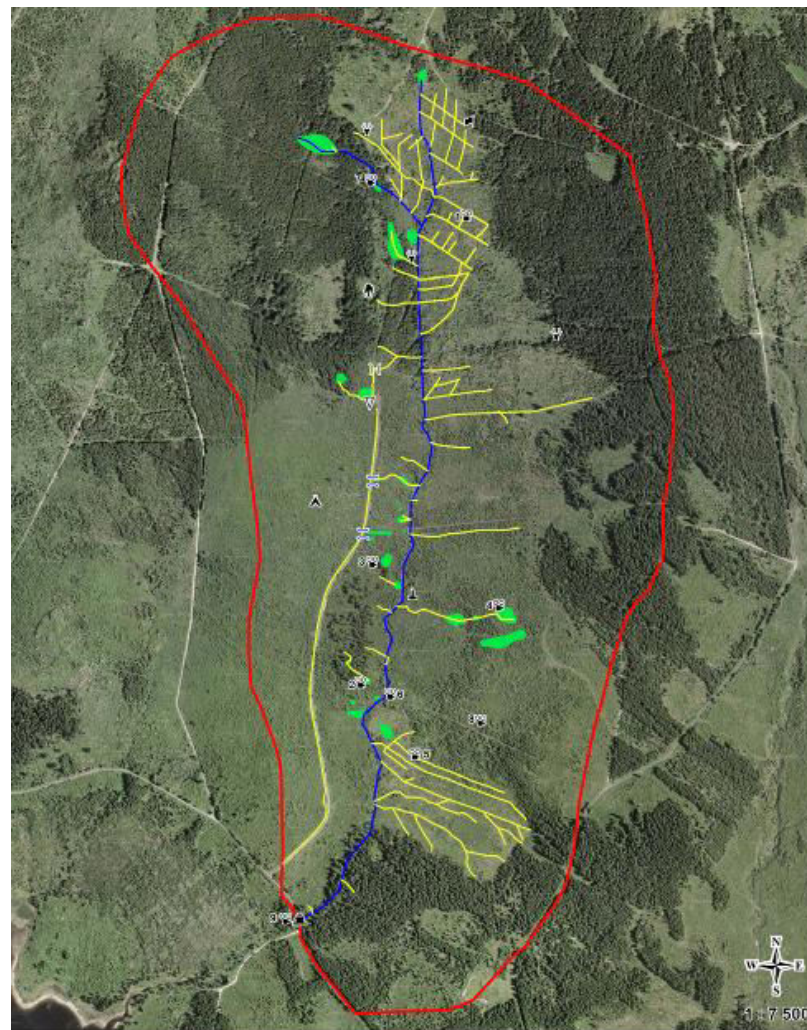
kambisoly a podzosoly (90%)



organosoly (10%)

Povodí vykazuje známky okamžité odezvy odtoku na srážku, přestože plošný povrchový odtok není pozorován

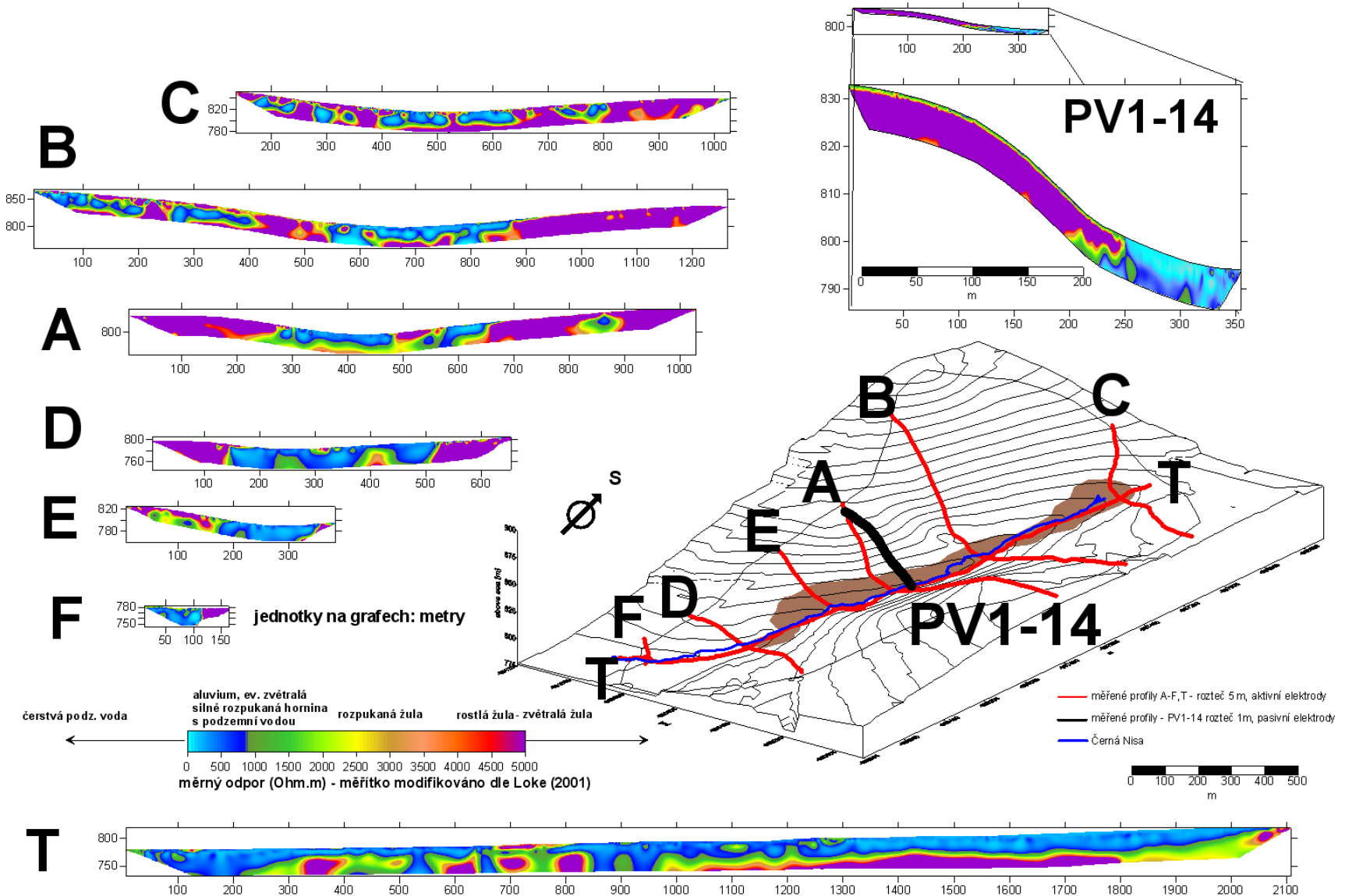
- rekognoskace povodí – drenážní sítě a mokřadů
- geologický a geofyzikální průzkum
- hydrometeorologická měření
- vzorkování vody pro stanovení izotopového a hydrochemického složení



LEGENDA:

5	fotografická příloha	▲	experimentální plocha	—	hranice povodí
↓	pošed. čekaná	▲	Tomšovka	—	přítok
—	propustek	▲	klimatická stanice	—	potok
—	pomník Porscheho smrti	▲	srážkoměr	—	mokřad
▲	skolka	▲	limnigraf		
▲	mrazek				

Diagnostika podpovrchových struktur pomocí elektrické rezistivní tomografie (ERT)



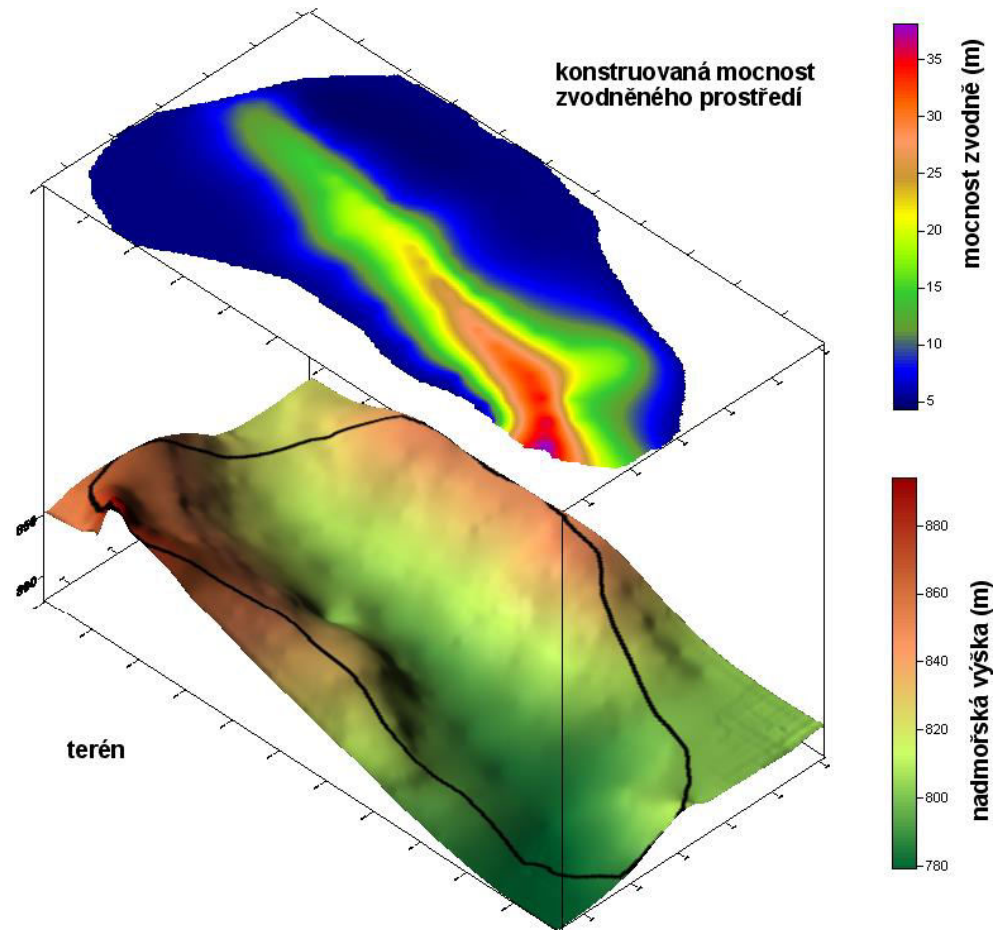
Představa rozměrů zvodně podle ERT

svahy: 5-10 m zvětralinového pláště

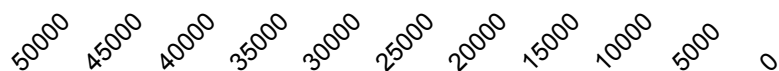
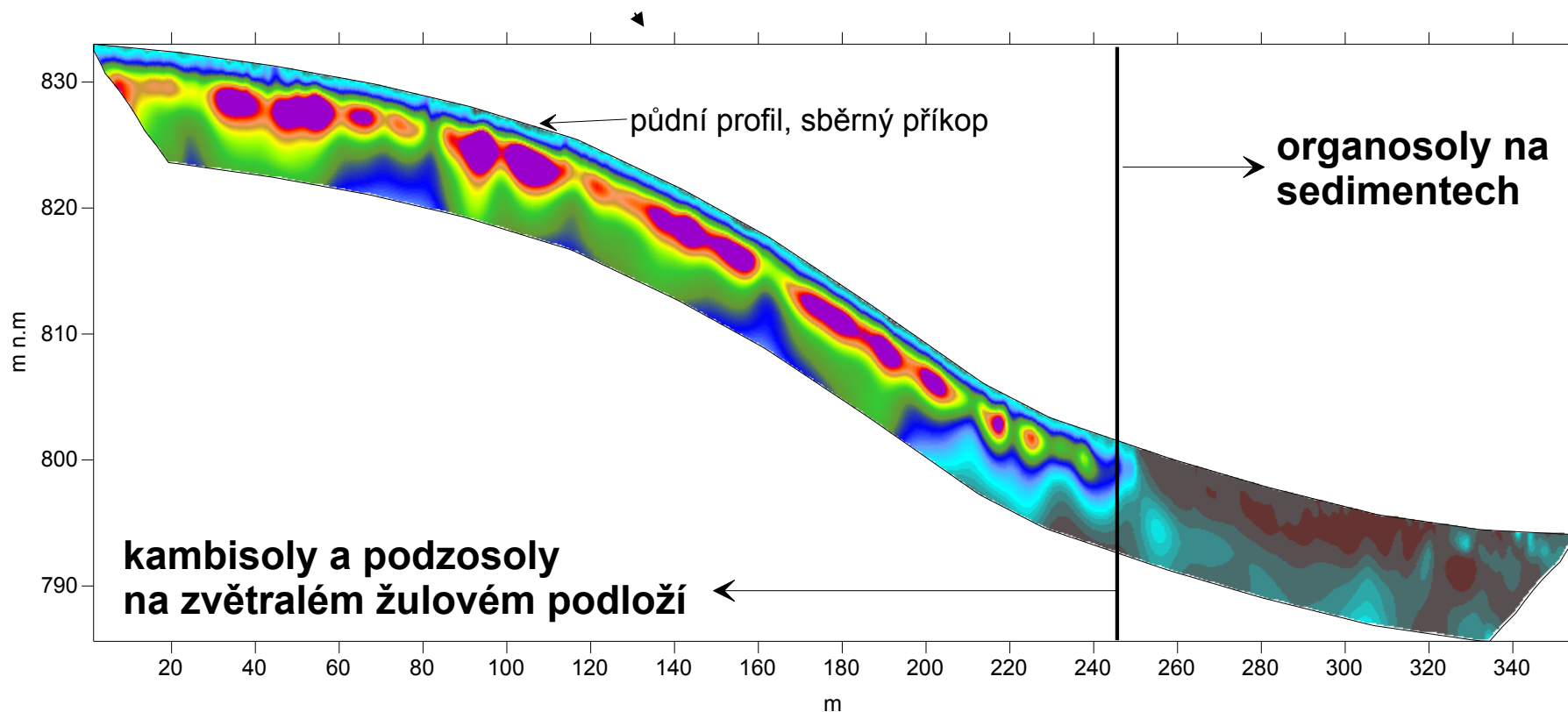
údolí: 10-50 m sedimentů

dle ERT zvodně obsahuje
1.8 – 5.6 mil m³ vody
(pórovitost 10-30%)

to odpovídá přibližně ekvivalentu
srážek
za 1.4-4.3 roky



ERT podrobně - experimentální svah



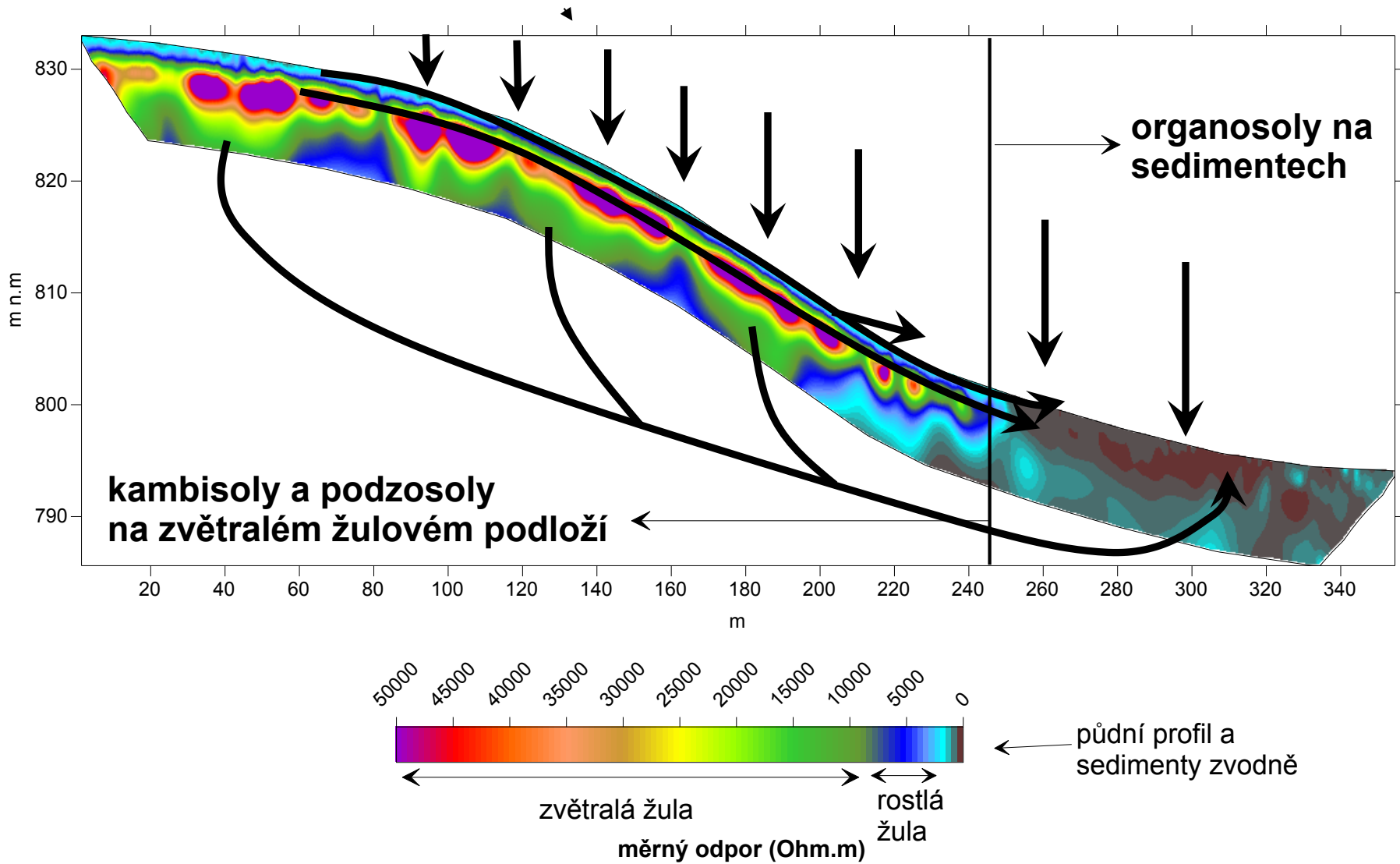
zvětralá žula

rostlá žula

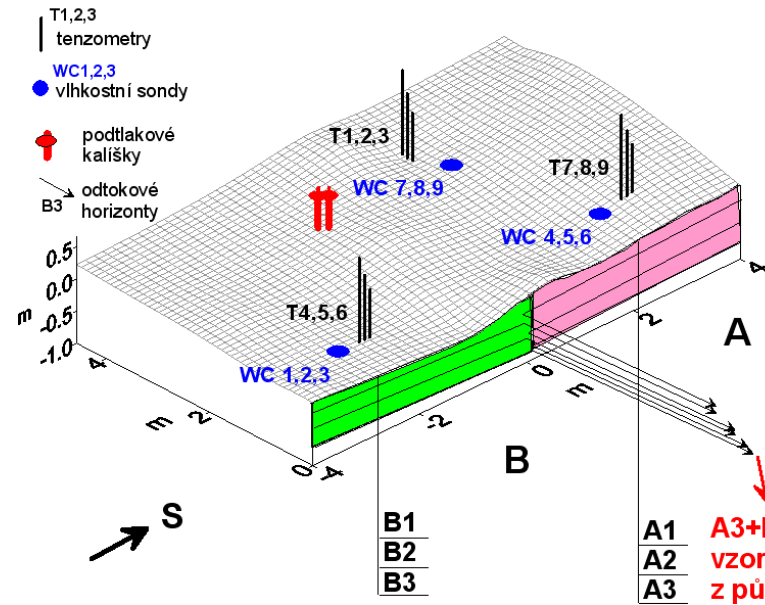
měrný odpor (Ohm.m)

← půdní profil a sedimenty zvodně

Možné cesty proudění vody



Odtokové procesy v půdě na svahu



zařízení pro vzorky vody

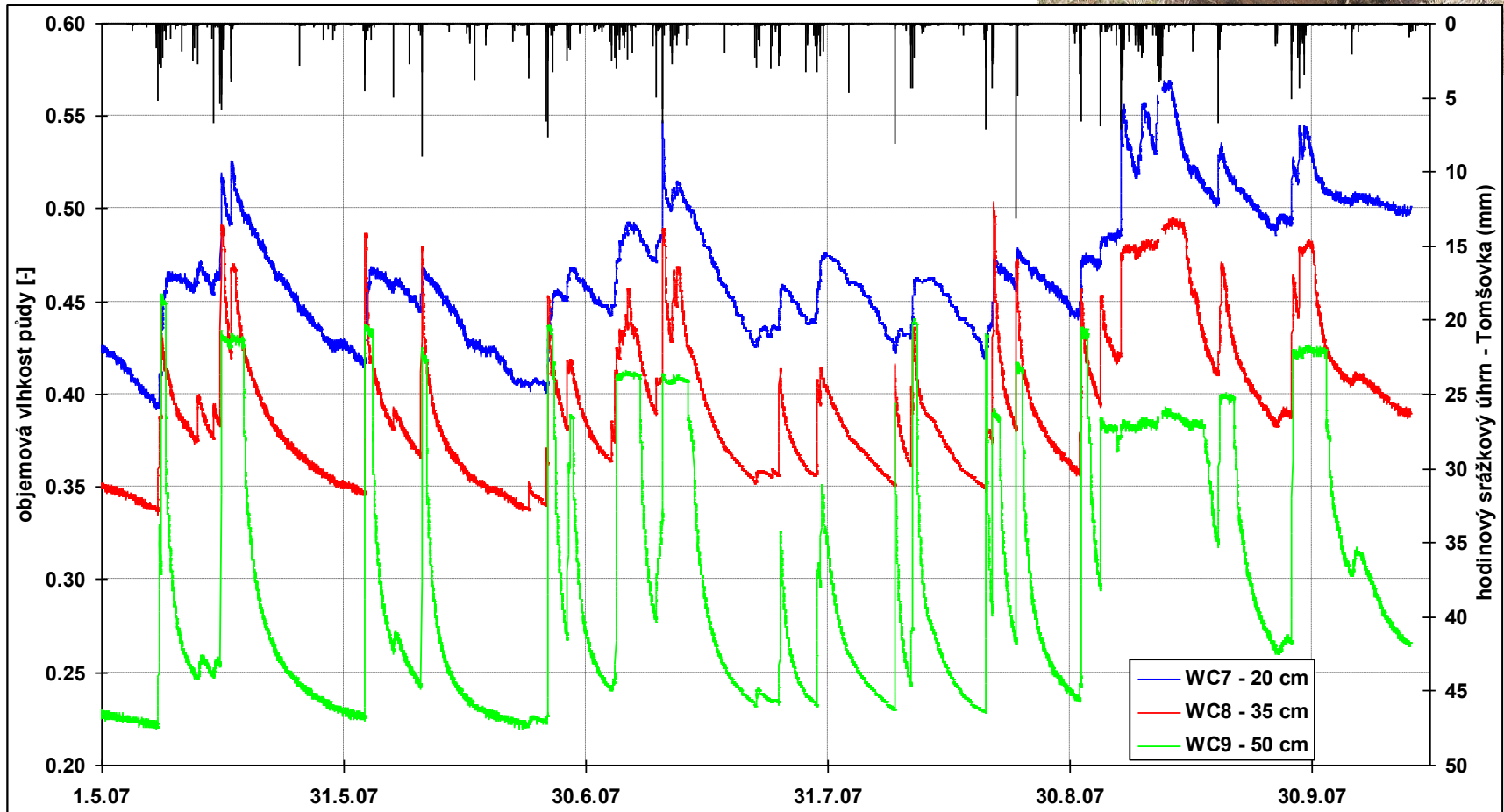
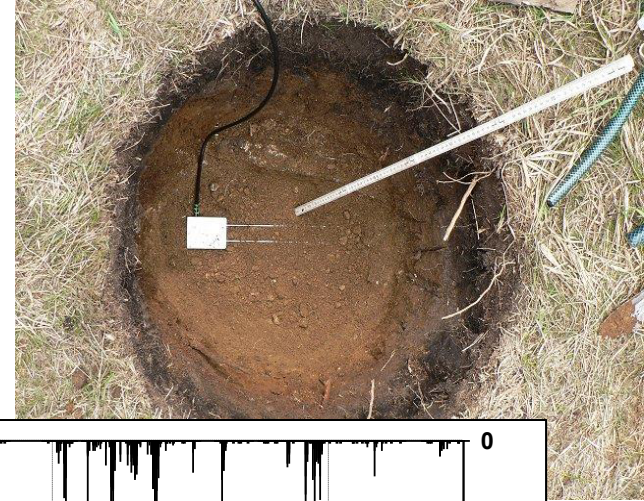


sběrné horizonty v kambizemi

průtokoměry, podpovrchový odtok

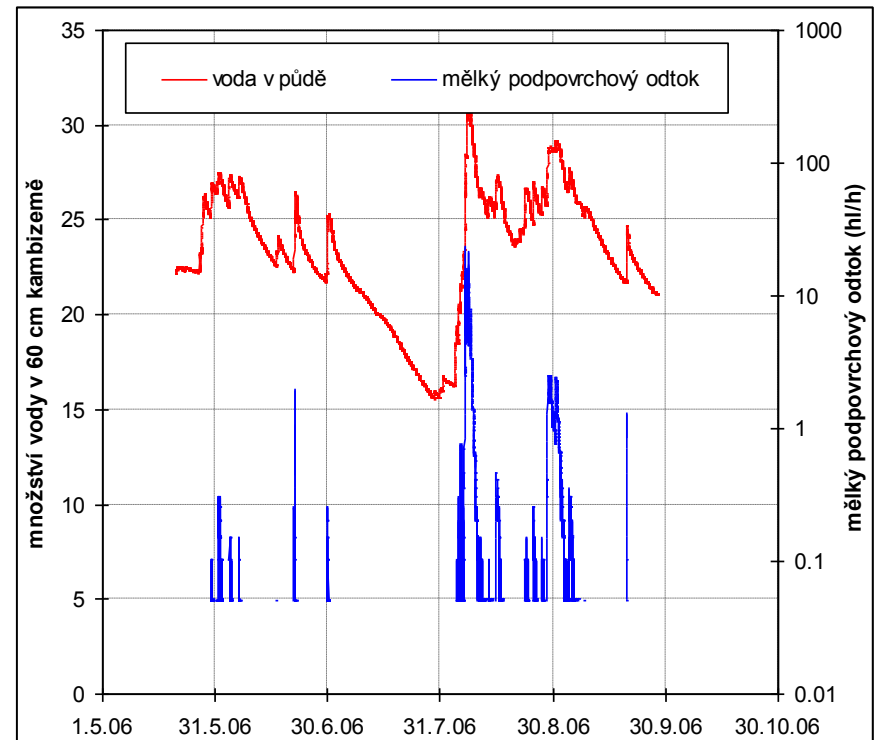
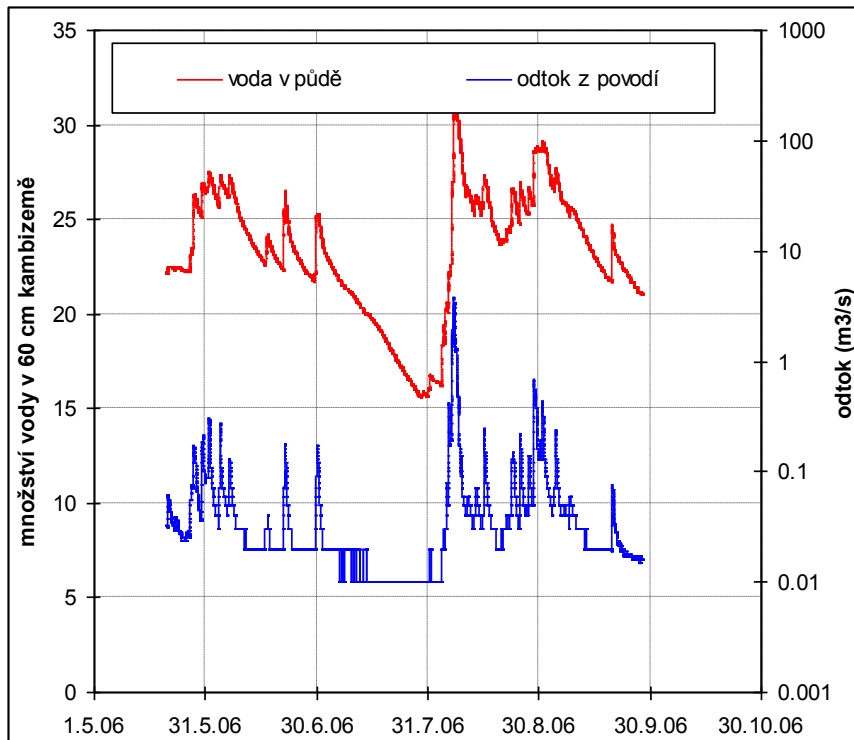
tenzometry – půdní sací tlak

Vlhkost půdy v půdních horizontech Ah, B a BC

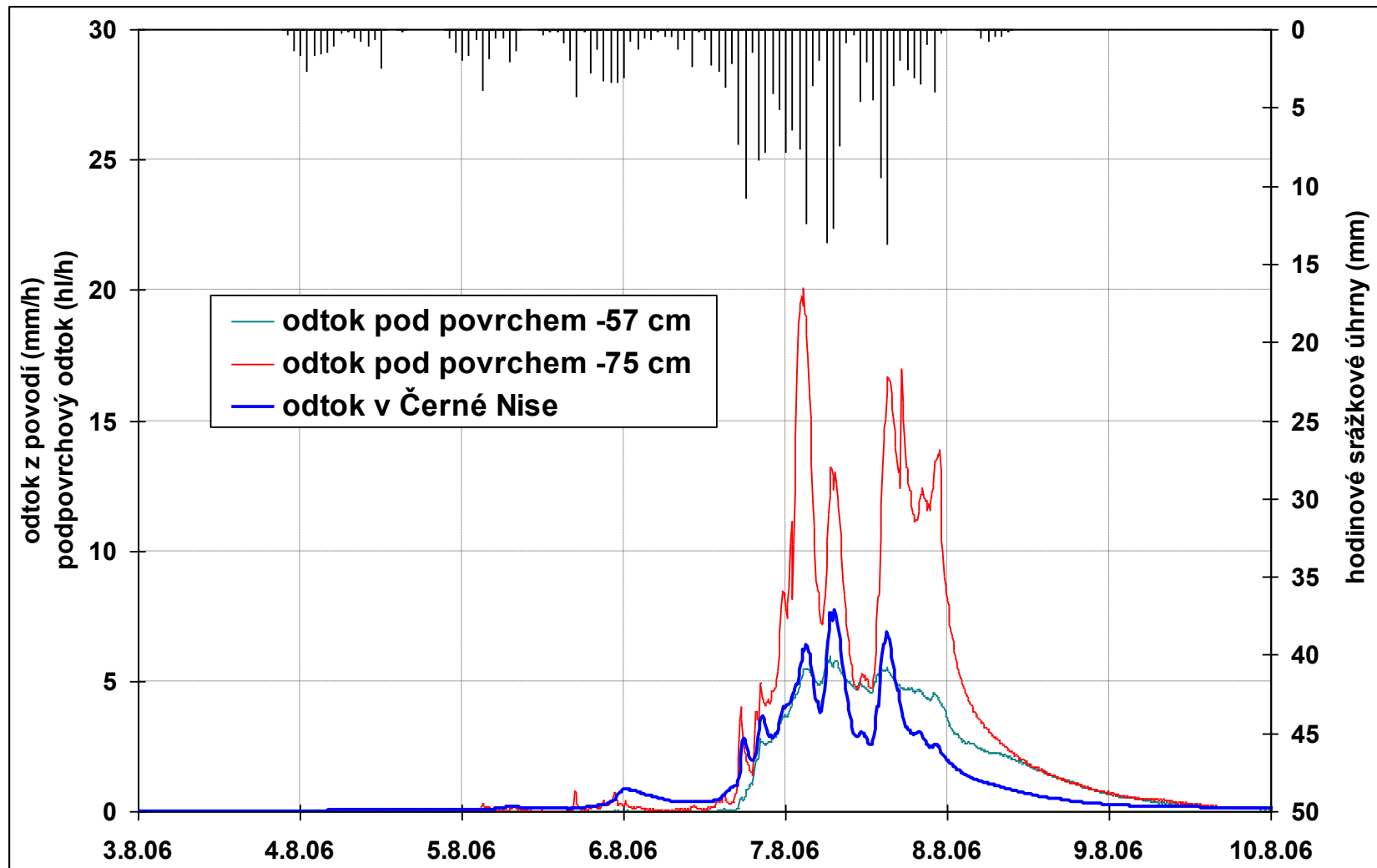


Vliv zásoby půdní vody na podpovrchový a celkový odtok

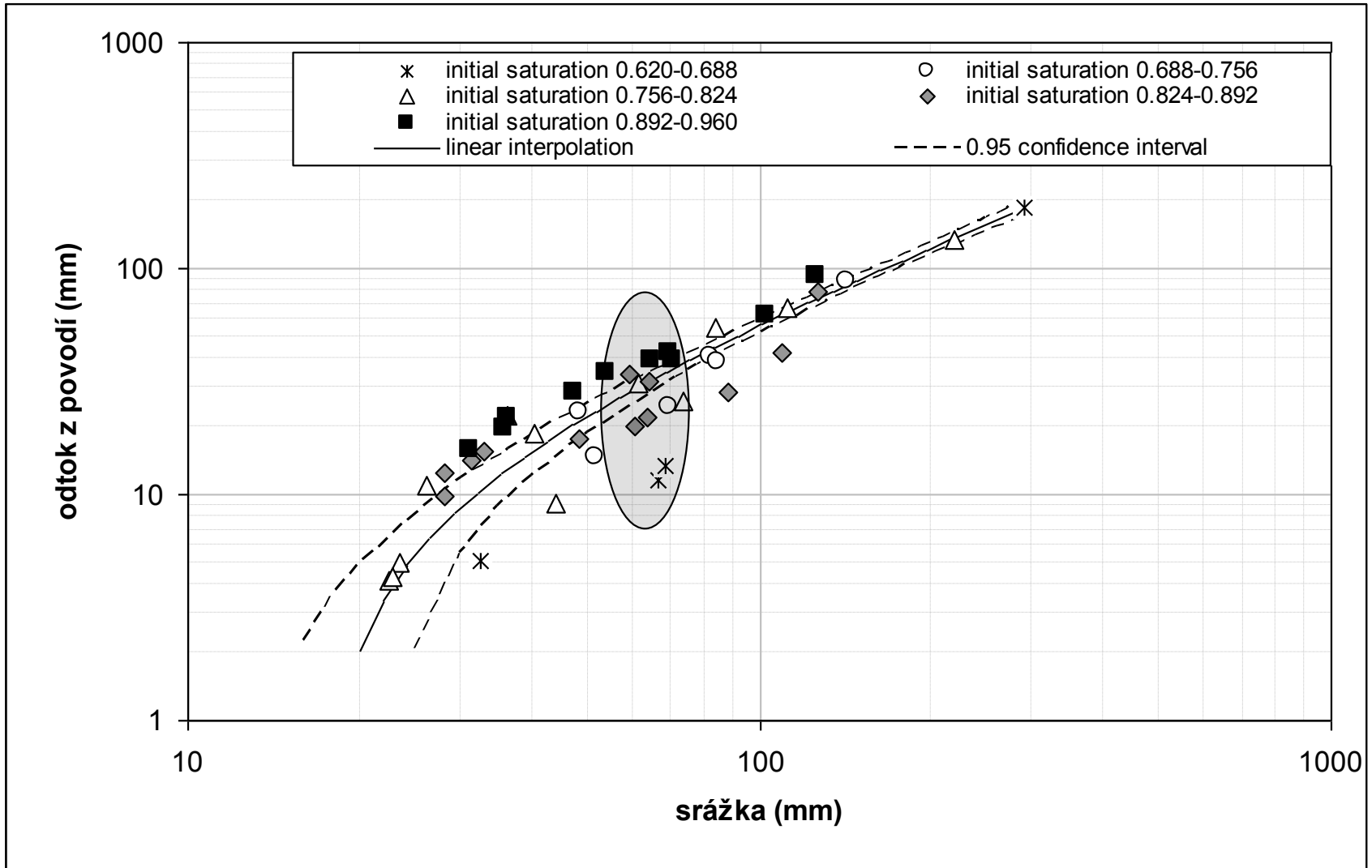
nasycení půdního profilu
tvorba podpovrchového odtoku
celkový odtok z povodí



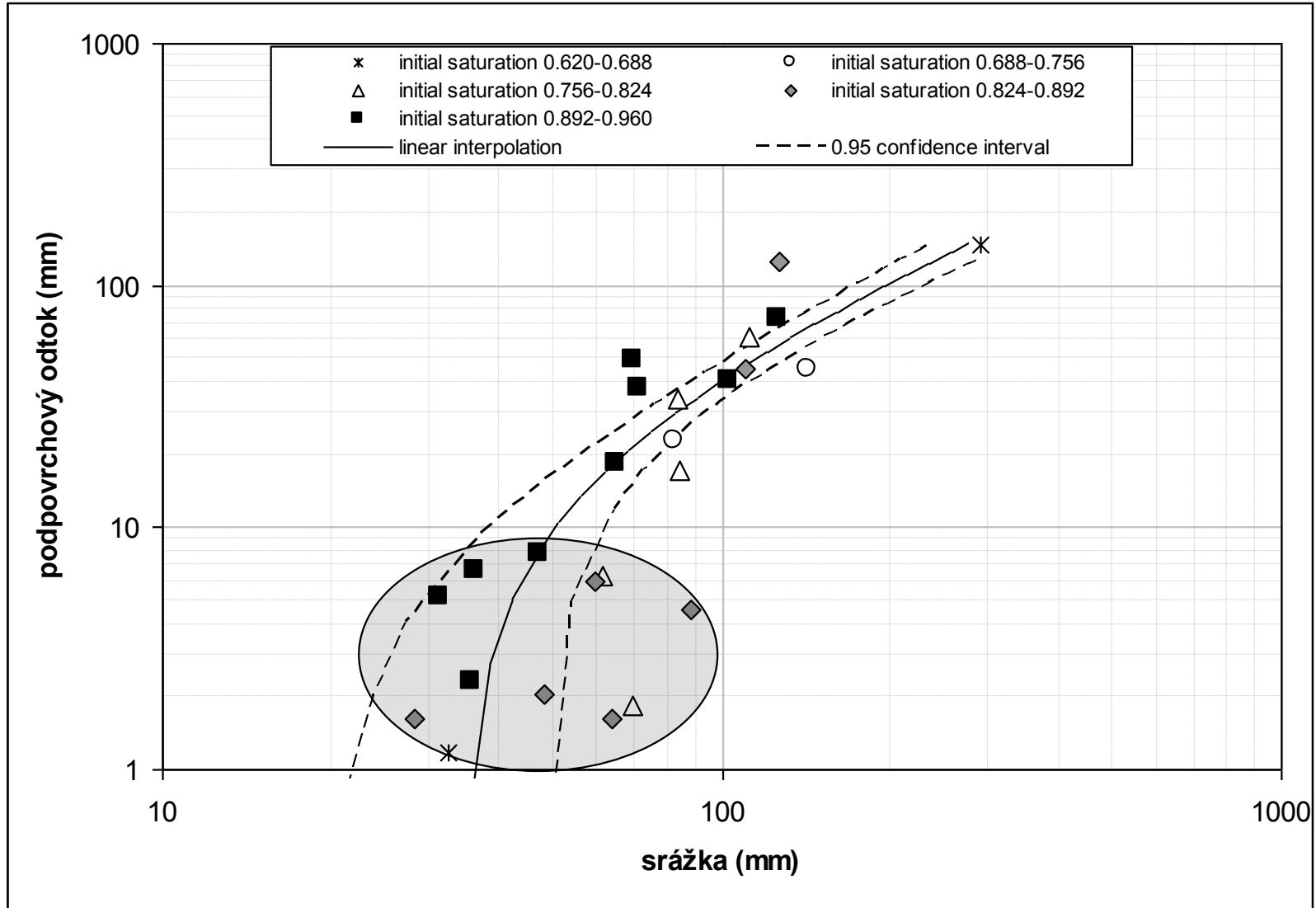
Podpovrchový odtok na svahu a celkový odtok z povodí podmínění celkového odtoku pohybem vody v půdním profilu



Srážkoodtokový proces - stejné množství srážky může vyvolat různá množství odtoku (vliv předchozí vlhkosti)



Srážkoodtokový proces - Pražové množství srážky (při různém nasycení) spustí významné odtokové procesy



Proč stopovače?

- prostředek k ověření konceptů tvorby povrchového a podpovrchového odtoku
- identifikace procesů pohybu vody, především pod zemským povrchem
- matematické modelování tvorby odtoku

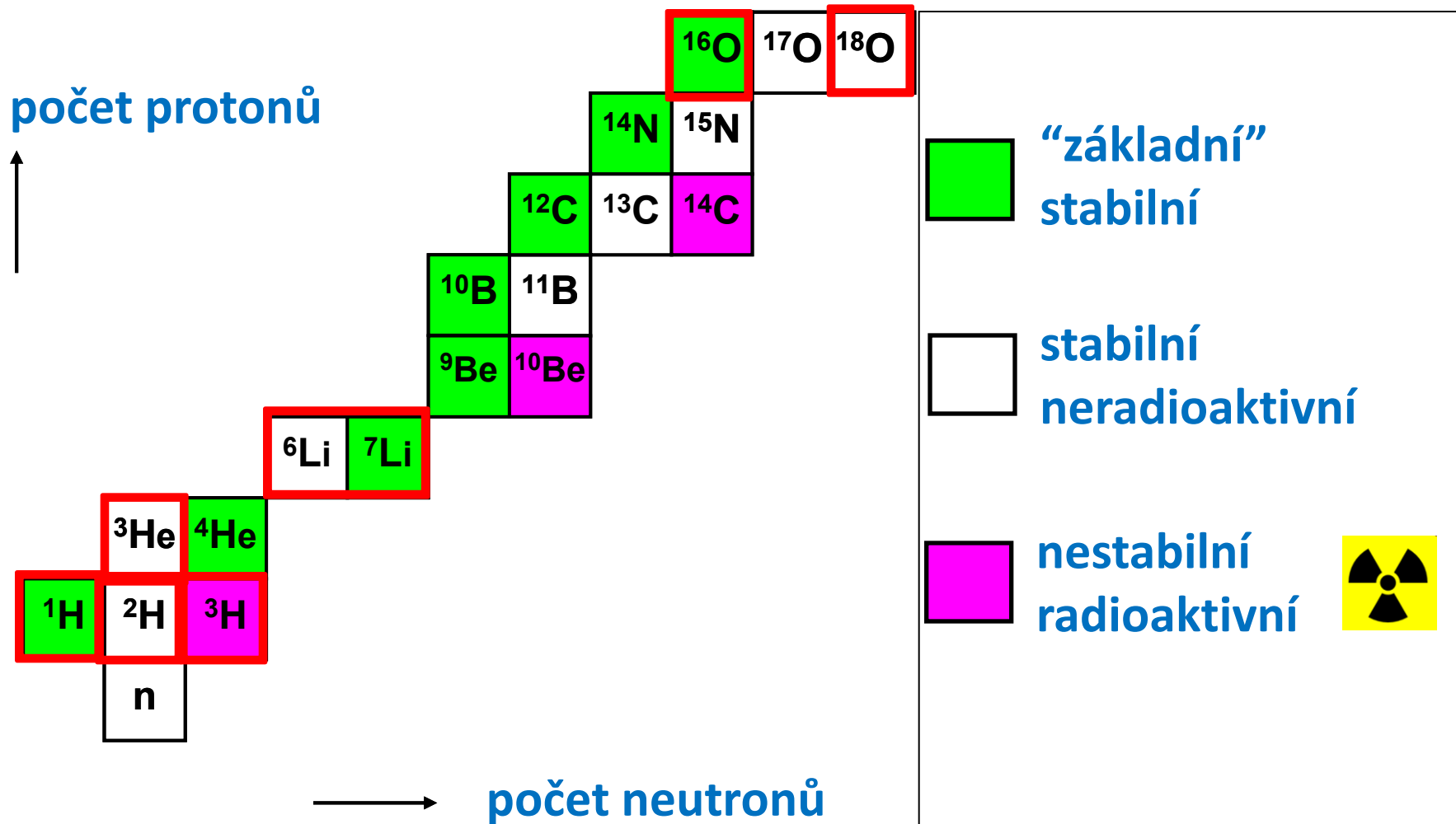
Přírodní stopovače v hydrologii

Dostupné ionty a sloučeniny: např. Ca^{2+} , SiO_2 , DOC
změna koncentrace látek ve vodě po kontaktu s půdně-
horninovým prostředím – původ vody

Izotopy: především stabilní ^{18}O , ^2H
proměnlivá koncentrace ve srážkách – dynamika vody

**Globálně rozšířené látky (antropogenní činností):
např. ^3H - ^3He , freony (CFC)**
měnící se zdroj koncentrace v atmosféře - stáří vody

Použité izotopy



IAEA

Kombinované použití environmentálních izotopů pro sledování cest odtoku



Proměnlivý vstup ve srážkách, mísení v povodí

- rychlý odtok – doby zdržení, izotopová separace



Odlišné koncentrace ve srážkách a minerálních materiálech

- analýza koncových členů, důkaz zdrojů vody



Poločas rozpadu 12.33 let z ^3H na ^3He – datování vod bez kontaktu se vzduchem (tj. podzemních)

- Hluboký oběh vod v povodí

Stabilní izotopy v molekule vody

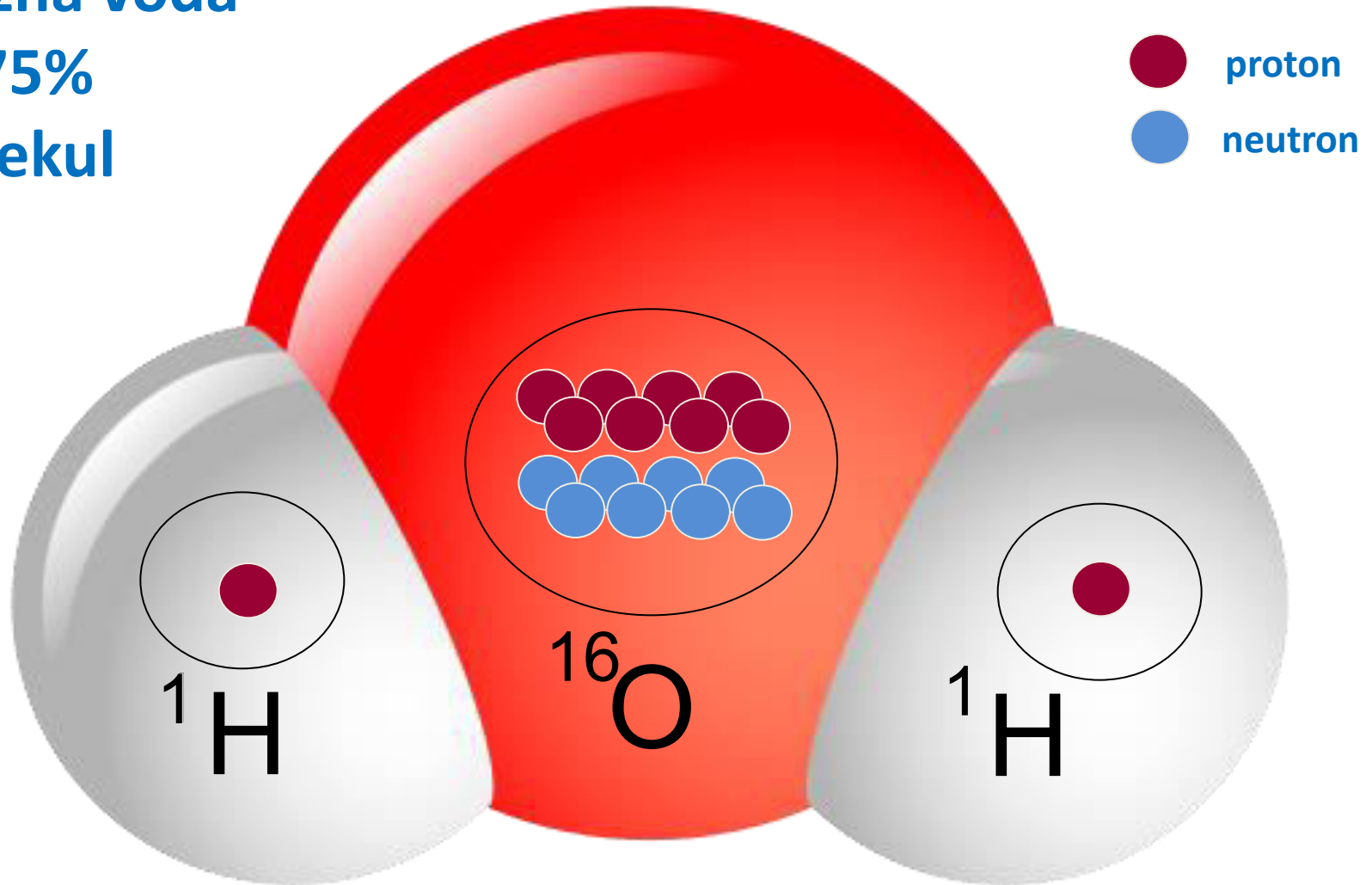
^1H , ^2H , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O ,

- přítomné v hydrologickém cyklu
- proměnlivé koncentrace ve srážkách
- molekuly vody jsou stopovačem
- jednoduché odběry a nakládání se vzorky

Stabilní izotopy vodíku a kyslíku ve vodě

“běžná voda”

99.75%
molekul

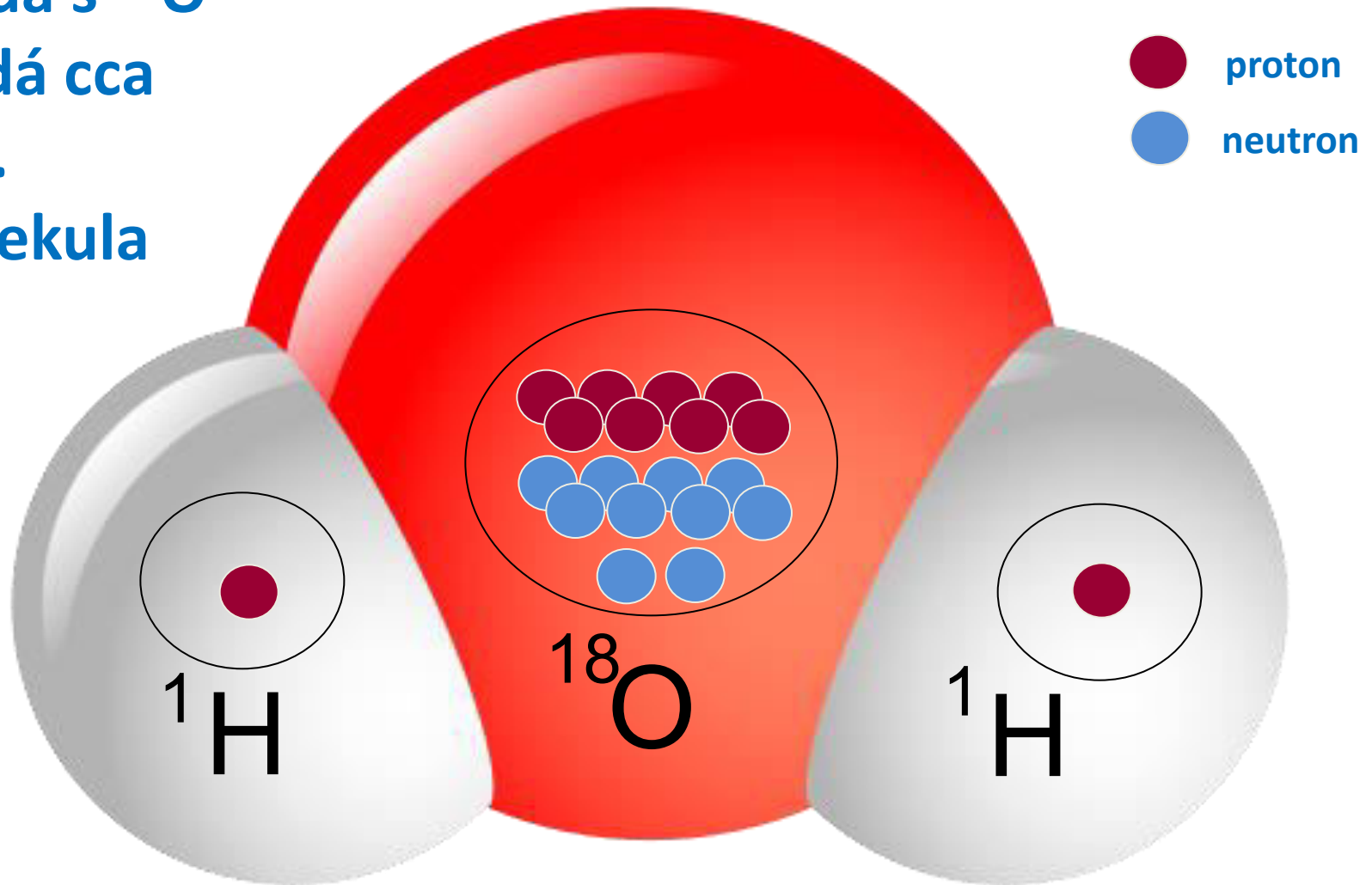


hmotnost celé molekuly = 18

Stabilní izotopy vodíku a kyslíku ve vodě

“voda s ^{18}O ”

každá cca
500.
molekula

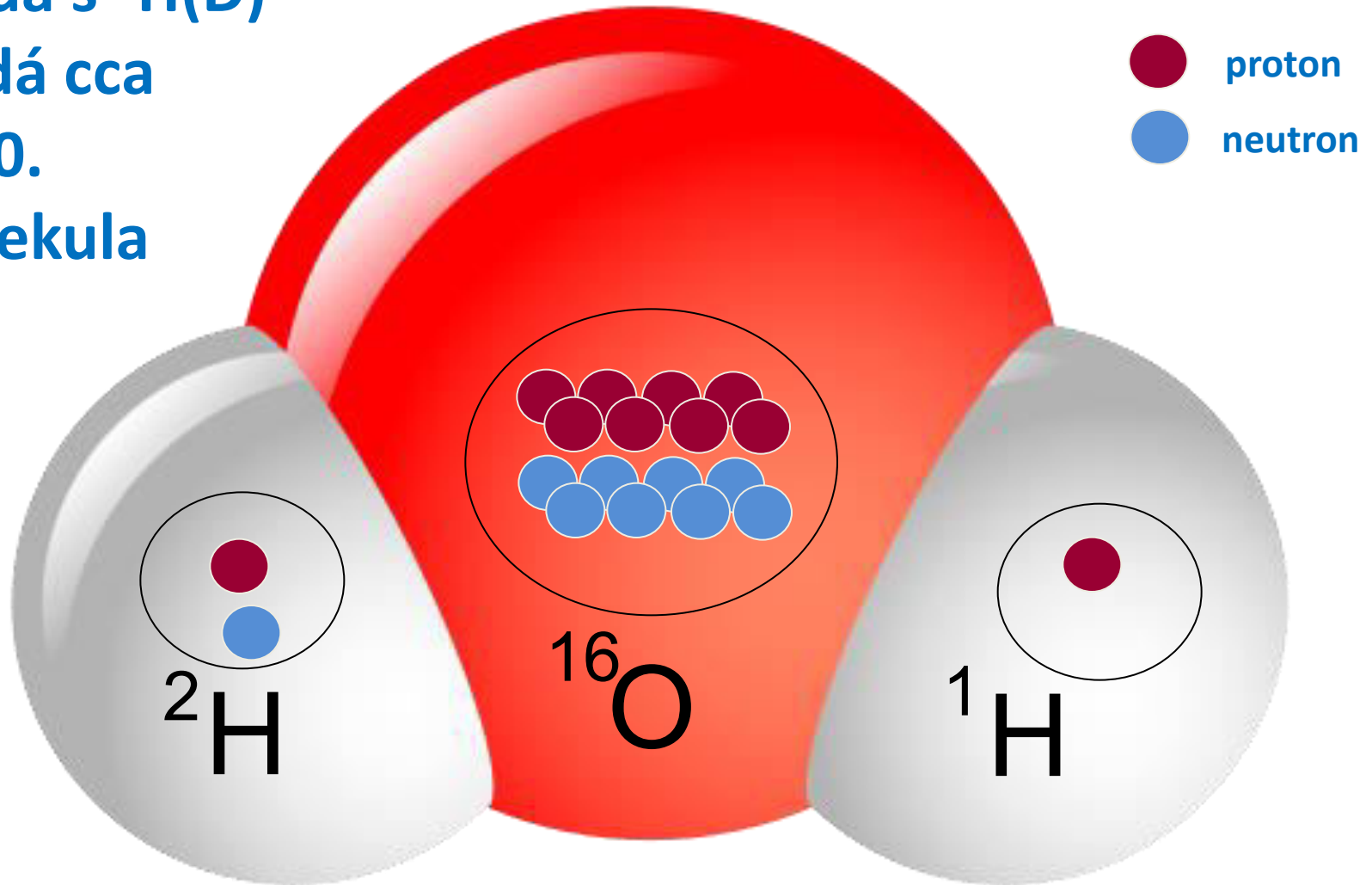


hmotnost celé molekuly = 20

Stabilní izotopy vodíku a kyslíku ve vodě

“voda s $^2\text{H}(\text{D})$ ”

každá cca
7000.
molekula



hmotnost celé molekuly = 19

Těžší stabilní izotopy v molekule vody

^2H (Deuterium)

$^2\text{H}/^1\text{H} = 1.5576 \cdot 10^{-4}$ (V-SMOW), přibližně 1:6400

$$\delta^2\text{H}_{\text{vzorek}} = \left(\frac{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{vzorek}}}{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) * 1000 [\text{‰}]$$

^{18}O

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2.0052 \cdot 10^{-3}$ (V-SMOW), přibližně 1:500

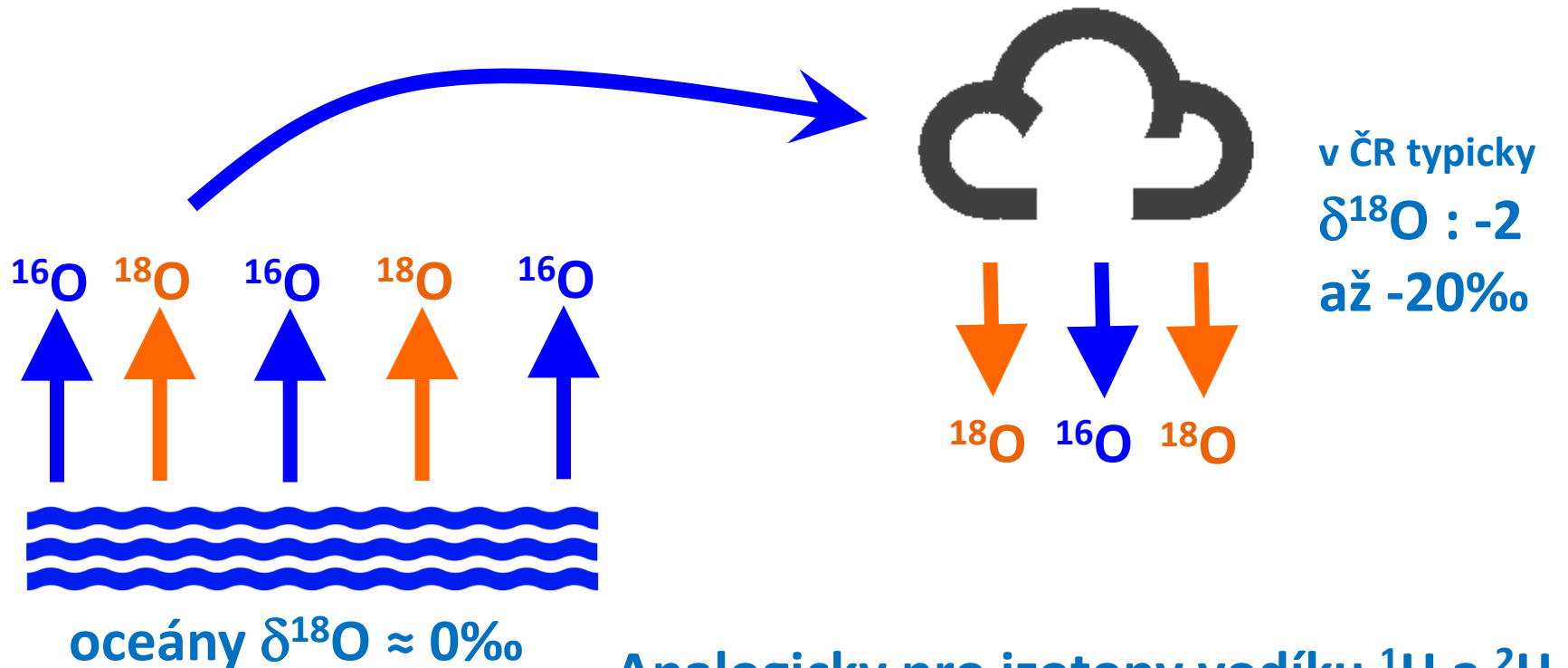
$$\delta^{18}\text{O}_{\text{vzorek}} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{vzorek}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) * 1000 [\text{‰}]$$

koncentrace izotopů relativizovány k V-SMOW

(Vienna Standard Mean Ocean Water $\delta^2\text{H}=0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$)

Stabilní izotopy vody v hydrologickém cyklu

- Obtížnější výpar molekuly vody s těžším atomem O nebo H
- Snadnější srážení těžších molekul
- tj. ochuzování vodních mas o těžší izotopy během postupu vodních mas nad kontinent

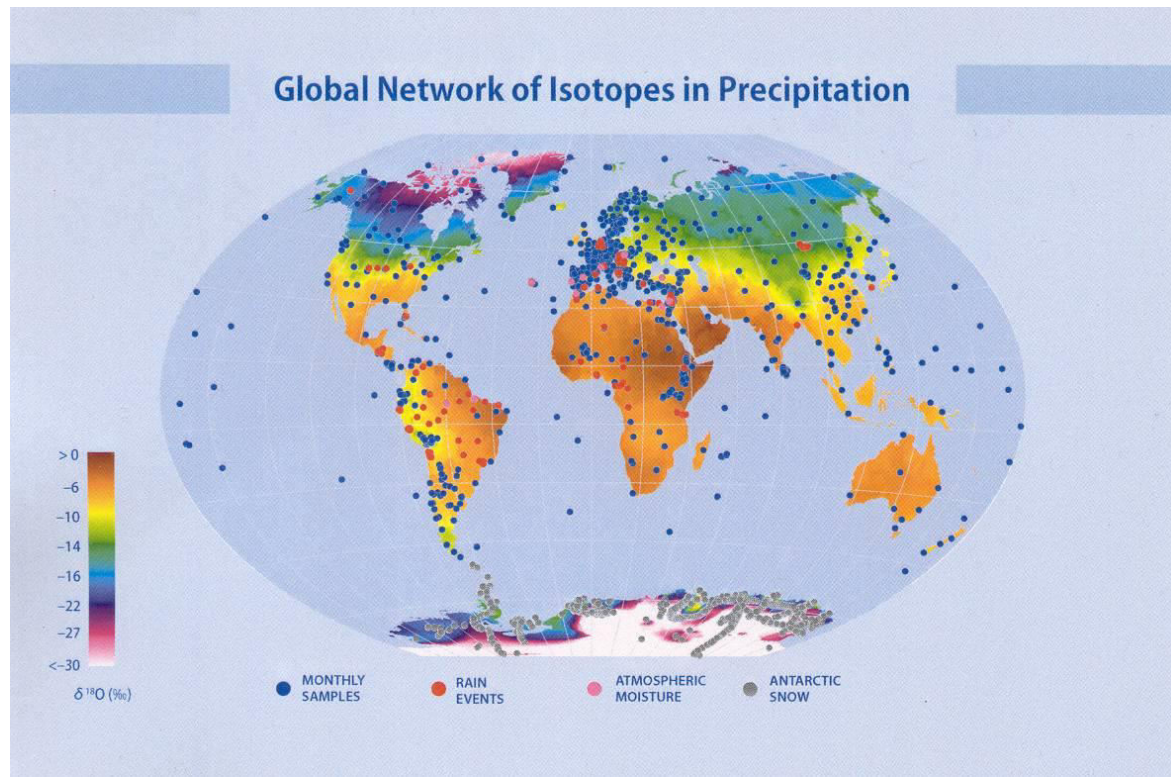


Analogicky pro izotopy vodíku ^1H a ^2H

Koncentrace stabilních izotopů vody v hydrologickém cyklu závisí na:

- vzdálenosti od moře
- nadmořské výšce a zeměpisné šířce lokality
- teplotě atmosféry formující srážky (frontální déšť, lokální bouřka)

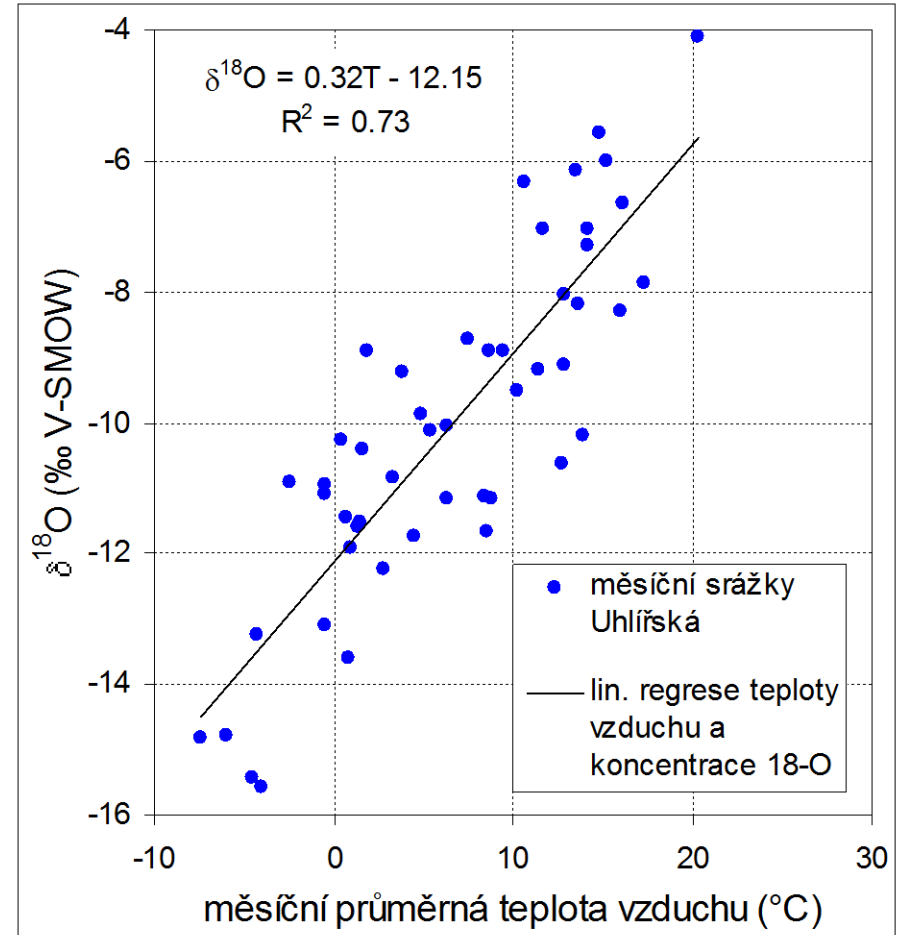
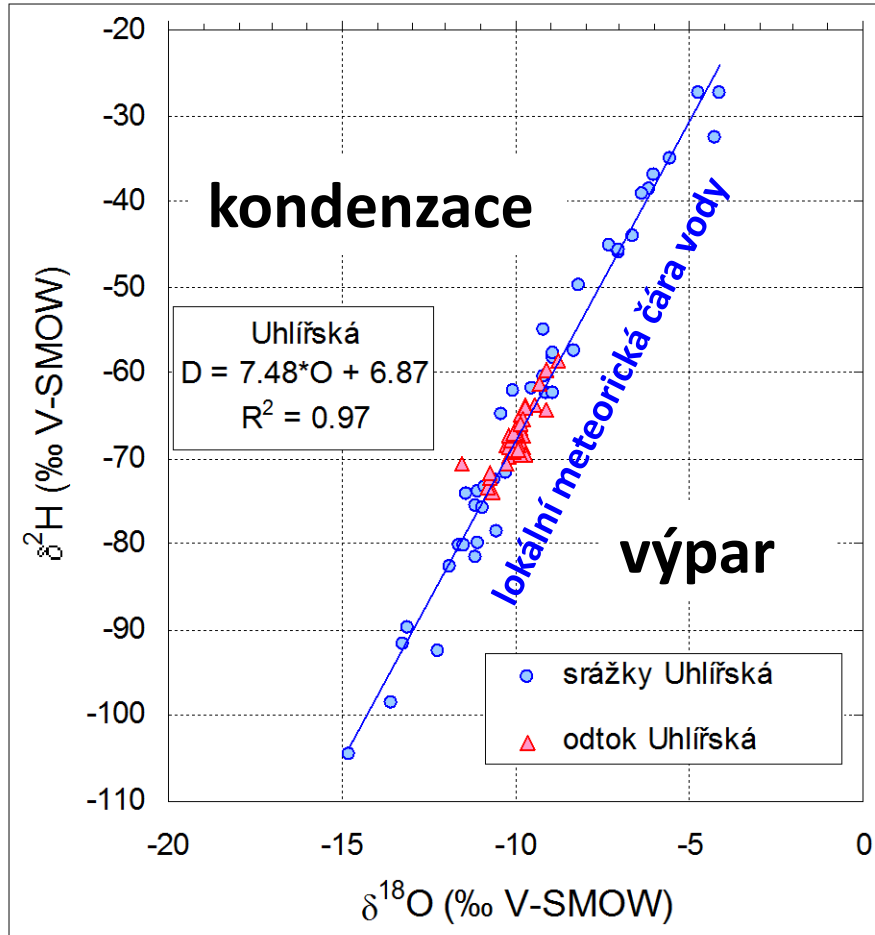
GNIP – globální síť izotopů ve srážkách
(MAAE, Vídeň)



Stabilní izotopy vody v hydrologii

- stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí
- určení podílu “nové” (srážkové) a “staré” (půdní a podzemní) vody v odtoku
- procesy proudění v půdním profilu a zvodni
- možné odlišení původů vod: splašková a dešťová voda v kanalizaci, průsak hrází vs. podzemní voda
- procesy tání sněhu
- kvantifikace výparu
- odlišení současných a starých podzemních vod
- studium vývoje klimatu (vrtná jádra z ledovců)
- celková hydrologická bilance

Vztah $\delta^2\text{H}$ a $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkové vodě a odtoku a vztah k teplotě prostředí



Izotopová separace složek odtoku

$$R_s = \frac{Q_s}{Q_t} = \frac{c_t - c_n}{c_s - c_n}$$

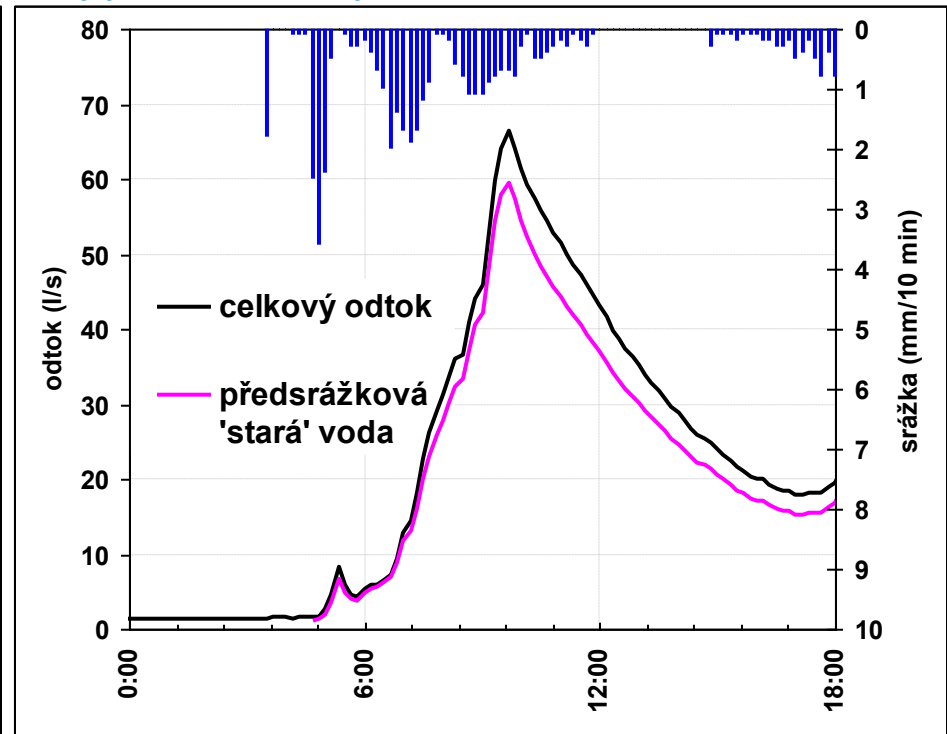
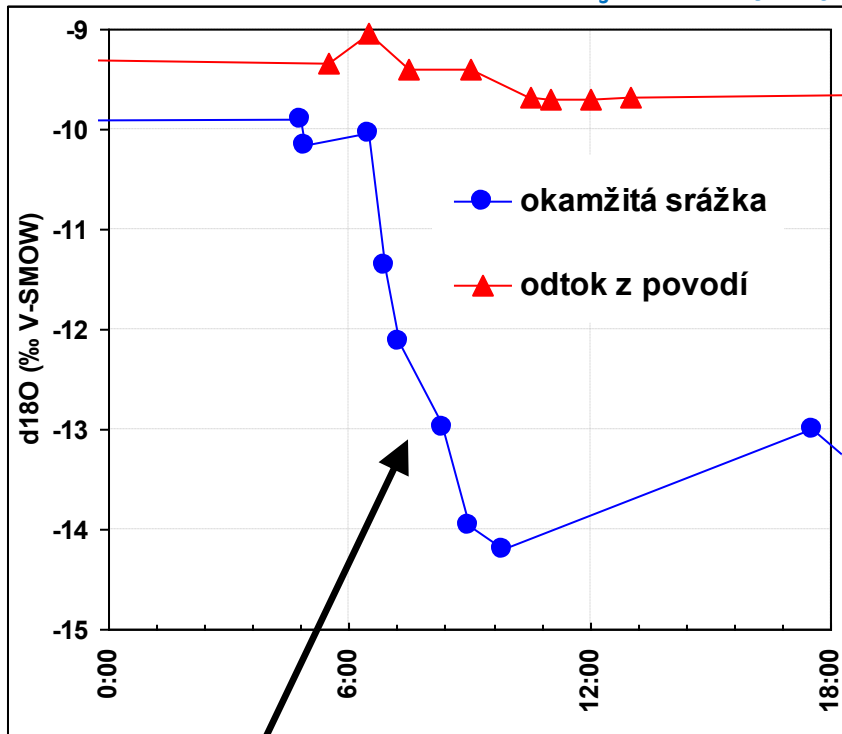
Q_t celkový odtok, Q_s odtok "staré" vody, Q_n odtok "nové" vody

c_t celkový obsah izotopu v odtoku

c_s obsah izotopu ve staré vodě (odtok před epizodou nebo podzemní či půdní voda)

c_n koncentrace izotopu ve srážce

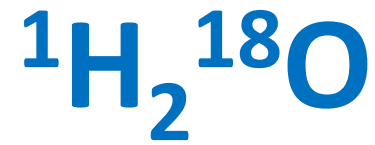
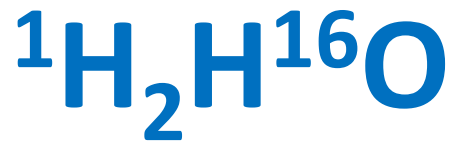
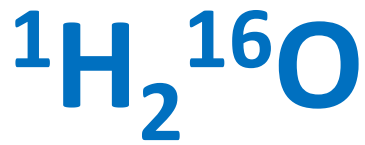
R_s okamžitý objemový podíl staré vody na odtoku



srážko-odtoková událost na meliorovaném zemědělském povodí Kopaninského toku, Č-M vysočina, 7.8.2010

Vypršení – pokles koncentrace těžších izotopů O (i H) během frontální srážky

Frakcionace izotopů O a H nestejněměrné vypařování

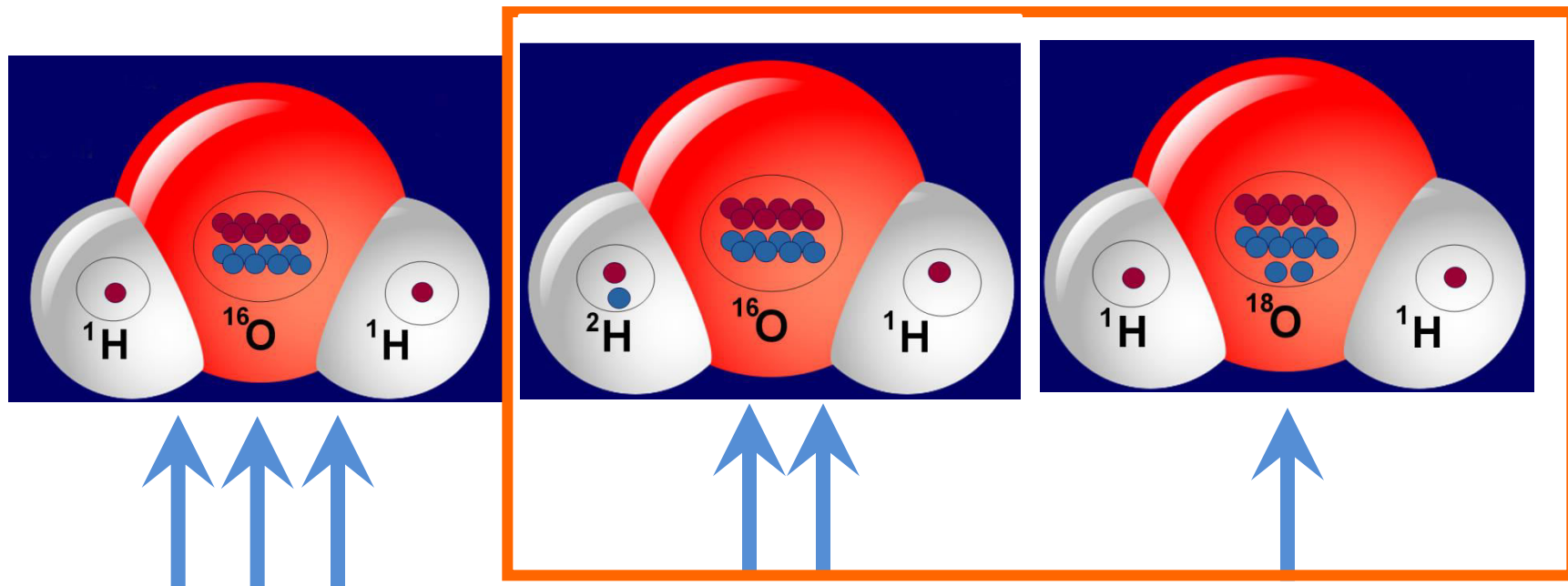


hmotnost

18

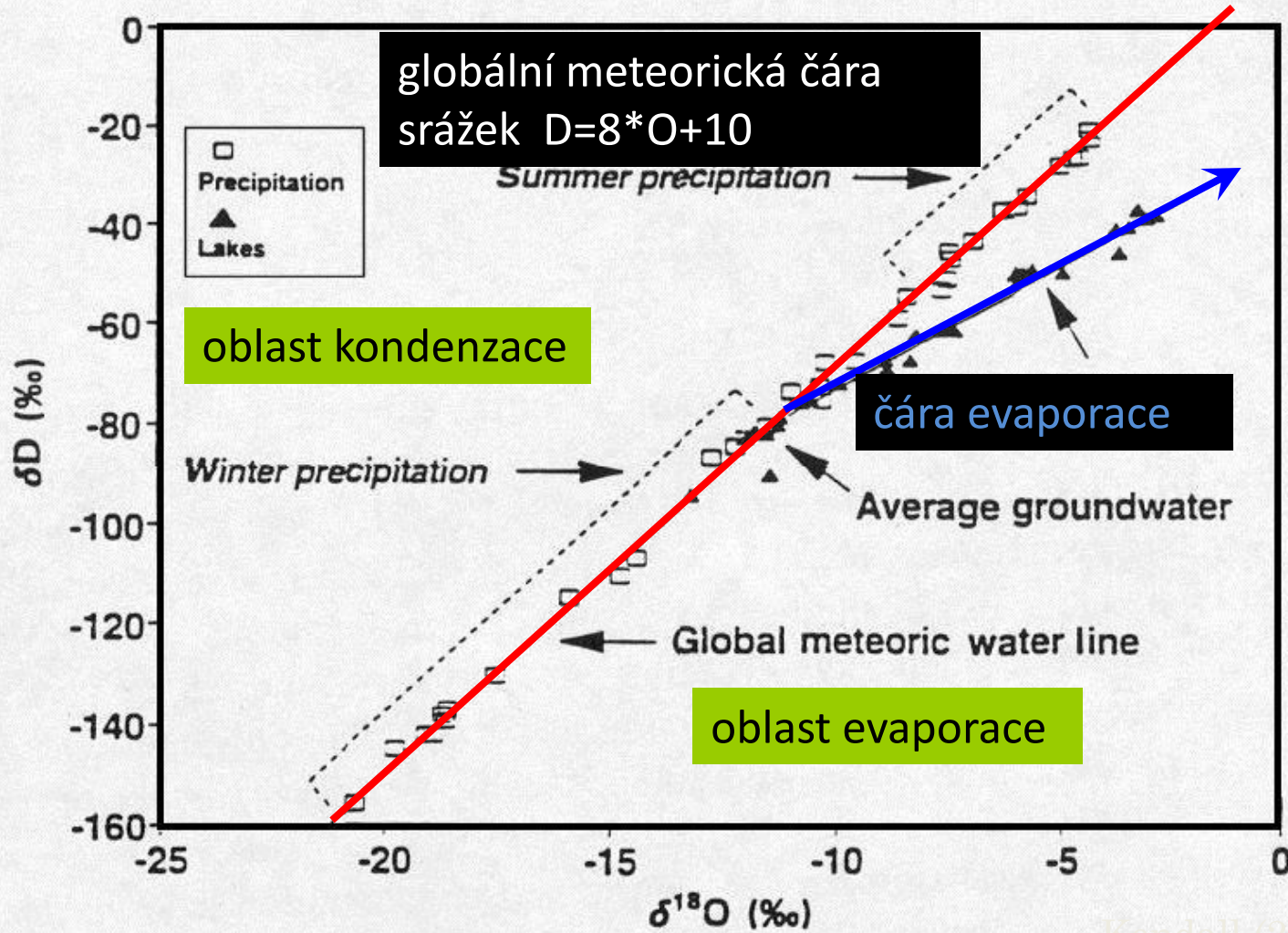
19

20

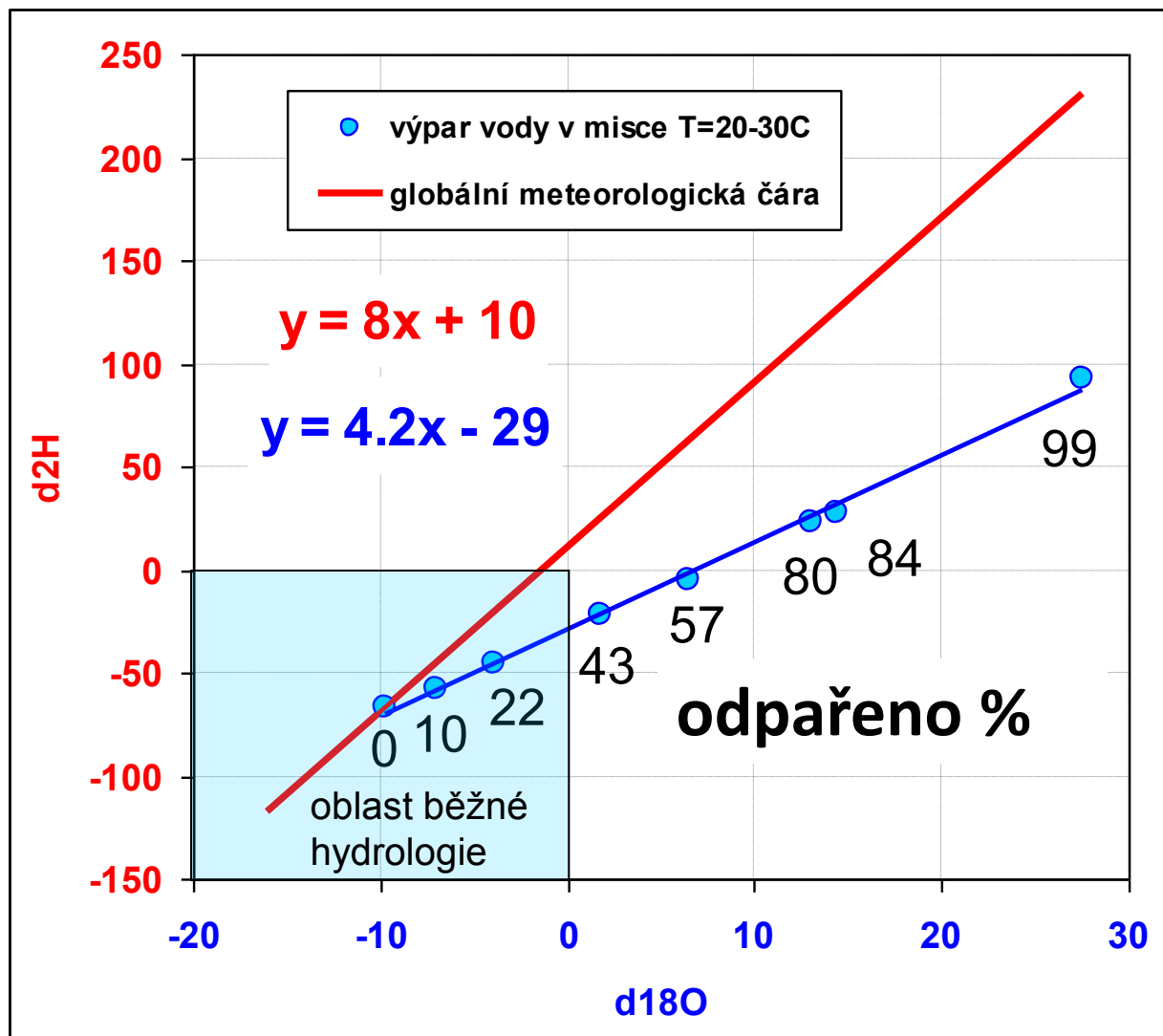


“náchylnost” k výparu

Frakcionace izotopů : O/H diagram



$^2\text{H}/^{18}\text{O}$ výparný experiment s vodou v misce



Voda volně odpařovaná, výrazná frakcionace izotopů O a H
Okamžitá kontrola měřeného vzorku

Využití deuteriového přebytku na rozkrytí zdrojů vod v povodí Jizery

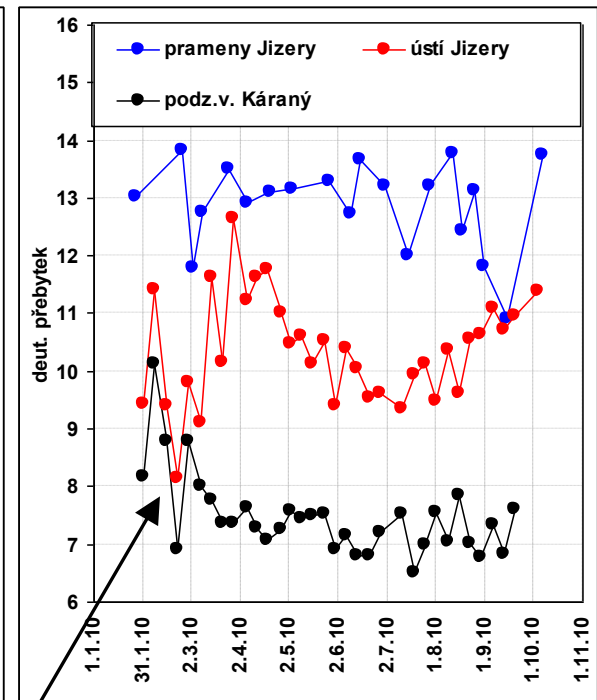
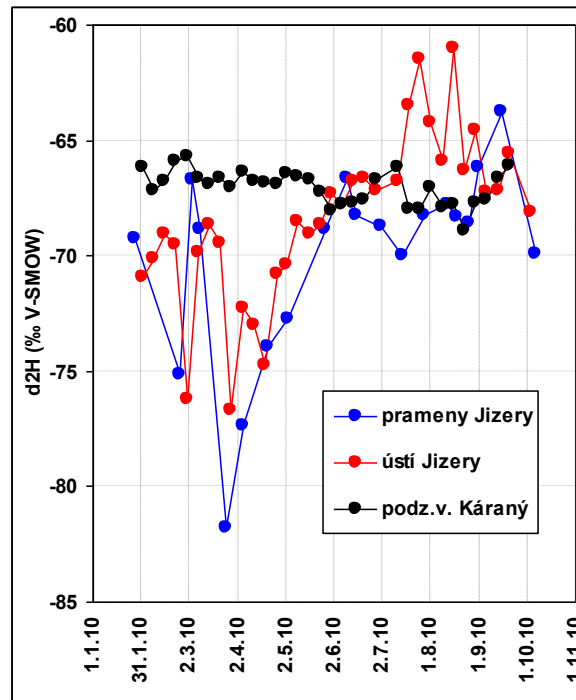
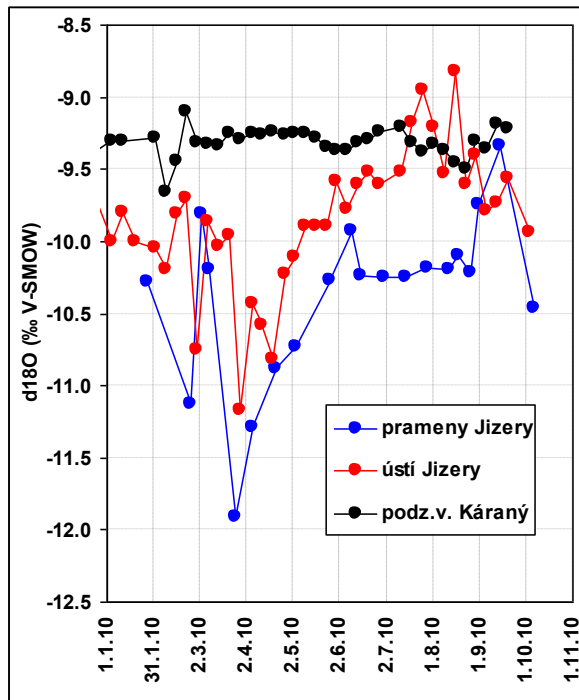
$$d = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$$

d .. deuteriový přebytek (-)

$\delta^{18}\text{O}$

$\delta^2\text{H}$

deut. přebytek



mísení vod Jizery a podzemní vody při čerpání pzv

Stanovení obsahu stabilních izotopů vody

Hmotnostní spektrometrie (IRMS)

velmi přesná, pro všechny izotopy, oddělené měření O a H, finančně náročná, složitá příprava vzorků, speciálně vyškolení pracovníci, přibližně od 1950

Laserová spektroskopie (ICOS/CRDS)

dostatečně přesná, pro některé izotopy, současné a rychlé měření O a H, 10x levnější než IRMS, nenáročná příprava vzorků, běžná obsluha, komerčně dostupná metoda od 2007

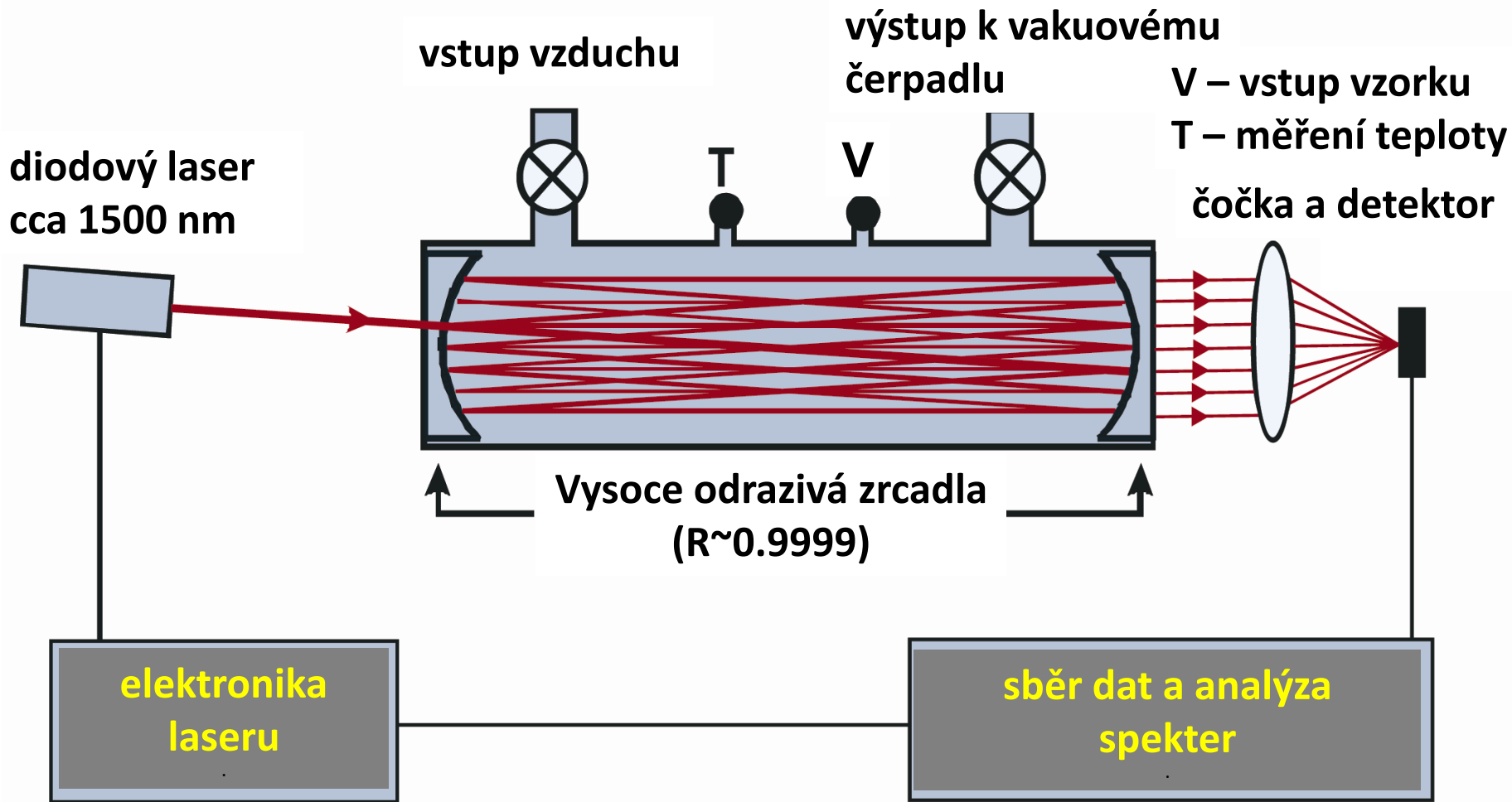
Laboratoř ČVUT, Fsv, K143



Schéma přístroje mimo-osého laseru

Integrated Cavity Output Spectroscopy (ICOS)

Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)



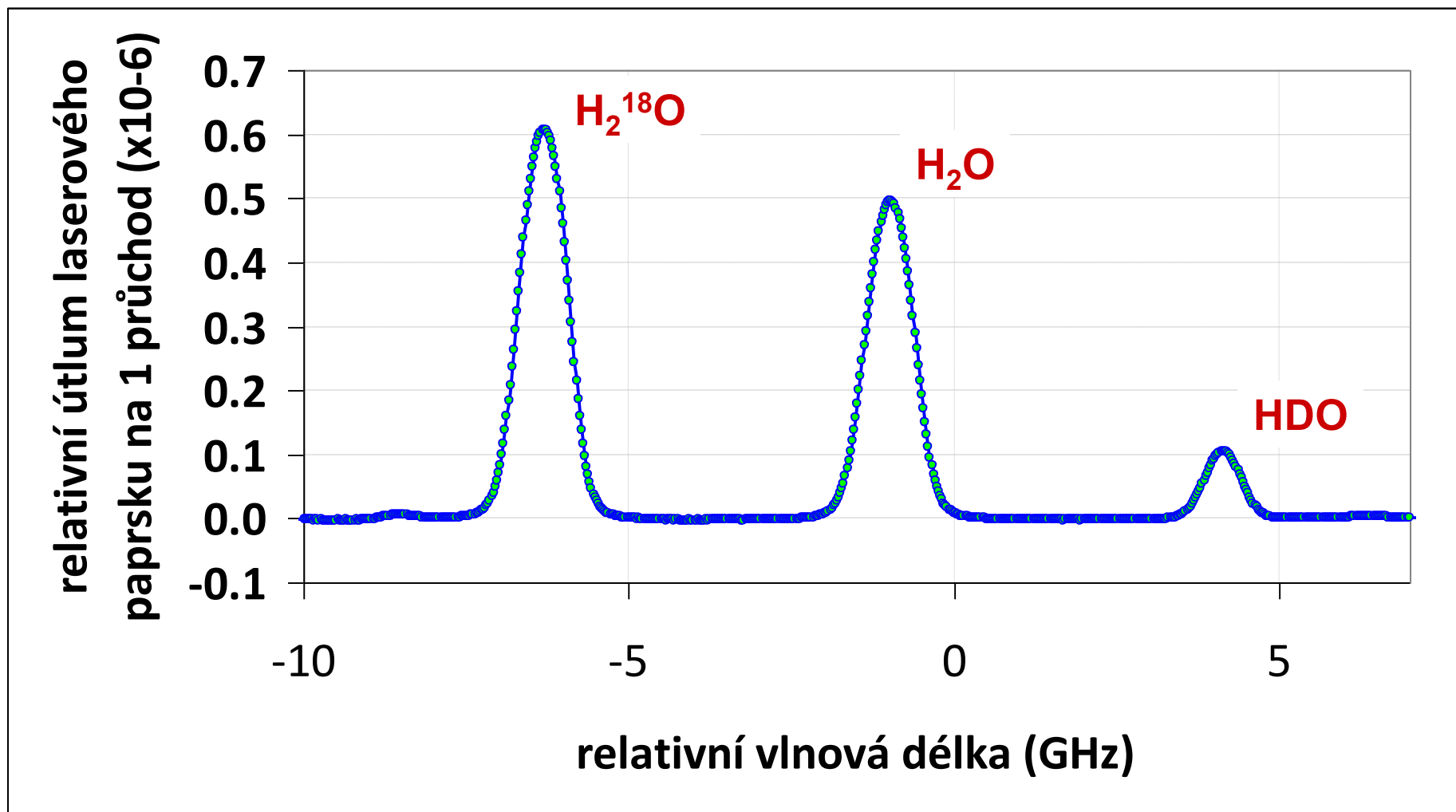
vzorek vody – cca 500 nl je vypařen a převeden do komory laseru
vodní pára 3×10^{16} molekul/ml, absolutní tlak max. 5 mBar (0.5 kPa)

Beerův zákon absorpce

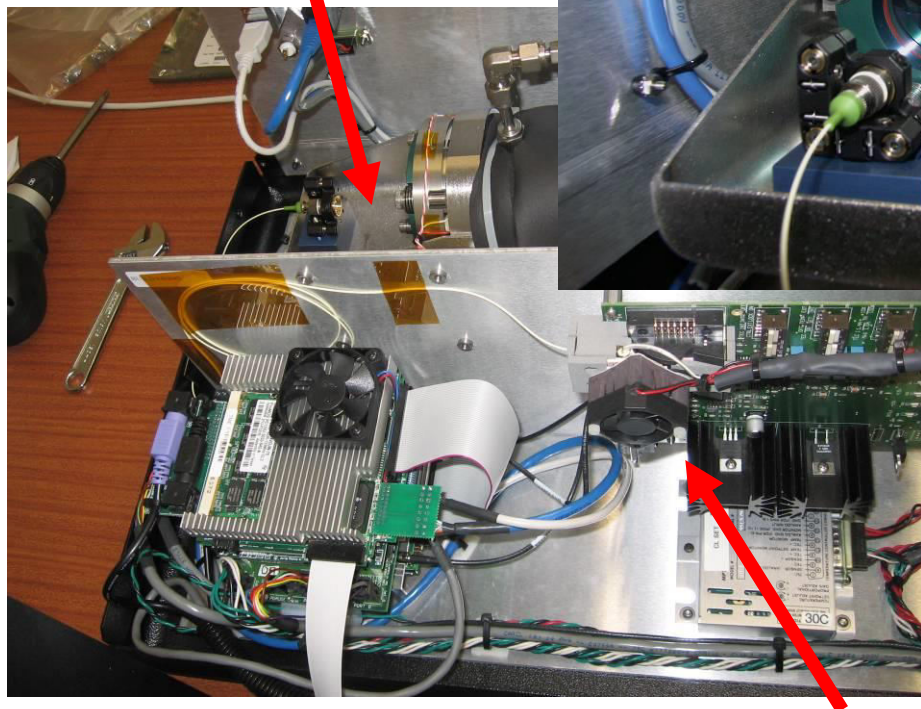
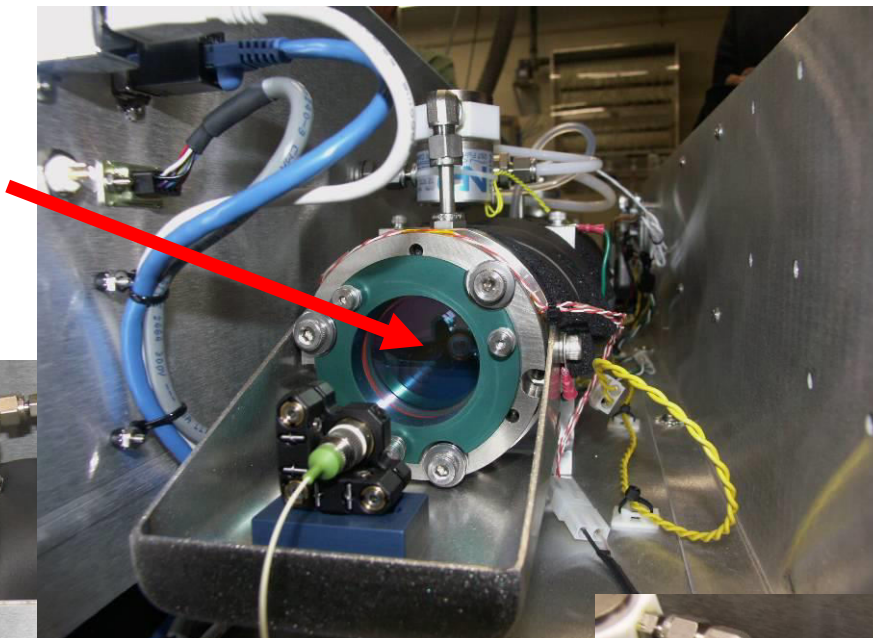
$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

I - výstupní intenzita, I_0 - vstupní intenzita, μ - koef. útlumu - dle tlaku a koncentrace izotopů, d - délka trasy laserového paprsku

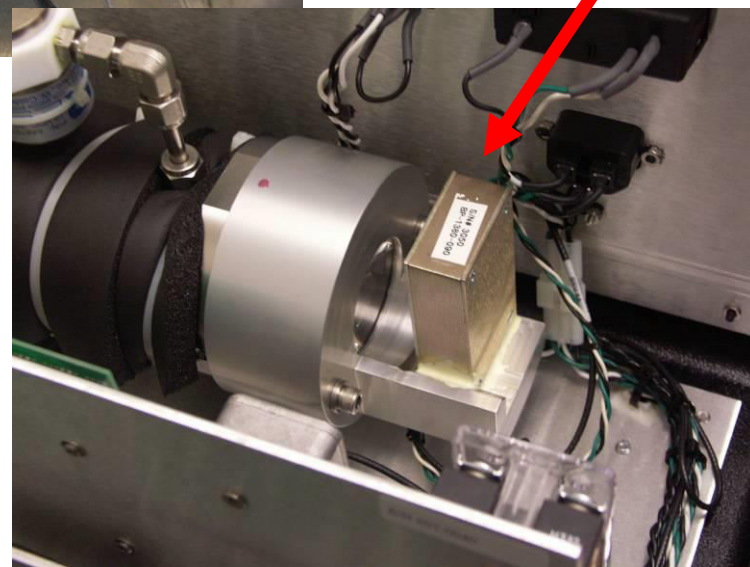
vzor spektrogramu



vstup světla
do komory

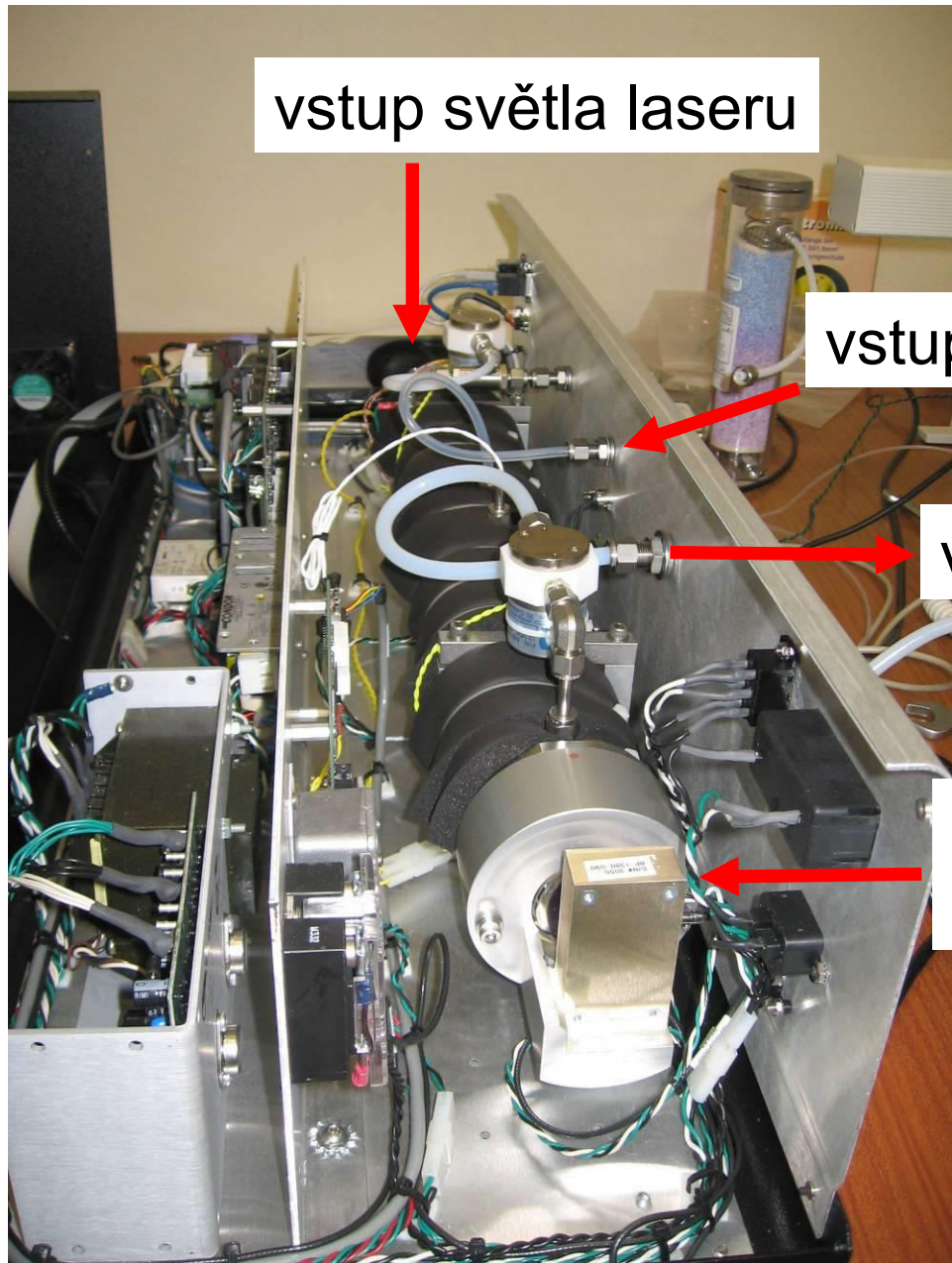


vyhodnocovací počítač



detektor

dle IAEA



vstup světla laseru

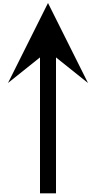
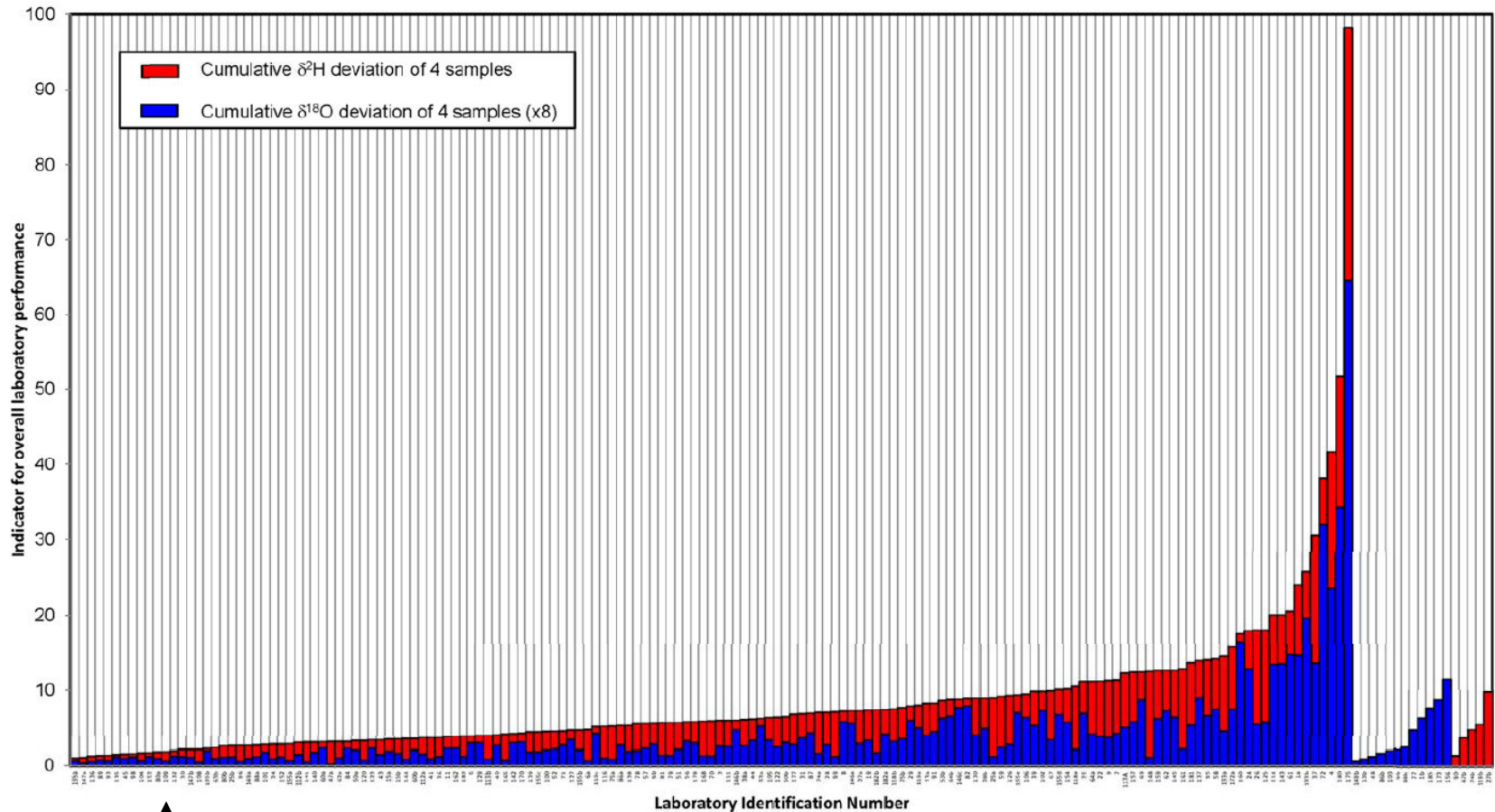
vstup vzorku

výstup vzorku

detektor
intenzity světla

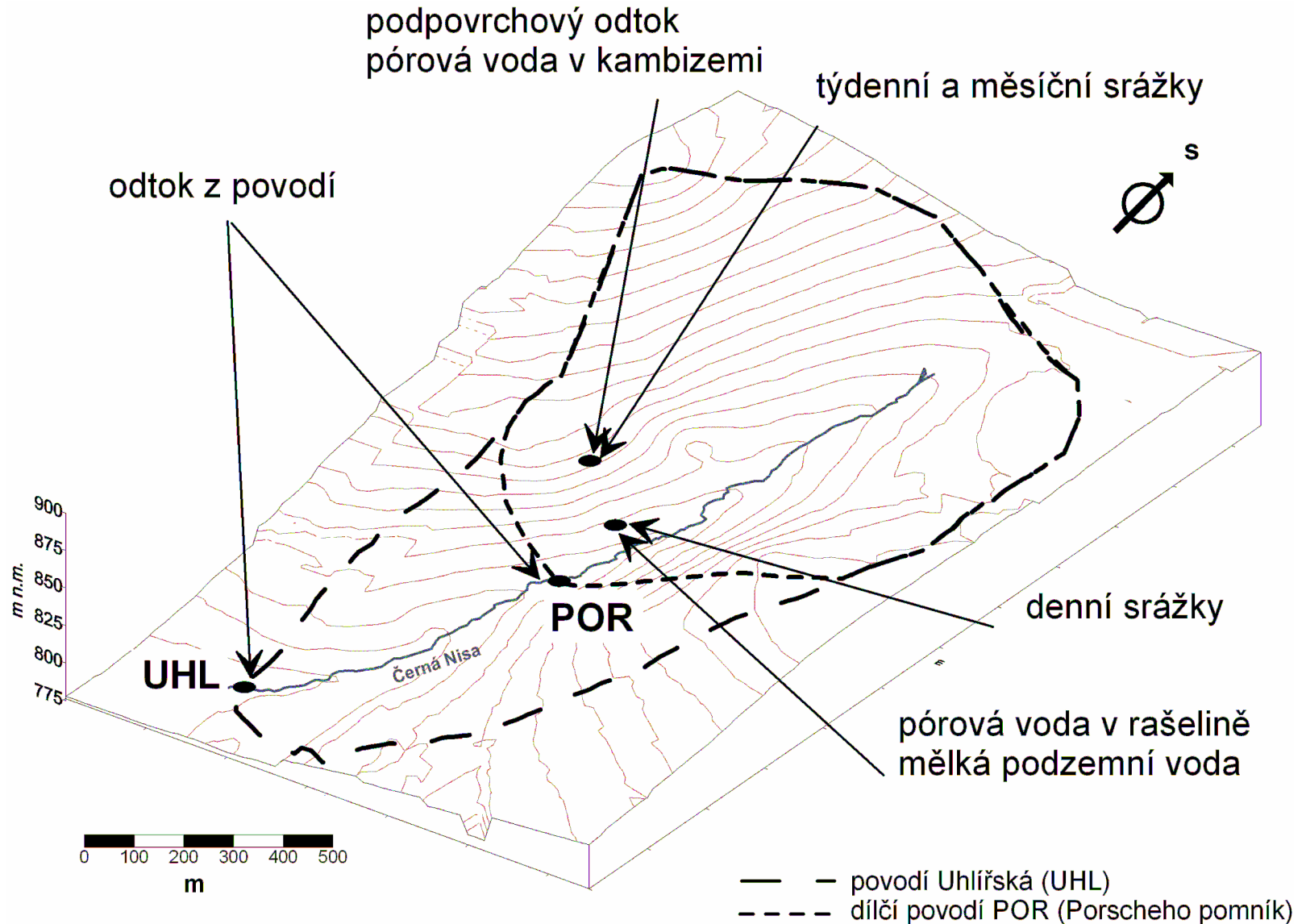
dle IAEA

Výsledek srovnávacího testu MAAE celková odchylka od známých hodnot

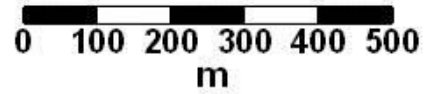


ČVUT v Praze, LWIA (laserspec)











Vzorkování vod v povodí

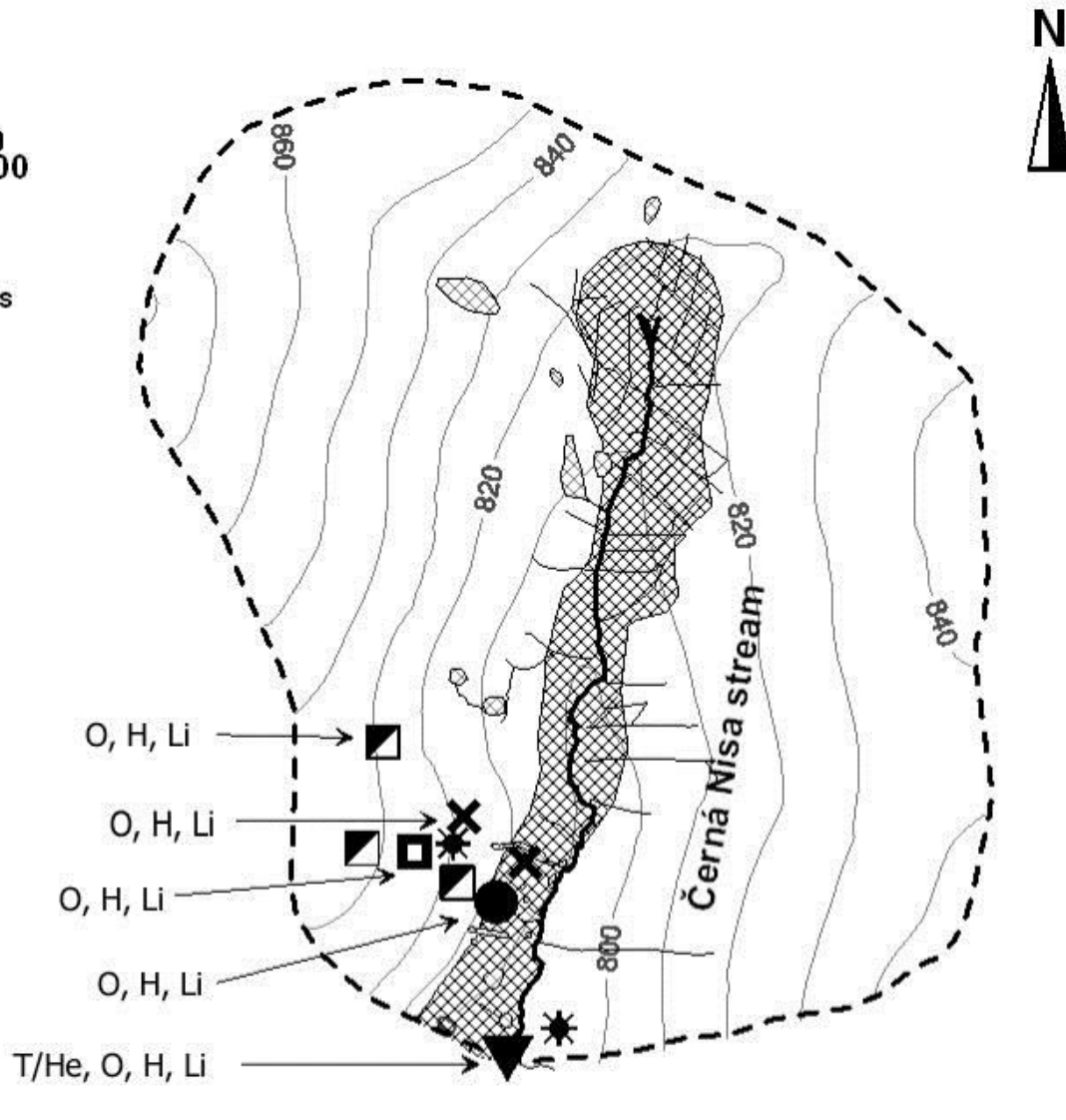


Dílčí povodí k povodí Uhlířská, 1.18 km²



numbers on countour lines
indicate altitude (m a.s.l)

-  Černá Nisa stream
-  tributaries
-  wetlands
-  catchment divide
-  raingauge
-  cambisol, podzol
pore water
-  precipitation
samplers
-  subsurface
trench
-  groundwater
peat water
-  gauging
station



Sběr kumulovaných měsíčních srážek – GNIP, CZ (stanice Uhlířská)



léto



zima

Denní srážky : automatický vzorkovač užitečný vzor ČVUT FSv



Vzorkování celkového odtoku na uzávěrovém profilu – dvojí frekvence (1x/den; 4x/den) dle vodního stavu



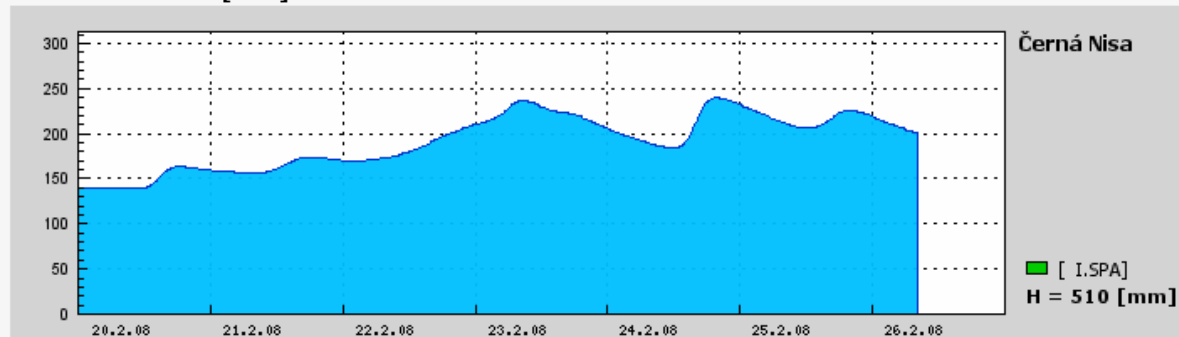
Měřicí stanice: **Horní Uhlířská** Uhlířská

UPOZORNĚNÍ: Veškerá uváděná data jsou bez právní záruky.

Poslední přenos: Út 26.02 08:16:40

Poslední data: Út 26.02 08:16:34

K1: vc CernaNisa [mm]



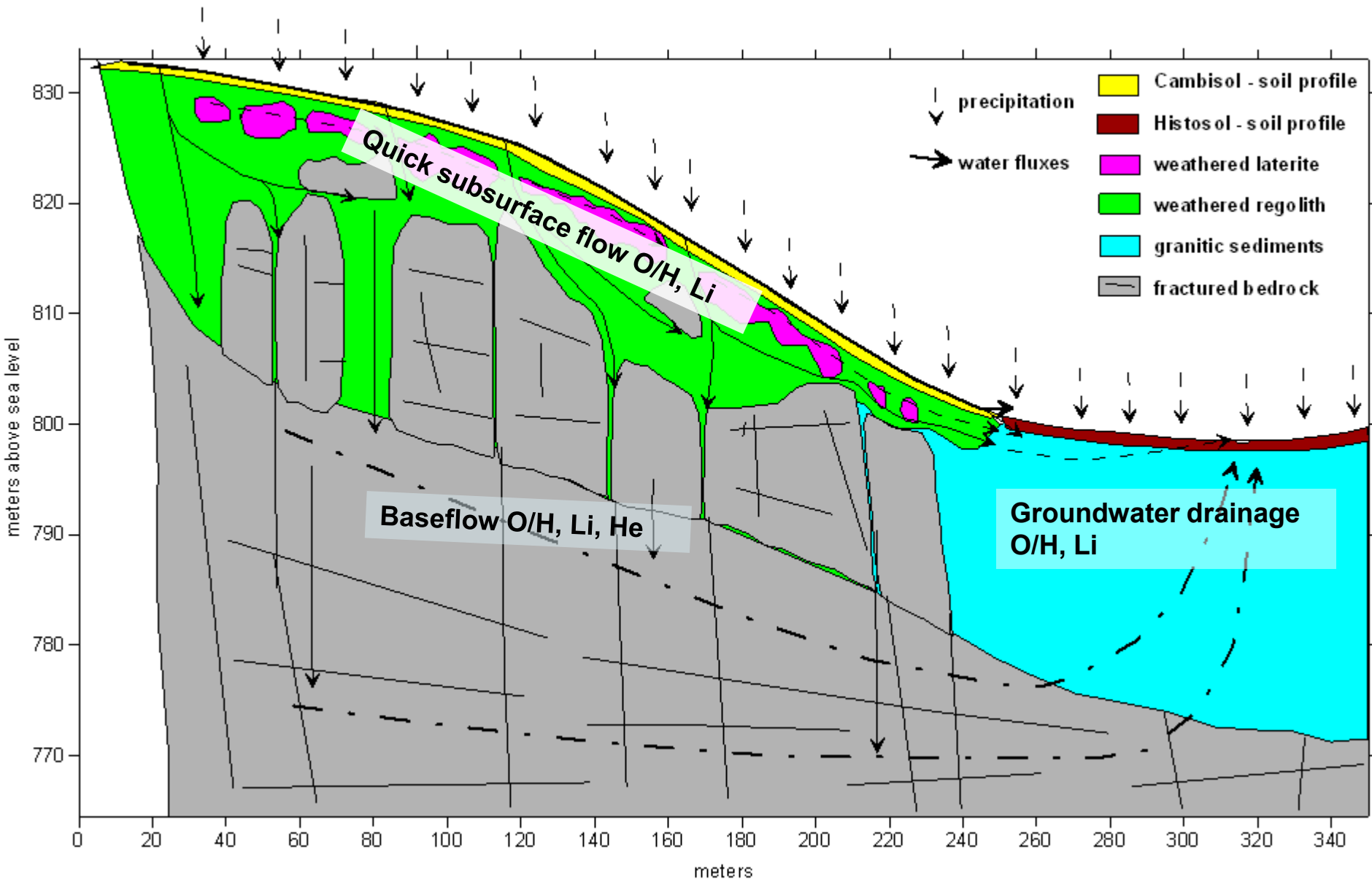
Půdní pórová voda v organozemi a kambizemi a podzemní voda v mělkých vrtech v sedimentech



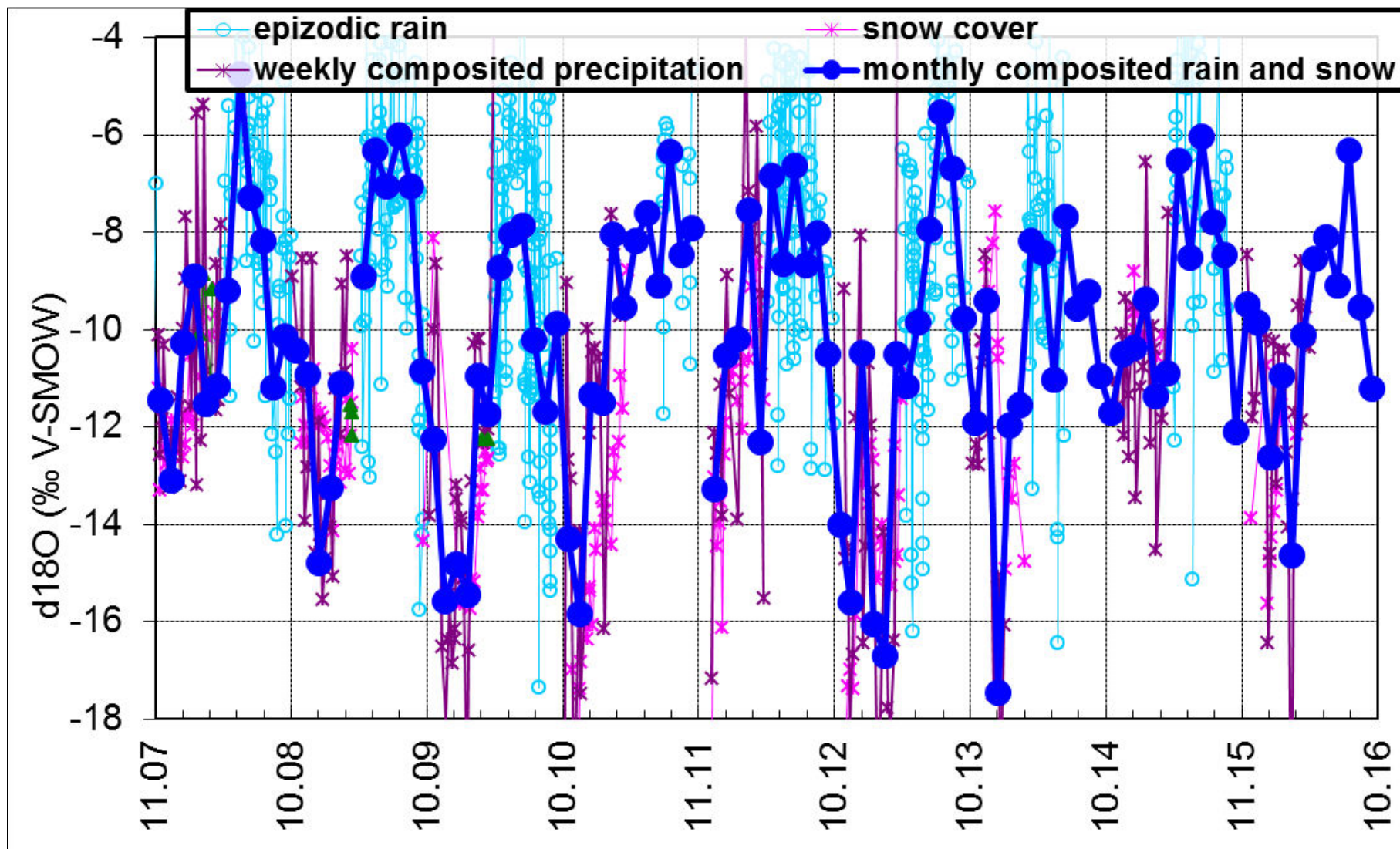
Příprava odběru půdní pórové vody (vlevo) Odběr podzemní vody (vpravo)



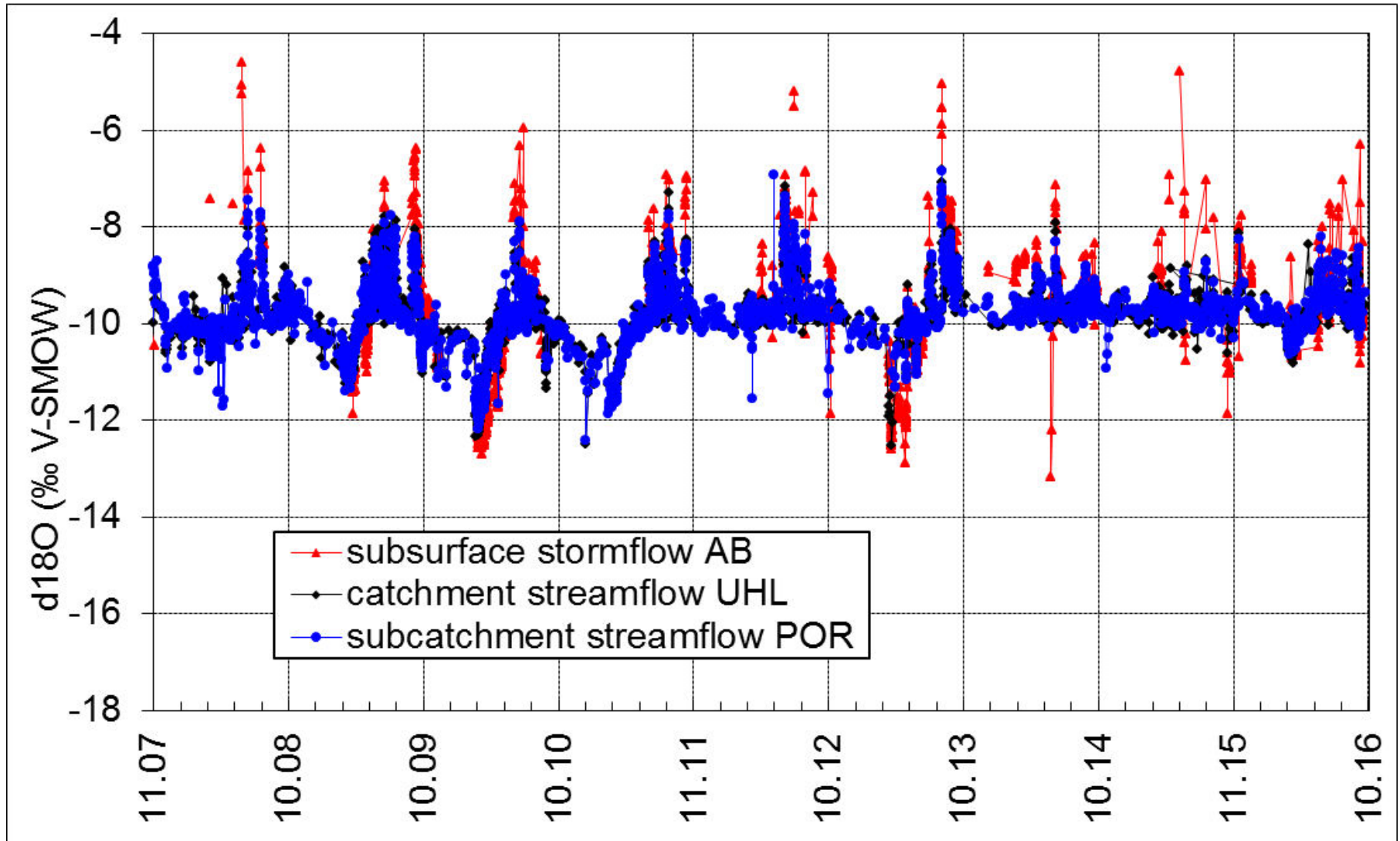
Možné cesty odtoku vody na svahu



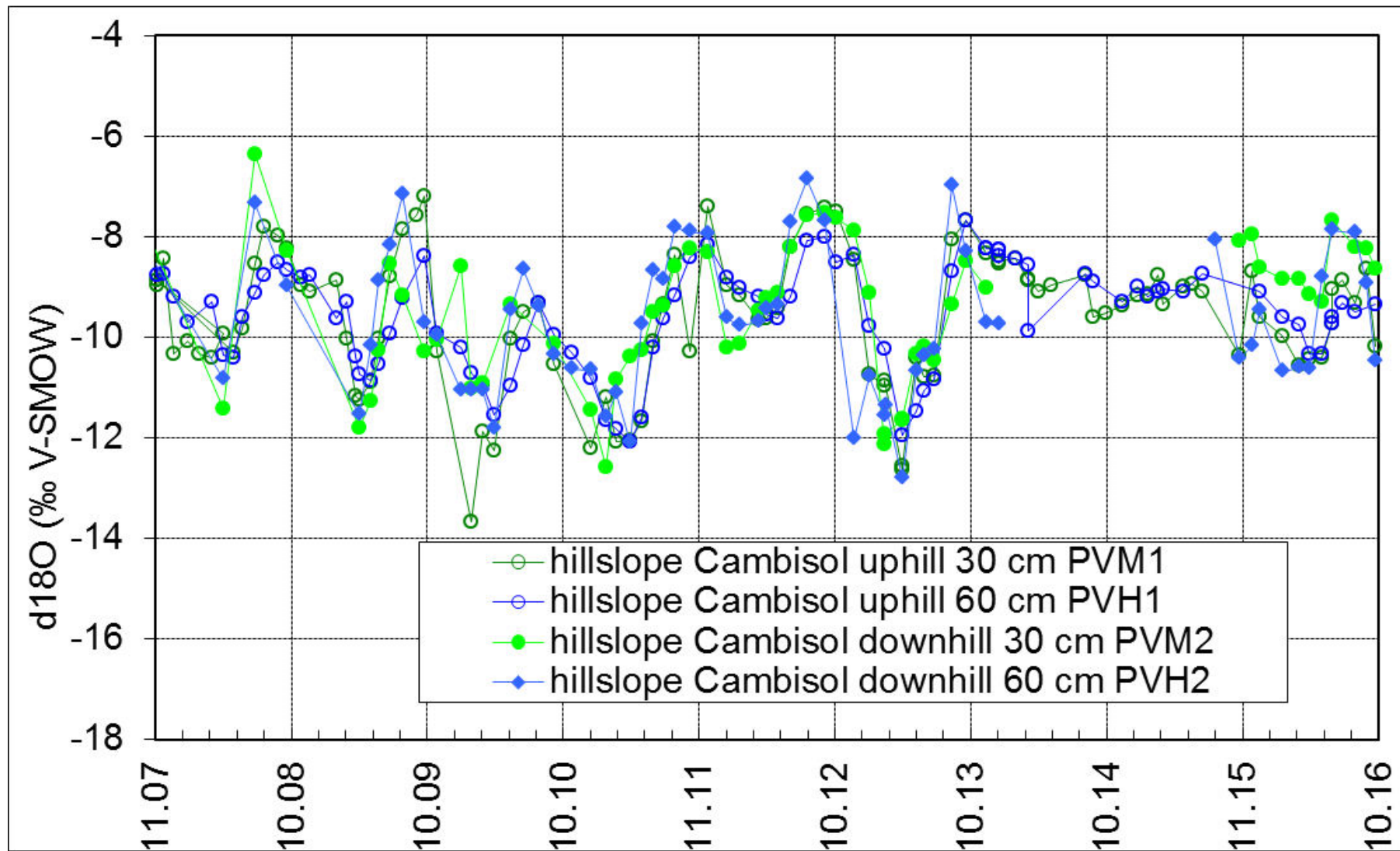
18-O v měsíční kumulované srážce



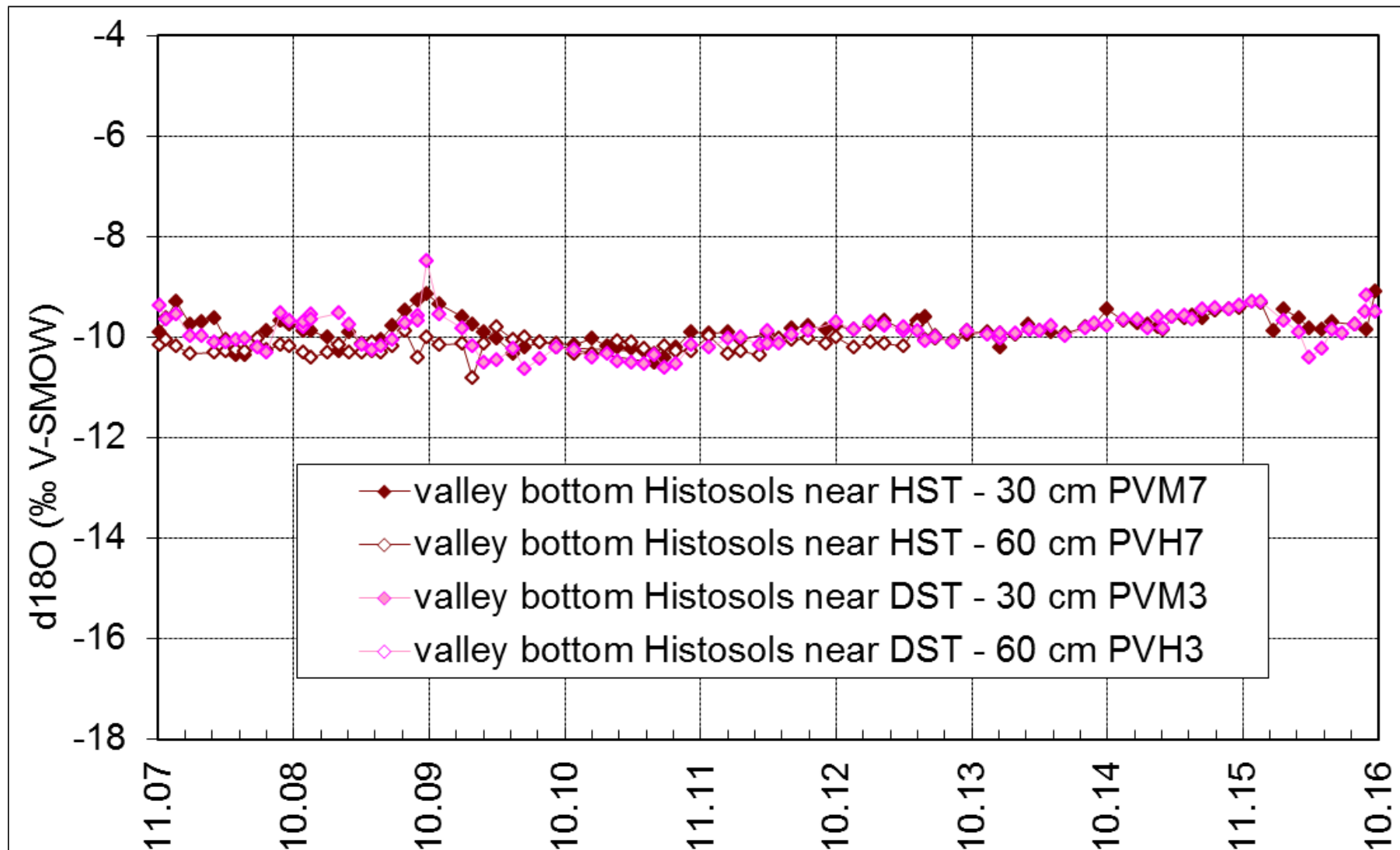
18-O v odtoku z povodí a z půdy



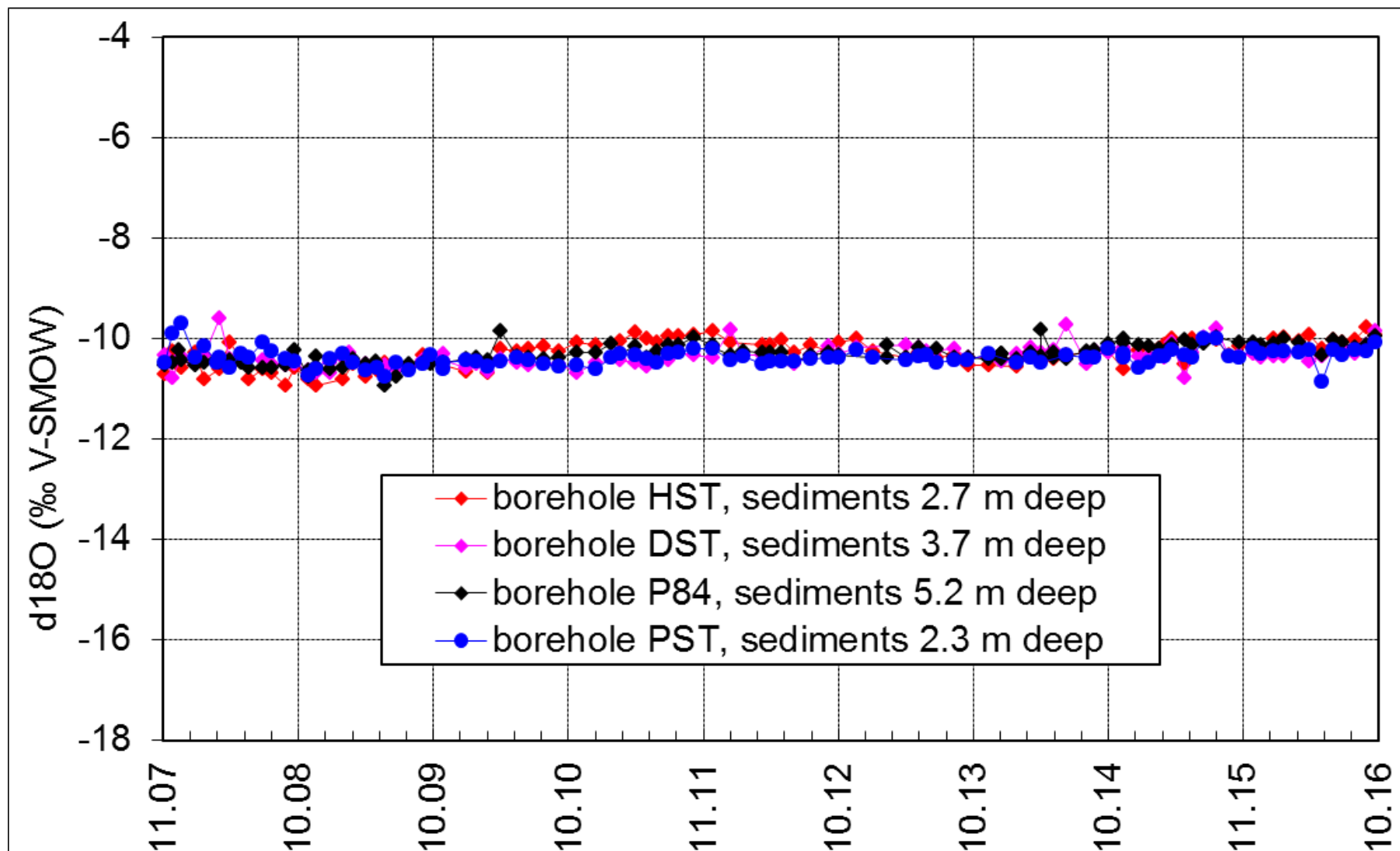
18-O v pórové půdní vodě (kambizemě, podzoly)



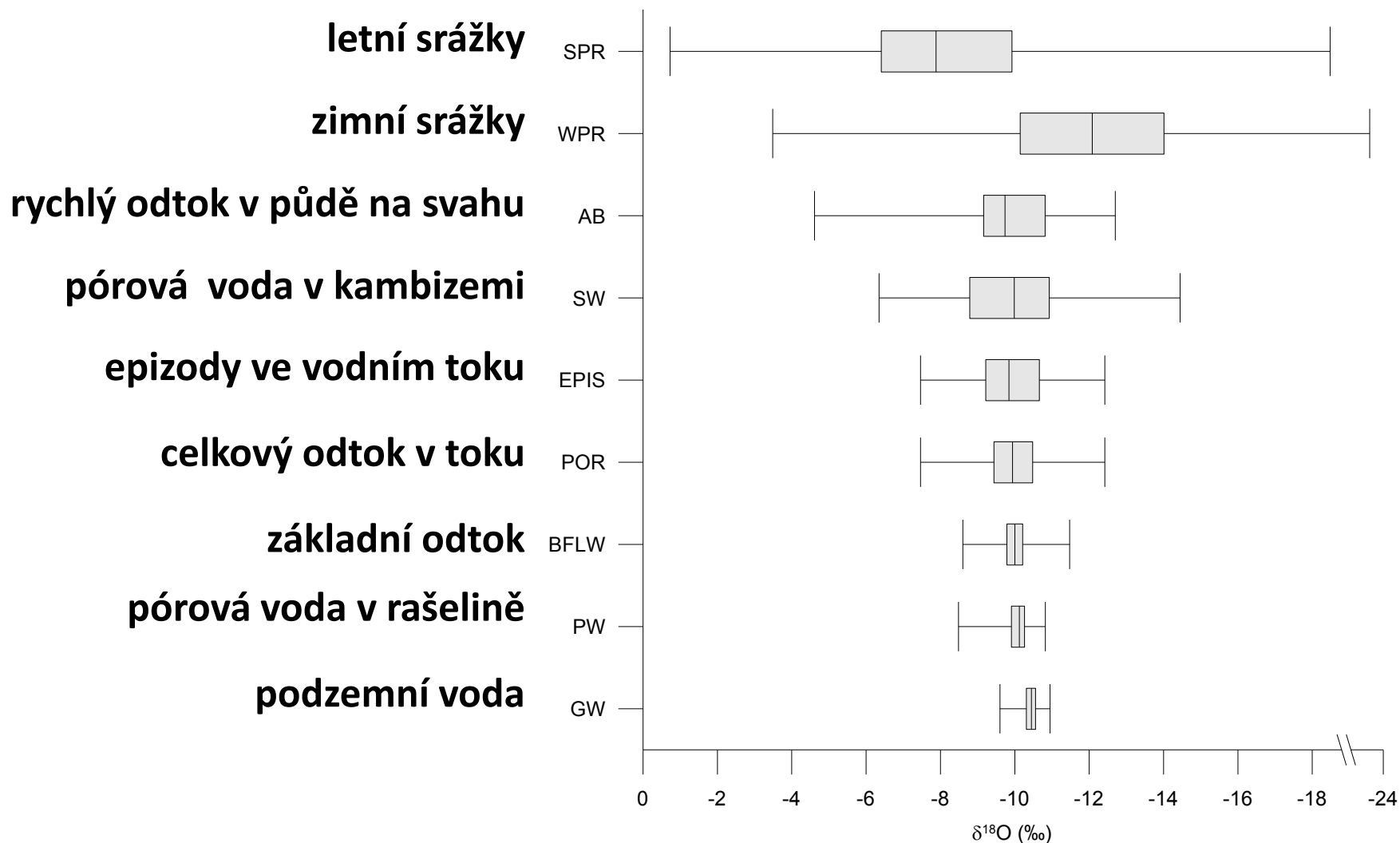
18-O v pórové půdní vodě (rašeliny)



18-O v mělké podzemní vodě

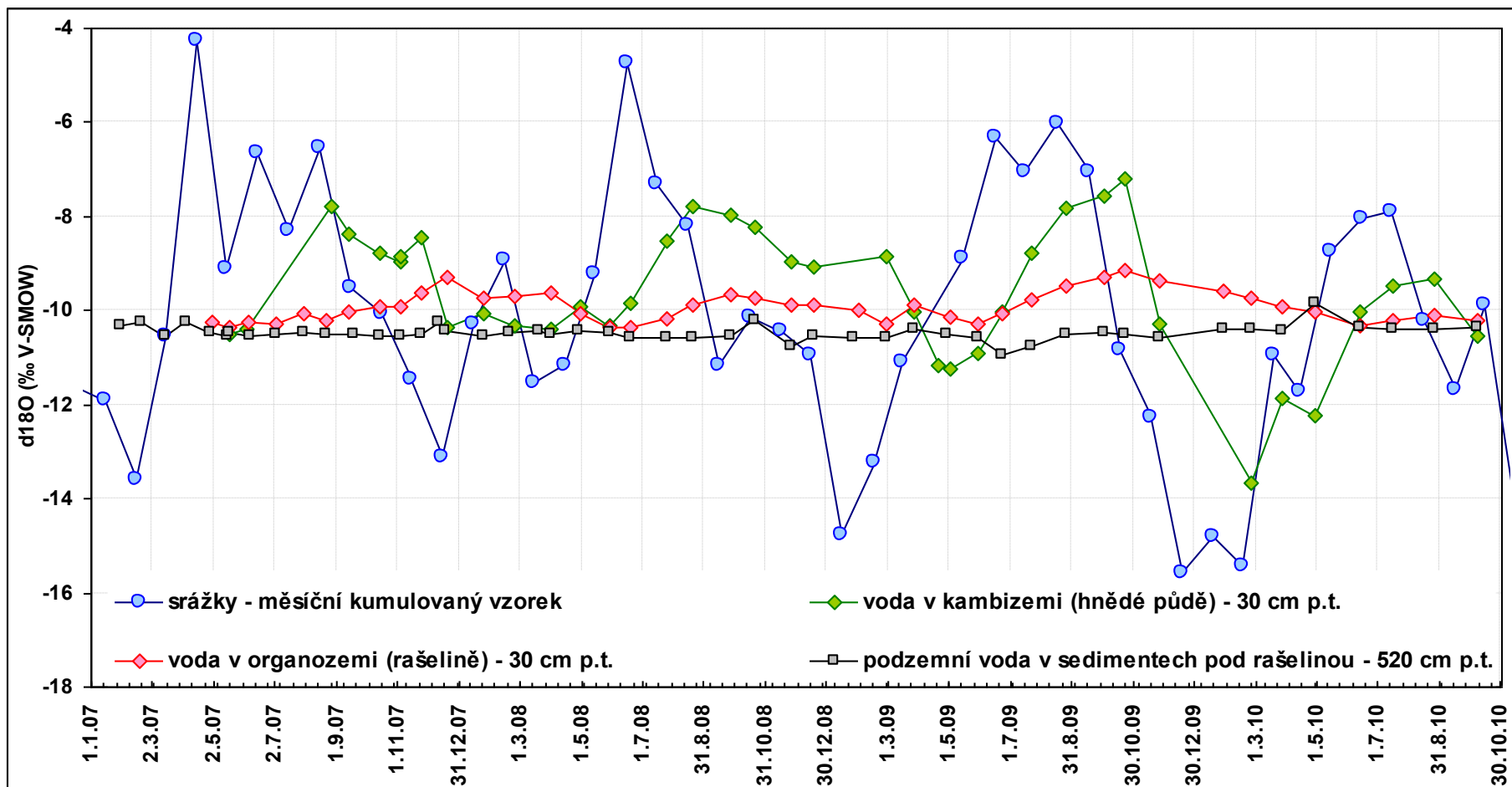


Postupné utlumení koncentrací ^{18}O ve vodách v povodí

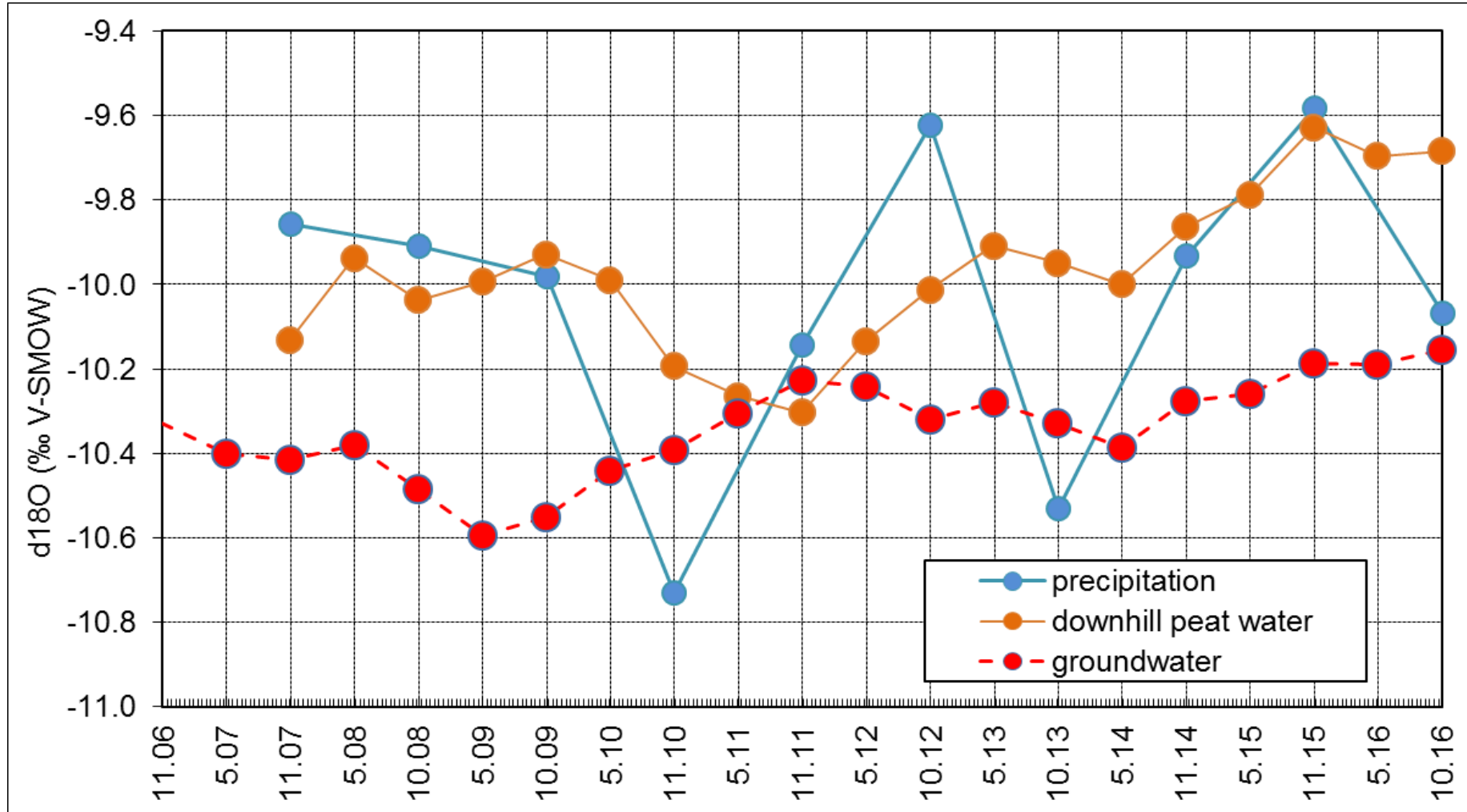


Sezóní mísení vod v půdním profilu a ve zvodni

(dynamika svahové půdní vody, rašeliniště a podzemní vody)
rašeliniště vznikající kombinací vývěru podzemní vody a dotací ze srážek

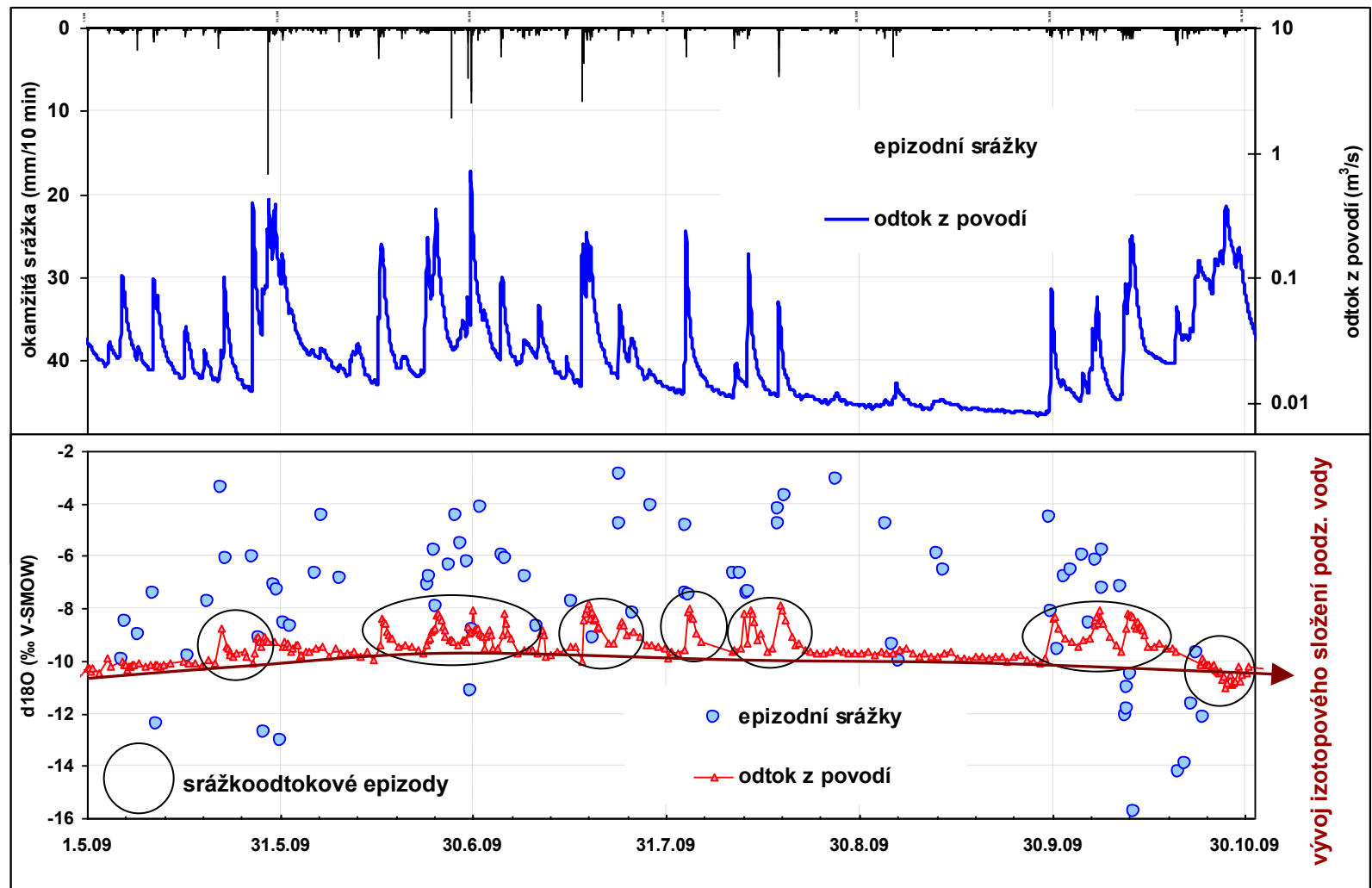


Izotopové složení v koncových členech



Odezva celkového odtoku na srážku

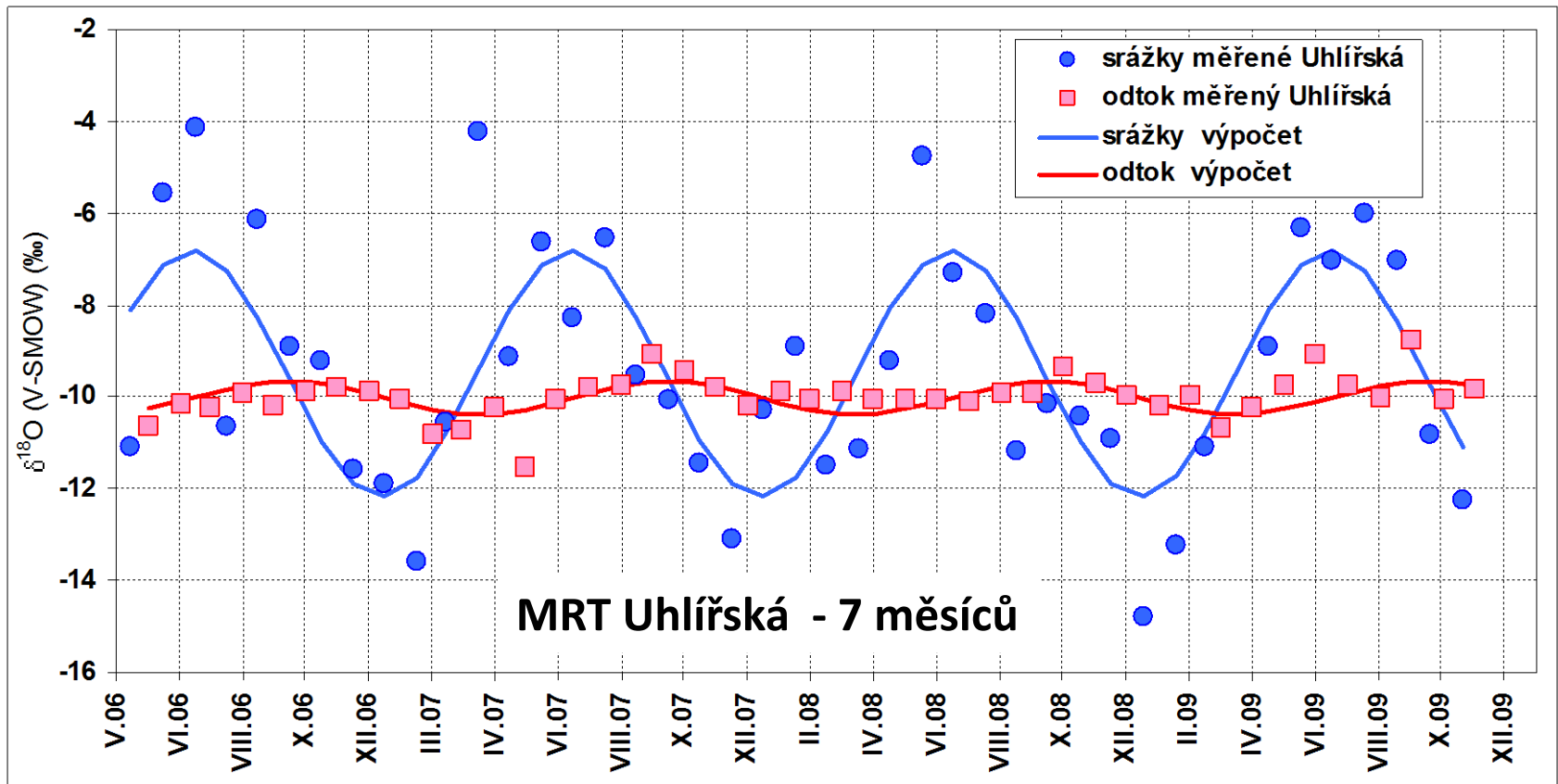
dominantní efekt tlakově drénované podzemní a půdní vody mísící se s odtékající srážkovou vodou



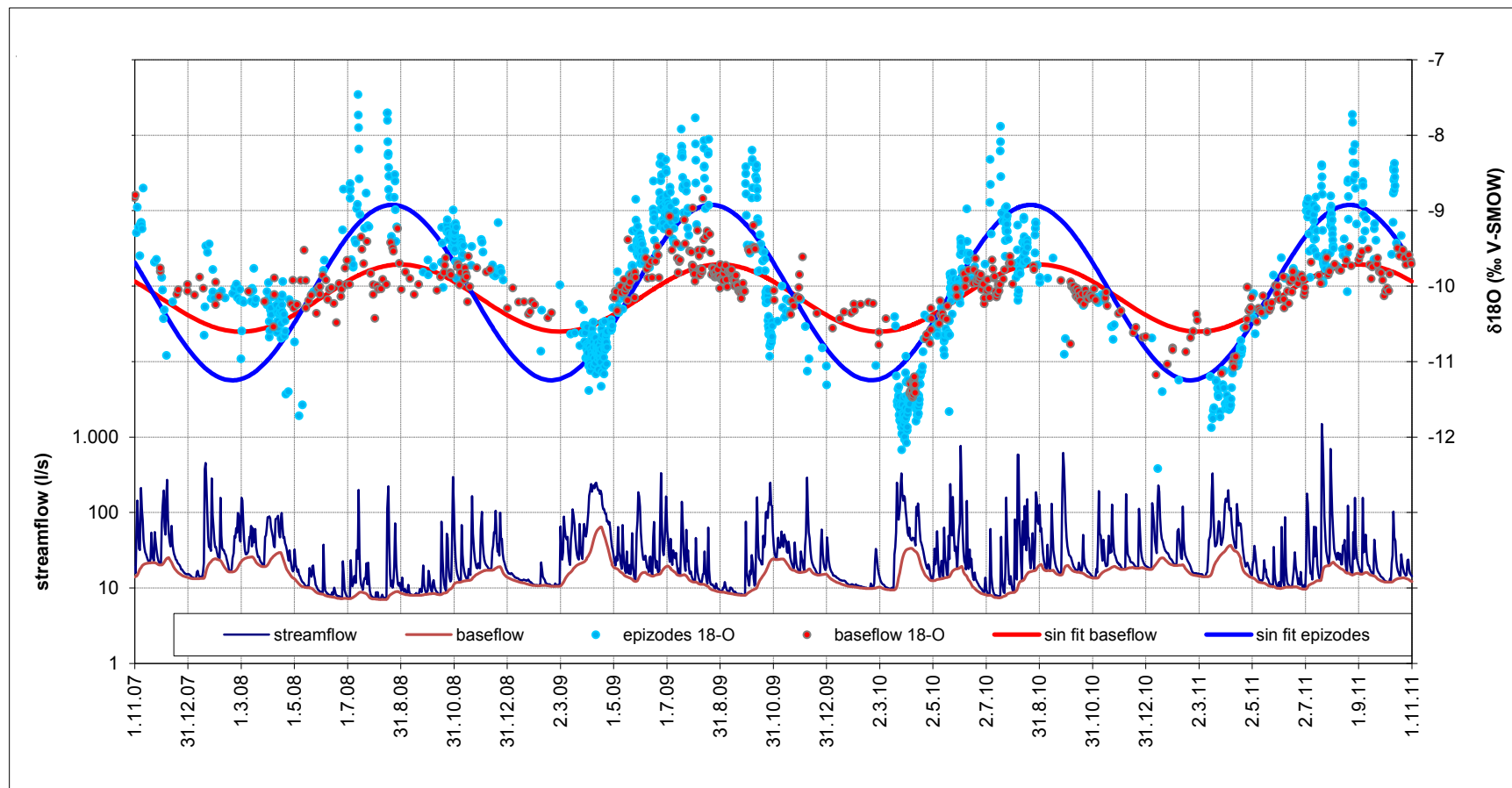
Využití izotopových dat pro průměrné doby zdržení vody v povodí (MRT) – model lineární nádrže

$$MRT = \left(\frac{1}{b'} \right) \left[\left(\frac{A_p}{A} \right)^2 - 1 \right]^{0.5}$$

Utlumení amplitudy sinové funkce
vstupu – (srážek A_p) a výstupu (odtoku A)
konverzní faktor ($1/b'$) = $6/\pi$ (měsíc)



Doby zdržení základního a epizodního odtoku



BFLOW průměrný index základního odtoku 0,673

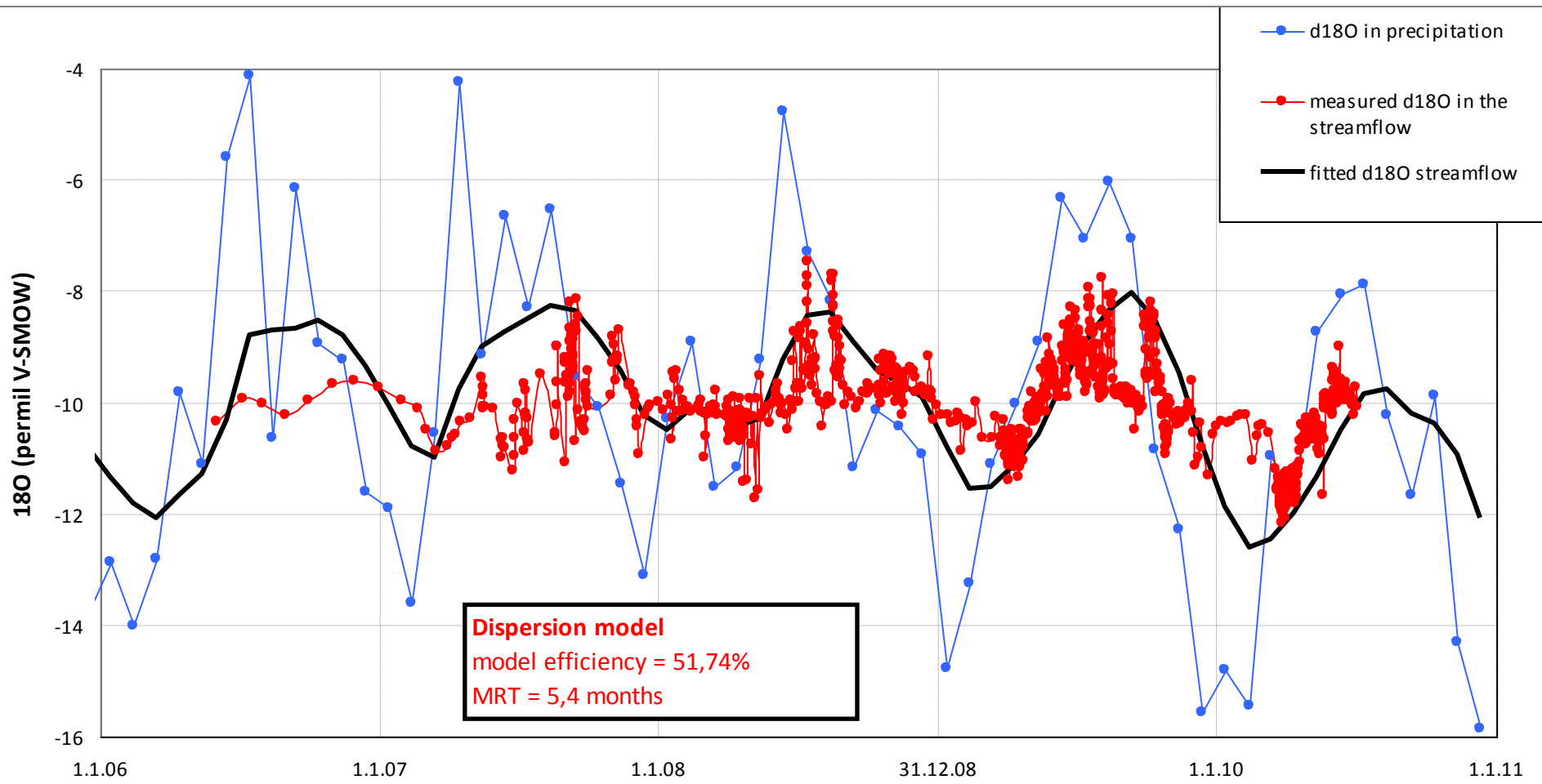
MRT doba zdržení – základní odtok 12.3 měsíce

- epizody 4.4 měsíce

Podzemní voda je hlavní složkou odtoku při letních bouřkách i tání sněhu

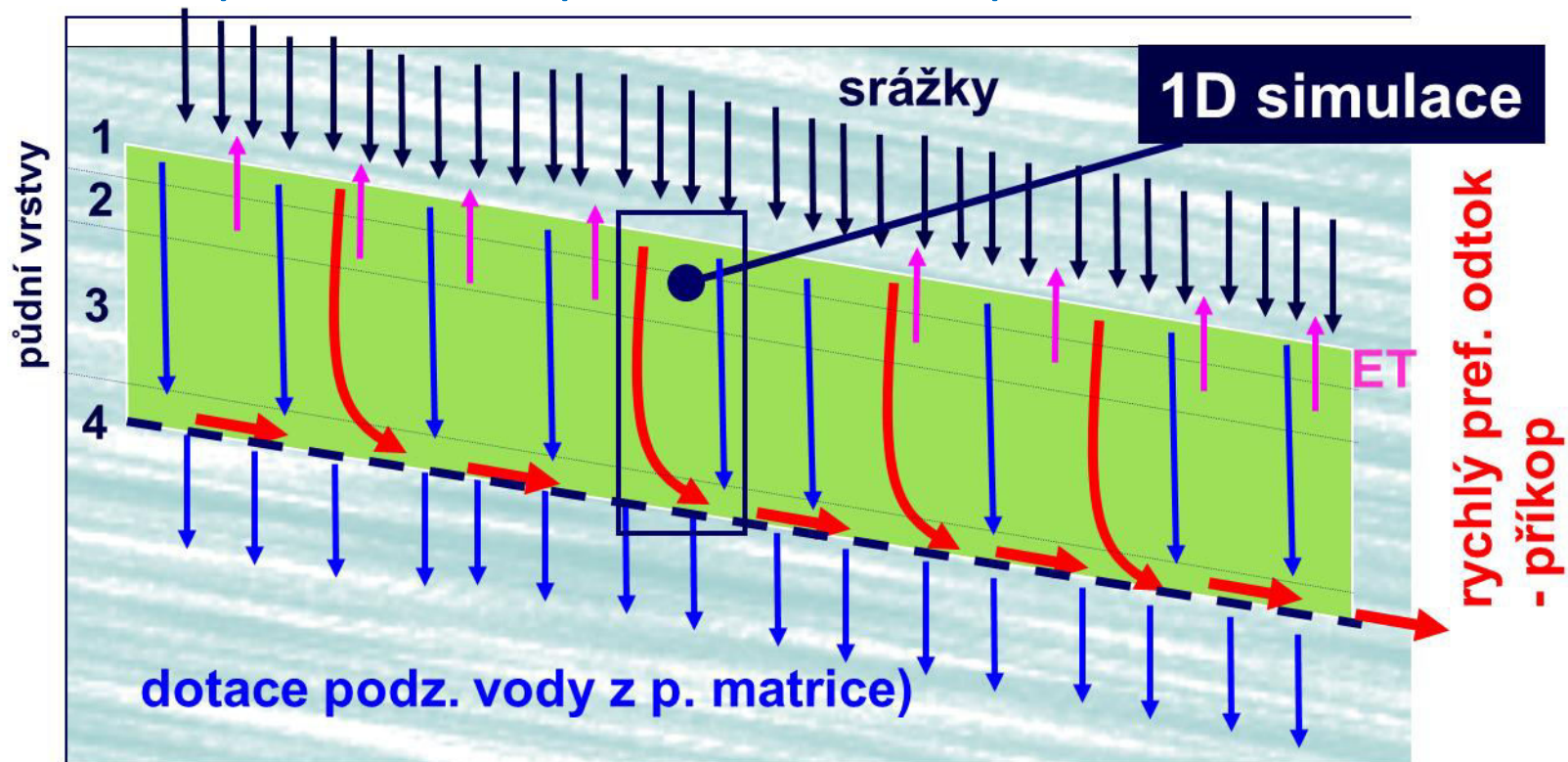
FLOWPC modelování odtoku

MRT = 5.4 měsíců pro celkový odtok



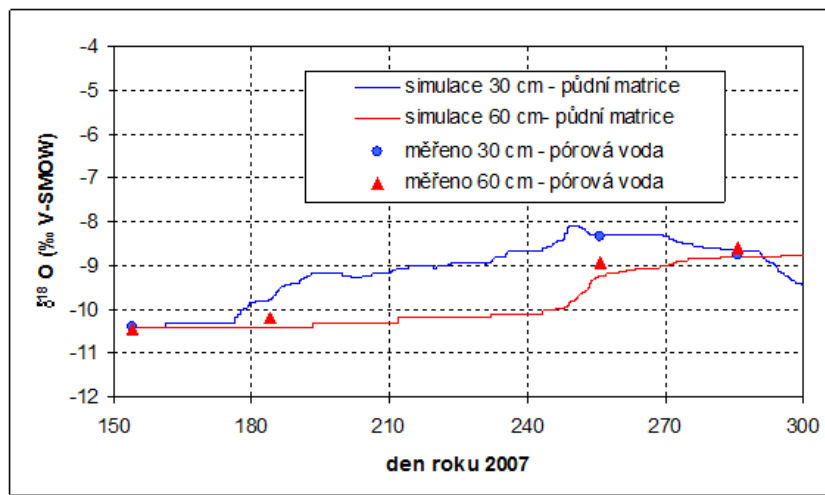
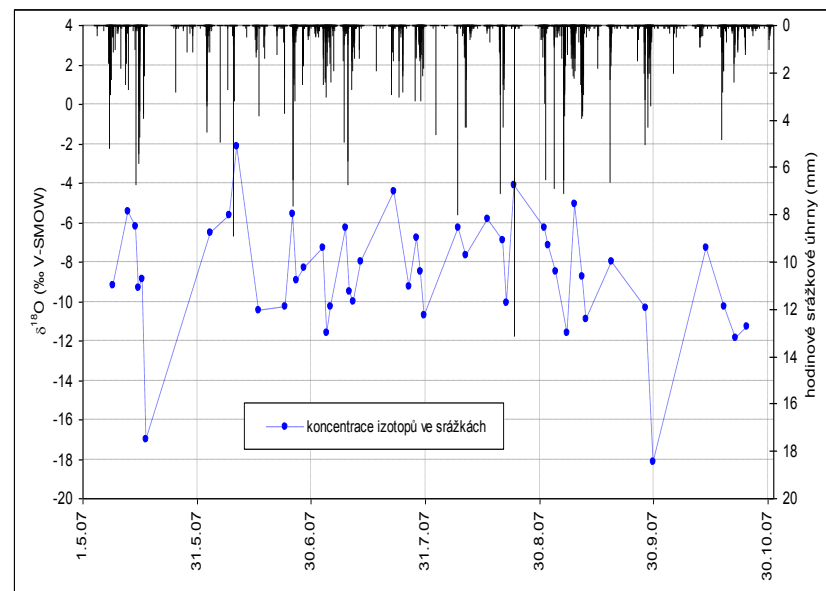
Modelování pohybu vody a transportu ^{18}O

vertikální pohyb s uvážením duální propustnosti (S1D, Vogel),
simultánní řešení Richardsovy rovnice a advekčně disperzní
rovnice pro doménu půdní matrice a preferenční doménu

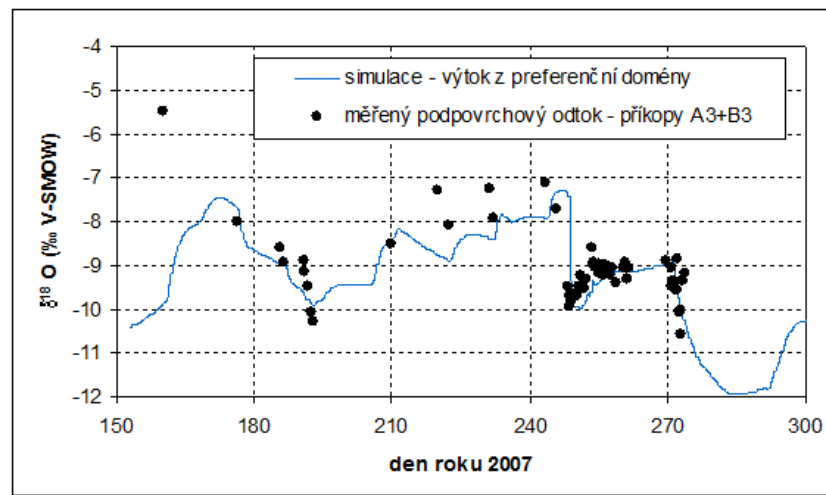


nízká K_s vrstev pod 75 cm rozp. žula, změna
směru proudění na svahové z vertikálního

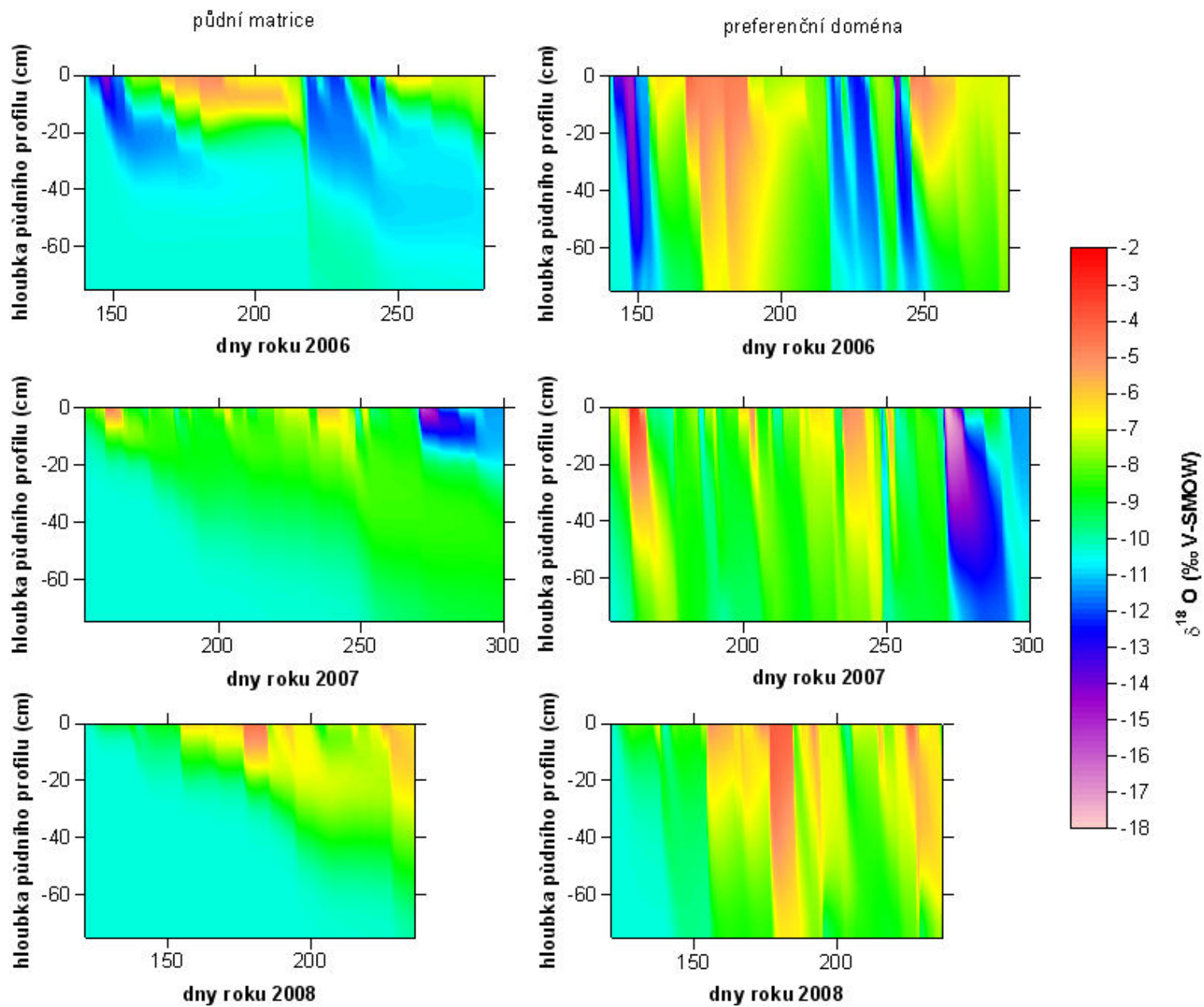
Transport izotopu z infiltrujících srážek půdní matricí a preferenčními cestami v půdním profilu



voda v půdní matrici



rychlý pref. odtok z půdy



Závěry

- izotopy a hydrochemické stopovače umožňují formulovat nové koncepty tvorby odtoku včetně látkových toků
- informace získané pomocí izotopů precizují matematické modelování fyzikálních procesů a podporují rozvoj modelovacích technik
- laserová spektroskopie umožňuje vznik časoprostorově obsáhlých souborů dat dostupnou inženýrskou metodou

děkuji za pozornost

