

Antropogenní ovlivnění jeskynního mikroklimatu

01 Úvod

- role jeskynní mikroklimatologie
- oxid uhličitý v jeskynní atmosféře
- role proudění vzduchu v jeskyni

Klimatologie

- klima = sklon (Hipparchos) - závislost podnebí na sklonu paprsků slunce

Předmět studia:

- vytváření klimatu na Zemi - vznik odlišného klimatu jednotlivých regionů
- kolísání a změny klimatu a prognóza budoucího vývoje klimatu
- klasifikace jednotlivých typů podnebí a jednotlivých klimatických oblastí

Dělení klimatologie:

1) podle měřítka: klimatologie v makro- / mezo- / topo- / **mikro-** oblastech

2) podle studijních hledisek:

- obecná (zákonitosti tvorby podnebí a klimatických změn, faktory vs. jevy)
- regionální (analytické studium klimat. poměry území, klim. regionalizace)
- aplikovaná (využití klimatologie v praktických oborech)

Klima podle rozsahu

Kategorie	Horizontální rozměr	Vertikální rozměr	Doba trvání atm. víru	Atm. vír	Objekt
Mikroklima	0,01 – 100 m	0,1 – 10m	0,1 – 10 s	Prašný vítr	Louky
Topoklima	100 m – 10 km	10 – 1000 m	10 s – 2,7 hod	Tornádo	Svahy
Mezoklima	1 – 200 km	1 – 1000 m	2,7 – 27,7 hod	Hurikán	Kotliny
Makroklima	200 – 50000 km	1 m – 100km	27,7 h – 11,5 dnů	Cyklona	ČR

Kl. systém, složky, vazby

- pět klim. složek: **Atmosféra, Hydrosféra, Kryosféra, Biosféra, Geosféra**
- složky 2-5 tvoří aktivní povrch: „Aktivní povrch je ta část krajinné sféry, kde dochází k odrazu dopadajícího slun. záření a kde současně probíhá přeměna energie krátkovlnného slunečního záření na tepelnou energii.“
- aktivní vrstva: trojrozměrný prostor, který také ovlivňuje tvorbu klimatu

Mezi jednotlivými složkami nepřetržitě probíhají klimatotvorné procesy:

- pojem „počasí“ představuje okamžitý stav klimatického systému
- pojem „klíma“ představuje stat. soubor všech stavů, jimiž prochází úplný úplný klimatický systém během několika desetiletí (podle WMO 30 let)

Mikroklima (tologie)

- mikroklima představuje podnebí velmi malých oblastí (patří sem i jeskyně)
- předmětem našeho zájmu je mikroklima jeskyní, PŘ. krasová klimatologie - relativní uzavřenost a malý kontakt s okolím, jeskynní mikroklima spadá do dvou kategorií, jejichž definice často splývají:

(1) endoklima a (2) kryptoklima

- významnou roli při vzniku mikroklimatu hraje makropočasí (počasí v okolní atmosféře) a na základě jeho vlivu na makroklima rozlišujeme 2 typy počasí:
radiační typ počasí: příznivý vliv na mikroklima – malý dopad makropočasí
advekční typ počasí: nepříznivý vliv na mikroklima – malý rozdíl oproti okolí

Jeskynní mikroklima

- soubor charakteristických klimatických procesů probíhajících uvnitř jeskyně (bez slunečního záření, stálá nízká teplota a vysoká vlhkost, slabé proudění)
- jeskynní mikroklima je charakterizováno několika základními proměnnými:
 - teplota vzduchu** (jak teplota uvnitř jeskyně, tak i v okolní atmosféře)
 - tlak vzduchu a vlhkost vzduchu** (typy: absolutní, relativní, specifická)
 - koncentrace plynů v atmosféře** (nejdůležitější: oxid uhličitý a radon)
 - koncentrace částic v atmosféře** (jeskynní aerosol nebo speleo-aerosol)
- základní proměnné jeskynního mikroklimatu jsou pak ovlivňovány/řízeny:
 - prouděním vzduchu** (ventilací), **prouděním vody**, **výměnou tepla**

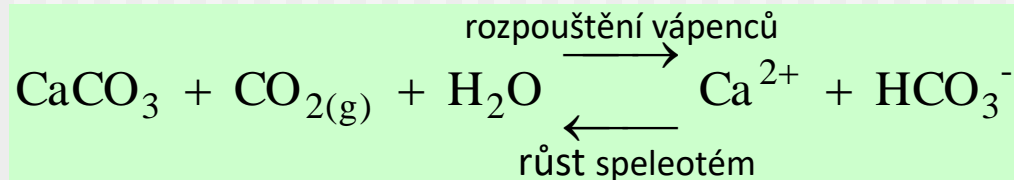
Jeskynní mikroklima

- mikroklima jeskyně je dále ovlivňováno řadou vedlejších faktorů:
 - geografické/geologické faktory** (vliv geologické stavby oblasti)
 - hydrologické/meteorologické faktory** (srážky, rychlosti větru)
 - antropogenní faktory** (zpřístupňování jeskyní, turistický ruch)
 - fyzikální faktory, radiologické faktory, nebo chemické faktory**
- s postupujícím časem dochází k pozvolným změnám intenzity ovlivňování jednotlivými faktory - důsledek změn podmínek v okolní atmosféře jeskyně
- fyzikální a chemické procesy, podílející se na tvorbě mikroklimatu jeskyně mohou být ovlivněny geologicky aktivním podložím (hydrotermální oblasti)

Role j. mikroklimatologie

(1) Speleogeneze – tvorba jeskyní a jejich výplní

CO₂ v jeskynní atmosféře představuje významnou proměnnou kras. procesů



Hnací silou speleogen. procesů je tak rozdíl koncentrací/parciálních tlaků CO₂

(i) **parc. tlak CO₂ „ve vodě“** ($P_{\text{CO}_2(w)}$) (ii) **parc. tlak CO₂ v jeskyni** ($P_{\text{CO}_2(\text{atm})}$)

$P_{\text{CO}_2(w)} < P_{\text{CO}_2(\text{atm})}$... rozpouštění CO₂ ve vodě (rozpuštění)

$P_{\text{CO}_2(w)} > P_{\text{CO}_2(\text{atm})}$... odplynění vody o CO₂ (růst speleotém)

Role j. mikroklimatologie

(2) Ochrana jeskynního prostředí

- acidifikace prostředí – vliv kyselých dešťů, působení na vegetaci
- kondenzační koroze na jesk. stěnách: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
- antropogenní CO_2 , teplo, vlhkost, částice, viry, bakterie, plísně ...

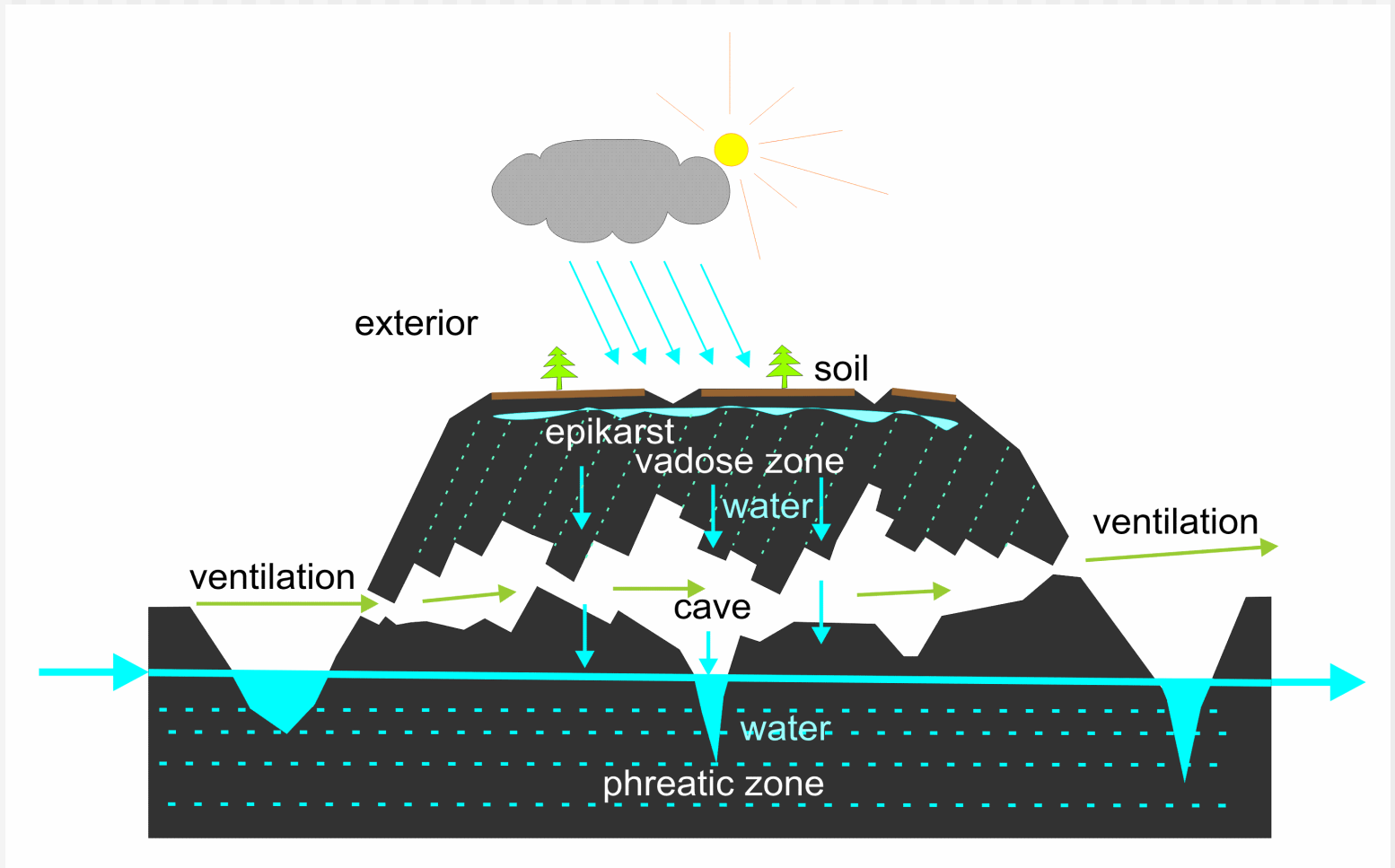
(3) Rekonstrukce paleoklimatu – archiv informací

- konstantní teplota jeskyně odpovídá průměrné venkovní teplotě
- změny teplot v geologické minulosti v izotop. složení speleotém

(4) Speleoterapie

- založena na periodickém pobytu pacientů v jeskynním prostředí
- zaměřeno především na léčbu nemocí horních cest dýchacích

Krasový profil



Jeskyně jako dyn. systém

- jeskyně představuje otevřený dynamický systém, v němž dochází k výměně jak hmoty, tak i energie s okolním prostředím
- výměna hmoty vyjádřena pomocí hmotových toků, které odpovídají změně látkového množství v čase, kladná změna - přírůstek, záporná změna - úbytek

$$j_X \sim + \frac{dm_X}{dt}, \quad - \frac{dm_X}{dt}$$

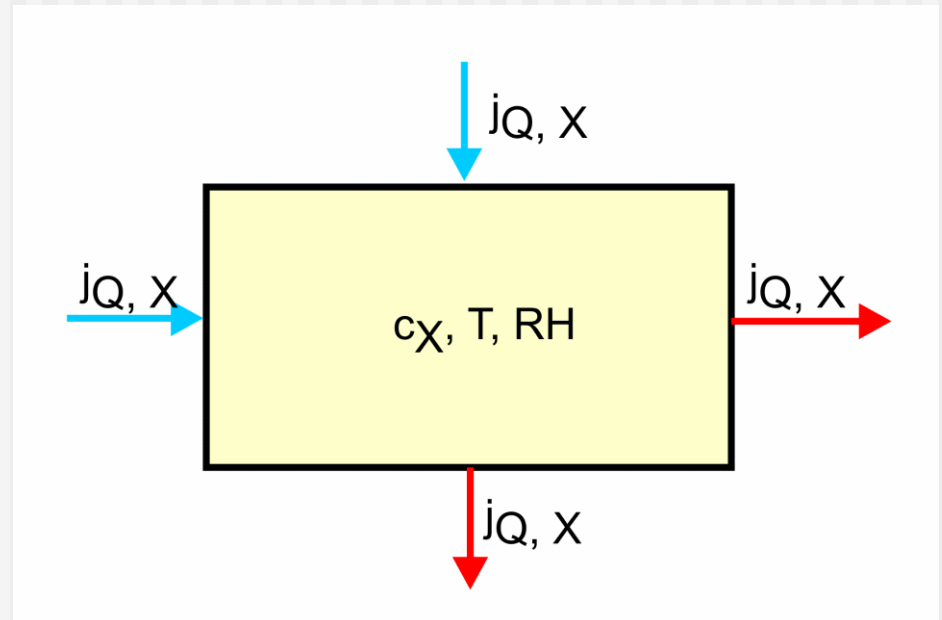
- bilance toků: aktuální stav systému odpovídá sumě všech toků do/z systému
- stacionární stav: suma všech dílčích hmotových toků do/z systému je rovna 0

$$\sum_{\text{in, out}} j_X^{\text{in, out}} = \sum_{\text{in}} j_X^{\text{in}} + \sum_{\text{out}} j_X^{\text{out}} = 0$$

Box model jeskyně

Proměnné:

- Q ... teplo (j_Q ... tepelný tok)
 - X ... CO_2 , H_2O , radon, částice
 - T ... teplota vzduchu jeskyně
 - c_X ... koncentrace složky X
 - RH ... relat. vlhkost vzduchu
-
- výpočty: určení vstupů a výstupů, stanovení toků hmot a tepla do/z jeskyně
 - hodnoty parametrů v jeskyni: c_X , T , RH ... – předpokládáme stacionární stav
 - „nositelé“ hlavních proměnných: teplo (T), voda (RH , c_i , T), **vzduch** (RH , c_i , T)

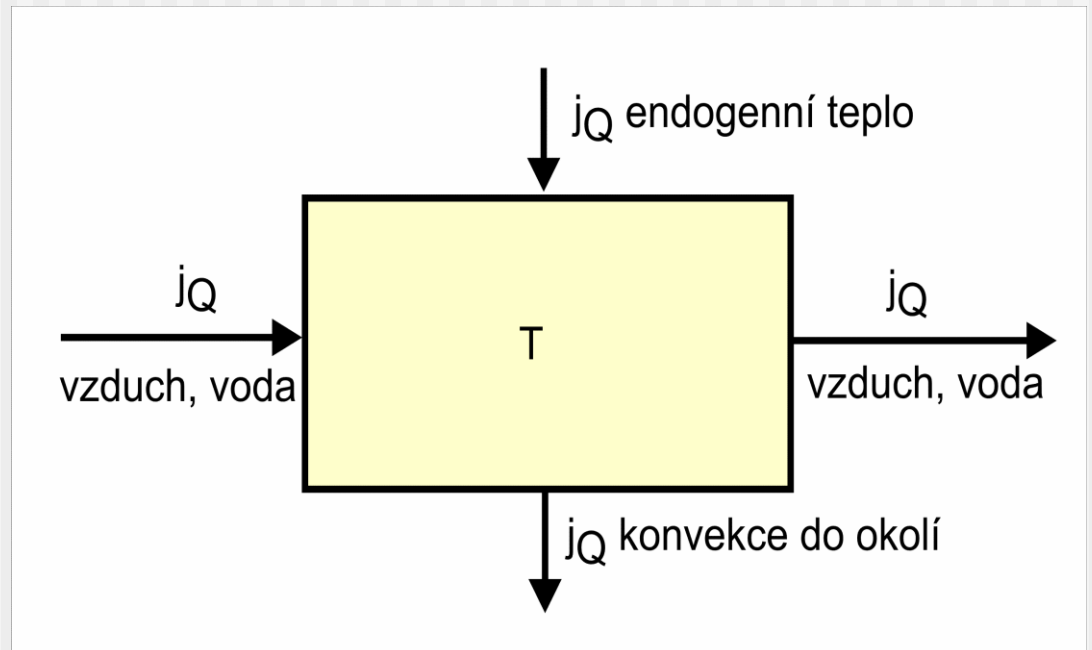


Teplota jesk. atmosféry

Teplota dána teplem:

$$Q = m c \Delta T$$

- Q představuje teplo [J]
- c měrnou t. kap. [J/kg/K]
- m udává hmotnost [kg]
- ΔT je změna teploty [K]
- tep. kapacity pro různá prostředí: voda (4180 J/kg/K), vzduch (1003 J/kg/K pro 0 °C), hornina (700–900 J/kg/K v závislosti na typu horniny)
- vzduch tvoří nejvýznamnější médium pro přenos tepla v jeskynním prostředí



Teplota jesk. atmosféry

Významné faktory řídící teplotu vzduchu v jeskyni:

- výměna vzduchu s okolní atmosférou jeskyně (ventilace jeskyně) (!)
- endogenní teplo (geoterm. gradient) v geologicky aktivních oblastech

Méně je teplota jeskynní atmosféry ovlivňována:

- podzemní (například řeka Punkva) případně povrchově tekoucí voda
- exhalace (výron) juvenilních plynů (plyny uvolňující se ze zemské kůry)
- různé chemické pochody vyskytující se například v sed. horninách

Při malém příspěvku endogenního tepla je prům. teplota uvnitř jeskyně blízká průměrné roční teplotě v okolní atmosféře (využití speleotém v jeskyni jako archiv paleoteplot v minulých dobách)

Teplota jesk. atmosféry

Změny teploty jeskynního vzduchu ovlivňují

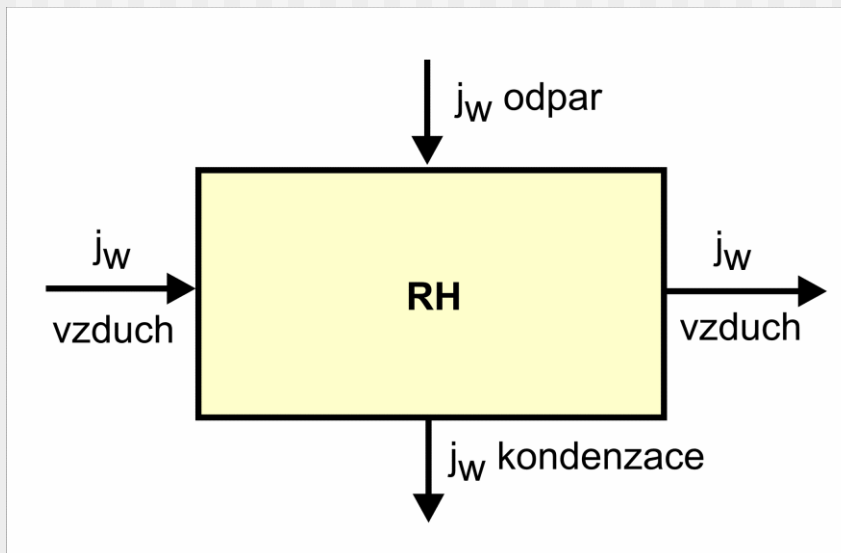
- okamžitou relativní vlhkost jeskynního vzduchu
- změny v proudění vzduchu v dynamických jeskyních - komínový efekt (na základě teploty okolní atmosféry vznik různých módů ventilace)
- určující vliv mají meteorologické podmínky - externí teplota vzduchu (ovlivnění proudění vzduchu uvnitř jeskyně roční či denní sezónností)

Obecně uznávaný model krasového systému – tři hlavní zóny:

- heterotermická zóna: blízko povrchu/vstupů do jeskyně, externí vliv
- homotermická zóna: hlubší pasáže jeskyně s konst. teplotou vzduchu
- přechodová zóna: střídání heterotermických/homotermických pasáží

Vlhkost jesk. atmosféry

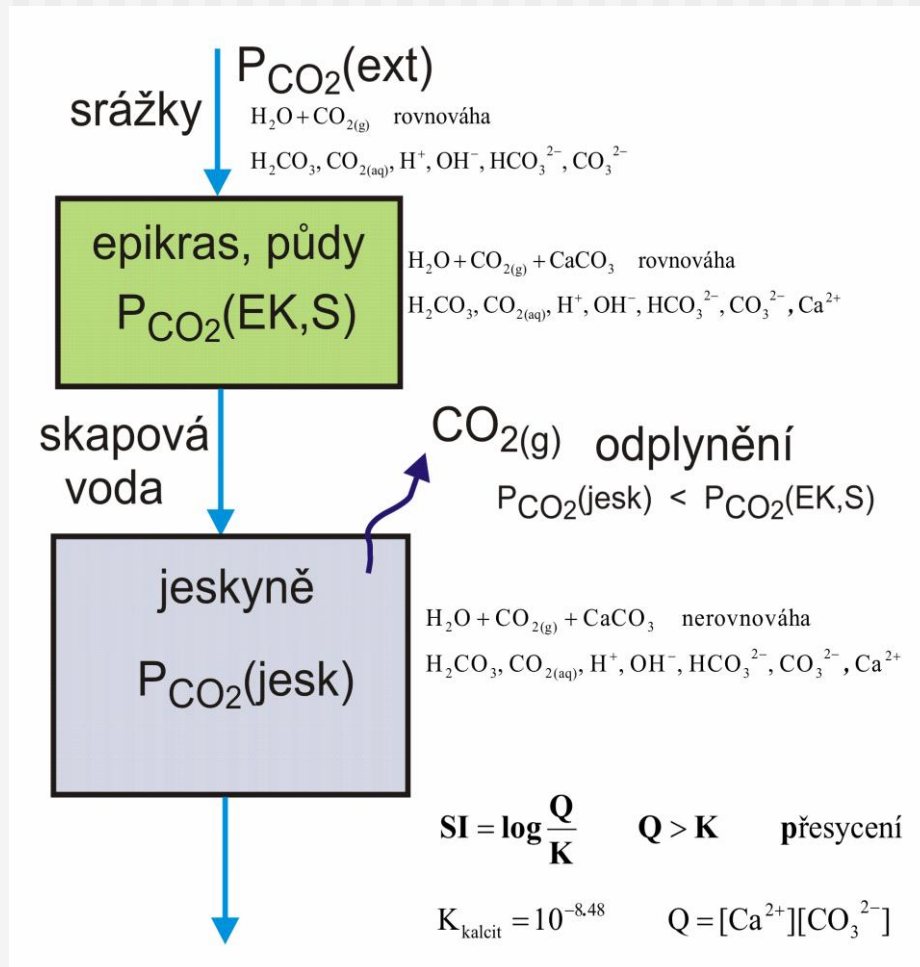
- absolutní vlhkost: hmotnost vodní páry obsažené v obj. jednotce vzduchu (nejčastěji se vyjadřuje v jednotce g/m^3)
- relativní/poměrná vlhkost: poměr okamžitého množství vodní páry ve vzduchu a množství vodní páry za stejných podmínek při plném nasycení
- specifická vlhkost: hmotnost vodní páry obsažená v 1 kg vlhkého vzduchu



Hlavní toky v jeskyni:

- proudění vzduchu v jeskyni
- odpařování do j. atmosféry
- proudění vzduchu z jeskyně
- kondenzace vody v jeskyni

Role krasového CO₂



Externí atmosféra

- $P_{\text{CO}_2} \sim 10^{-3,4}$, tj. ~ 400 ppmv
- dopad na povrch jako srážky

Půdy a epikras

- $P_{\text{CO}_2} \sim 10^{-1,5}$ (~ 31600 ppmv)
- syčení o CO₂ až do rovnováhy

Jeskynní atmosféra

- $P_{\text{CO}_2} \sim 10^{-3}$, tj. ~ 1000 ppmv
- odplyňování přebytečn. CO₂

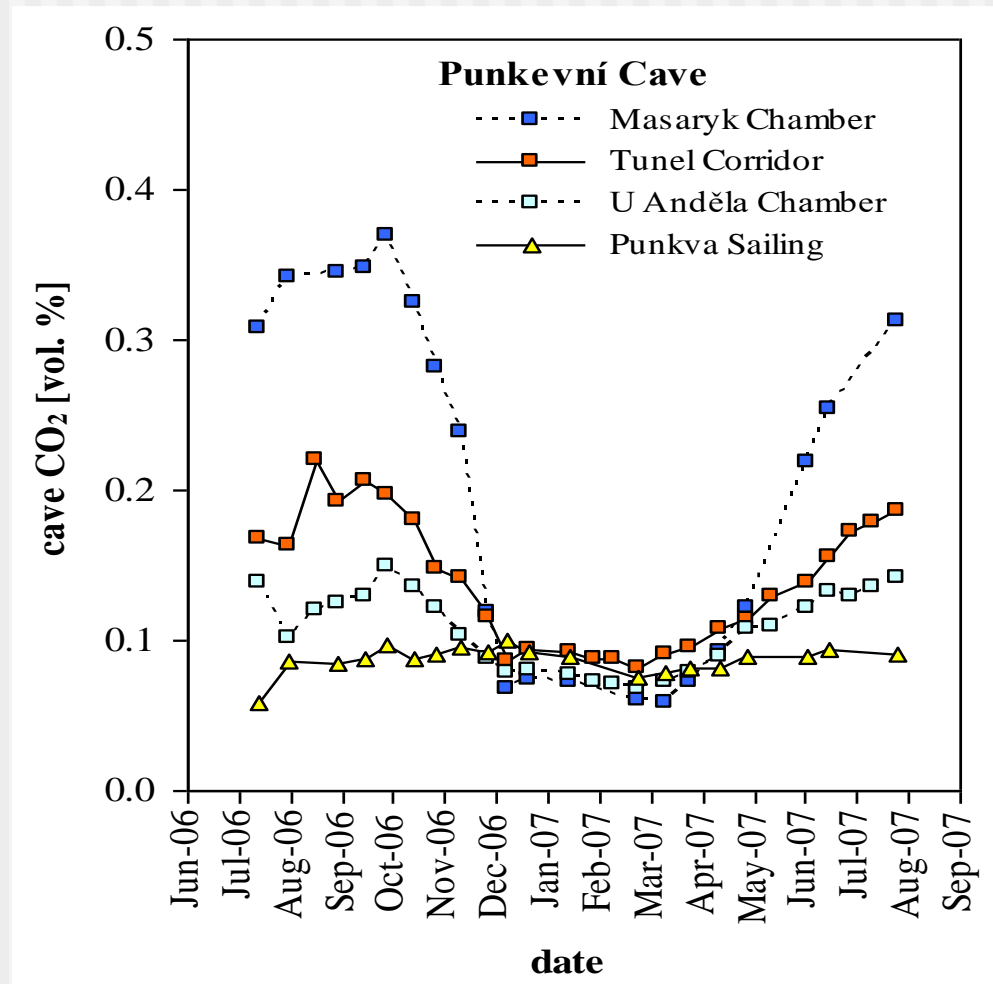
CO₂ v jeskynní atmosféře

Sezónní závislosti

- anuální – odlišné hodnoty během sezóny (léto/zima)
- diurnální – různé hodnoty v průběhu dne (den a noc)

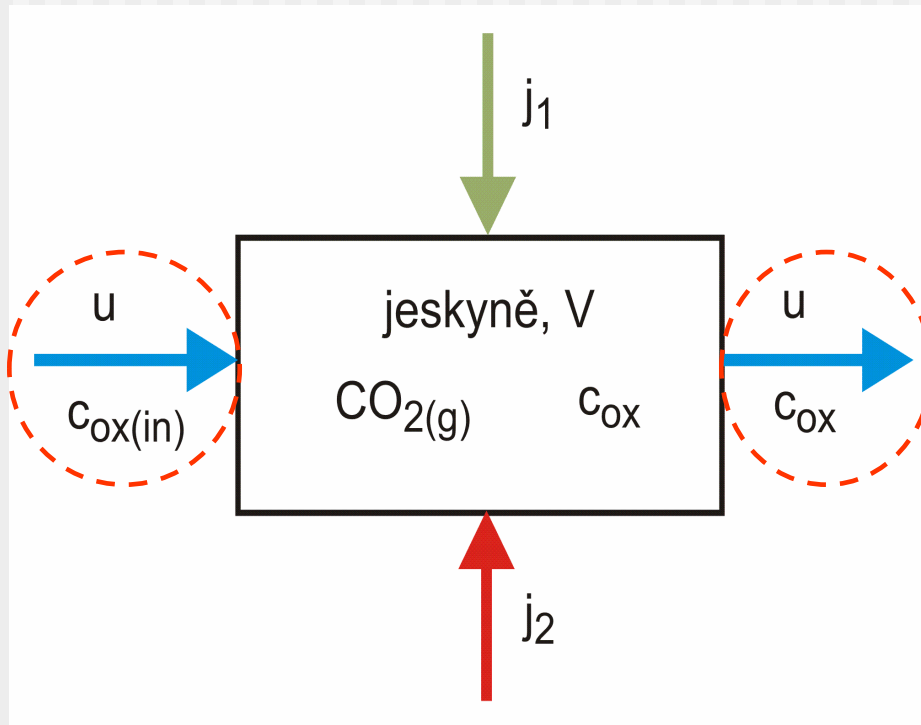
Zdroje CO₂ v jeskyni

- produkce půdami a epikr.
- antropogenní toky turistů
- externí atmosféra jeskyně
- produkce jesk. sedimenty



Box model CO₂ v jeskyni

- modelování koncentrace CO₂ v jeskyni pomocí box-modelu (hmotové toky)
- aktuální koncentrace CO₂ v rezervoáru dána sumou jednotlivých toků CO₂



Modelové proměnné

- j₁ ... přirozený vstupní tok
- j₂ ... antropogenní vst. tok
- u ... obj. rychlost proudění
- c_{ox}(in) ... venkovní konc. CO₂
- c_{ox} ... konc. CO₂ uvnitř jesk.

Box model CO₂ v jeskyni

- celk. tok CO₂ do jeskyně (přírůstek CO₂ za čas) dán součtem jednotlivých dílčích toků CO₂ do/z jeskyně (do jeskyně kladné, z jeskyně ven záporné)

$$j = \frac{dV_{ox}}{dt} = \frac{V dc_{ox}}{dt} = j_1 + j_2 + u c_{ox(in)} - u c_{ox}$$

- tok j_1 : $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$*
- tok j_2 : $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$*
- rychlost u : $7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$*

- pokud je součet dílčích toků nulový, máme koncentraci CO₂ ve stac. stavu

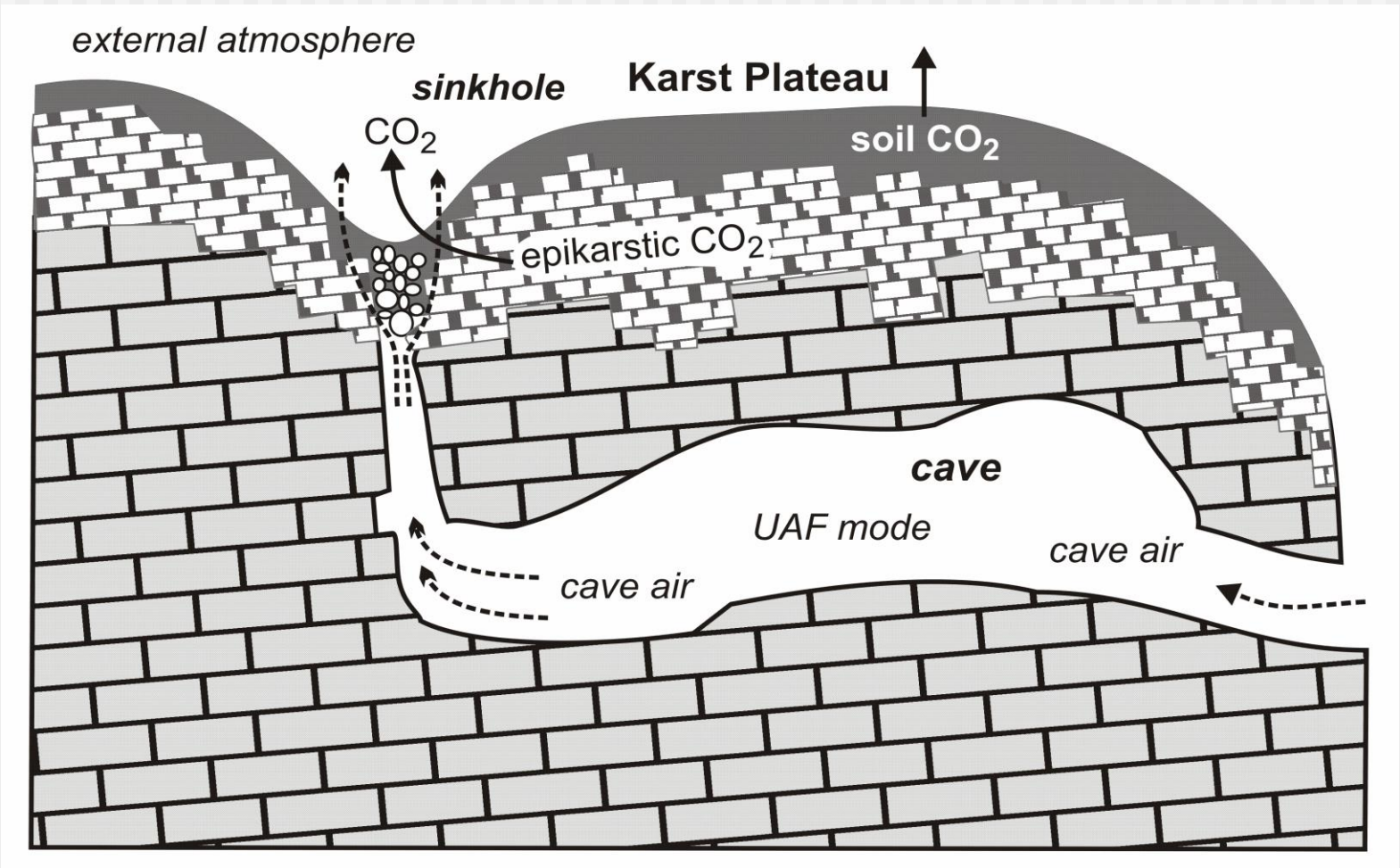
$$c_{ox}^{ss} = \frac{j_1 + j_2}{u} + c_{ox(in)}$$

- c_{ox}^{ss} : $(8,08-8,64) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$*

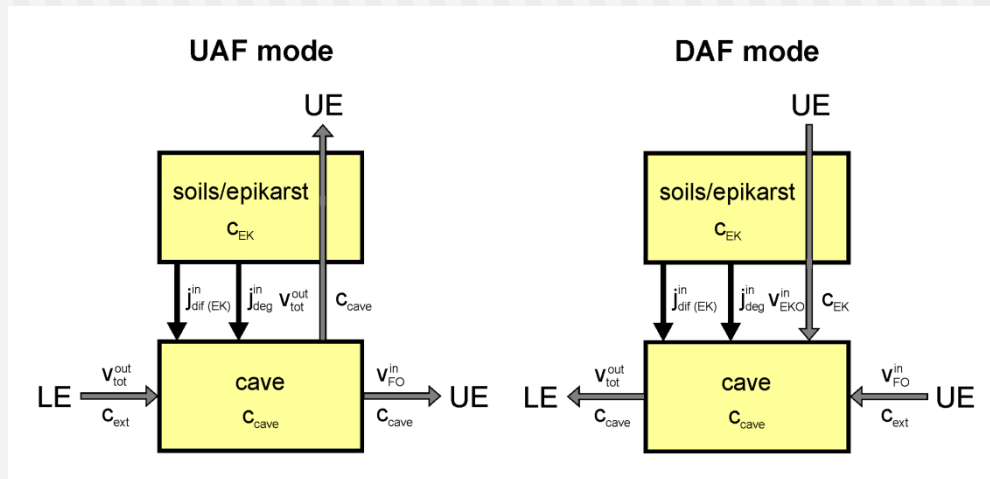
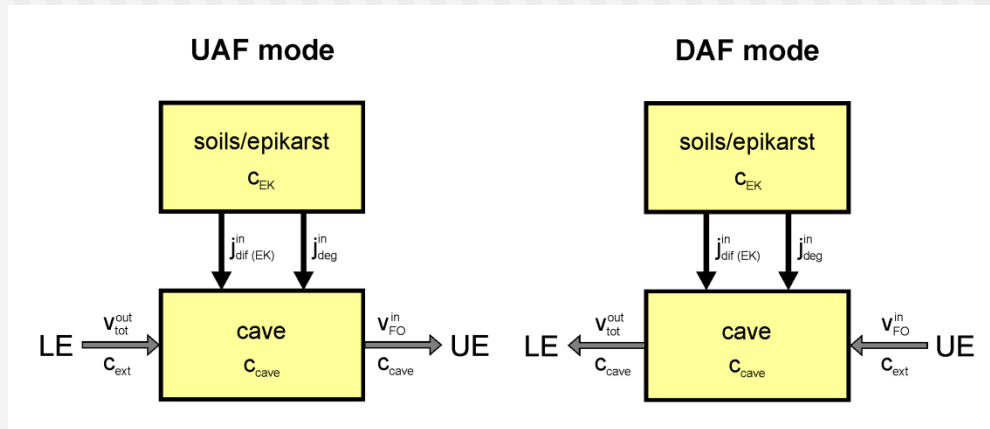
- jestliže jsou j_1 , j_2 , u a $c_{ox(in)}$ konstantní, po integraci a úpravách dostáváme

$$c_{ox} = \left(\frac{j_1 + j_2}{u} + c_{ox(in)} \right) \left(1 - e^{-\frac{u}{V}t} \right) + c_{ox}^0 e^{-\frac{u}{V}t}$$

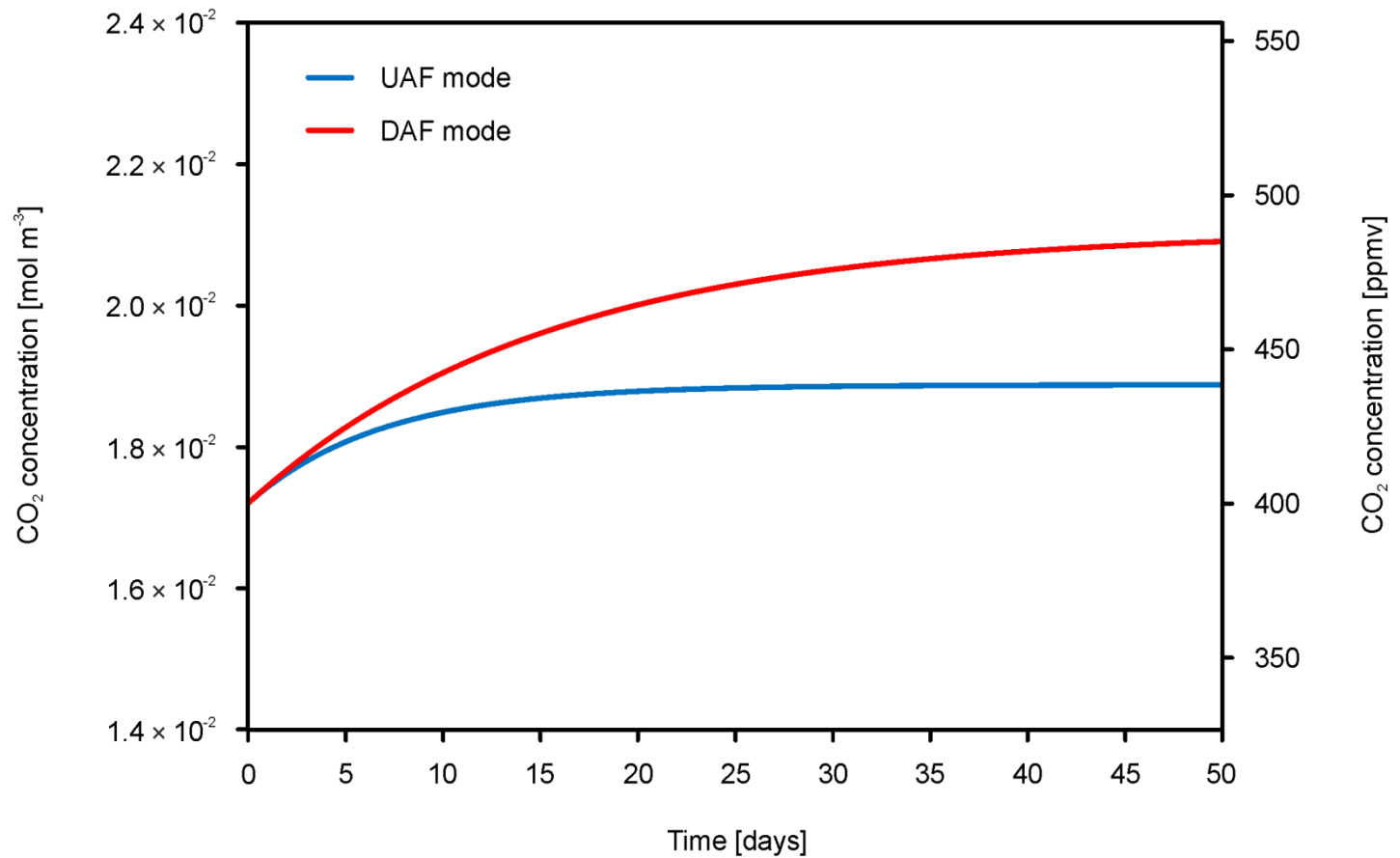
Dynamika CO₂ v závrttech



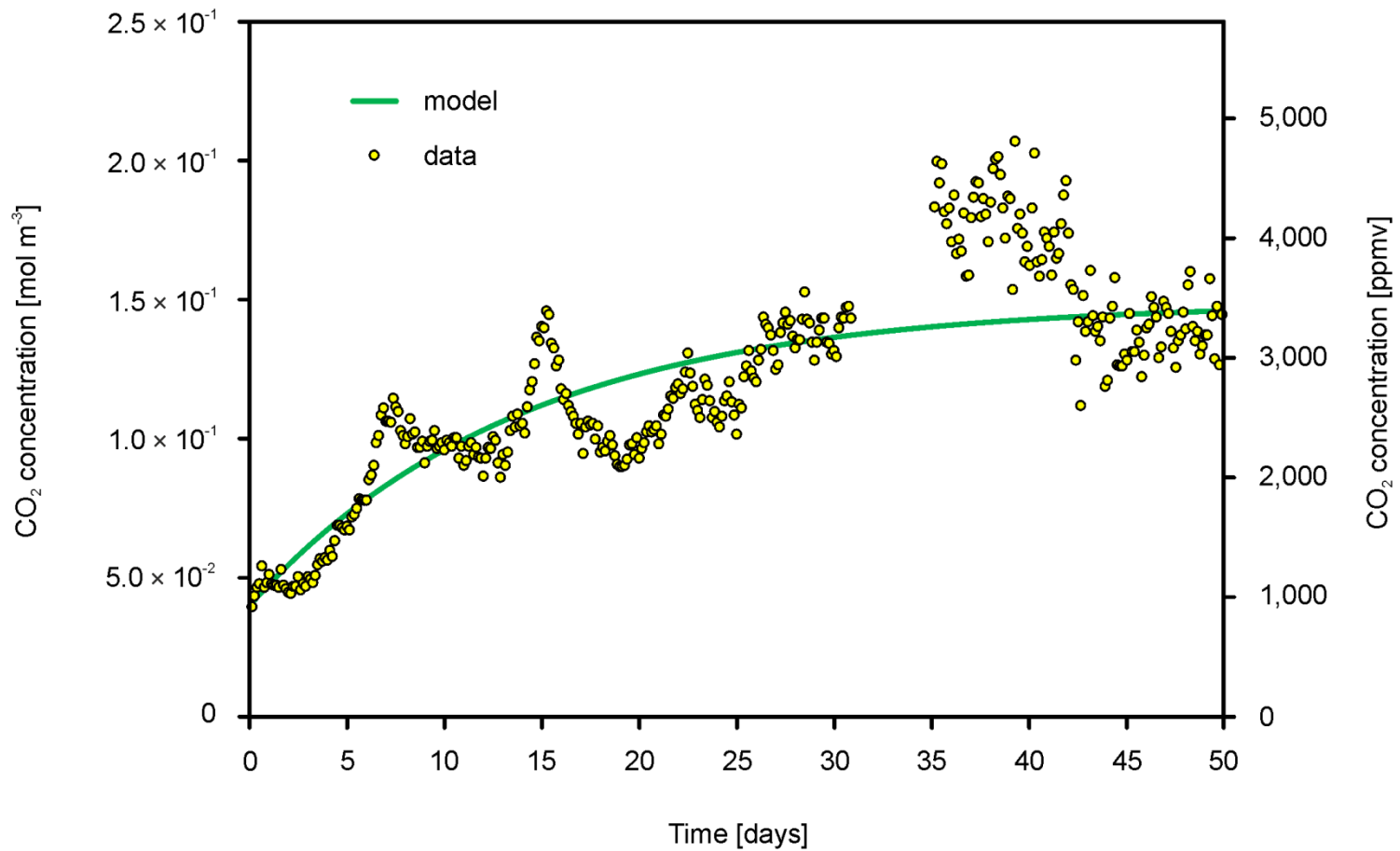
Advekce CO₂ z epikrasu



Advekce CO₂ z epikrasu



Advekce CO₂ z epikrasu



Proudění vzduchu jeskyní

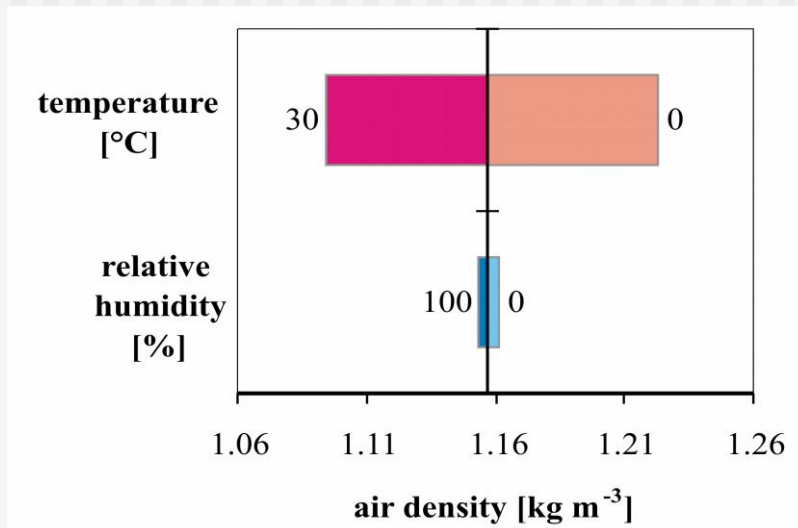
- proudění a jeho směr dán rozdílem hustot vzduchu v jeskyni a v jejím okolí

- součet hustot **suchého vzduchu** a **vodní páry**:

$$\rho = \frac{M_a (P - p_w) + p_w M_w}{RT}$$

- parc. tlak vodní páry dán polynomem 6. řádu:

$$p_w = RH \left\{ \sum_{i=0}^{i=6} a_i (T - T_0) \right\} / 100$$

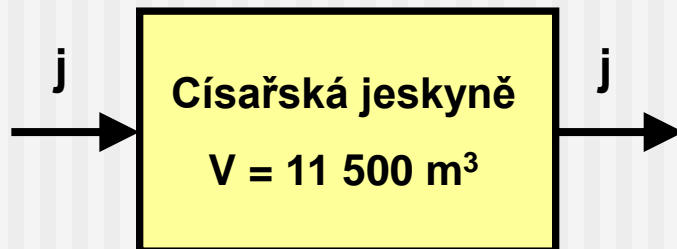


Vliv relativní vlhkosti a teploty

- citlivostní analýza → tornádo graf
- teploty 0–30 °C (běžné podmínky)
- rozmezí relativní vlhkosti 0–100 %
- teplotní rozdíl $\Delta T = T_{\text{exteriér}} - T_{\text{jeskyně}}$

Proudění vzduchu jeskyní

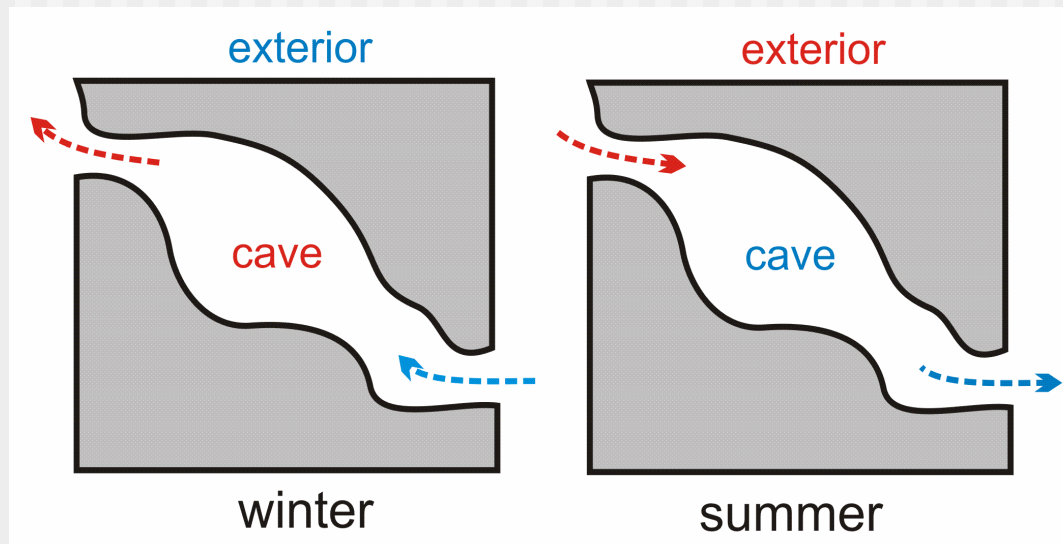
- **lineární rychlost** v [m/s] - závislá na ploše jeskynního profilu v daném místě
- **objemová rychlost** v [m³/s] - je v jeskyni konstantní (modely, objemové toky)
- **Příklad:** lineární rychlost proudění v jeskynní chodbě ($S_1 = 10 \text{ m}^2$) je 0,022 m/s
 - ▶ jaká bude lin. rychlost proudění vzduchu v chodbě s profilem $S_2 = 20 \text{ m}^2$?
- **ventilace jeskyně** [čas⁻¹] - objemové proudění vzduchu normalizované na objem jeskyně (\approx rozsah výměny jeskynní atmosféry za časovou jednotku)
- **doba z(a)držení** [čas] – to odpovídá převrácené hodnotě ventilace jeskyně



- prům. objemové proudění 0,188 m³/s
- ventilace jeskyně: 0,059 hod⁻¹ (5,9 %)
- doba zadržetí vzduchu v jeskyni: 17 h

Dynamické jeskyně

- dva nebo více vchodů v různých nadmořských výškách (dynamické proudění)
- ventilace v dynamické jeskyni probíhá na principu tzv. „komínového efektu“ (proudění způsobené rozdílnými teplotami u jednotlivých jeskynních vchodů)
- dva ventilační módy: zimní mód proudění (**UAF**) a letní mód proudění (**DAF**)



UAF mód proudění

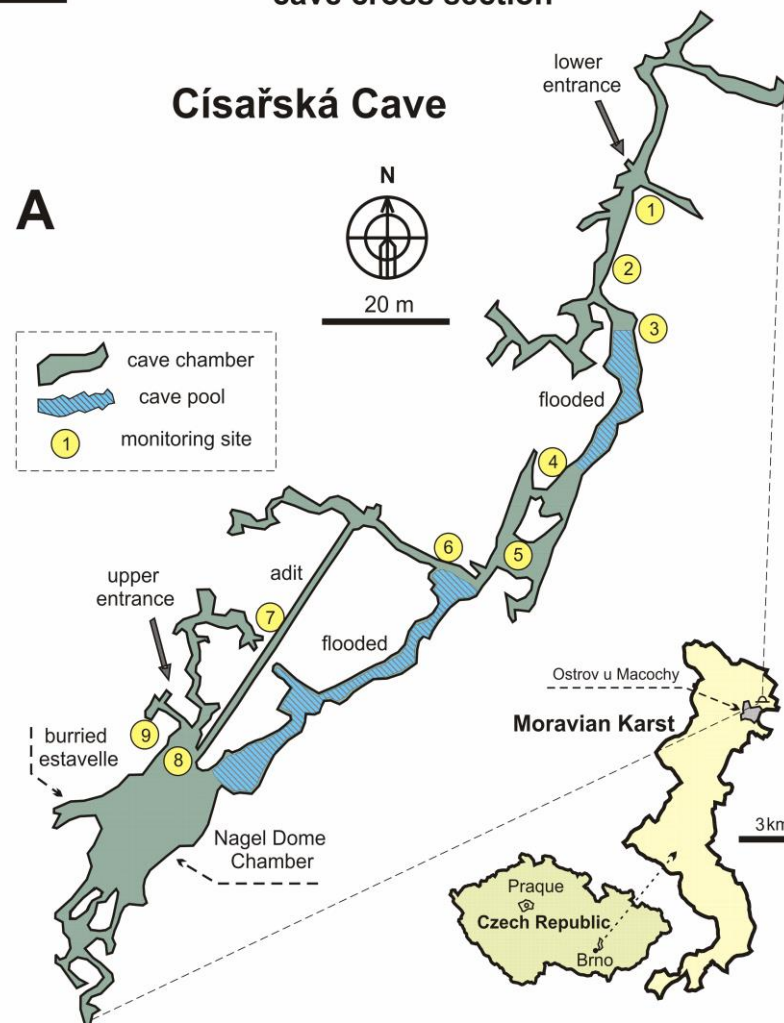
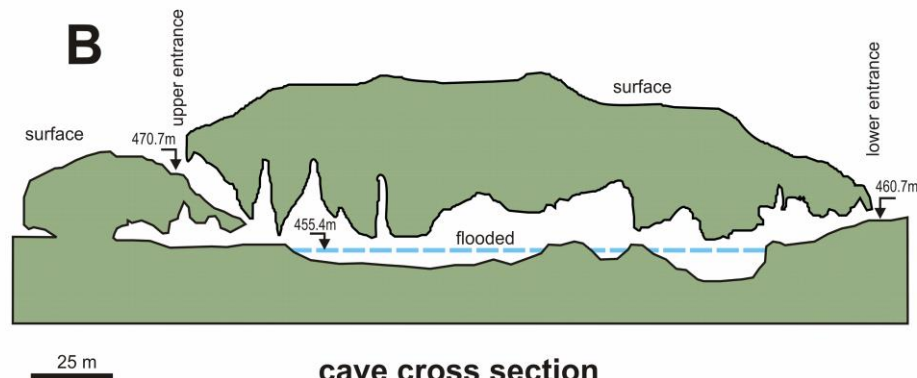
- $T_{\text{jeskyně}} < T_{\text{exteriér}}$
- vzestupné proudění

DAF mód proudění

- $T_{\text{jeskyně}} > T_{\text{exteriér}}$
- sestupné proudění

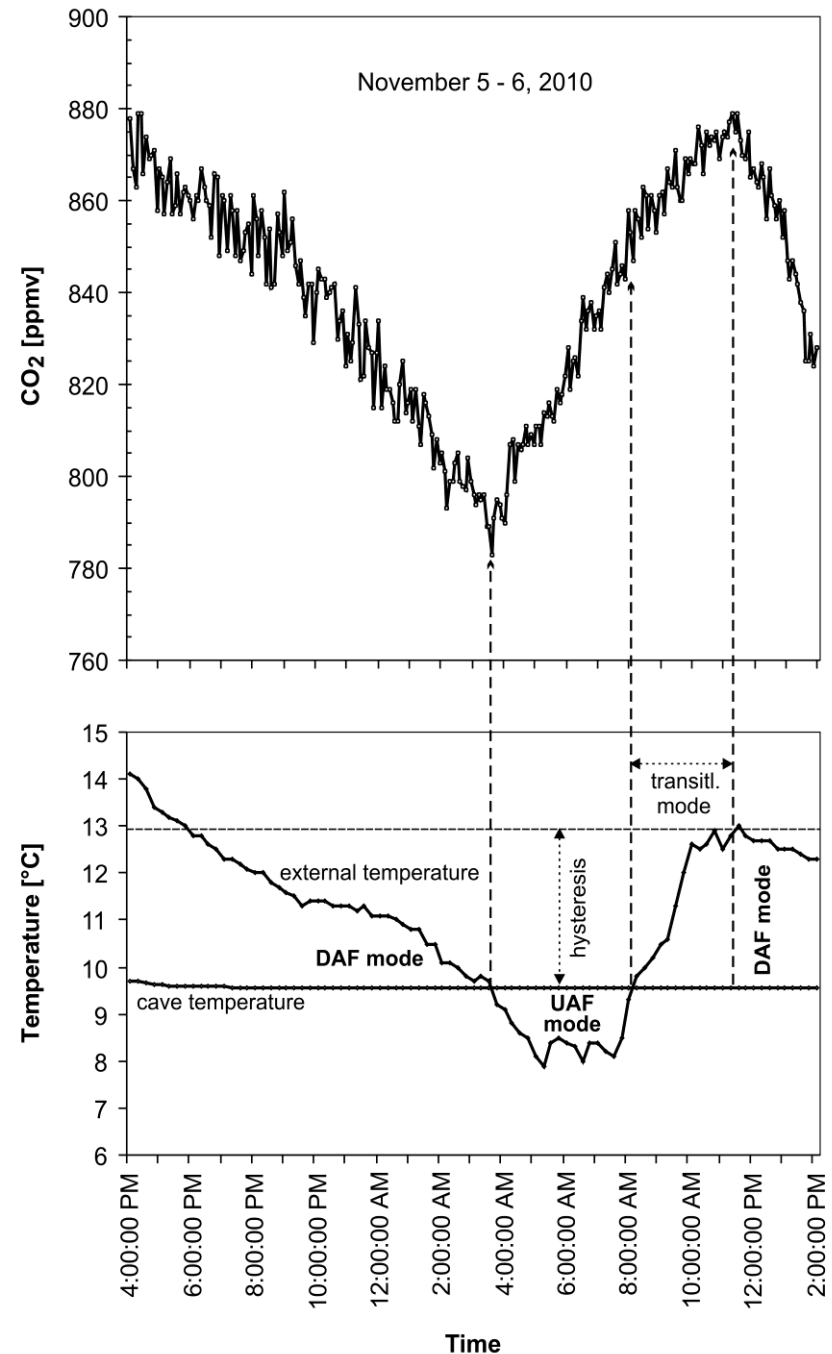
Císařská jeskyně

- v severní části Moravského krasu (≈50 m za obcí Ostrov u Macochy)
- typicky dyn. jeskyně - dva vchody o různé nadm. výšce (ve vchodech ocelové dveře s okénky 20x20 cm)
- v jeskyni celkem 8 jezírek (hladina uměle regulována skrze čerpadla)
- jeskyně je v současnosti využívána Dětskou léčebnou se speleoterapií (kapacita 50 dětí, pobyt 20 h týdně)



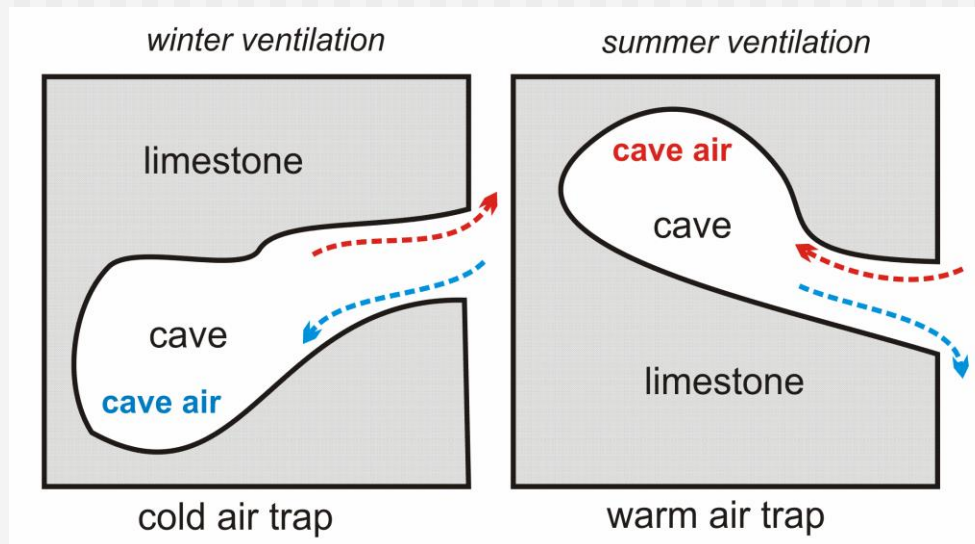
Císařská jeskyně: vlaštovčí křídla

- dyn. jeskyně: dva vchody v různých nadmořských výškách - rozdíl 10 m
- podzim: období stagnující ventilace
- DAF mód: intenzivnější ventilace u horního vchodu - pokles konc. CO₂
- UAF mód: přínos koncentrací CO₂ z hlubších pasáží jeskyně - nárůst CO₂
- při přepnutí do DAF módu teplotní hystereze (teplota přepnutí vyšší o $\approx 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ - přechodné období proudění)



Statické jeskyně

- statické jeskyně ventilují pouze polovinu sezóny v závislosti na ext. teplotě
- jeden anebo více vchodů s relativně malým rozdílem nadmořských výšek
- odlišný klimatický režim u jeskyní situovaných pod a nad úrovní hl. vchodu



Jesk. pod úrovní vchodu

- ventilují v zimním období
- „past na studený vzduch“

Jesk. nad úrovní vchodu

- ventilují v letním období
- „past na teplý vzduch“

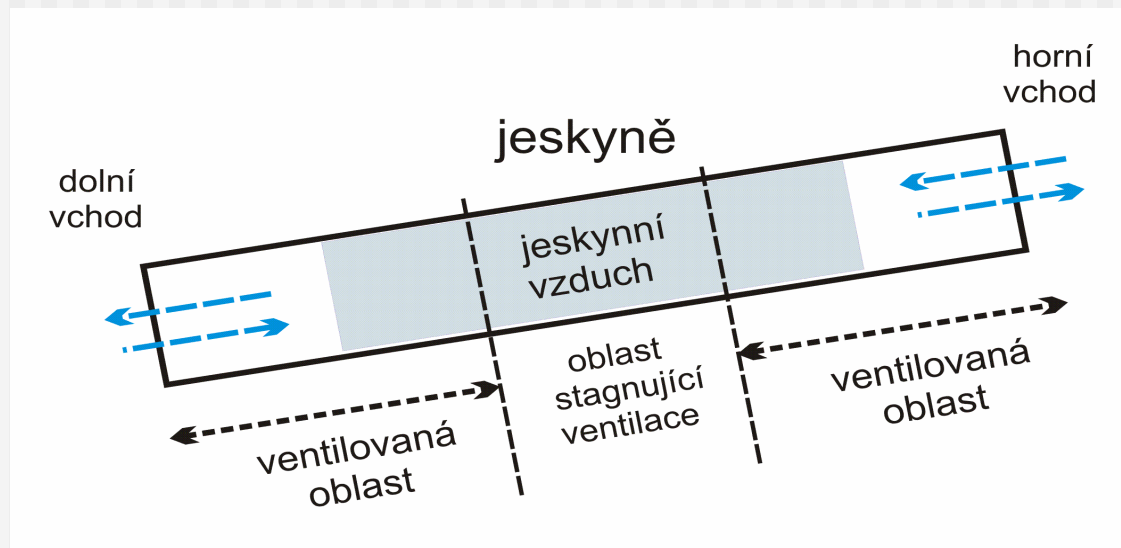
Ventilační období

Období aktivní ventilace

- trvání aktuálního módu delší než doba zadržení vzduchu v jeskyni
- výměna pomocí pístového toku
- typické pro zimní a letní období

Období stagnující ventilace

- doba zadržení vzduchu v jeskyni kratší než aktuální mód jeskyně
- přechodný mód - popotahování
- zbylé části sezóny (jaro/podzim)



Ventilace v Císařské jesk.

- paralelní měření proudění vzduchu u obou j. vchodů za různých tepl. podmínek
- lineární hodnoty proudění přepočítány na objemové
- záporné hodnoty proudění - opačné směry proudění
- vyšší objem vzduchu přes okénko horního vchodu j.
- nulové proudění vzduchu při venkovní teplotě 13 °C

