

Karsologie

Jiří Faimon

rozsah 2/0

3 kredity

Mikroklimatologie jeskyní

Mikroklimatologické parametry

(1) Teplota, vlhkost

kondenzační koroze

speleoterapeutický faktor

(2) Koncentrace CO₂

řídí růst speleotém / rozpouštění vápenců

speleoterapeutický faktor?

Zdravotní riziko při vysokých koncentracích

(3) Koncentrace Rn

zdravotní riziko

speleoterapeutický faktor

konzervativní prvek při studiu mikroklimatologických změn

Řídící proces: ventilace jeskyně

Ventilace je principiálně určena geometrií jeskyně

Dělení jeskyní na

- Dynamické
- Statické

Ventilace je řízena rozdíly v hustotě vzduchu!

Ventilační módy:

UAF (upward airflow mode)

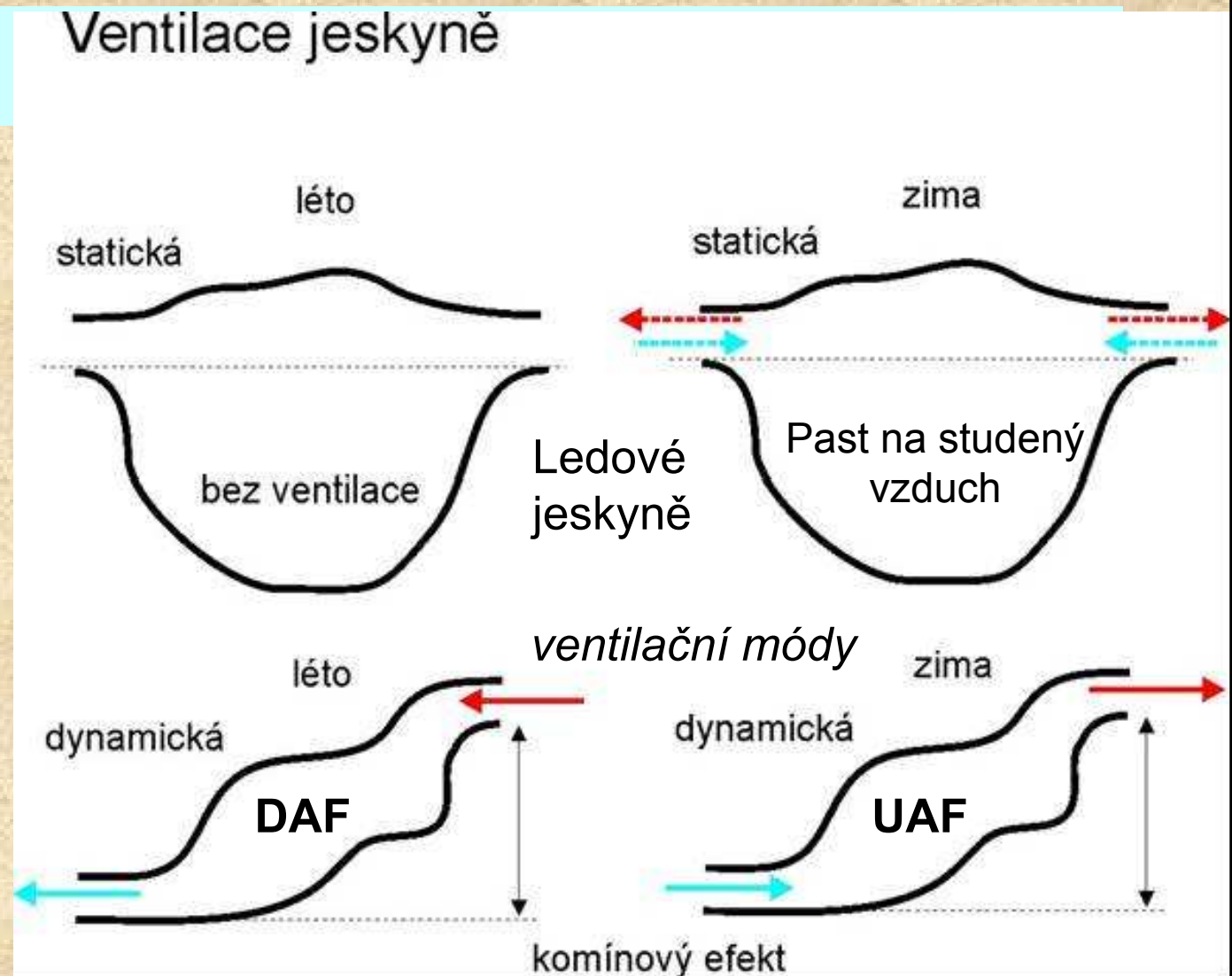
DAF (downward airflow m.)

Klíčové venkovní podmínky:

teplotní gradient mezi

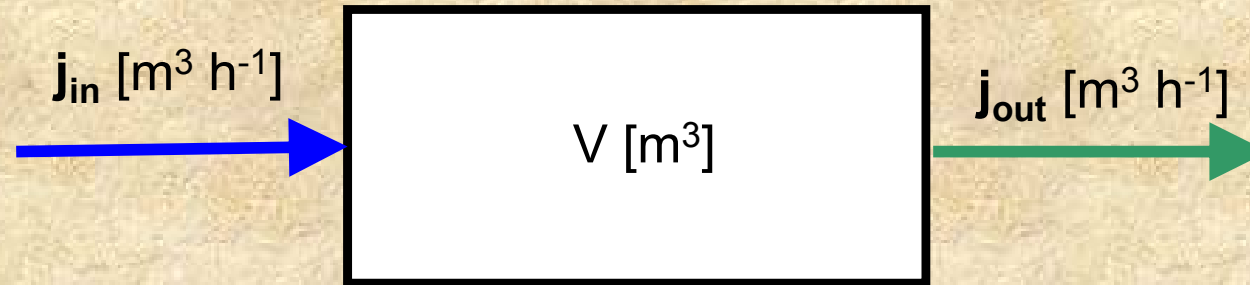
- venkovní teplotou
- vnitřní teplotou jeskyně

Mezi těmito krajními typy je plynulý přechod!



Dynamický model

Jeskyně



Objemové toky horním a dolním tokem j_i , šipky vyznačují aktuální směr
Směry proudění se mění v závislosti na venkovní teplotě

Ventilace

Jaká část jeskyně vyvětrána za jednotku času. Umožňuje porovnat
mikroklimatické poměry v jednotlivých jeskyních navzájem!

Ventilace jeskyně - objemový tok j jeskyní ($\text{m}^3 \text{ hod}^{-1}$) normalizovaný na objem
jeskyně V (m^3):

$$v = \frac{j}{V} \quad [\text{h}^{-1}]$$

Doba/čas zadržení:

$$\tau = \frac{V}{j} \quad [h]$$

Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Mikroklimatologie jeskyně je principiálně ovlivněna **ventilací jeskyně**.

Pilotní studie provedené v letech 2006/09 v Císařské jeskyně (Moravský kras, Česká republika):

- (1) potvrzení teoretických předpokladů (závislost intenzity a směru proudění jeskynní atmosféry na geometrii jeskyně a teplotních gradientech)
- (2) Odhad specifických parametrů studovaných prostor (ventilace jeskyně, doba zadržení atmosféry)
- (3) potvrzení komplexního vlivu ventilace na tzv. kondenzační korozi
- (4) několik nových poznatků (výrazné oscilace v intenzitě proudění, nevyrovnané hmotové bilance)

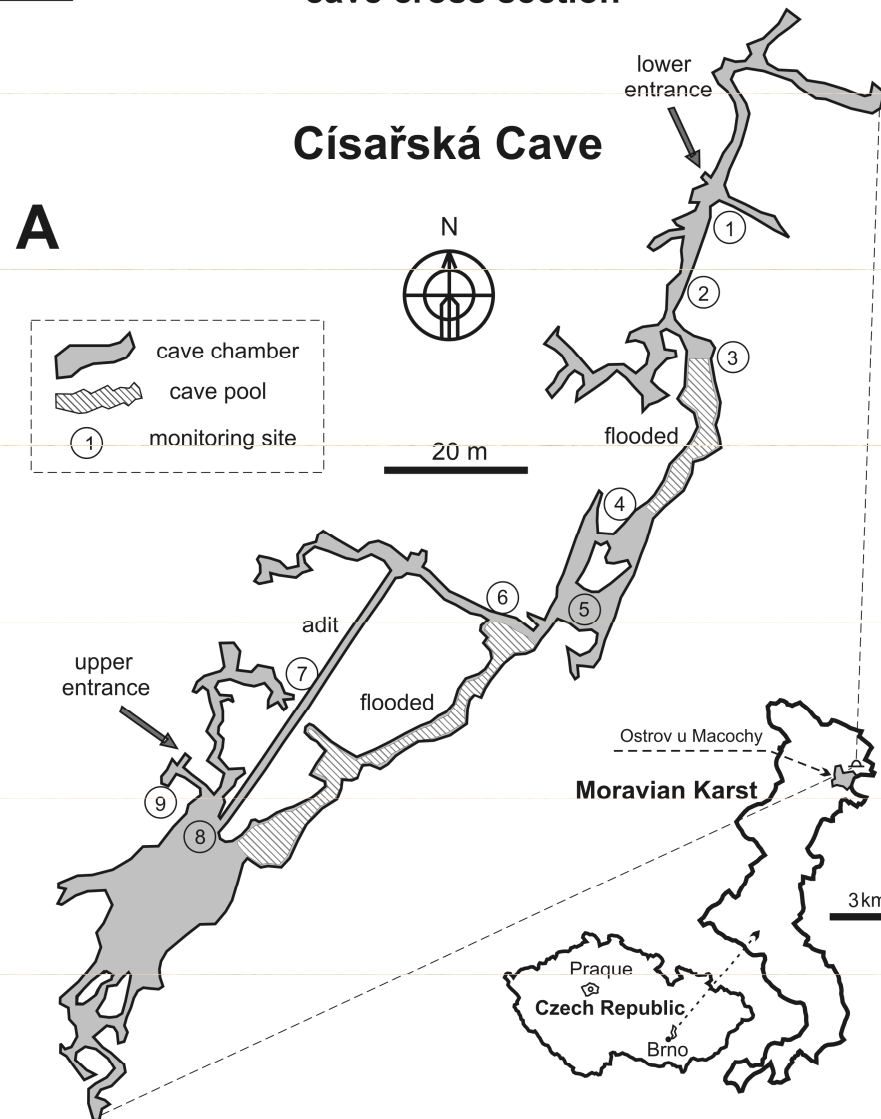
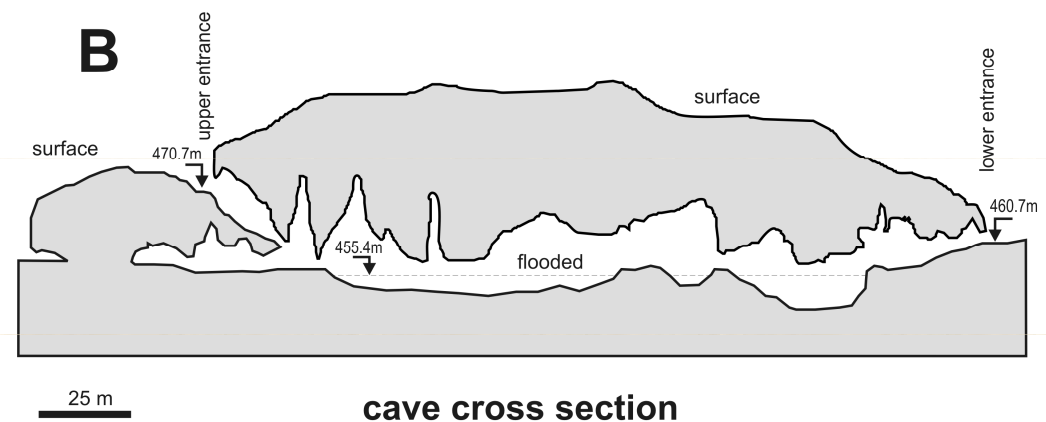
Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

(A) Mapka Císařské jeskyně

(B) Plánek příčného řezu

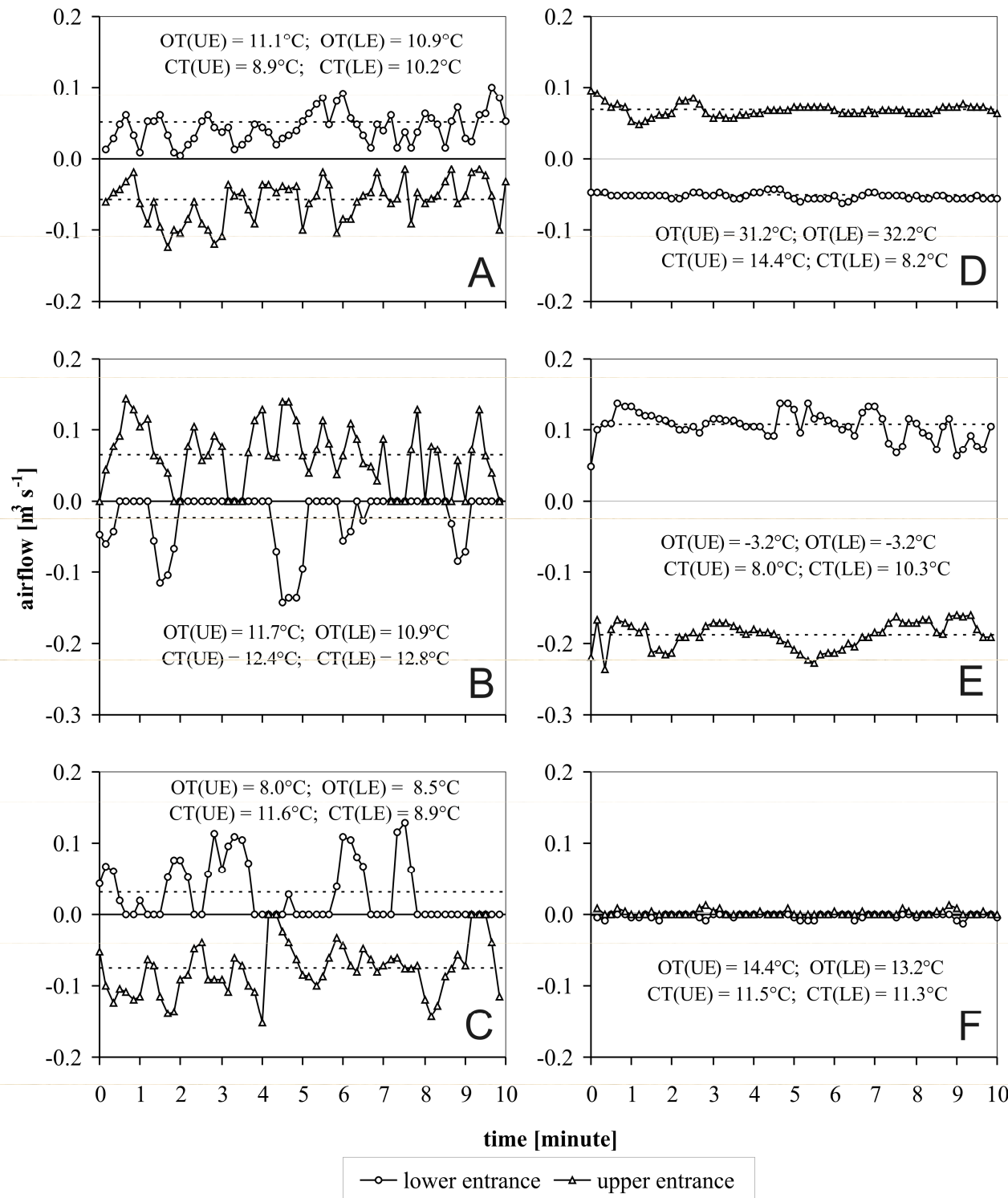
Podle Absolon, 1970.

Číslo představují
monitorovací místa.



Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Objemové toky vzduchu v úrovni horního (UE) a dolního (LE) vchodu Císařské jeskyně.



(A) kvaziperiodické oscilace;

(B, C) nevyvážené chaotické oscilace s vysokými pulzy

(D, E) relativně stabilní toky při vysoké (D) a nízké (E) venkovní teplotě

(F) téměř nulové toky při zhruba vyrovnaných teplotách venku a v jeskyni

Zkratky:

OT znamená vnější teplota (outdoor temperature),

CT představuje teplotu v jeskyni (cave temperature), LE je dolní vchod (lower entrance) UE je horní vchod (upper entrance).

Císařská jeskyně: anuální data

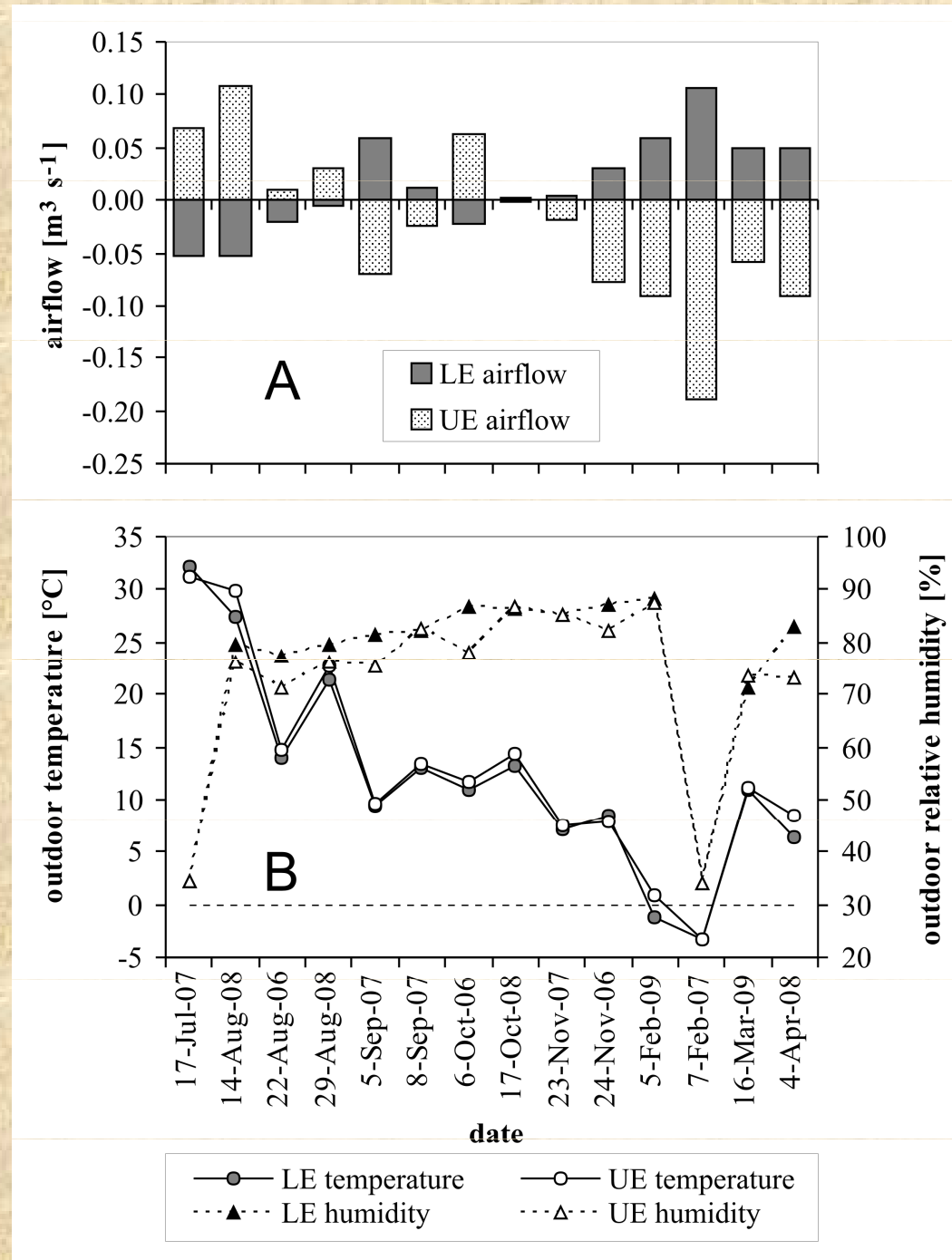
Proudění atmosféry (objemové toky vzduchu $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$),

Sezónní vlivy

Období srpen 06 - březen 09

(A) objemové toky vzduchu spodním (LE) a horním (UE) vchodem jeskyně

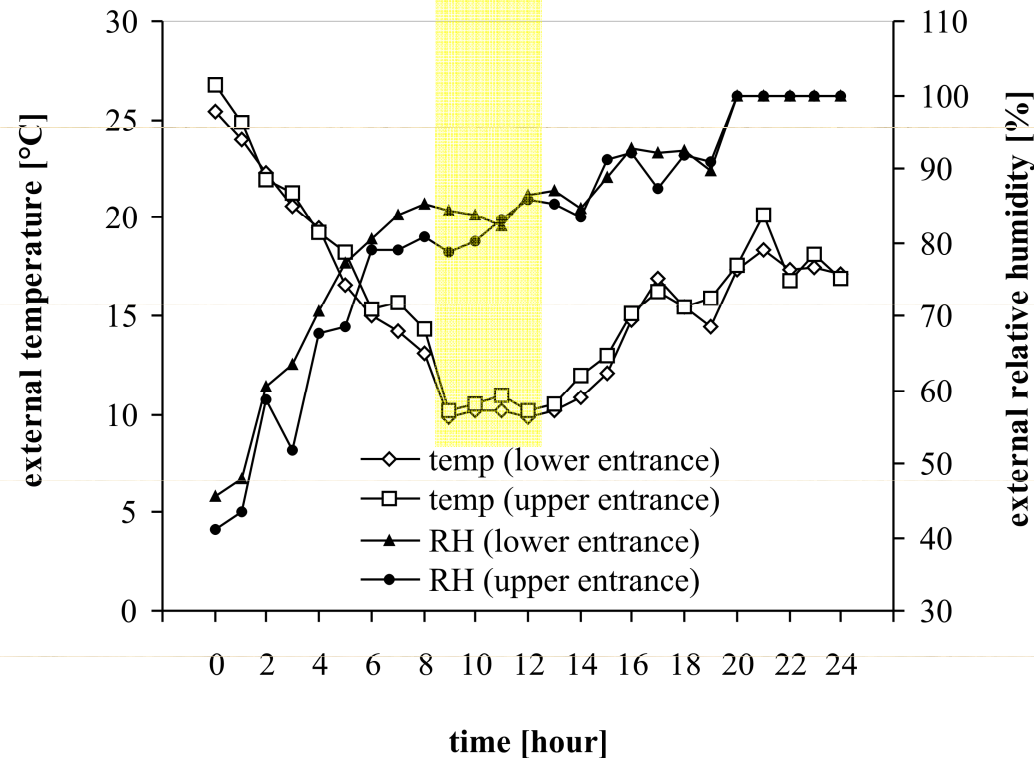
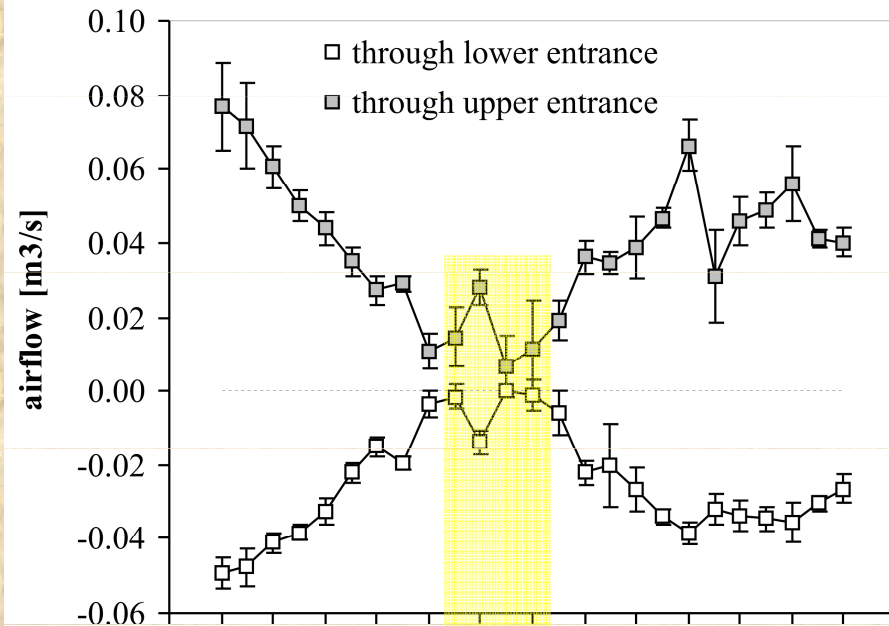
(B) teplota a vlhkost venkovní atmosféry poblíž spodního (LE) a horního (UE) vchodu jeskyně.



Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Císařská jeskyně - 24h data

Průměrné proudění atmosféry
(toky vzduchu $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)



Diurnální variace ve ventilaci Císařské jeskyně

(A) Objemové toky vzduchu
přes horní (LE) a dolní (LE)
vchod jeskyně

(B) Teplota a vlhkost vnější
atmosféry poblíž horního (LE)
a dolního (LE) vchodu jeskyně.

Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

- Proudění v jeskyni - důsledkem rozdílu hustot mezi venkovní a jeskynní atmosférou.
- Hustota vzduchu je funkcí celé řady proměnných, nejvýznamnější teplota a vlhkost.

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

ρ hustota směsi [kg m^{-3}],
 M_i molární hmotnost i -plynu [kg mol^{-1}],
 P celkový tlak plyné směsi [Pa],
 p_w parc. tlak vodní páry [Pa],
 R plynová konstanta [$\text{m}^3 \text{Pa K}^{-1} \text{mol}^{-1}$],
 T absolutní teplota [K].

Parciální tlak vodní páry, p_w :

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

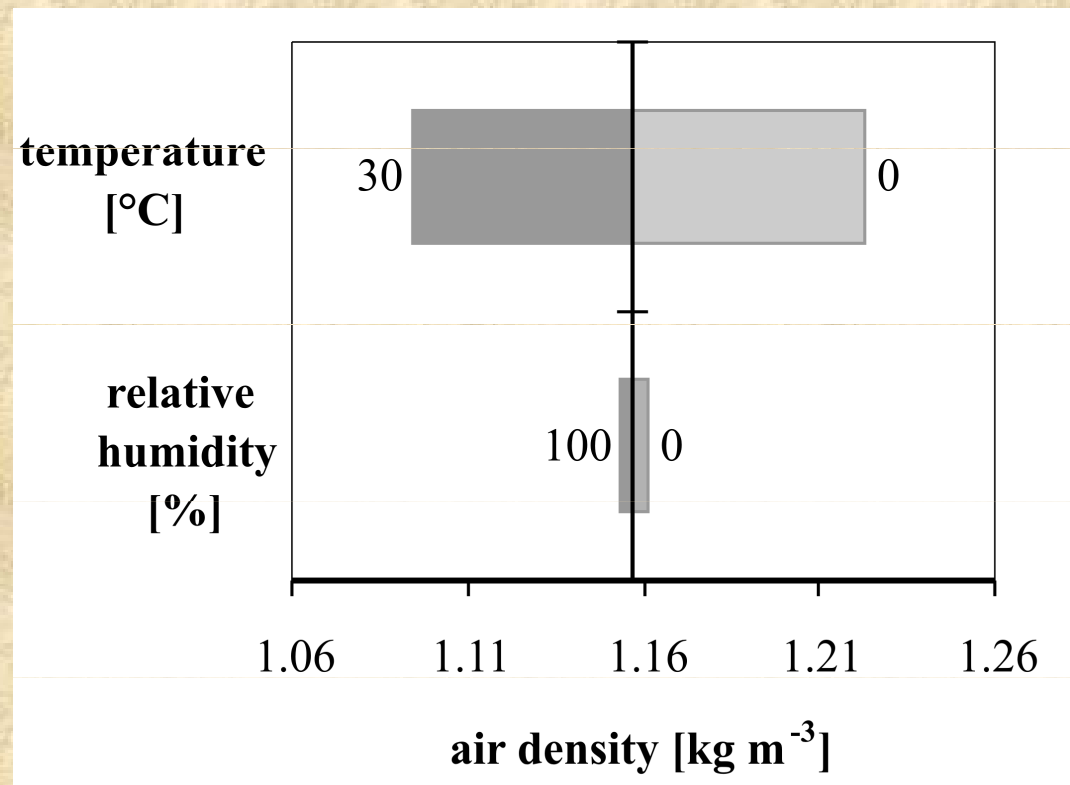
RH relativní vlhkost [%]

$T_0 = 273.15 \text{ K}$

a_i koeficienty

Výraz v závorce – parciální tlak nasycené vodní páry [Pa] při dané teplotě T [K] (Flatau et al., 1992)

Analýza teoretických matematických vztahů (sensitivity analysis) ukázala, že teplota je rozhodující proměnná:



Vliv teploty (v rozsahu 0–30 $^{\circ}\text{C}$) a relativní vlhkosti (v rozsahu 0–100 %) na hustotu vzduchu. Citlivostní analýza - tornádo graf.

Modelování – regresní analýza

Na soubory *objemové toky vzduchu* (zkratka AF) vs. *teplota* (T) byly aplikovány **matematické modely**

(a) *lineární model* (zkratka LM) $AF = b_0 + b_1 T$

(b) *kvadratický model* (QM) $AF = b_0 + b_1 T + b_2 T^2$

(c) *exponenciální model* (EM) $AF = b_0 + \frac{b_1}{b_2} \left(1 - e^{b_2 T} \right)$

Regrese data - nejprve odděleně pro 24h data, pak pro anuální data. Následně - data sloučena do jediného souboru, analyzována společně. Proložení dat modely uspokojivé; koeficienty determinace (R^2) se pohybovaly v rozmezí 0.601 až 0.752.

Analýza variance (ANOVA) - všechny modely jsou **statisticky významné** ($p < 0.0001$).

Pomocí regresní analýzy - vyčísleny jednotlivé **parametry modelů**:

Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

		c.d.	b_0		b_1		b_2		$\Gamma(AF=0)$
model	vchod	R^2	hodnota	p-level	hodnota	p-level	hodnota	p-level	°C
diurnální, 24h data:									
LM	LE	0.718	0.021	0	-0.003	0	-	-	7.15
QM	LE	0.735	0.044	0	-0.006	0	9.05E-05	0	8.55
EM	LE	0.736	0.058	0	0.009	0	-6.93E-02	0	8.74
LM	UE	0.601	-0.018	0	0.003	0	-	-	5.19
QM	UE	0.601	-0.019	3.43E-06	0.004	1.04E-13	-2.19E-06	0.8709	5.26
EM	UE	0.601	-0.019	4.24E-06	-0.004	3.03E-13	-1.40E-03	0.8564	5.27
anuální data:									
LM	LE	0.605	0.062	0	-0.004	0	-	-	15.71
QM	LE	0.621	0.068	0	-0.006	0	5.75E-05	0	14.2
EM	LE	0.622	0.068	0	0.006	0	-3.04E-02	6.84E-11	14.2
LM	UE	0.72	-0.111	0	0.007	0	-	-	15.99
QM	UE	0.75	-0.129	0	0.011	0	-1.33E-04	0	14.09
EM	UE	0.752	-0.129	0	-0.012	0	-3.81E-02	0	14.13
kombinovaná anuální + 24h data:									
LM	LE	0.614	0.049	0	-0.004	0	-	-	11.88
QM	LE	0.684	0.069	0	-0.008	0	1.25E-04	0	10.72
EM	LE	0.68	0.068	0	0.008	0	-5.53E-02	0	10.58
LM	UE	0.654	-0.085	0	0.007	0	-	-	12.63
QM	UE	0.747	-0.127	0	0.014	0	-2.31E-04	0	11.39
EM	UE	0.748	-0.127	0	-0.016	0	-6.48E-02	0	11.14

Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Nalezení **matematické závislosti** umožňuje:

(1) odhad ventilace jeskyně v závislosti na venkovní teplotě

(2) určení teploty, $T(AF=0)$, při které je ventilace jeskyně nejnižší (nulová).

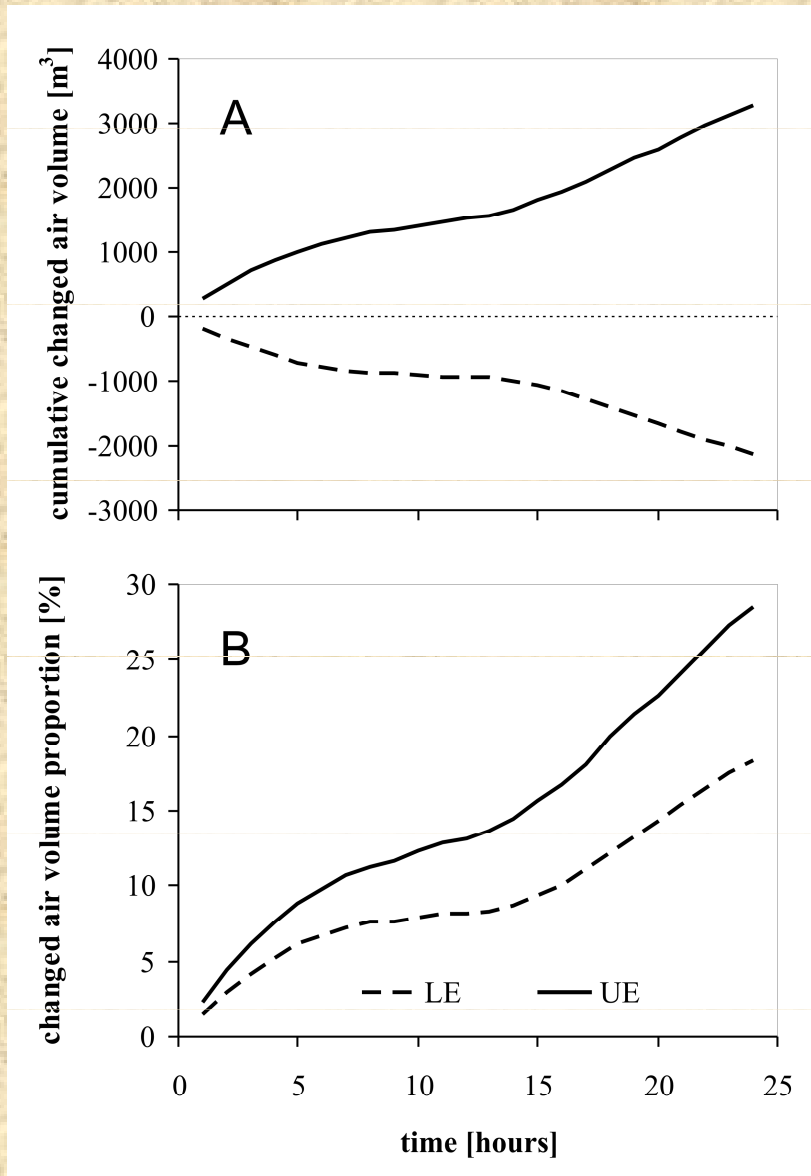
- Hodnoty vypočtené z jednotlivých datových souborů kolísají v širokém rozmezí
- Nejvíce věrohodné - hodnoty získané z *kombinovaných anuálních a 24h dat*.
- Pokud považujeme proudění horním vchodem za určující, jsou to teploty $T \sim 11,14$ až $12,63$ (*poslední 3 řádky v tab.*).

Vzhledem k tomu, že nelineární modely jsou statisticky významnější, lze za věrohodnou hodnotu **$T(AF=0)$ považovat teplotu kolem $11,2^\circ\text{C}$.**

Tato teplota je paradoxně o něco vyšší než průměrná teplota v jeskyni $9,8 \pm 1,9^\circ\text{C}$ (včetně vstupních pasáží), popř. $9,6 \pm 1,4^\circ\text{C}$ (bez vstup. pasáží).

Rozdíl může souviset se ztrátou energie třením atmosféry o stěny jeskyně při proudění atmosféry.

Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní



Dynamika výměny jeskynní atmosféry během sledovaného diurnálního cyklu (24h data).

(A) kumulativní nárůst absolutních objemů vzduchu vyměněných během 24h

(B) Relativní množství vyměněného vzduchu

Během 24 hodin se vymění za daných podmínek téměř 30% celkového objemu jeskyně (pokud chápeme horní vchod jako určující)

Venkovní teplota trvale nad/pod teplotou $T(AF=0) \sim 11,2^{\circ}C$ (léto/zima)

- **kompletní výměně jeskynní atmosféry za venkovní vzduch**
- v závislosti na velikosti odchylky od $T(AF=0)$ výměna během jednoho až několika dnů

Maximální *objemová rychlost proudění* $v \sim 0,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (únor 2007, venkovní teplota $T \sim -3^{\circ}C$) odpovídá *ventilaci jeskyně* $u \sim 0,07 \text{ hod}^{-1}$ a *času zadržení* $\tau \sim 14,3 \text{ hod}$. Za předpokladu ideálního pístového toku by se jeskynní atmosféra vyměnila za 14,3 hodiny.

Oscilace venkovní teploty kolem $T(AF=0) \sim 11,2^{\circ}C$ (jaro, podzim)

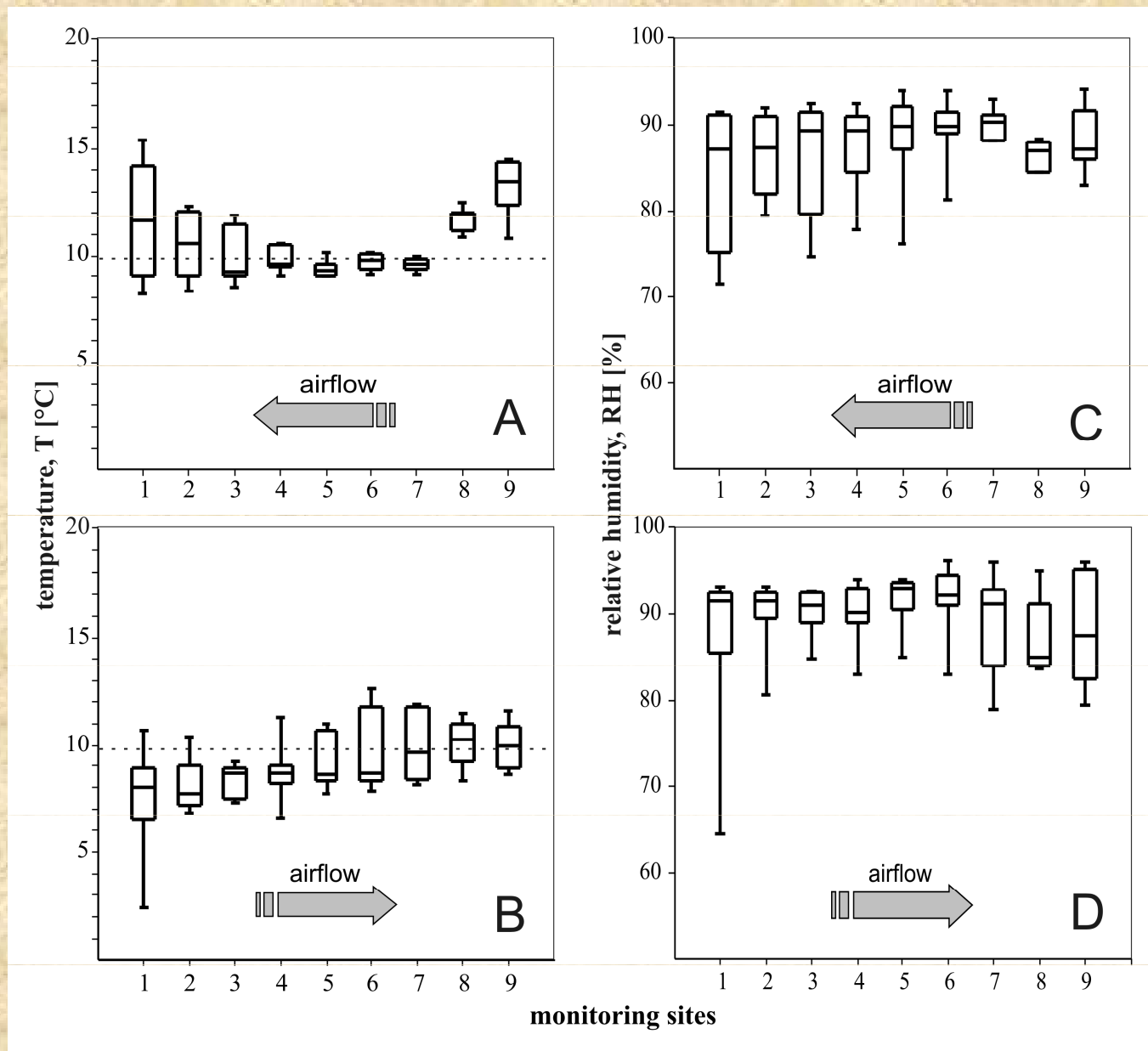
- jeskynní atmosféra „potahována“ střídavě směrem k hornímu resp. dolnímu vchodu
- výměně dochází jen ve vstupních pasážích jeskyně. V hlubších pasážích „starší“ jeskynní atmosféra zachovaná.

Výměna atmosféry může být vnímána jako **nežádoucí (kontaminace jeskynního prostředí)**:

- (1) je při ní vynášen autigenní jeskynní speleo-aerosol a nahrazován aerosolem vnější atmosféry (včetně virů, spor, resp. cizorodého, často technogenního prachu)
- (2) jsou při ní vynášeny autigenní plyny (CO_2/Rn) a nahrazovány plyny technogenními (oxidy dusíku a síry)
- (3) může být ovlivněna teplota a vlhkost především ve vstupních pasážích jeskyně (viz dále)

**Ventilace udržuje nízké hladiny CO_2 v jeskynním prostředí!!!!
Hnací síly pro růst speleotém!**

Vliv proudění na mikroklimatologii Císařské jeskyně



Vliv sezónních variací ve ventilaci Císařské jeskyně na rozložení teploty a vlhkosti.

Čísla na x-ose odpovídají monitorovacím místům

Rozložení teploty napříč jeskyní závisí na aktuálním směru proudění (A B)

Rozložení vlhkosti je spíš kontrolován skapovými vodami než ventilací (C D)

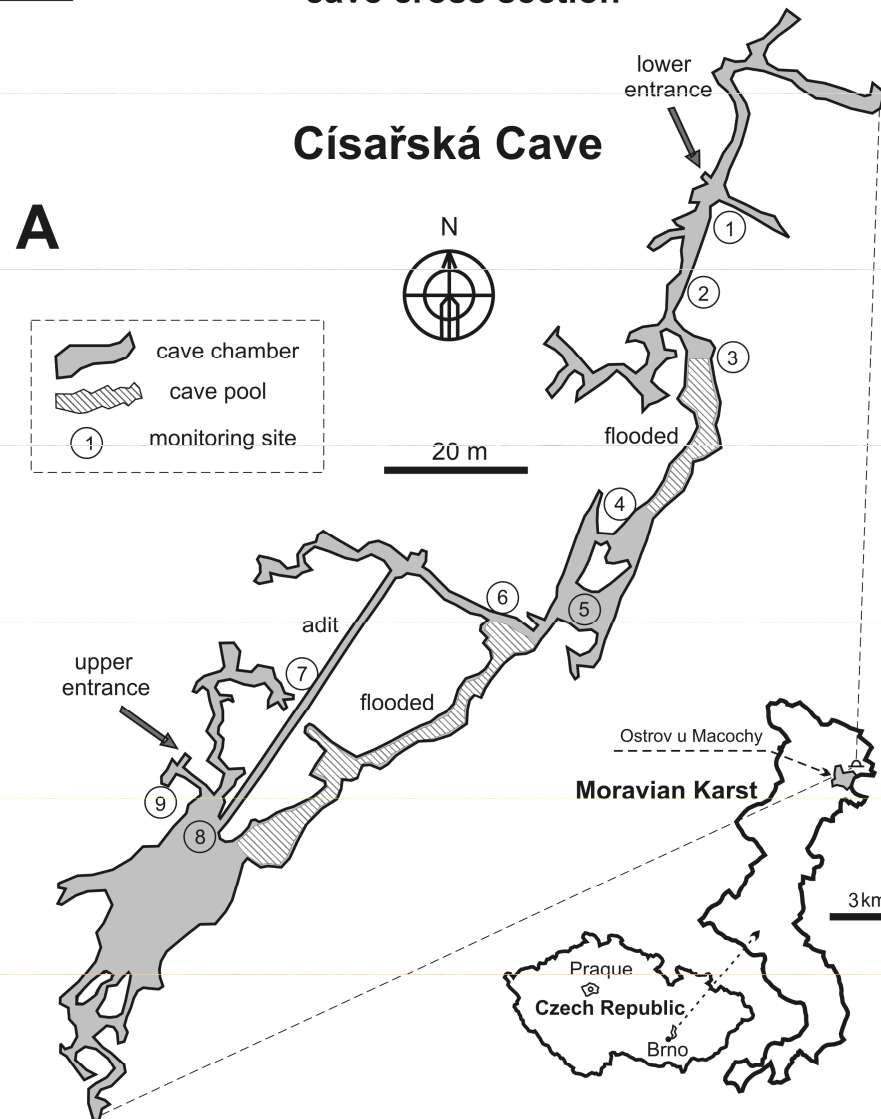
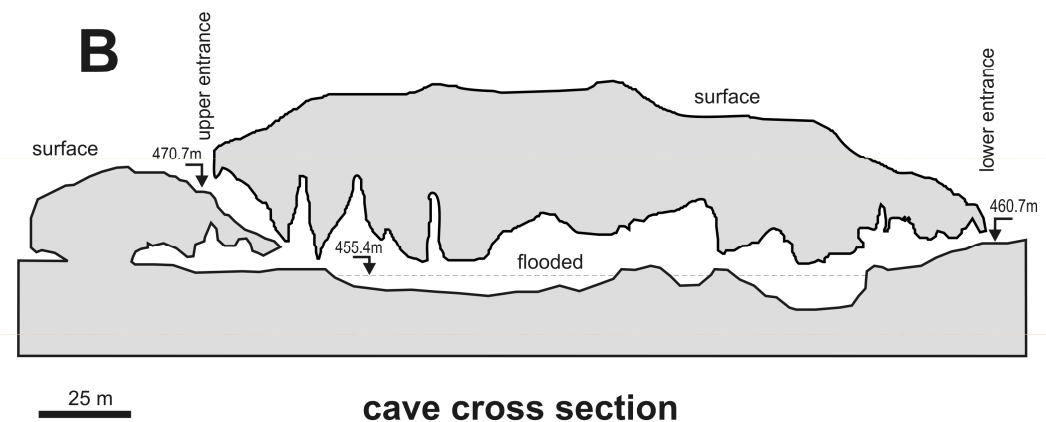
Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

(A) Mapka Císařské jeskyně

(B) Plánek příčného řezu

Podle Absolon, 1970.

Čísla představují
monitorovací místa.



Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Vliv vysokofrekvenčních variací v proudění jeskynní atmosféry na koncentraci CO_2 a teplotu v Císařské jeskyni

(A) CO_2 v jeskynní atmosféře

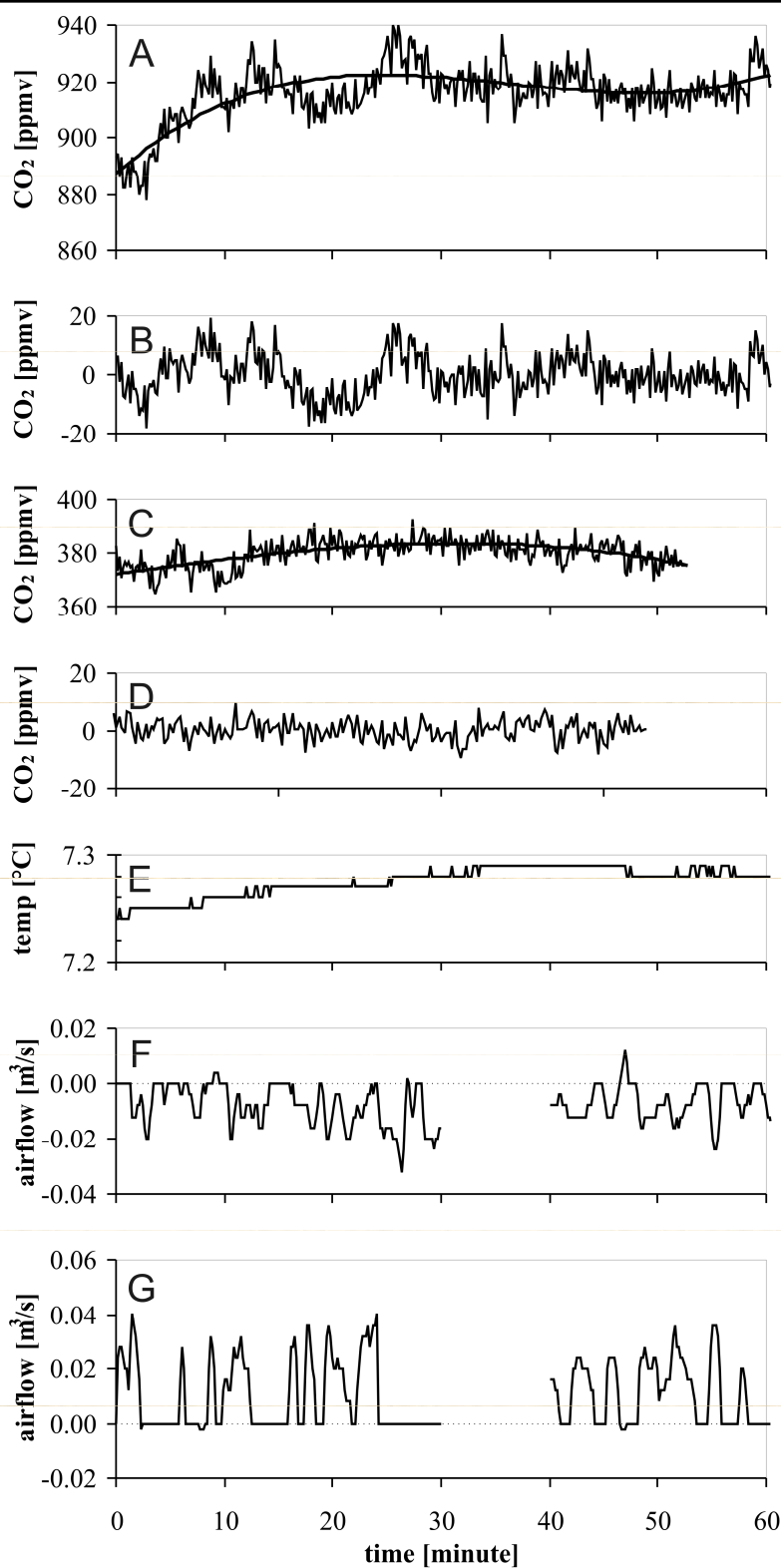
(B) CO_2 v jeskynní atmosféře po odečtení nízkofrekvenčního signálu

(C) CO_2 ve venkovní atmosféře

(D) CO_2 ve venkovní atmosféře po odečtení nízkofrekvenčního signálu

(E) teplota v jeskyni

(F, G) objemové proudění jeskynní atmosféry v úrovni horního a dolního vstupu



Karsologie I: mikroklimatologie jeskyní

Detailní analýza diurnálních variací koncentrace CO₂ v

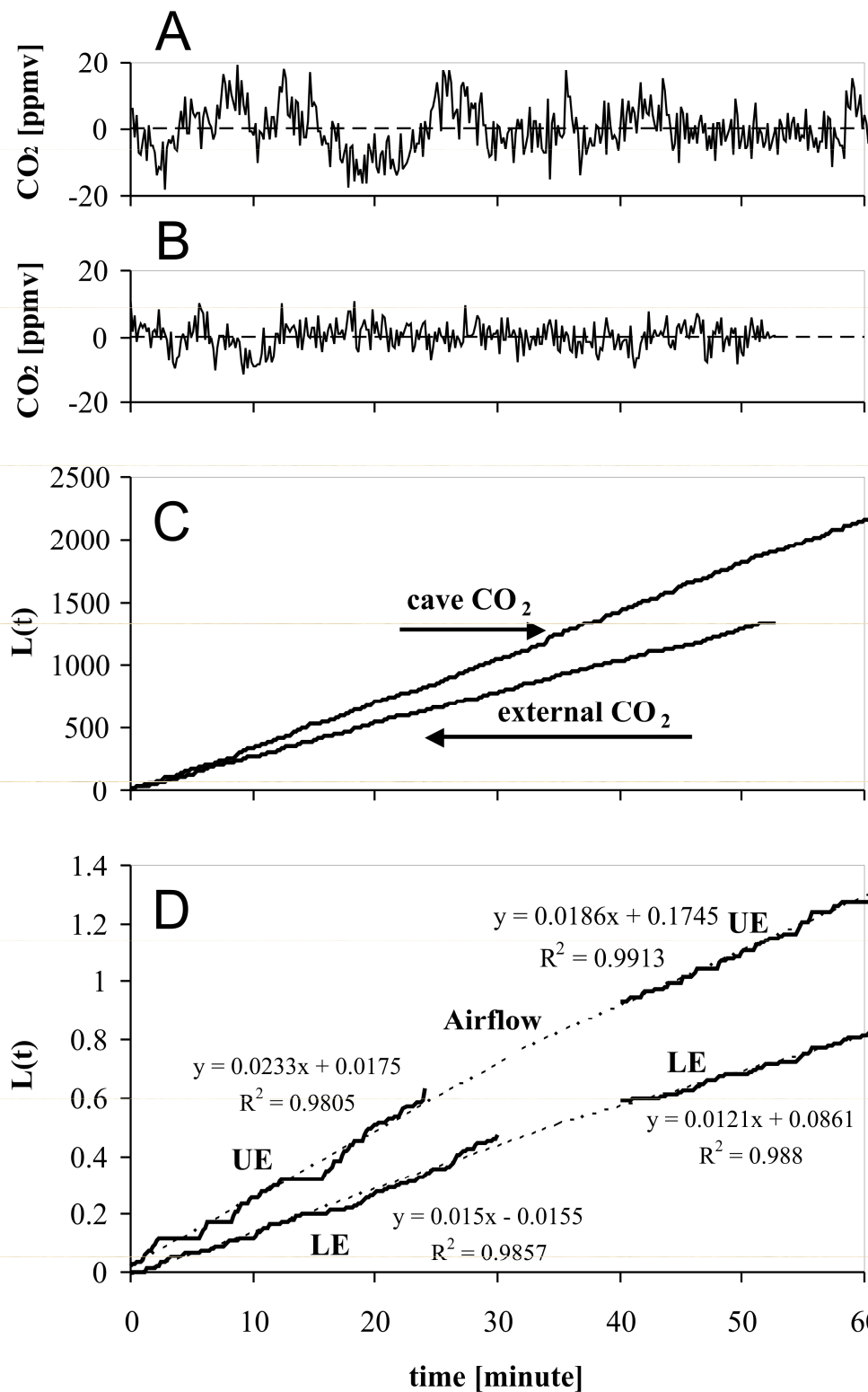
(A) Císařské jeskyni

(B) venkovní atmosféře

Entropie křivek

(C) oxid uhličitý

(D) objemové toky vzduchu horním (UE) a dolním (LE) vchodem

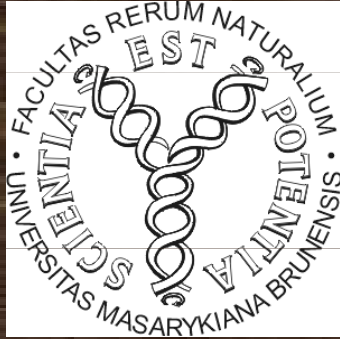


Kondenzace vody v jeskynním prostředí

- **Absolutní vlhkost** vzduchu - hmotnost vodní páry (g) v jednotkovém objemu vzduchu (m^3)
- **Relativní vlhkost vzduchu** - poměr mezi aktuální hmotností vodních par ve vzduchu a maximálně dosažitelnou hmotností par při dané teplotě a tlaku

Pokud teplota vzduchu o dané vlhkosti klesne k rosnému bodu (teplota kdy je pára nasycená), dochází ke kondenzaci vody!

- Zkondenzovaná voda je principiálně
 - nasycená CO_2
 - nenasycená kalcitem
- Zkondenzovaná voda rozpouští karbonátové horniny (vápence a sintry)
Tento proces se nazývá **kondenzační koroze**
- agresivita kondenzační vody se zvyšuje se vzrůstajícím množstvím rozpuštěného CO_2



Department of Geological Sciences
Faculty of Sciences, Masaryk University,
Czech Republic

Cave Microclimate Impact on Karst Processes: Role of Cave Ventilation

Jiří Faimon, Dana Troppová

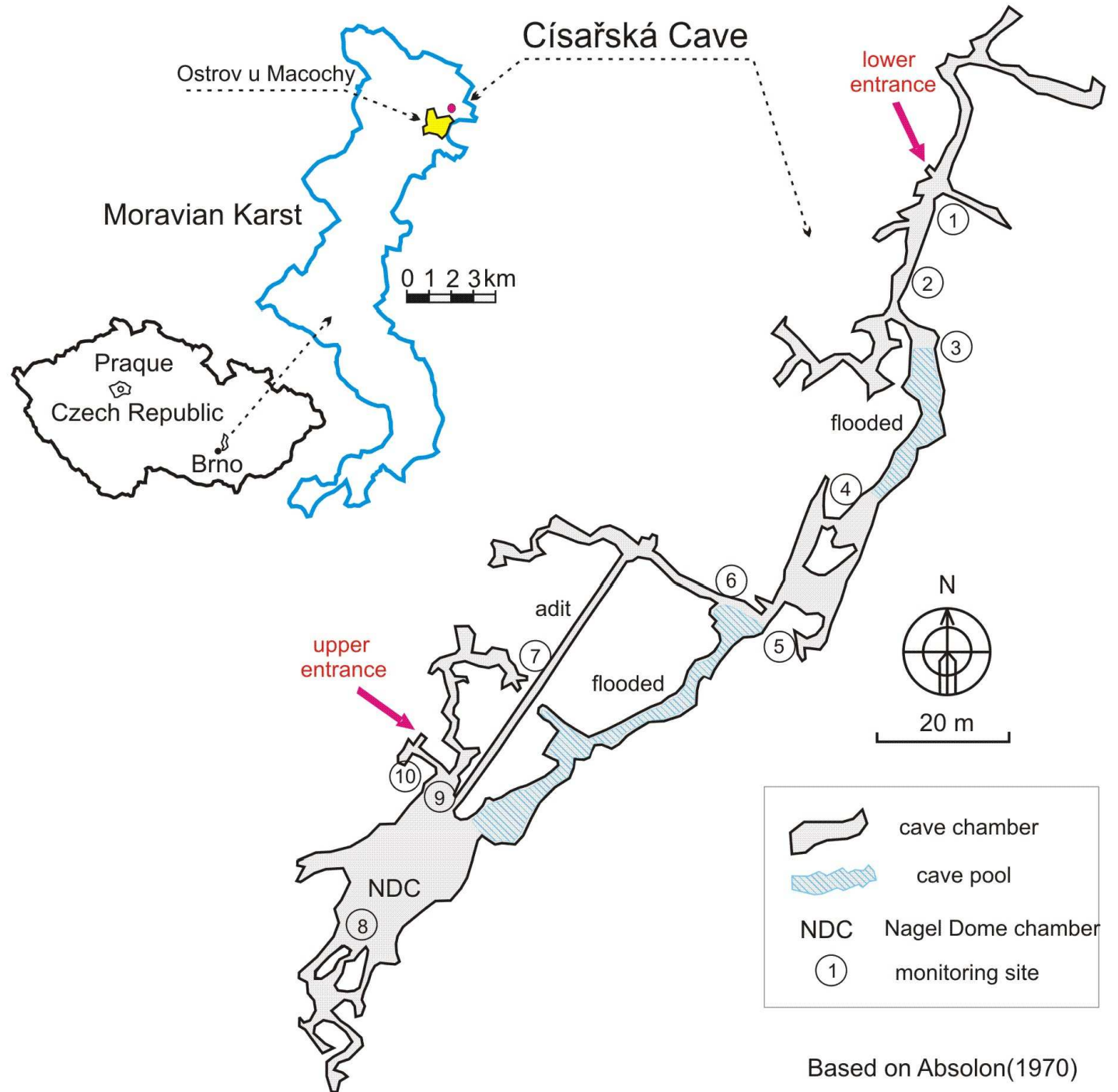
2007

Case Study: Císařská Cave (Czech Republic)

North Part of the
Moravian Karst

Devonian Limestone

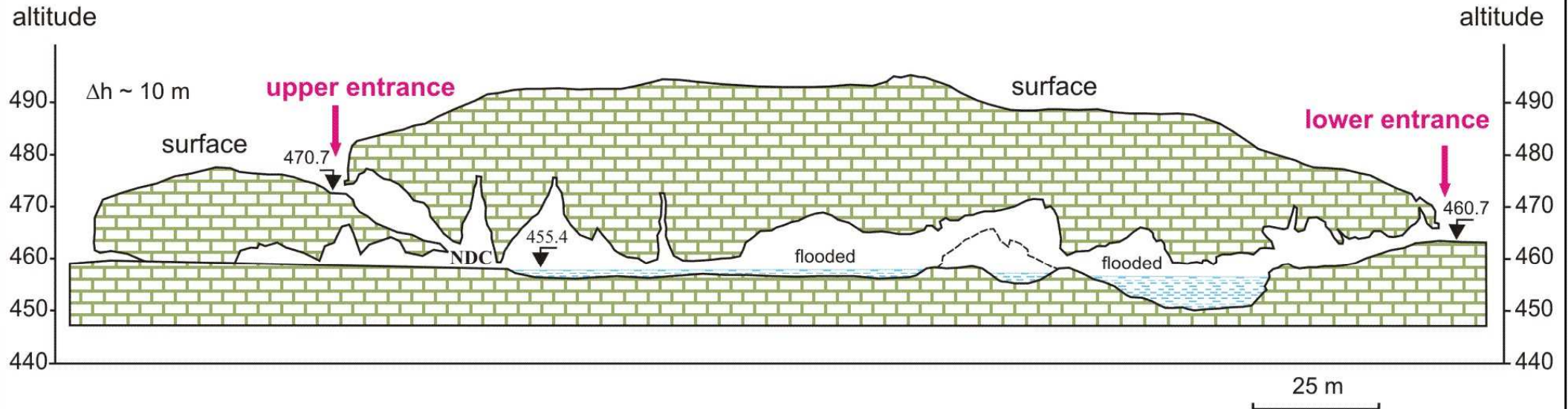
Macocha Strata Group



Microclimate Impact on Karst Processes

Based on Absolon (1970)

Císařská cave: cross section

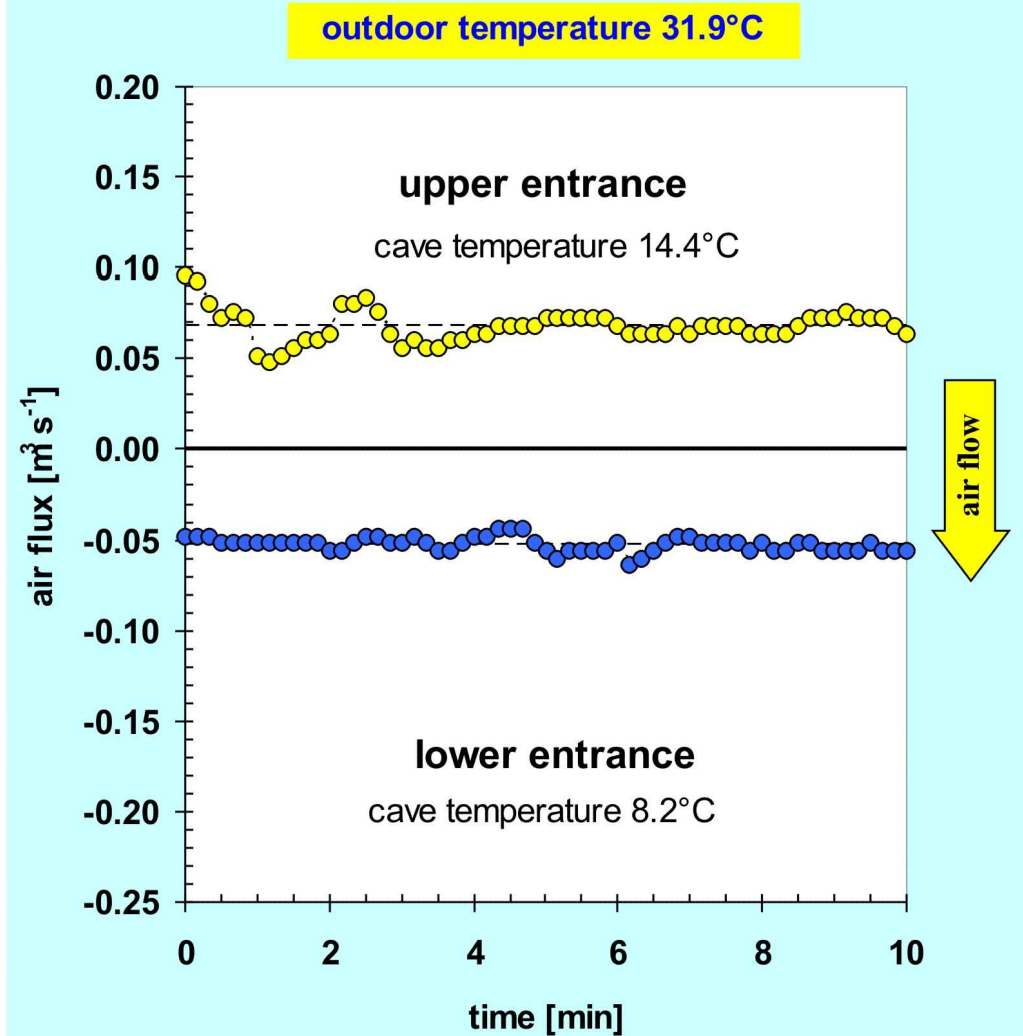
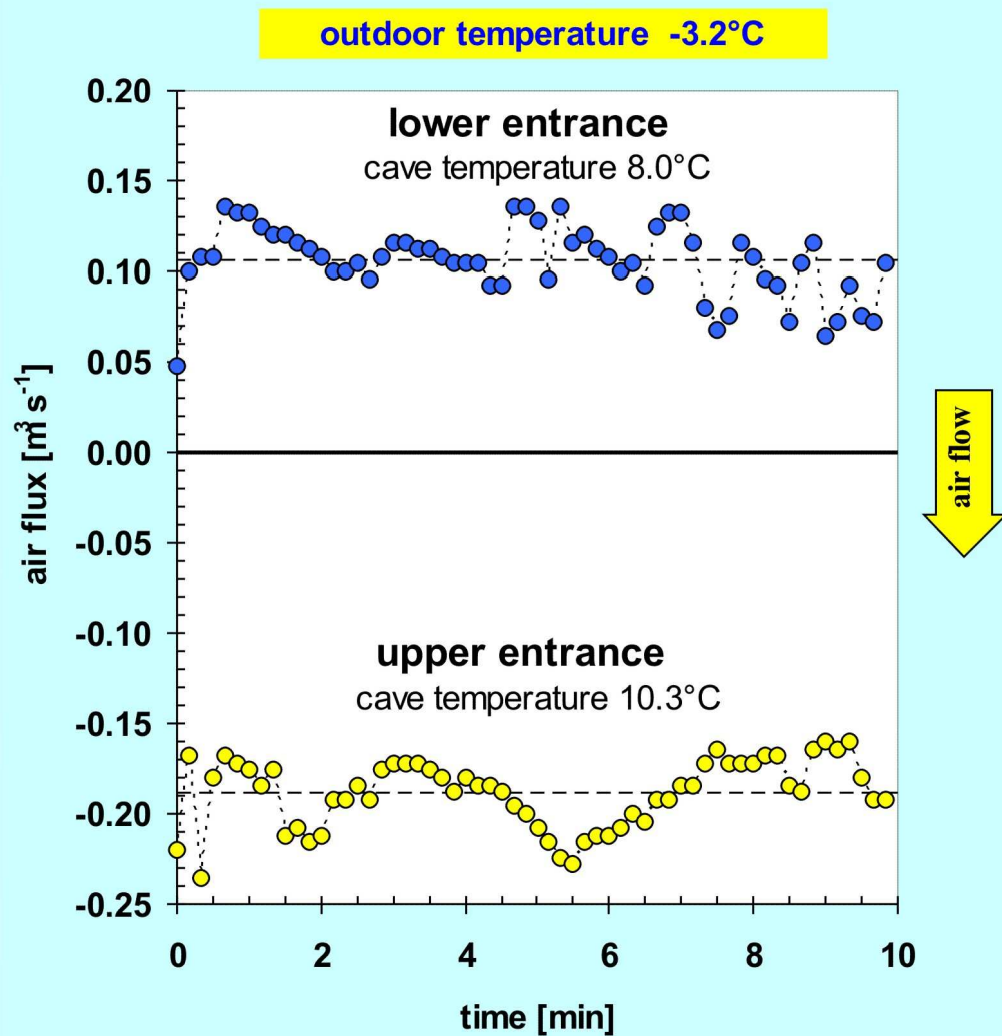


Methods

- air flow (anemometer, La Crosse EA 3000)
- temperature/humidity (thermometer/hygrometer, Greisinger GFTH 200)
- condensation extent (estimated on a relative scale, 0 – 4)

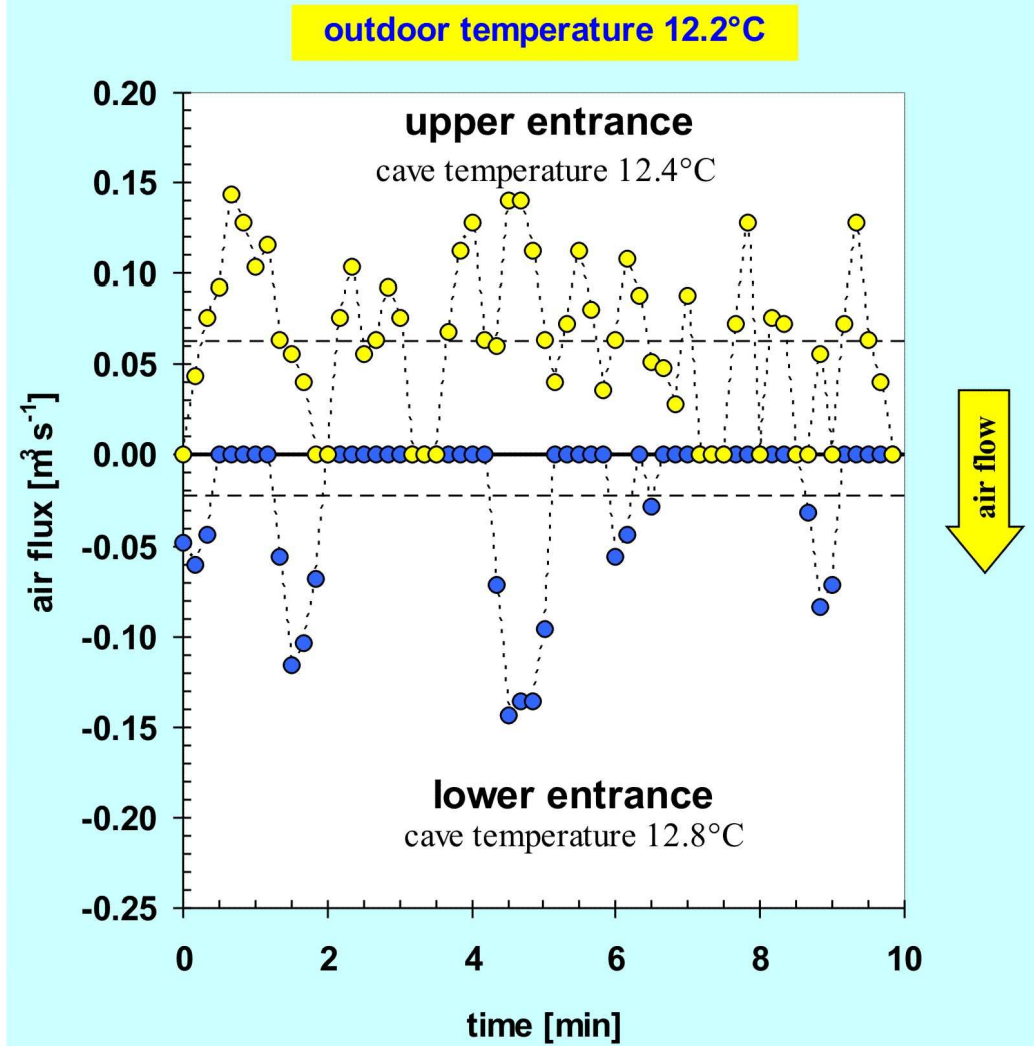
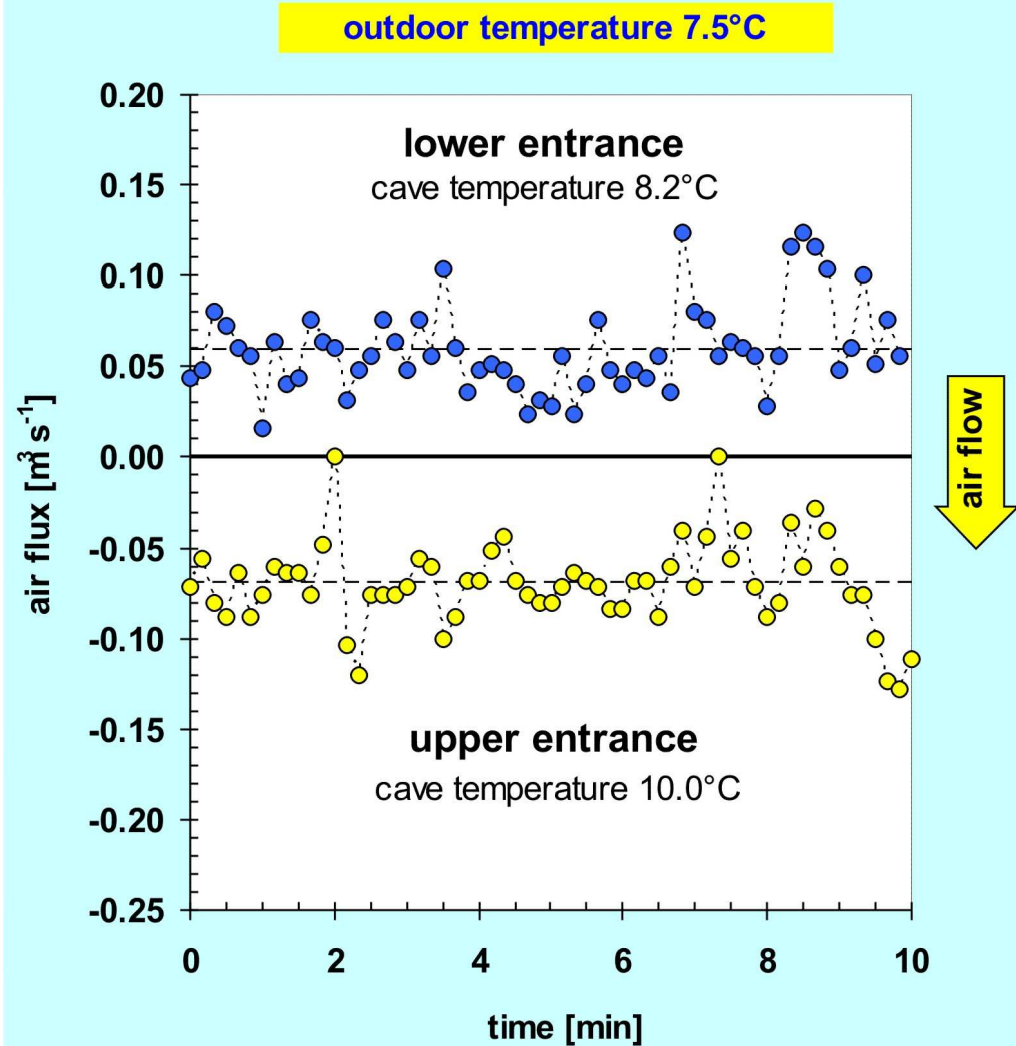
Results

Air Flow / Cave Ventilation



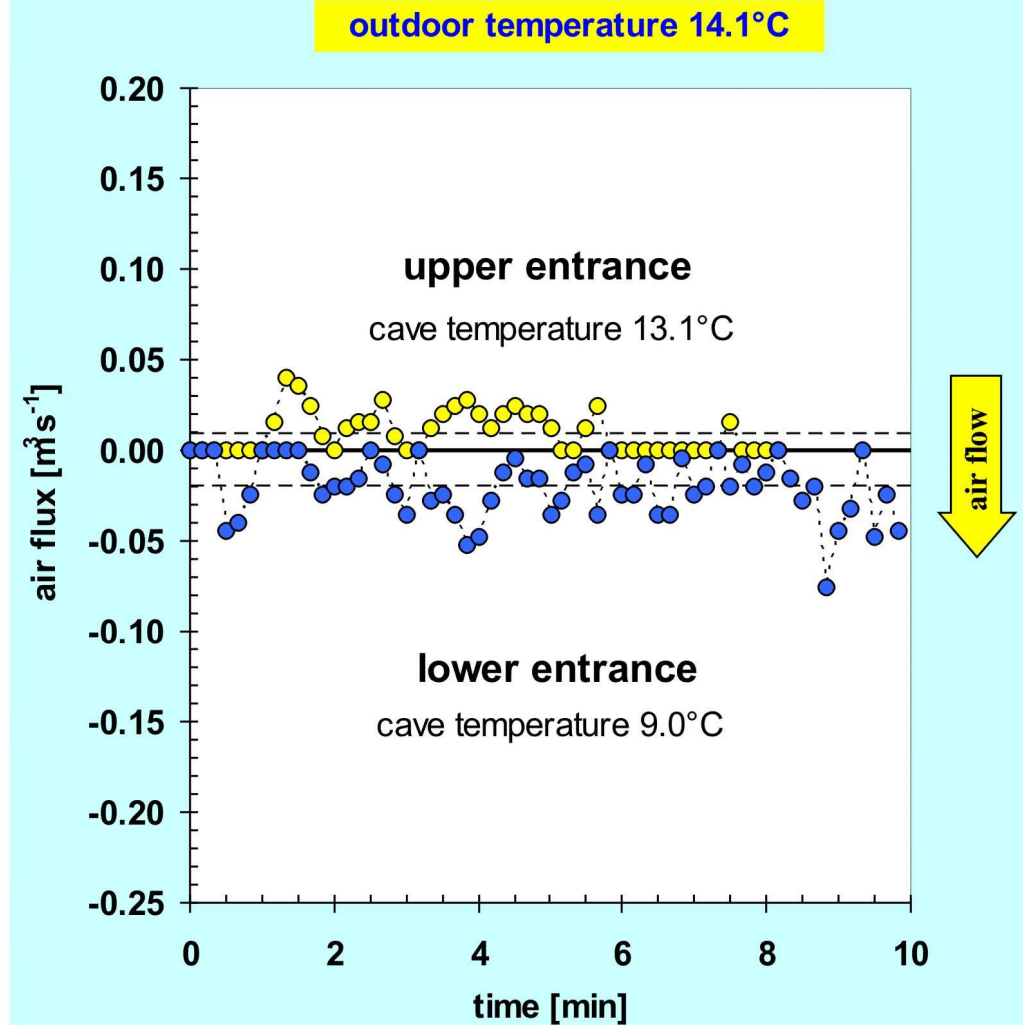
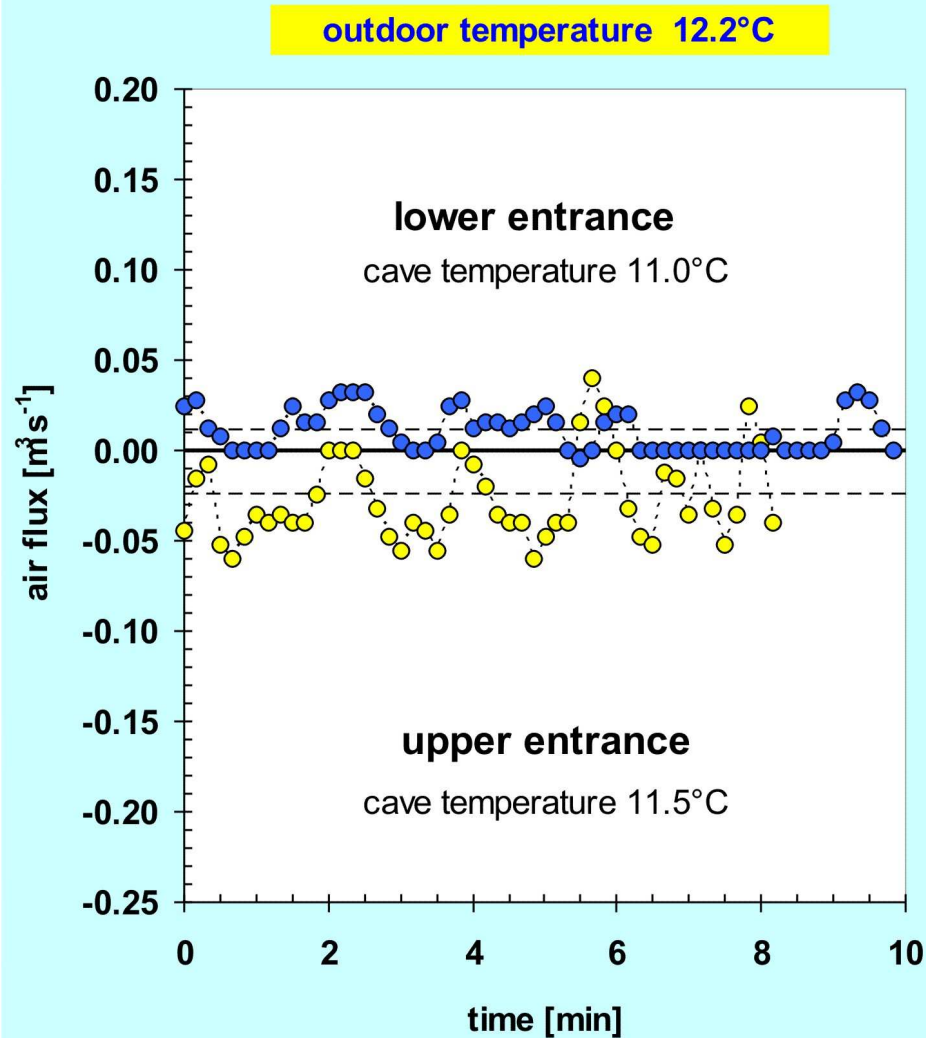
Microclimate Impact on Karst Processes

Air Flow / Cave Ventilation

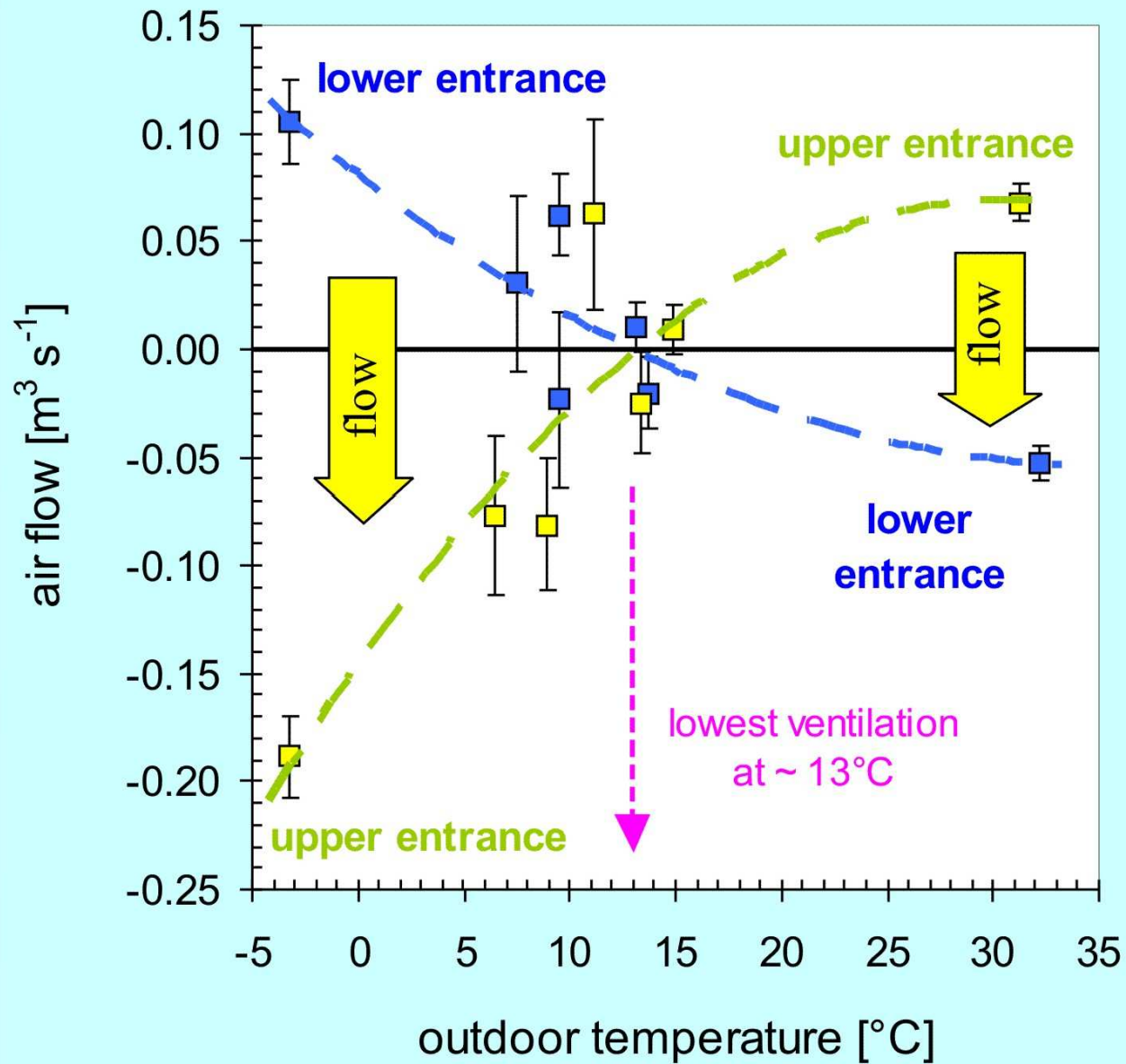


Microclimate Impact on Karst Processes

Air Flow / Cave Ventilation



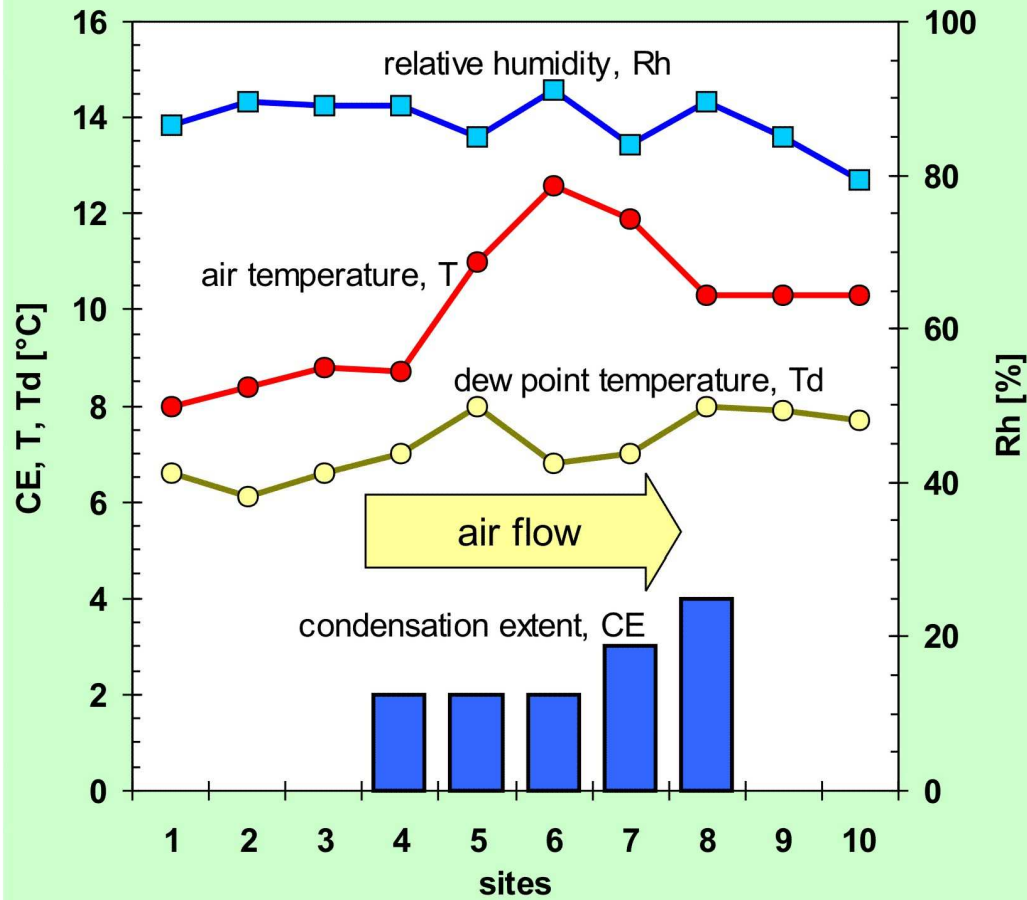
Microclimate Impact on Karst Processes



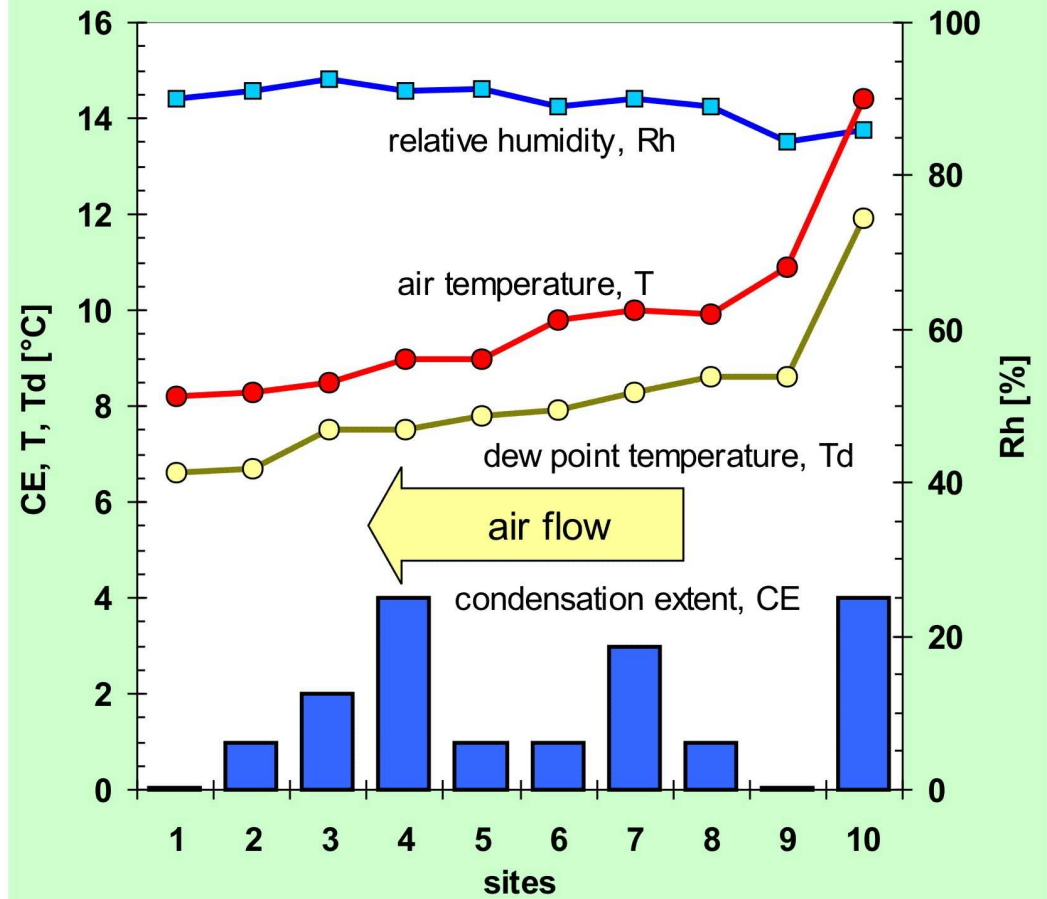
Microclimate Impact on Karst Processes

Microclimatologic Parameters and Water Condensation

outdoor temperature -3.2°C

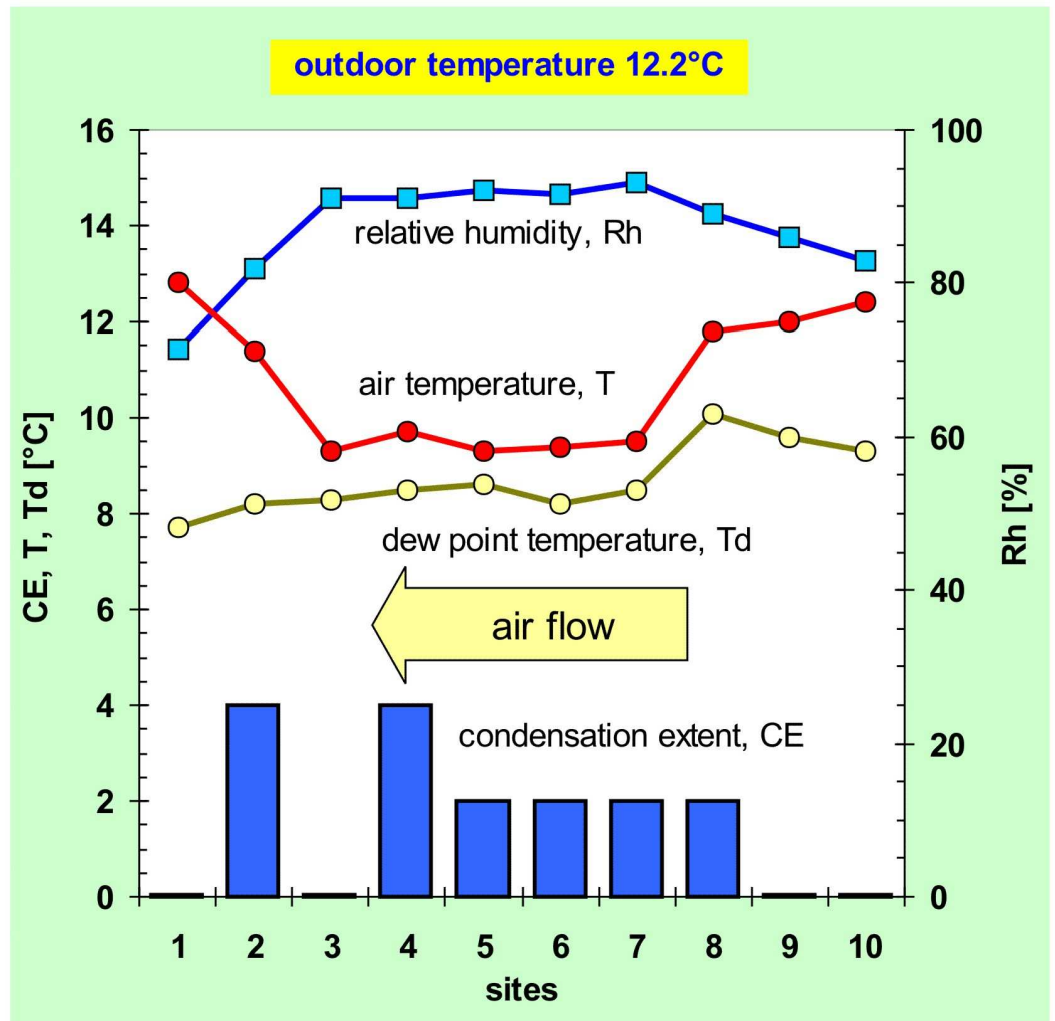
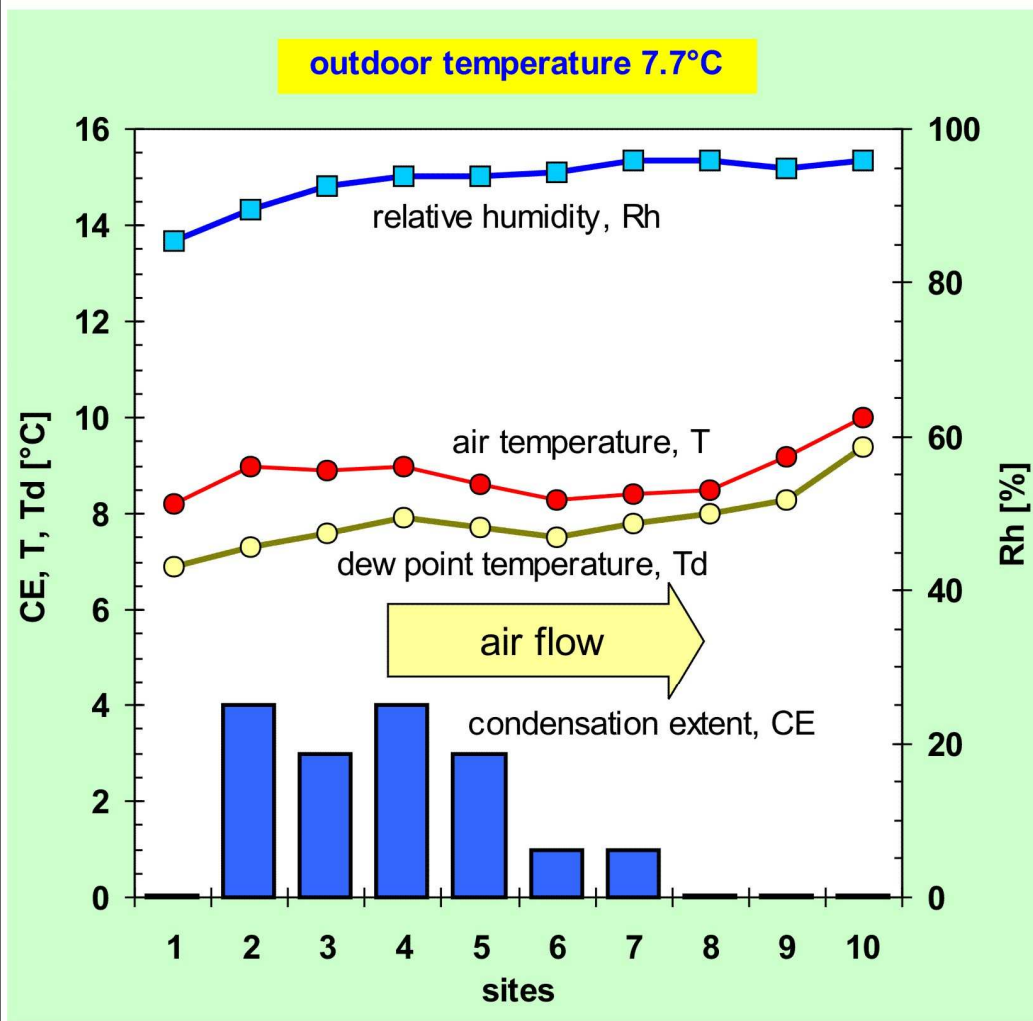


outdoor temperature 32°C



Microclimate Impact on Karst Processes

Microclimatologic Parameters and Water Condensation



Conclusions

- cave microclimatic parameters change with cave ventilation
- cave ventilation is controlled by outdoor conditions (temperature)
- air flux through cave oscillates
- dependence of *air flux* on *outdoor temperature* is nonlinear
- cave ventilation controls levels of gasses in cave atmosphere
- both air flow intensity and direction control cave water condensation

References

Absolon K. (1970) Moravský kras (in Czech). Academia, Prague, 416 pp, (in Czech).

Faimon J., Štelcl J., Sas D. (2006) Anthropogenic CO₂-flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). Science of the Total Environment 369, 231–245.

For more information: faimon@sci.muni.cz
Institute of Geological Sciences
Faculty of Sciences, www.sci.muni.cz
Masaryk University
Brno, Czech Republic

Thank You!