

**HODNOTY CHEMICKÉ DENUDACE**

POKUS S MIKROERODIMETREM (MEM) *(Kunaver, J., 1979: Some experiences in measuring surface karst denudation in high alpine environment)*

MEM měří denudaci holé skály	DENUDACE		
	POVRCHOVÁ [mm ka <sup>-1</sup> ]	CELKOVÁ [m <sup>3</sup> km <sup>-2</sup> ka <sup>-1</sup> ]	POVRCHOVÁ %
Kavkaz	43	130	33,08
Kanin	31	94	32,98
Triglav	20	60	33,33
Dachstein	20	-	
Schwyzer Kalkalpen	20	-	
Tatry	15	46	32,61
Brenta	15	-	
Marguerais	13	40	32,50

**POKUS S MIKROERODIMETREM**

*(Ford, D. C., & Williams, P.W., 1989: Karst geomorphology and Hydrology)*

**PŘÍKLADY ZE SVĚTA (MEM) v různých geodynamických prostředích**

	[mm ka <sup>-1</sup> ]	
Co. Clare, Irsko	200	vápenec
Co. Clare, Irsko	500	vápenec, ponor
Co. Clare, Irsko	410	vápenec, aktivní chodba
Co. Clare, Irsko	50	vápenec, pramen
Co. Clare, Irsko	5	Ø snižování povrchu
Yorkshire	13	Ø snižování povrchu
Pikhagan, severní Norsko	25	mramor
Kajmanské ostrovy	383	kalkarenit
Aldabra Atoll	1250	korálový vápenec
Sv. Pavel, Londýn	139	portlandský vápenec

**SROVNATELNÉ HODNOTY ZVEDÁNÍ**

*(Summerfield, M. A., 1991: Global geomorphology)*

	[mm ka <sup>-1</sup> ]	
Centrální Alpy	400 - 1000	kůra
Kulu-Mandi Belt, Himálaj	700	kůra
Jižní Alpy, Nový Zéland	10 000	kůra
Poloostrov Huon, Nová Guinea	1000 - 3000	povrch
Jižní Alpy, Nový Zéland	5000 - 8000	povrch

**HODNOCENÍ DENUDACE V NĚKTERÝCH POVODÍCH***(Summerfield, M. A., 1991: Global geomorphology)*

	Celková denudace	Chemická denudace	
	[mm ka <sup>-1</sup> ]	[mm ka <sup>-1</sup> ]	%
Brahmaputra	677	34	5
Chuang Che (Žlutá řeka)	529	11	2
Ciang Jiang (Jangce)	133	37	28
Amazonka	70	13	18
Dunaj	47	16	35
Mississippi	44	9	20
Volha	20	13	64
Nil	15	2	10
Řeka sv. Vavřince	13	12	89
Lena	11	9	81
Jenisej	9	7	80
Chari	3	1	29

**DOBA ROZPOUŠTĚNÍ V PŮDÁCH***(Ford, D.C., & Williams, P.W., 1998: Karst geomorphology and Hydrology)*

	Denudace [mm ka <sup>-1</sup> ]	Poznámka
Fergus River, Irsko	55	60 % povrch, 80 % svrchních 8m
NW Yorkshire	83	50 % povrch
Jura, Švýcarsko	98	33 % holá skála, 58 % pod půdou, 37 % zóna přesunu, 5 % jeskynní kanály
Coleman Plains, Austrálie	24	75 % povrch a zóna přesunu, 20 % jeskynní kanály, 5% pokrytý kras
Somerset Island, Kanada	2	100 % nad permafrostem
Waitomo, Nový Zéland	69	60 % na povrchu a v zóně přesunu
Cave Branch, Belize	90	40 % v jeskynních kanálech

**VZNIK A ZVĚTŠOVÁNÍ JESKYNNÍCH KANÁLŮ**

ZVĚTŠOVÁNÍ PRŮŘEZU JESKYNNÍHO KANÁLU (»CHODBY«):

$$\frac{dA}{dt} = \frac{31,56Q}{\rho_r} \frac{dC}{dL} \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}$$

Kde je:

$dL$	Diferenciál délky výseku kanálu
$dA$	Diferenciál povrchu průřezu kanálu
$Q$	Průtok [ $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ]
$dC$	Diferenciál koncentrace $\text{CaCO}_3$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]
$\rho_r$	Hustota horniny [vápenec max. $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ ]
$dA/dt$	Přírůstek povrchu v čase [ $\text{cm}^2 \text{ a}^{-1}$ ]
$dC/dL$	Přírůstek koncentrace rozpuštěné hmoty podél pozorovaného úseku kanálu [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]
31,56	Konstanta pro přeměnu jednotky (cgs systém)

Základní geometrické modely:

	Nárůst povrchu průřezu		Namočené lemování, obruba ( $p$ )
Kulatá roura	$dA = 2\pi r dr$	$r$ : poloměr roury	$2\pi r$
Planární mezera (trhlina)	$dA = b dw$	$b, w$ : šířka mezery (trhliny)	$2b$

RYCHLOST ODSOUVÁNÍ (ROZPOUŠTĚNÍ) STĚNY:

$$S = \frac{31,56Q(C - C_0)}{pL\rho_r} \text{ cm a}^{-1}$$

Kde je:

$S$	Stupeň posunu stěny ; $dr/dt$ pro rouru, $dw/2dt$ pro mezeru
$C$	Koncentrace roztoku
$C_0$	Koncentrace roztoku při vstupu do segmentu

PRŮTOK INICIÁLNÍMI STRUKTURAMI URČUJÍ:

Použitelné napájení:	<i>Kontrola povodí</i>	časově více stabilní
Vodivost kanálu:	<i>Hydraulická kontrola</i>	s růstem kanálu ztrácí vliv

**REŽIMY TOKU**

Tok v kanálech: laminární ↔ turbulentní

Kritériem je Reynoldsovo číslo. Kritická hodnota  $R_e \approx 500$ .

$$R_e = \frac{\rho v R}{\mu}$$

Kde je  $R$  hydraulický poloměr, roury:  $r/2$ , mezery:  $w/2$   
 $\rho$  hustota vody  
 $v$  rychlost vody  
 $\mu$  dynamická viskozita vody

Dříve nežli začne korozní rozšiřování (začátek krasovění / iniciace) je tok po mezerách zpravidla laminární. Přechod do turbulentního se uskutečňuje při  $w \approx 1 - 20$  mm.

LAMINÁRNÍ TOK v uzavřené rouři popisuje Hagen-Poiseuille-ův vzorec:

$$Q = \frac{R^2 \gamma A}{c \mu}$$

Kde je:  $c$  Konstanta tvaru: roury: 2, mezery: 3  
 $\gamma$  Specifická hmotnost vody  
 $i$  Hydraulický gradient (ztráta energetické výšky / délka)

Pro mezery neznámé šířky ( $b$ ) používáme parametr *lineární průtok*:

$$Q = Q/b = v \times w$$

TURBULENTNÍ TOK v uzavřených nebo otevřených převodnicích popisuje Darcy-Weissbachův vzorec:

$$Q = A \frac{8Rgi}{f}$$

Kde je:  $g$  Zemské zrychlení  
 $f$  Faktor tření pro plně turbulentní tok v rovných rourách a mezerách  $f = 0,03 \leftrightarrow 0,1$ .

France  
 Šušteršič

## DYNAMIKA ROZŠÍŘOVÁNÍ JESKYNNÍCH KANÁLŮ

Rychlost pohybu (ústupu) jeskynní stěny omezuje činnost na styku hornina – voda a nikoliv přenos hmoty v celém vodním tělese:

Molekulární difuze skrz laminární vrstvu:

$$\text{První Fickův zákon: } F = -D \frac{dC}{dx}$$

Změna koncentrace roztoku v čase:

$$\text{Původní Plummer-Wigley-ova rovnice: } \frac{dC}{dt} = k \frac{A}{V} (C_s - C)^2$$

$$\text{Vylepšená Plummer-Wigley-ova rovnice: } \frac{dC}{dt} = k' \frac{A}{V} \left(1 - \frac{C}{C_s}\right)^n$$

$k$  a  $n$  jsou funkcemi  $C/C_s$ , teploty a  $P_{CO_2}$ .

$C$  dokážeme stejně v celém průřezu – k tomu napomůže dostatečně rychlý přenos hmoty, rovněž ve stojaté vodě

Vztahy  $(C/C_s)_T$  na přechodu z jedné hodnoty potence ( $n = 1,48$ ) do druhé ( $n = 4,41$ ) / A. Palmer, 1991

$P_{CO_2}$ [atm $\approx$ bar]	5 °C	15 °C	25 °C
1,0	0,8	0,85	0,9
0,3	0,65	0,7	0,8

0,03	0.6	0,7	0,8
0.003	0.6	0,7	0,8

Platí stejně pro laminární jako pro turbulentní tok.

France  
Šušteršič

## Geologie krasu **List 36**

### DYNAMIKA ROZŠÍŘOVÁNÍ JESKYNNÍCH KANÁLU

ROZŠÍŘOVÁNÍ CHODBY [cm . a<sup>-1</sup>] do přeměněných tvarů:

$$S = \frac{31,56k \left(1 - \frac{C}{C_s}\right)^n}{\rho_r}$$

Výpočty přibližně odpovídají výsledkům měření v přírodě.

#### Položky:

- Vodou plně zalitý průchod (roura) můžeme mít za uzavřený systém.
- Při vstupu je roztok CO<sub>2</sub> ve vody v rovnováze se vzdušným CO<sub>2</sub>
- V rouře reaguje se stěnami a procento CO<sub>2</sub> ve vodě klesá.
- Efektivní C<sub>S'</sub> klesá směrem k nasycené koncentraci pro uzavřený systém.
- Ve srovnání s otevřeným systémem, kde C<sub>S</sub> zůstává konstantní, je rozpouštění v uzavřeném systému pomalejší.

#### Závěry:

- Rychlost rozšířování chodby se zvětšuje s průtokem, tedy dosáhne maximum, po kterém další narůstání průtoku nemá dalšího vlivu.
- V průměrném krasovém podzemí je to rychlost 0,1 až 1,0 mm.a<sup>-1</sup>, která potom zůstává přibližně konstantní. (Nastane-li přeskok, začne se chodba prodlužovat).
- Při malém průtoku, který je charakteristický pro jeskynní kanály v rané fázi vzniku, jsou mezi soupeřícími vodními cestami v rychlosti šíření kanálu velké rozdíly.
- V rané fázi mohou jednotlivé kanály zvyšovat rychlost rozšířování pouze se zvětšeným průtokem (piraterií).

- Až když budou mít početné soupeřící vodní cesty strmé gradienty, krátké cesty a podobný chemizmus, porostou všechny stejně, bez ohledu na velikost.

Atkinsonův paradox  $\Leftrightarrow$  vyřeší ho skokově zvětšený řád reakce (potenčního exponentu)  $n$ . Kde je  $1 - C/C_S < 1$ , rychlosti rozšiřování chodby,  $S$  poklesne, jakmile se  $n$  zvětší.

France  
Šuštěršič

## Geologie krasu List 37

### DYNAMIKA ROZŠÍŘOVÁNÍ JESKYNNÍCH KANÁLU

Definice:  $t_{max}$  je nejkratší doba, za kterou dosáhne zvětšování chodby největší účinek po celé délce kanálu.

$$t_{max} = \alpha w_0^{-3,12} \left( \frac{i}{L} \right)^{-1,37} (P_{CO_2}^0)^{-1,0} \quad [t_{max}] \text{ a}$$

kde je:  $\alpha$  koeficient, který vyjadřuje teplotu vody a typ systému (otevřený/uzavřený)  
 $w_0$  počáteční šířka štěrbiny

Pro vznik jeskyně je »výhodnější«, že je  $t_{max}$  co nejkratší. Tedy: čím větší je  $P_{CO_2}^0$ , tím kratší je  $t_{max}$  atd. Odnos je tedy reciproční, potence pak negativní.

Doba, která uplyne od přeskoku dokud není dosažen  $t_{max}$  je méně než 0,1 %  $t_{max}$ .

Pokud by tomu tak nebylo, denudace by krasové masivy plně odstranila, ještě dříve, než by se v nich vyvinuly krasové kanály.

V přírodě dosahují hodnoty potence po přeskoku  $3 < n_2 > 5$  pro  $pH > 4$ .

Při nižších pH (laboratoř), je skoků více a ve větším rozsahu.

Vliv mají ještě:

- litologie
- neúplně uzavřený systém (míchání)
- přítomnost iontů, které zakončují procesy
- zbývající reakce ve vodě

France  
Šuštěršič

**Geologie krasu** List **38**

## DYNAMIKA ROZŠÍŘOVÁNÍ JESKYNNÍCH KANÁLU

VZNIK (v užším smyslu) KAŽDÉHO KANÁLU PROBÍHÁ PŘES DVĚ FÁZE

1. PŘÍPRAVA (angl. *gestation* = *těhotenství*)  
Zvětšování kanálu je závislé od průtoku, kinetika chemické reakce téměř nemá vlivu.
2. ZRALOST:  
Zvětšování kanálu bez ohledu na kinetiku dosáhlo maximum, zůstane nezávislé na průtoku. Celý kanál se šíří stejnoměrně, bez ohledu na délku.
  - Větší část svých »dějin« prorážejí kanály v období přípravy, přičemž je nasycenost roztoku téměř úplná.
  - Přechod od přípravy ke zralosti je krátký.
  - V období přípravy se kanály nejvíce rozšiřují v počátečních 10% délky
  - U autigenních jeskyní se rychlost rozšiřování zmenšuje jakmile do nich vstoupí povrchový vzduch s menším  $P_{CO_2}$ .

První fáze (jakmile dosáhne  $t_{max}$ ) trvá v průměrné jeskyni okolo 10 000 let (ané), aby se jeskyně stala pro člověka průchodnou, trvá to několik ka. Jakmile jsou kanály větší, stávají se poměry tak nestabilními, že je rychlost zvětšování obtížné stanovit.



### **Penetrační vzdálenost**

Je vzdálenost, při které agresivita (schopnost rozpouštění určité horniny) roztoku klesá na 10% počáteční hodnoty.

### **Průlom**

Je okamžik, kdy se od vtoku do výtoku obnoví první spojená (uzavřená) sekvence plně turbulentního toku a rychlost průtoku naroste o nejméně jeden velikostní řád.

France  
Šušteršič

## **Geologie krasu**

**List 39**

### **ZÁKLADY HYDROGEOLOGIE KRASU**

#### **Typy horninových masívů**

vzhledem k chování podzemní vody

AQUIFER (nesoucí vodu)

AQUITARD

AQUIFUG

AQUIKLUD

#### **TYPY PODZEMNÍ VODY** vzhledem k poloze v prostoru:

- Visící podzemní voda
- Zachycená podzemní voda
- Hluboká podzemní voda - s volnou hladinou  
- se stlačenou hladinou

Hluboká podzemní voda má výtok na regionální bázi odtoku. Obvyklý výraz pro regionální bázi odtoku je *erozní báze*. Je chybný, neboť kras definujeme právě tak, že eroze (odnos hmoty) probíhá také hlouběji nežli regionální báze odtoku (úroveň vertikálních krasových pramenů).

Hydrografické zóny v krasovém podzemí:		
NENASYCENÁ (vadózní)	⇒	NASYCENÁ (freatická)
voda se přelévá na způsob volného pádu		voda se přelévá na způsob spojených nádob

Floskule - přání, aby voda pronikala gravitačně jenom jako volná hladina je chybné, neboť gravitace pohání veškeré vody v krasu, pouze prostředí jsou jiná.

France  
Šuštěršič

## Geologie krasu List 40

### ZÁKLADY HYDROGEOLOGIE KRASU

#### Podrobnější rozdělení hydrografických zón

NEPRONIKNUTÁ (NENAPLNĚNÁ) *vadózní / aerační*

- zóna půdního průniku
- epikrasová zóna
- zóna svislého průniku

[OBČAS ZALITÁ – epifreatická / *vadózní*]

PRONIKNUTÁ (NAPLNĚNÁ)

- dynamofreatická (plýtce + hluboko freatická)
- notefreatická (hluboko + stagnačně freatická)

Činnost hydrografických zón v krasu

NEPRONIKNUTÝ (NENAPLNĚNÝ) *svislý odtok vody do hlubin*

- zóna půdního přenosu ⇒ půdní procesy
- epikrasová zóna ⇒ občasné zaostávání
- zóna svislého přenosu ⇒ vznik krbů

VODA TEČE/ PRONIKÁ NA PRINCIPU VOLNÉHO PÁDU .

[OBČASNĚ ZALITÁ – vznik "gravitačních" kanálů]

PRONIKNUTÁ výtok vody ze systému spojených nádob

- dynamofreatická ⇒ aktivní svazek  
(99% odtoku ze systému DÁLE PŘEVLÁDÁ TURBULENTNÍ TOK)
- notefreatická ⇒ vznikající svazek  
(1% odtoku ze systému VÝHRADNĚ LAMINÁRNÍ TOK)