

# DEGRADACE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

---

Alena Vimmrová, Martin Keppert a externisté



## Program DSM – ZS 2024/2025

|    | Datum  | Obsah                                      | Přednáší                      |
|----|--------|--|-------------------------------|
| 1  | 24.9.  | Úvod, CO <sub>2</sub> a stavební materiály | Prof. Keppert                 |
| 2  | 1.10.  | Degradace a sanace betonu                  | Ing. Vávra ( <i>Betosan</i> ) |
| 3  | 8.10.  | Úvod do elektrochemie                      | Prof. Keppert                 |
| 4  | 15.10. | Koroze kovových materiálů I.               | Prof. Keppert                 |
| 5  | 22.10. | Koroze kovových materiálů II.              | Prof. Keppert                 |
| 6  | 29.10. | Biodegradace                               | Doc. Vimmrová                 |
| 7  | 5.11.  | Degradace a sanace dřeva                   | Ing. Frankl ( <i>ÚTAM</i> )   |
| 8  | 12.11. | Nátěrové hmoty                             | Prof. Keppert                 |
| 9  | 19.11. | Vady a opravy nátěrů                       | Ing. Milíč ( <i>SYNPO</i> )   |
| 10 | 26.11. | Degradace polymerů                         | Doc. Vimmrová                 |
| 11 | 3.12.  | Studentské prezentace                      |                               |
| 12 | 10.12. | Studentské prezentace                      |                               |
| 13 | 17.12. | Zkouška                                    |                               |

# Studentské prezentace

- okruh beton
  - chování betonu za **velmi vysokých teplot** – tunelové požáry, aplikace polymerních vláken
  - degradace **rozptýlené výztuže**
  - **Alkáliová reakce kameniva** – hodnocení materiálů, prevence
- poškození materiálů a kcí. **cyklickými změnami teploty a vlhkosti**
- **keramické stavební prvky**
- konstrukce z **nepálené hlíny**
- materiály na bázi **sádry**
- mechanické poškození materiálů a konstrukcí **proudícími tekutinami** – eroze, abraze (kapaliny, vzduch)
- ....

# Beton v kostce

## Se zřetelem k jeho trvanlivosti

beton = cement + voda + kamenivo 0/8 mm a více (+...)

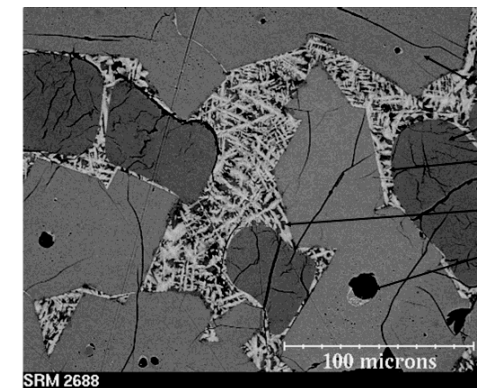
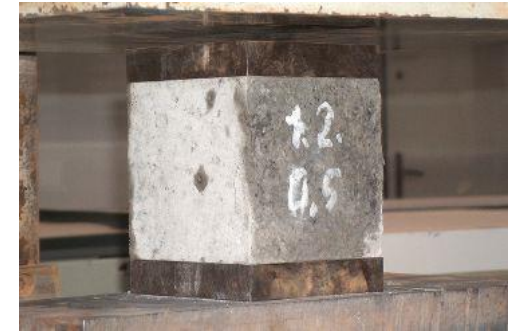
**cement:** obsahuje slídkové minerály – látky schopné reagovat s vodou za vzniku **hydratačních produktů** – způsobují ztuhnutí kaše

### cementářská notace:

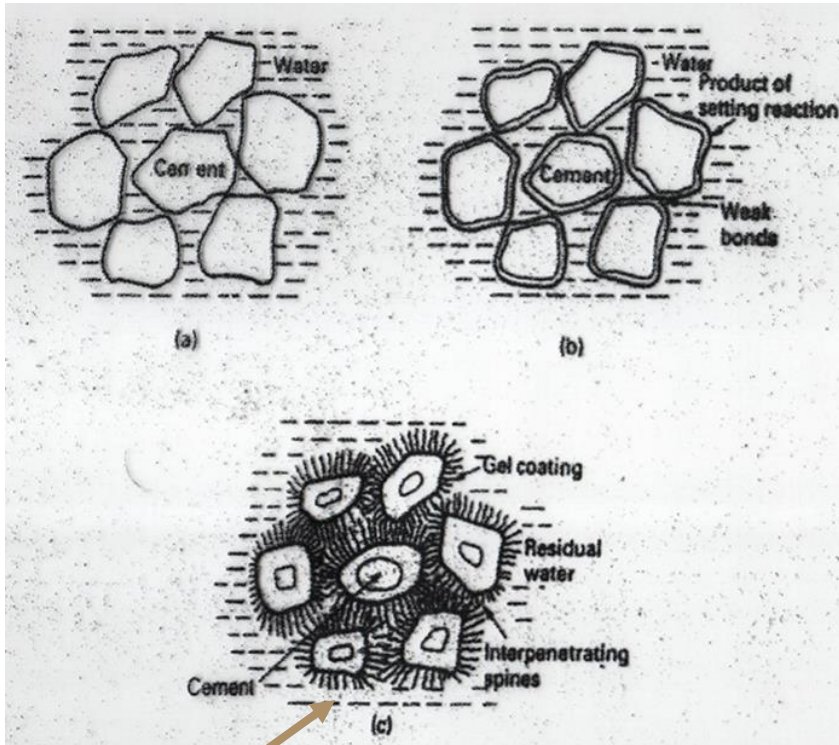
|   |                                |
|---|--------------------------------|
| C | CaO                            |
| S | SiO <sub>2</sub>               |
| A | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| F | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| H | H <sub>2</sub> O               |

### slídkové minerály:

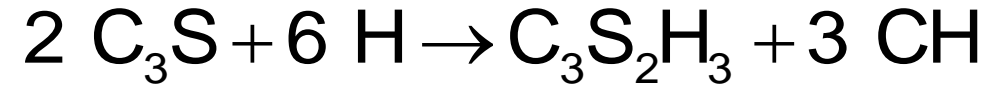
C<sub>3</sub>S nejvíce – rychle reaguje s vodou  
C<sub>2</sub>S pomalá reakce  
C<sub>4</sub>AF, C<sub>3</sub>A minoritní složky – ale významné



## hydratace slínekových minerálů:



**vlákna hydratačních produktů → zpevnění**



**C-S-H gel**

**hydroxid vápenatý  
(portlandit)**

$\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$  – hydratují na AFt a Afm fáze, např ettringit

**směsné cementy (CEM II – CEM V):** obsahují **reaktivní příměsi**

- látky, které jsou schopné hydratovat a pojit reakcí s **CH** – vznikajícím při hydrataci slínekových minerálů  
struska, popílek, přírodní pucolány – látky s reaktivním  $\text{SiO}_2$

zralý beton obsahuje:

kamenivo (v ČR obvykle vyvřelé horniny – stabilní složky)

C-S-H gel – pojivo, AFT/Afm fáze

hydroxid vápenatý – zajišťuje vysoké pH betonu (na počátku 12,5)

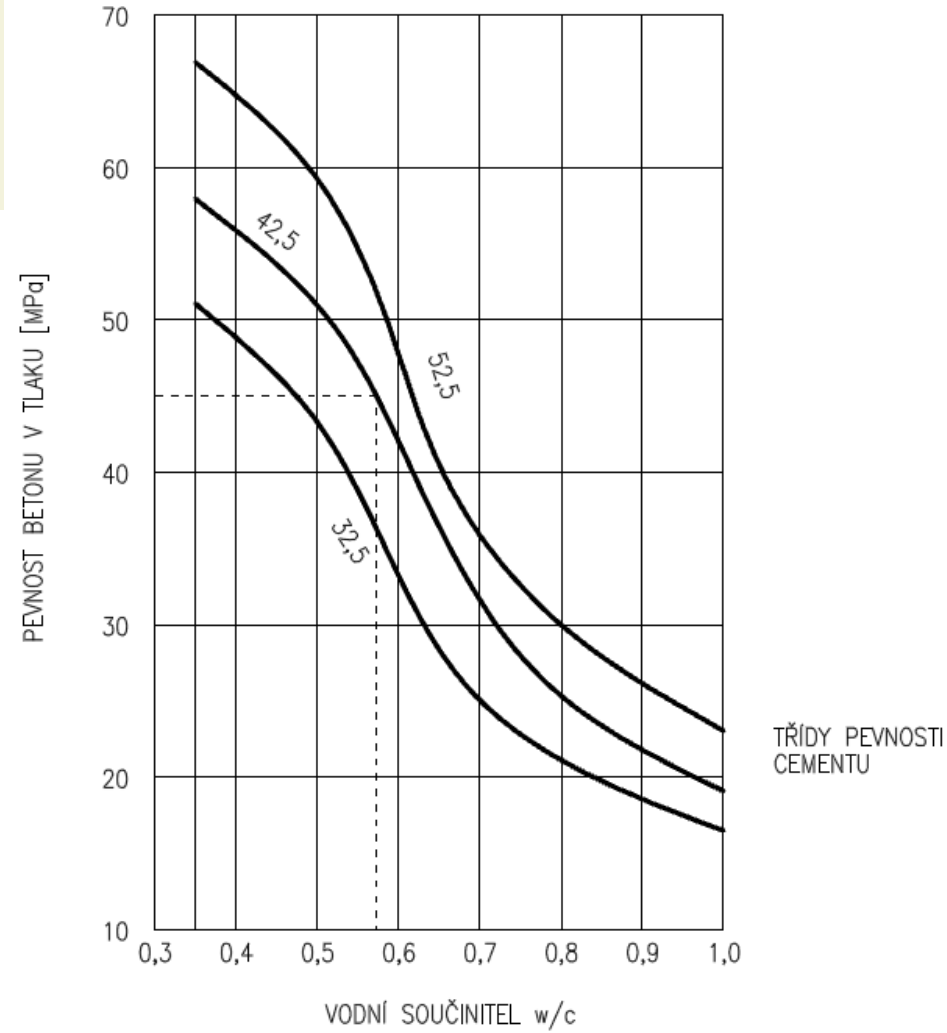
**póry:** gelové – mezi částicemi gelu – nevyhnutelné, neškodí  
kapilární – vznikají v důsledku obsahu **záměsové vody**  
více vody = více kapilár = menší pevnost, větší propustnost betonu

cesta k vyšším pevnostem:

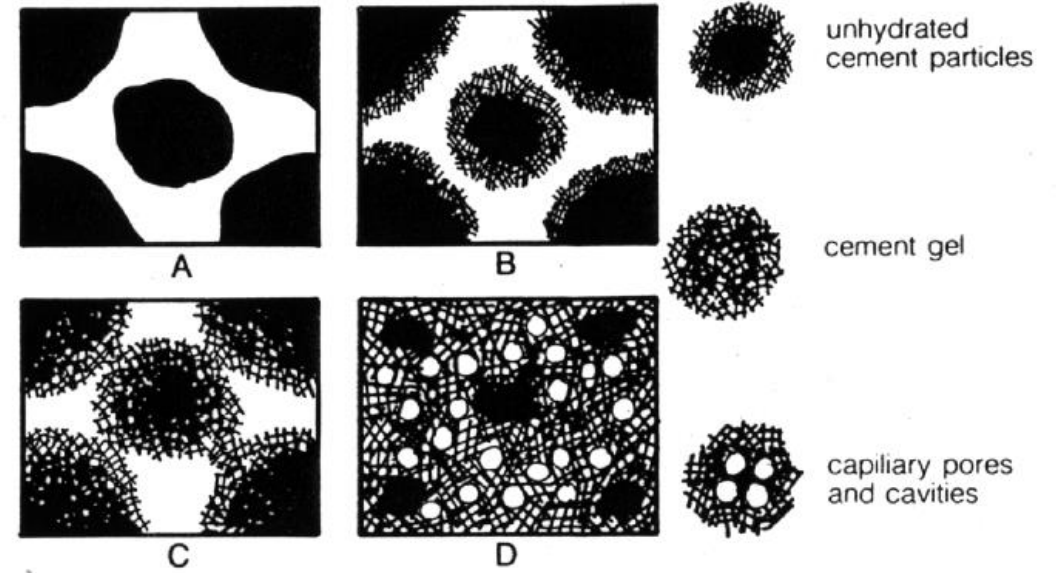
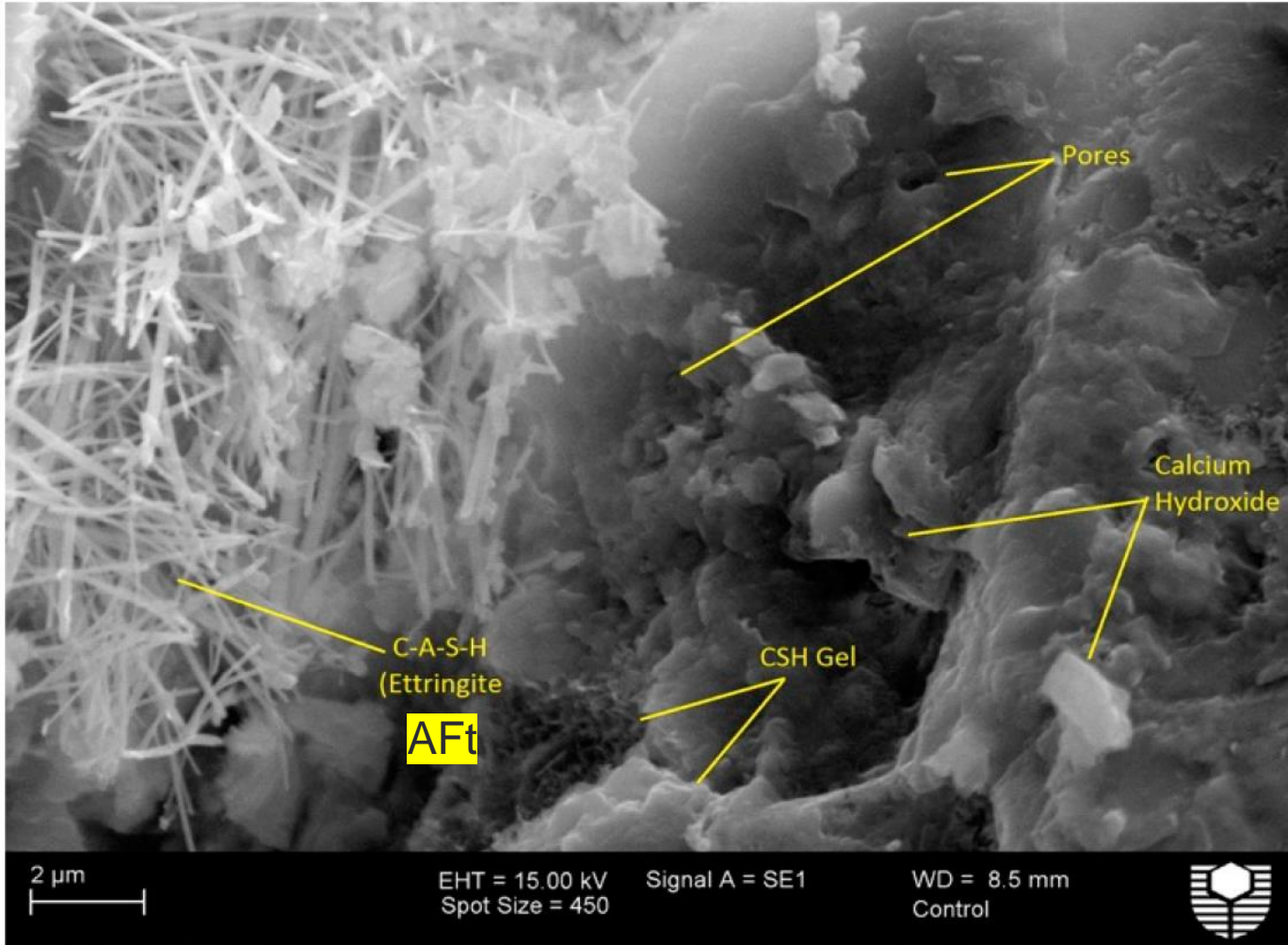
méně vody = méně kapilárních pórů

**plastifikační přísady**

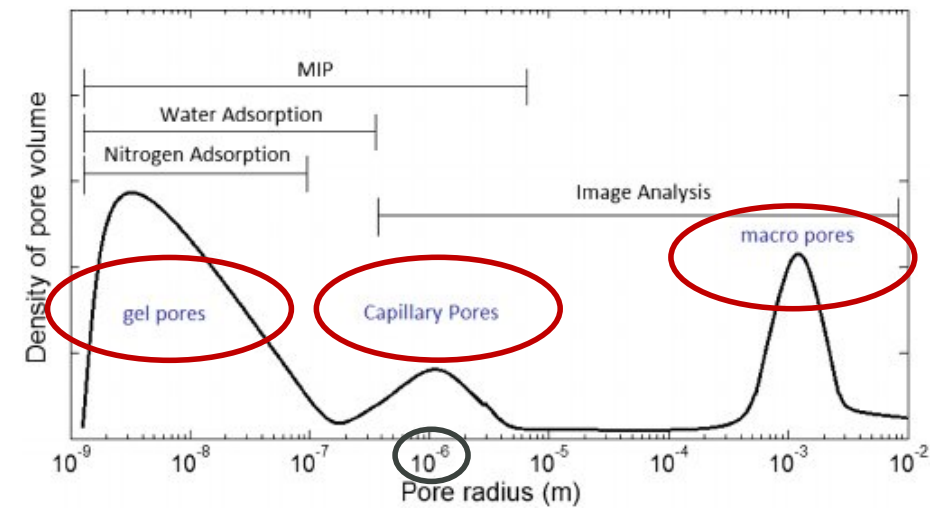
provzdušňování betonu: zavedení bublinek (100-300 mikronů) do betonu  
- realizuje se v nich expanze ledu –  
vyšší odolnost vůči poškození mrazem







- A) Immediately after mixing
- B) Reaction around particles – early stiffening
- C) Formation of skeletal structure – first hardening
- D) Gel infilling – later hardening



0. krok stranou

# Logaritmy

$$\log_a x = y \Leftrightarrow a^y = x$$

$$a^{\log_a x} = x$$

$$\log_a a^r = r$$

$$\log_a r^s = s \cdot \log_a r$$

$$\log_a (r \cdot s) = \log_a r + \log_a s$$

$$\log_a \frac{r}{s} = \log_a r - \log_a s$$

$$\log_a x = \frac{\log_b x}{\log_b a}$$

$$\log_b a \cdot \log_a b = 1$$

$$\log_a x_1 = \log_a x_2 \Leftrightarrow x_1 = x_2$$

Dekadický log (a=10)

$$\log_{10} 100 =$$

$$\log_{10} 100 = y$$

$$100 = 10^y$$

$$10^2 = 10^y$$

$$y = 2$$

Přirozený logaritmus ln

$$\log_e x = \ln x$$

$e$  – Eulerovo číslo ( $e \doteq 2,72$ )



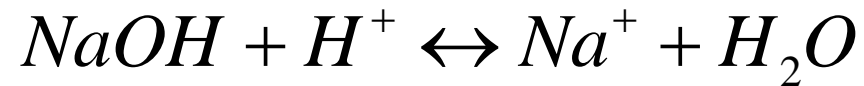
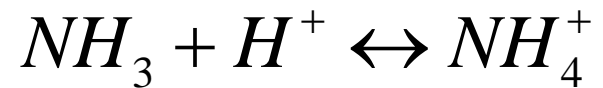
## 1. krok stranou

# Kyseliny a zásady

- Brønsted: nositelem kyselosti je  $H^+$  (vodíkový kation, proton)
- kyselina: ve (**vodném**) roztoku uvolňuje  $H^+$



- zásada: ve (vodném) roztoku přijímá  $H^+$



- voda:  $H_2O + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$

- výpočet pH (a pOH)

$$pH = -\log[c_{H^+}]$$
$$pOH = -\log[c_{OH^-}]$$

Ve všech roztocích platí:

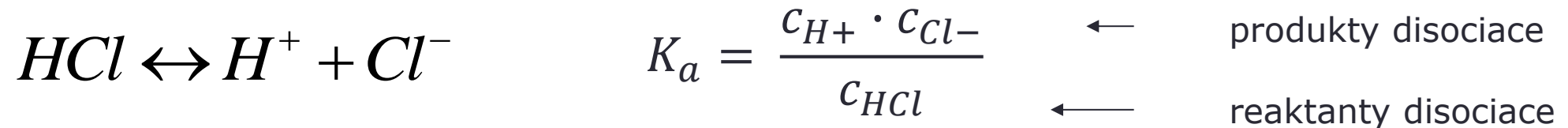
$$pH + pOH = 14$$

| Concentration of Hydrogen Ions | pH | Examples                           |
|--------------------------------|----|------------------------------------|
| 1/10,000,000                   | 14 | Liquid drain cleaner, Caustic soda |
| 1/1,000,000                    | 13 | Bleach, Oven cleaner               |
| 1/100,000                      | 12 | Soapy water                        |
| 1/10,000                       | 11 | Ammonia (11.9)                     |
| 1/1,000                        | 10 | Milk of magnesium                  |
| 1/100                          | 9  | Toothpaste                         |
| 1/10                           | 8  | Baking soda, Sea water             |
| 0                              | 7  | "Pure" water                       |
| 10                             | 6  | Milk                               |
| 100                            | 5  | Acid rain, Black coffee            |
| 1,000                          | 4  | Tomato juice                       |
| 10,000                         | 3  | Grapefruit & Orange juice          |
| 100,000                        | 2  | Lemon juice, Vinegar               |
| 1,000,000                      | 1  | Sulfuric acid                      |
| 10,000,000                     | 0  | Battery acid                       |

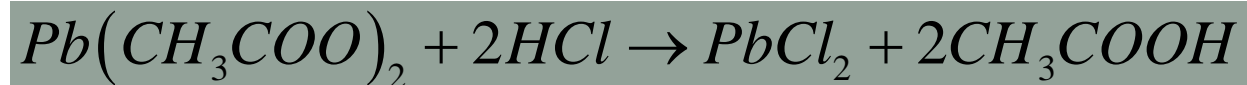
1. krok stranou

# Silné a slabé kyseliny

- síla kyseliny se charakterizuje **disociační konstantou** – **rovnovážnou konstantou disociační reakce**



- **silná kyselina** – disociuje téměř úplně; hodnota  $K$  vysoká ( $>0,01$ )  
anorganické kyseliny:  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ...
- **slabé kyseliny** – disociují pouze částečně; hodnota  $K < 0,01$  (až k  $10^{-11}$ ) – *koncentrace  $H^+$  je mnohem nižší, než koncentrace nedisociované formy kyseliny*  
anorganické:  **$H_2CO_3$ ,  $H_2SO_3$ ,  $H_2S$**   
organické: všechny – octová, mravenčí, šťavelová, jablečná...
- **sůl slabší kyseliny** je rozkládána působením silnější kyseliny („vytěsňování“)



1. krok stranou

# Silné a slabé kyseliny

$$K_a = \frac{c_{H^+} \cdot c_{OH^-}}{c_{HCl}}$$

Tabelace disoaciačních konstant:  $pK_a$

$$pK_a = -\log K_a$$

vyšší  $pK_a$  = slabší kyselina

uhličitá...octová...je dobré dávat beton do kuchyně?



...CaCO<sub>3</sub> se rozpouští působením octa (a jiných kyselých potravin)

| pKa    | Chemical Formula                                   | Name                 |
|--------|--|----------------------|
| -10    | HClO <sub>4</sub>                                  | Perchloric acid      |
| -7     | HCl  | Hydrochloric acid    |
| -3.0   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                     | Sulfuric acid        |
| -1.74  | H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                      | Hydronium            |
| -1.37  | HNO <sub>3</sub>                                   | Nitric acid          |
| +1.96  | HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>                      | Bisulfate ion        |
| +1.90  | H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                     | Sulfurous acid       |
| +2.16  | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                     | Phosphoric acid      |
| +2.46  | [Fe(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup> | -                    |
| +3.18  | HF   | Hydrofluoric acid    |
| +4.75  | CH <sub>3</sub> COOH                               | Acetic acid          |
| +4.97  | [Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup> | -                    |
| +6.35  | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                     | Carbonic acid        |
| +6.74  | [Fe(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>2+</sup> | -                    |
| +6.99  | H <sub>2</sub> S                                   | Dihydrogen sulfide   |
| +7.20  | HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                      | Sulfurous acid       |
| +7.21  | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>        | Dihydrogen phosphate |
| +8.96  | [Zn(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>2+</sup> | -                    |
| +9.21  | HCN  | Hydrogen cyanide     |
| +9.25  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                       | Ammonium             |
| +10.33 | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                      | Bicarbonate          |

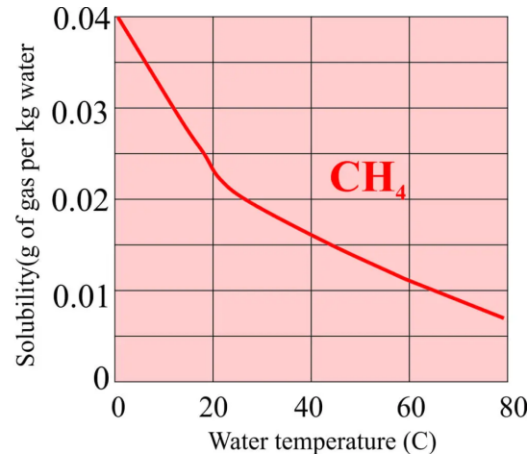
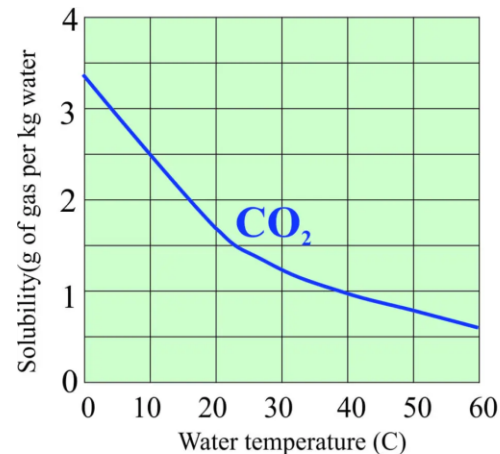
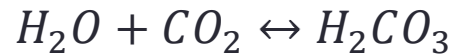
2. krok stranou

# Rozpouštění plynů ve vodě

## Fyzikální a chemické rozpouštění

- probíhá reakce mezi molekulou plynu a vody = mnohem vyšší rozpustnost

- vzniká „pravý roztok“ – molekuly plynu se rozptýlí mezi molekulami vody



The graph illustrates how much CO<sub>2</sub> can dissolve in water at different temperatures. Deep, cold ocean layers are usually less than 10°C. For comparison, the amount of methane that can dissolve at the same temperatures is about 100 times less.

Rozpustnost plynu v kapalině vždy klesá s rostoucí teplotou

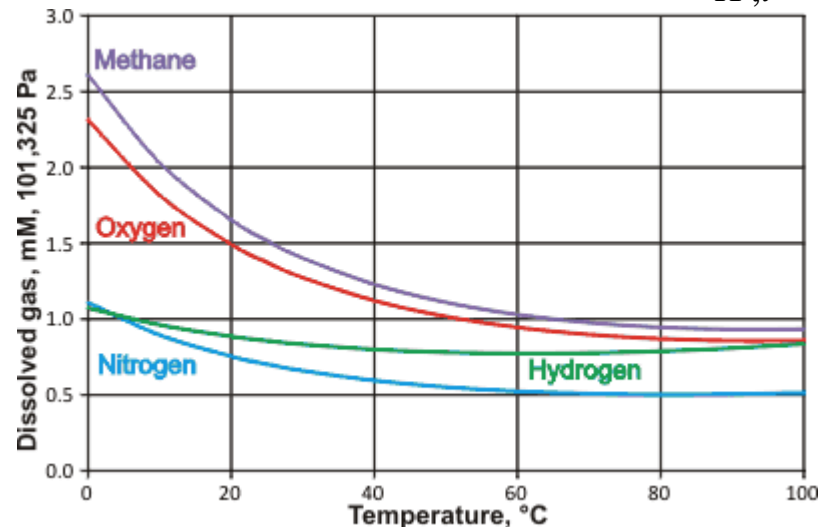
2. krok stranou

# Rozpouštění plynů ve vodě

parciální (částečný) tlak  $p_i$ : celkový tlak plyné směsi je součet „příspěvků“ tlaků jednotlivých složek:  $p_{\text{atm}} = p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{Ar}} + \dots$

Rozpustnost závisí na parciálním tlaku:

Henryho zákon:  $c_{i,v \text{ roztoku}} = \frac{1}{K_{H,i}} \cdot p_i$

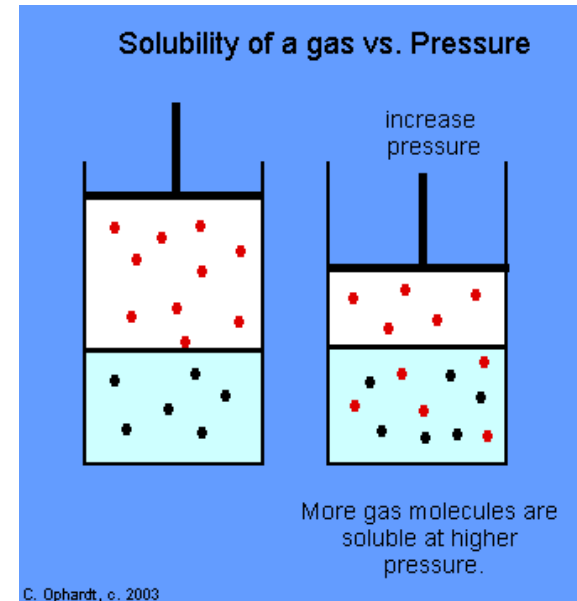


## parciální tlaky složek

$$p_i = x_i \cdot p$$

celkový tlak

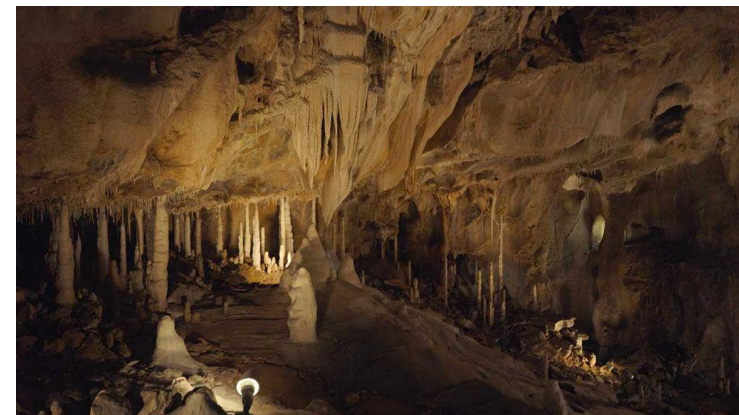
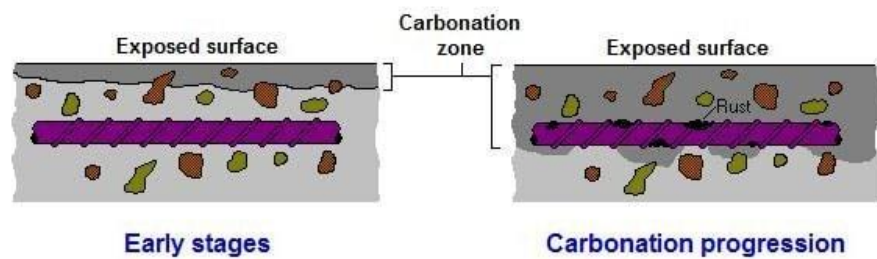
molární zlomek složky i





# DEGRADAČNÍ PROCESY V MATERIÁLECH VYVOLANÉ OXIDEM UHLIČITÝM V PROSTŘEDÍ

---



# Stupně agresivity prostředí pro beton

ČSN EN 206-1

Voda v prostředí, působící na beton

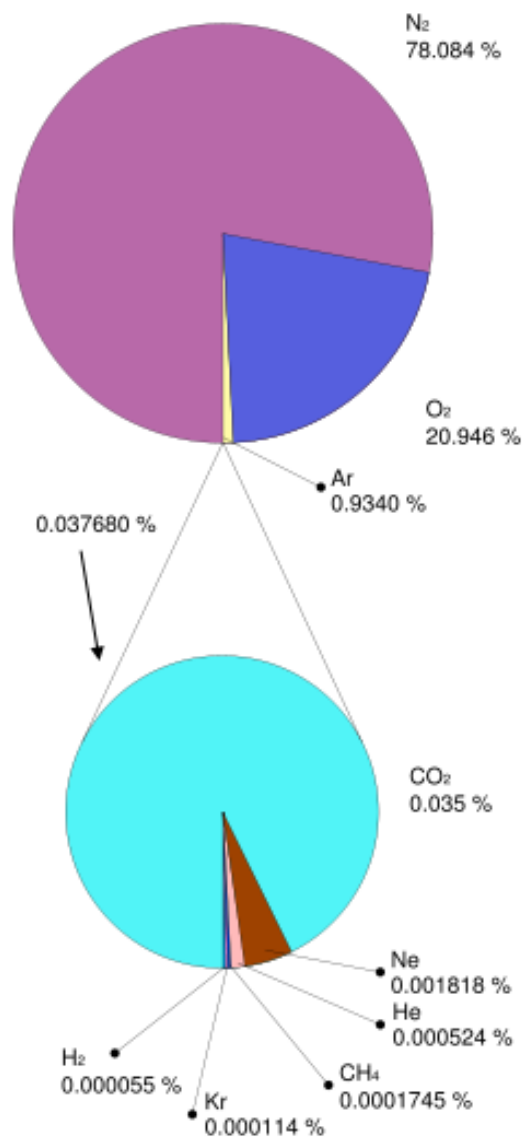
| Chemická charakteristika  | XA1<br>slabě agresivní | XA2<br>středně agresivní                       | XA3<br>vysoce agresivní |
|---|------------------------|--|-------------------------|
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )             | ≥ 200 a ≤ 600          | > 600 a ≤ 3000                                 | > 3000 a ≤ 6000         |
| pH  | ≤ 6,5 a ≥ 5,5          | < 5,5 a ≥ 4,5                                  | < 4,5 a ≥ 4,0           |
| CO <sub>2</sub> (mg l <sup>-1</sup> ) agresivní                 | ≥ 15 a ≤ 40            | > 40 a ≤ 100                                   | > 100 až do nasycení    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l                               | ≥ 15 a ≤ 30            | > 30 a ≤ 60                                    | > 60 a ≤ 100            |
| Mg <sup>2+</sup> mg/l   | ≥ 300 a ≤ 1000         | > 1000 a ≤ 3000                                | > 3000 až do nasycení   |
| <b>Doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu</b> |                        |  |                         |
| Max. vodní součinitel   | 0,55                   | 0,5  | 0,45                    |
| Min. pevnostní třída  | C30/37                 | C30/37   | C35/45                  |
| Min. obsah cementu  | 300                    | 320  | 360                     |
| Jiné požadavky  |                        | síranovzdorný cement<br>pro síranovou XA2, XA3 |                         |

Diagrammatic annotations with arrows pointing to the table:

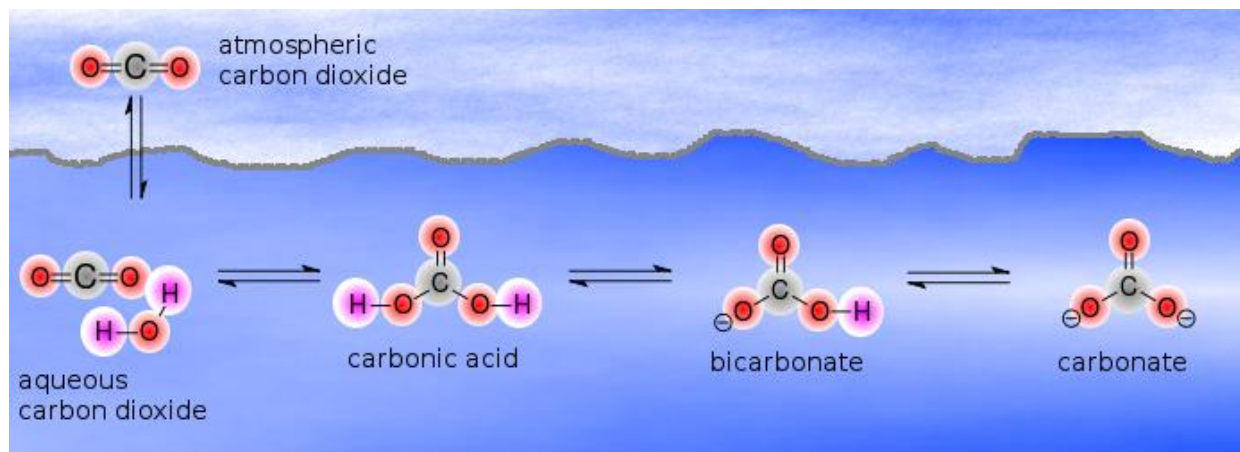
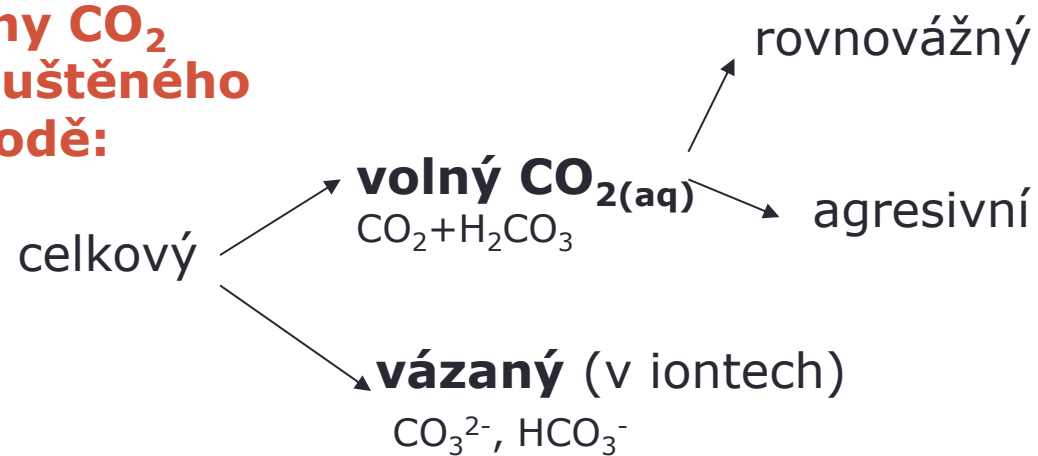
- síranové rozpínání (points to SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)
- rozpuštění pojiva (points to pH)
- rozpínání, uvolňování amoniaku (points to NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)
- hořčnaté rozpínání (points to Mg<sup>2+</sup>)

Půda: sírany

## Složení vzduchu



## Formy CO<sub>2</sub> rozpuštěného ve vodě:



# Formy výskytu CO<sub>2</sub> ve vodných roztocích

**Hydrogenuhlíčitanová rovnováha:** forma výskytu CO<sub>2</sub> v čisté vodě

Rozpouštění CO<sub>2</sub> ve vodě, vznik kyseliny uhličitě:



**Kyselost kyseliny uhličitě:** dvousytná kyselina

Disociace do 1. stupně:  $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

Disociace do 2. stupně:  $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

$$K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4,7 \cdot 10^{-11}$$

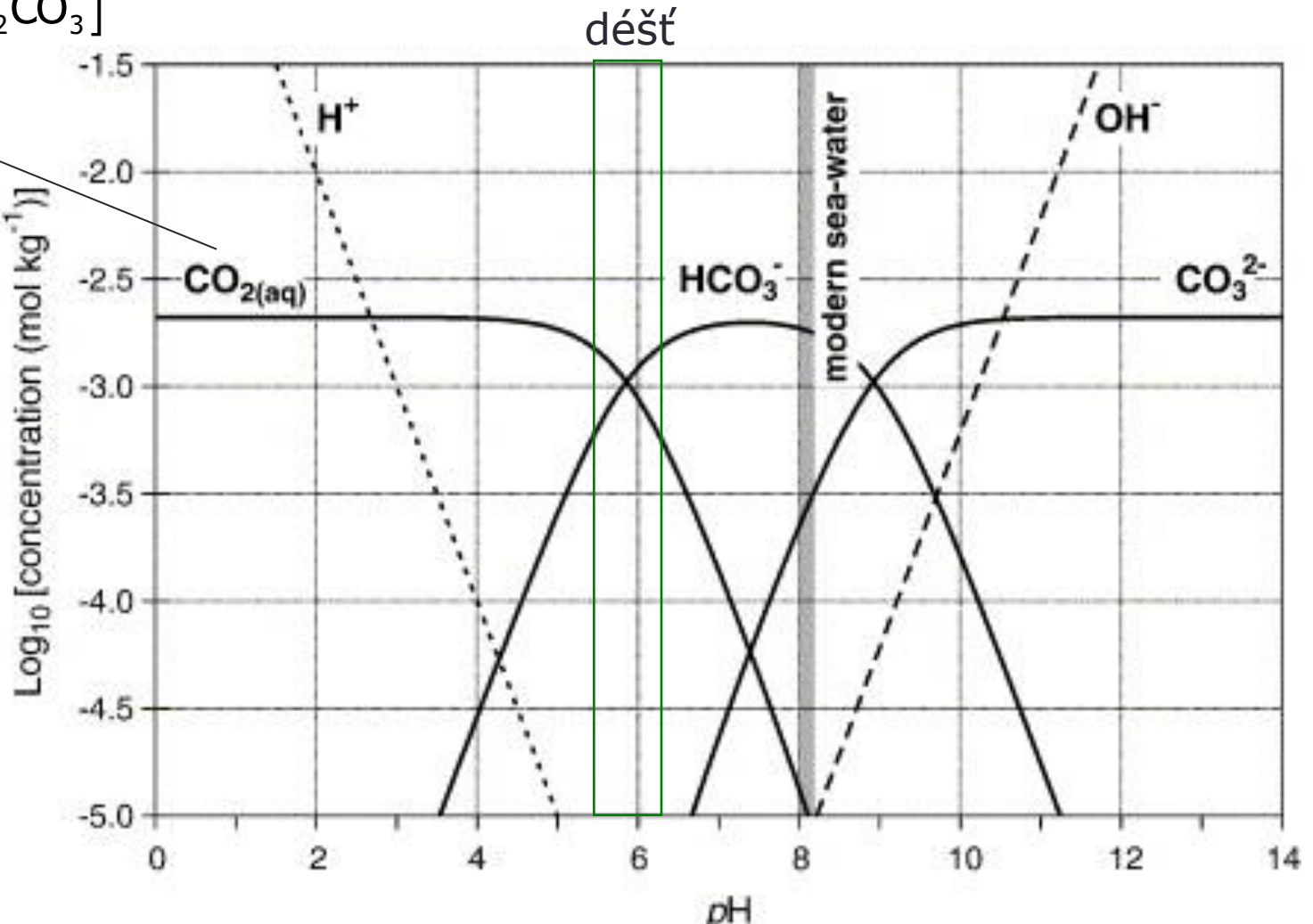
$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Voda nasycená atmosférickým CO<sub>2</sub> (p<sub>CO2</sub>=0,035 kPa): pH = 5,65

*Bjerrumův graf – nezahrnuje vliv Ca!*

$$\text{CO}_{2,\text{aq}} = [\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{CO}_3]$$

...prakticky se velmi špatně rozlišuje – měří se suma: **volný CO<sub>2</sub>**





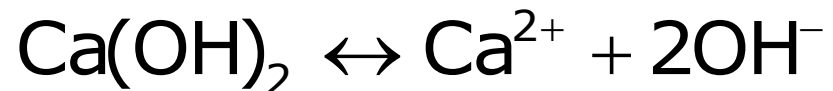
# Karbonatace betonu

## Složení cementového tmelu

| složka                               | obsah          | rozpustnost (g/l) |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| CSH fáze                             | 50-60%         | 0,05 g/l          |
| Aft+Afm fáze                         | 10-20 %        | kolem 0,5-1 g/l   |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub> portlandit</b> | <b>20-30 %</b> | <b>1,6 g/l</b>    |

všechny složky jsou v rovnováze – při jejím porušení (vyluhováním portlanditu) se ostatní složky rozkládají až na hydratované oxidy – pokles vazebných schopností

rozpuštění portlanditu řídí pH cementového tmelu – pórový roztok je nasycený roztok Ca(OH)<sub>2</sub> → pH = 12,5 (dále NaOH a KOH – minimální koncentrace)

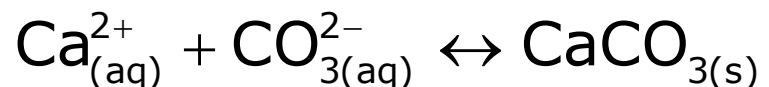
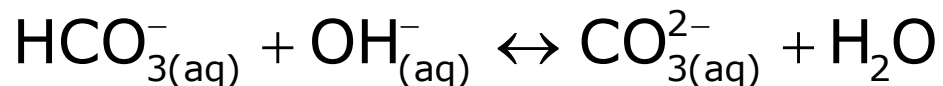
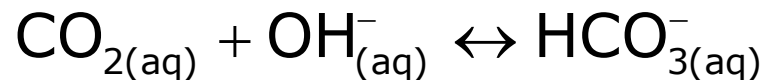


rozpuštění portlanditu podporuje nízká teplota a nízký obsah Ca<sup>2+</sup> (měkká voda) – „koroze betonu prvního druhu“

# Karbonatace betonu

## První fáze – neutralizace $\text{Ca(OH)}_2$

- ☐ souhrnná reakce **1. fáze:**  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- ☐ *neutralizují se i NaOH a KOH: na  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $\text{K}_2\text{CO}_3$*
- ☐ **mechanismus:**



**rozpustnost  $\text{CaCO}_3$   
0,014 g/l**

**Probíhá pouze ve vlhkém prostředí** – mechanismus „přes roztok“

Důsledky: pokles pH, pokles porozity – krystalizace  $\text{CaCO}_3$

Úplné zreagování veškerého  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow$  **pokles pH na 8,3**

# Karbonatace betonu

## Druhá fáze – karbonatace C-S-H

**2. fáze** karbonatace – po lokálním vyčerpání  $\text{Ca(OH)}_2$   
 $\text{CSH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \dots$  *hydratované oxidy - amorfní*



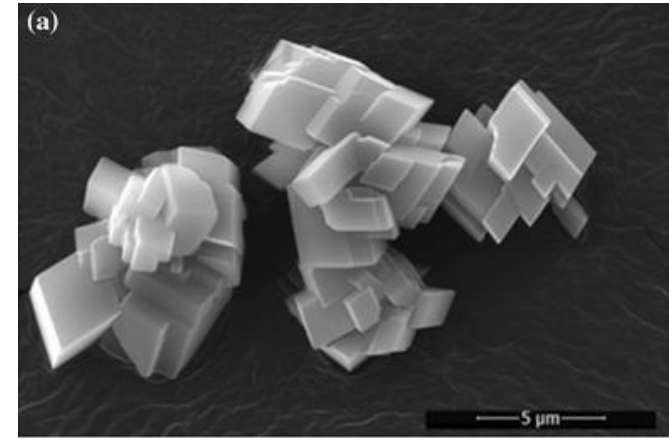
**Jemnozrnné formy – kalcit, aragonit, vatterit**

Karbonatace nezhydratovaných slínekových minerály:

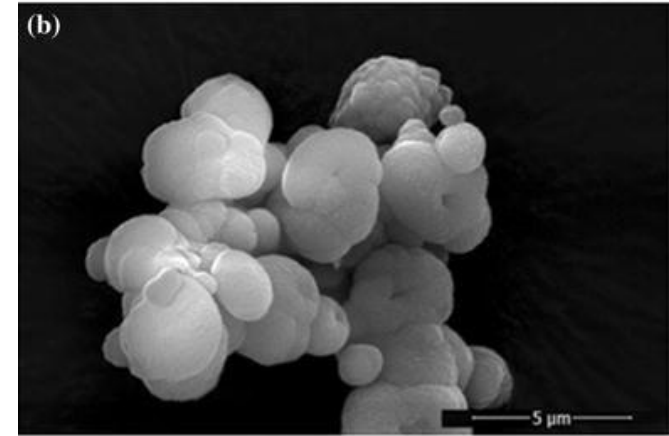


Už neklesá pH, ale klesá vazebná schopnost systému – rozpad C-S-H

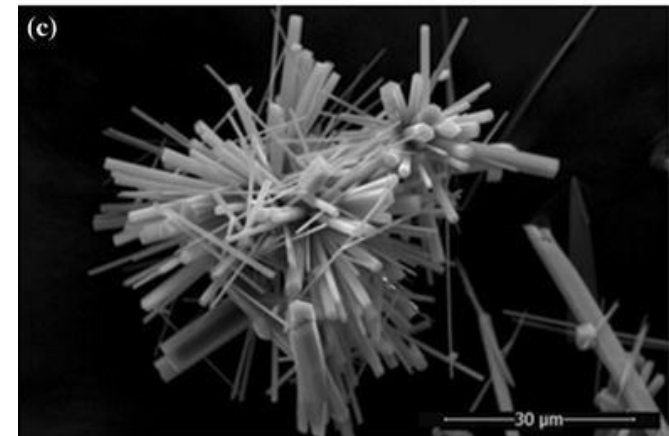
kalcit



vatterit



aragonit

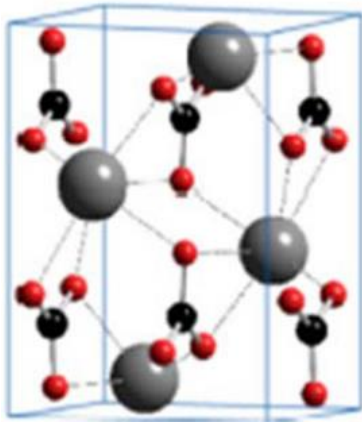
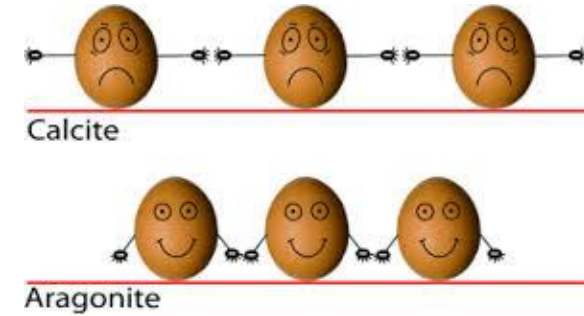


# Karbonatace betonu

## Třetí a čtvrtá fáze - rekrystalizace

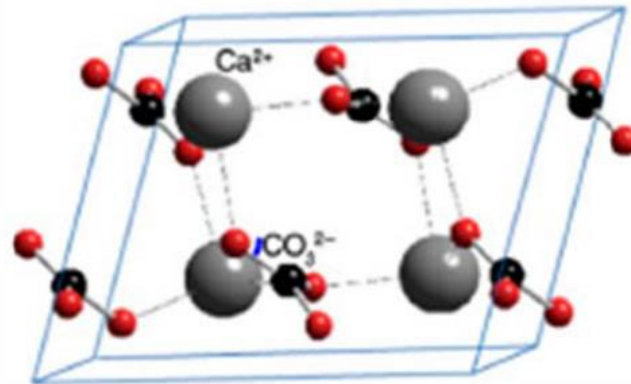
3. fáze: při cyklických změnách vlhkosti – rekrystalizace jemnozrnných forem kalcitu a aragonitu na velké krystaly + metamorfóza aragonitu a vateritu na kalcit → objemové změny, **krystalizační tlaky** (kalcit má menší hustotu)

4. fáze: kompletní rozpad tmelu na „hrubě krystalický“ kalcit a hydráty oxidů  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$



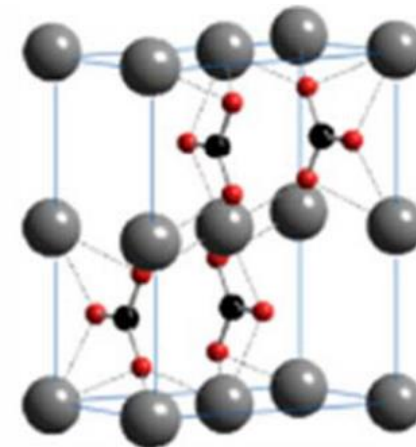
Aragonite

2,94 g/cm<sup>3</sup>



Calcite

2,71 g/cm<sup>3</sup>



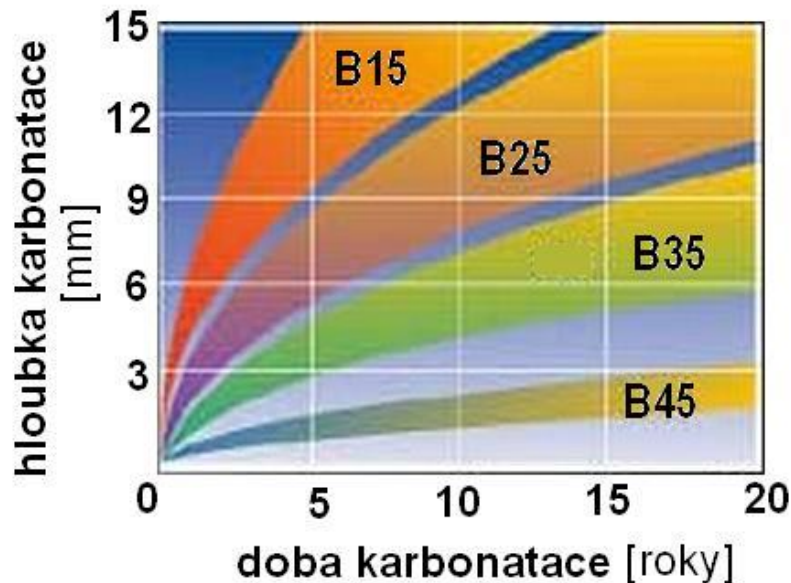
Vaterite

2,65 g/cm<sup>3</sup>

# Rychlost karbonatace

- ❑ modelování pro potřeby návrhu/odhadu životnosti železobetonových kcí
- ❑ určení tloušťky betonové krycí vrstvy výztuže
- ❑ jednodušší modely – představa **řídícího kroku** – nejpomalejší krok, určující rychlost celého procesu – pro karbonataci to je **rychlost difúze CO<sub>2</sub> pórovým prostorem** (II. Fickův zákon)
- ❑ **hloubka zkarbonatované vrstvy:**

$$x = A\sqrt{t}$$



**parametr A:** dif. koeficient CO<sub>2</sub>  
obsah CO<sub>2</sub> v atmosféře  
faktor difúzního odporu  $\mu$

vliv vlhkosti na rychlost: nejrychlejší při  
RH 75-90 %

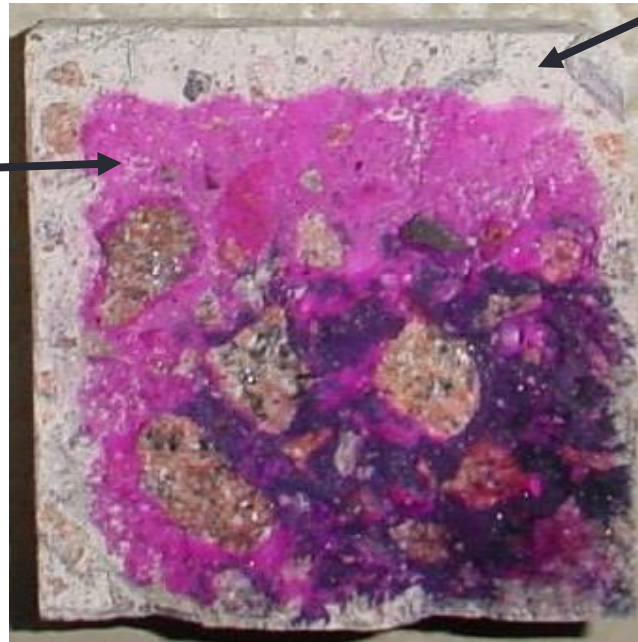
B15 = C 12/15  
B45 = C 35/45



# Sledování průběhu karbonatace betonu

- sledování karbonatace betonu pomocí fenolftaleinu (FFT):  
barevný přechod při  
pH 8-10

fialový:  
pH > 10  
obsahuje  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
výztuž OK



bezbarvý:  
pH  $\approx$  8  
karbonatovaný beton  
žádný  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
problém s korozí  
výztuže

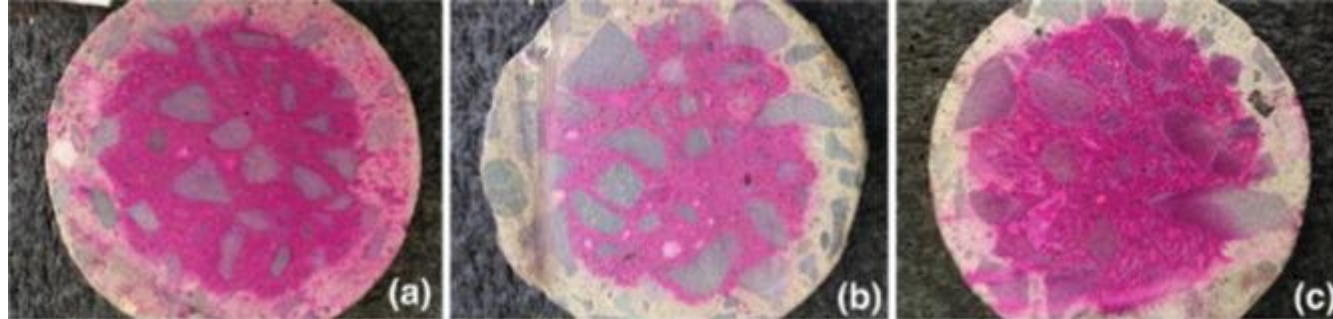
## Vyšetřování průběhu karbonatace pomocí fenolftaleinu

Ordinary Portland Cement

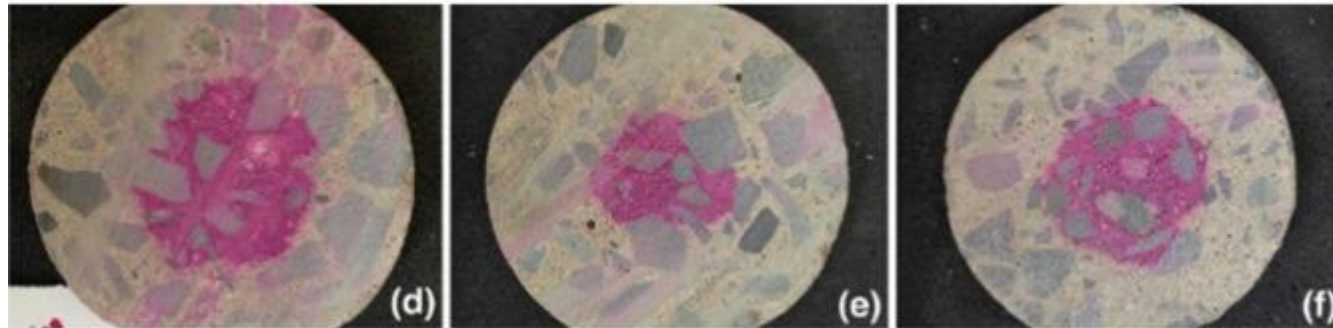
+metakoalin

+mikrosilika

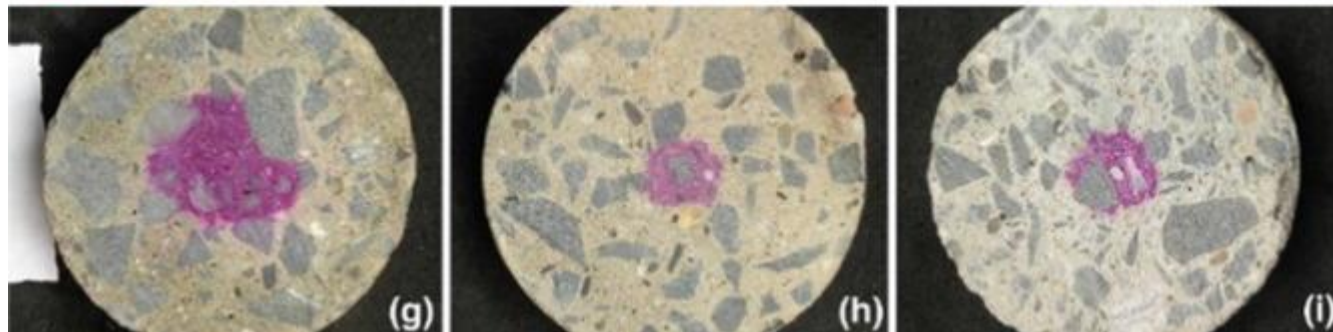
45 dní



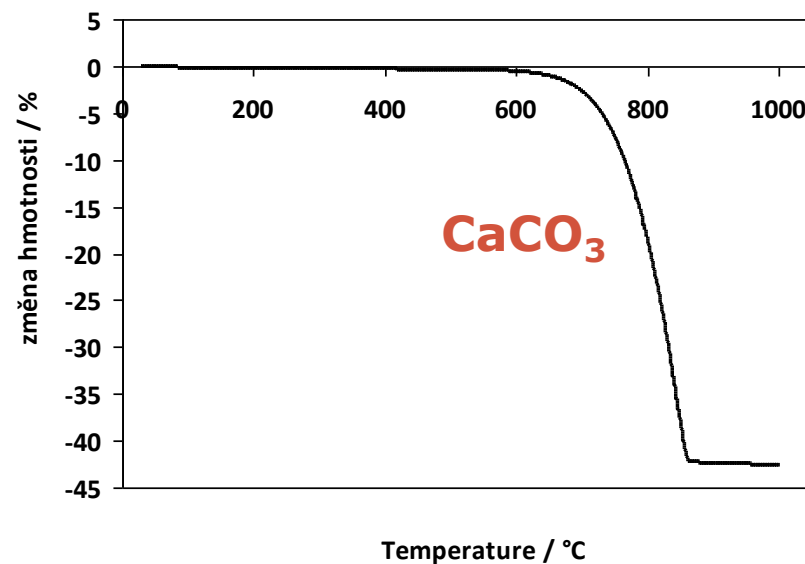
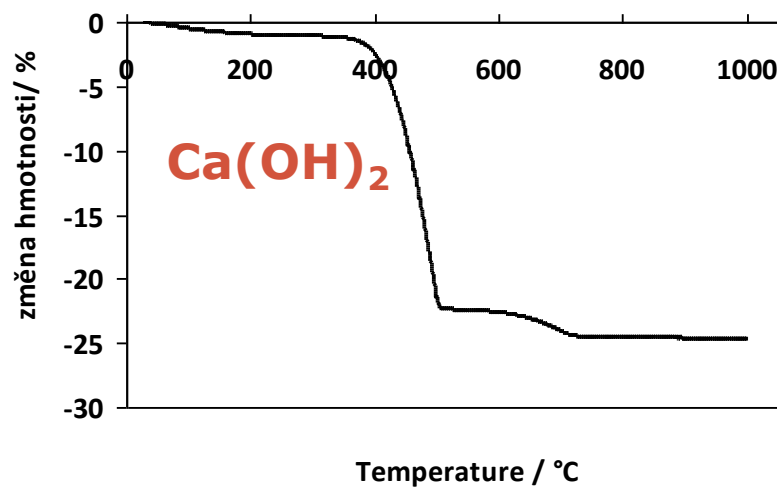
165 dní



240 dní



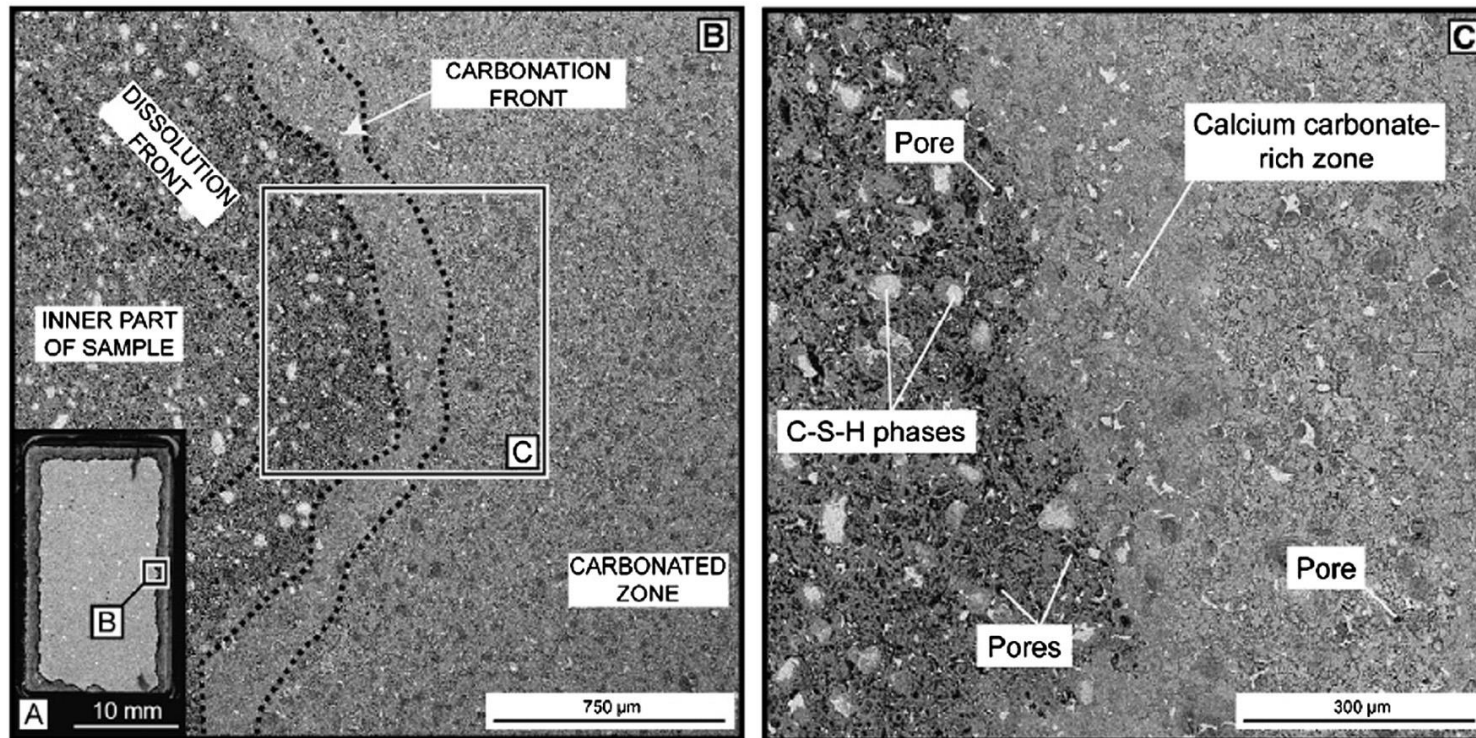
# Sledování průběhu karbonatace betonu - termogravimetrie





# Sledování karbonatace pomocí mikroskopických technik

Postup karbonatace v OPC pastě uložené ve vodě nasycené  $\text{CO}_2$

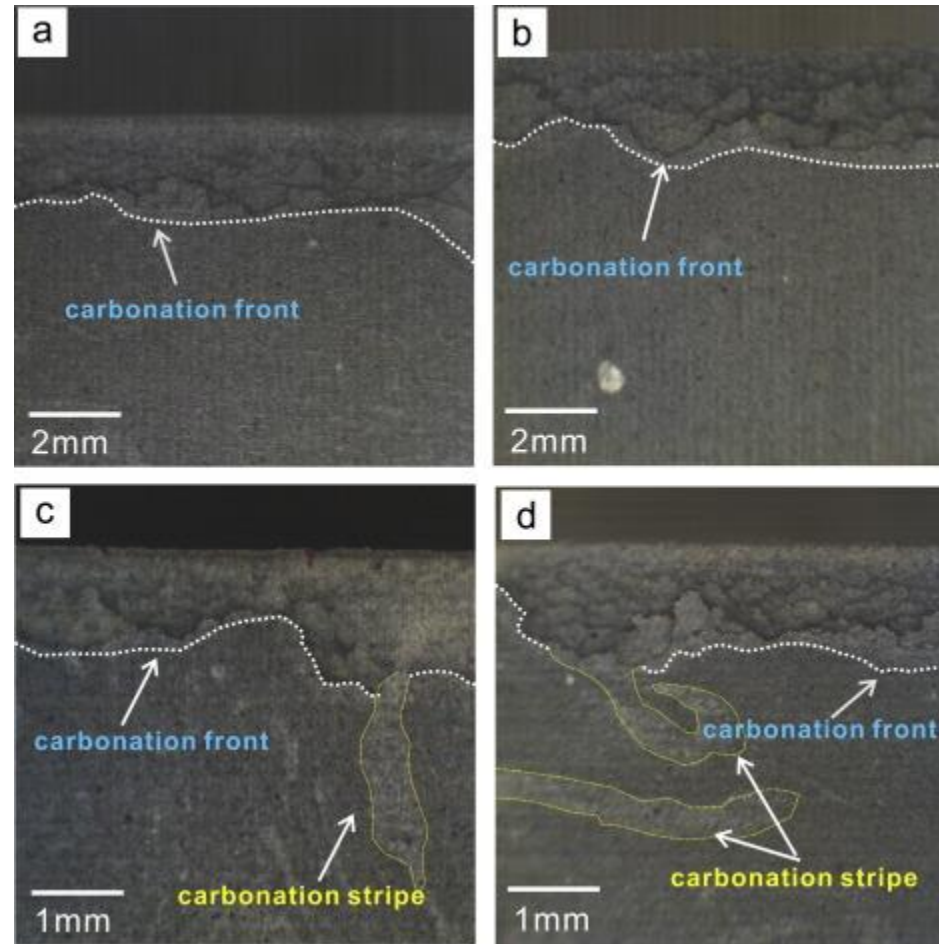


# Sledování karbonatace pomocí mikroskopických technik

Vyšetřování průběhu karbonatace pomocí optické mikroskopie

a) vzorek bez mechanického zatížení

b-d) rostoucí zatížení

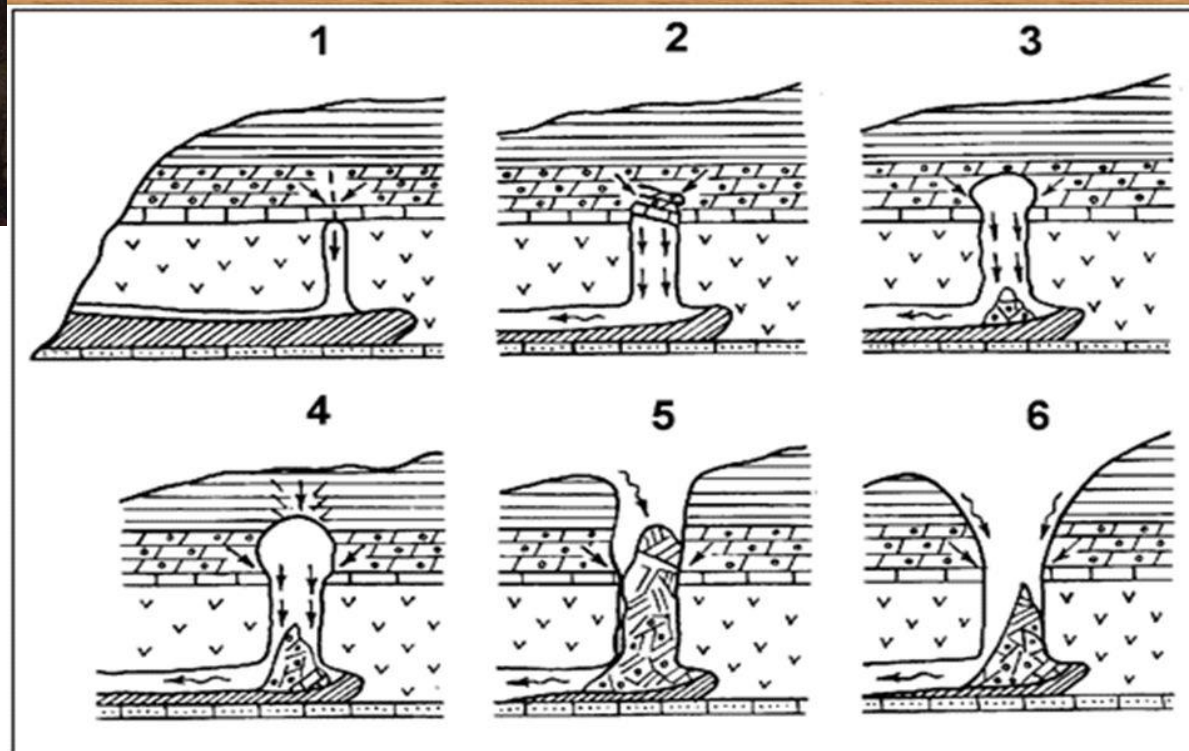






## 2) primární podzemní krasové jevy - jeskyně

Rozpouštění  $\text{CaCO}_3$  působením  
agresivního  $\text{CO}_2$



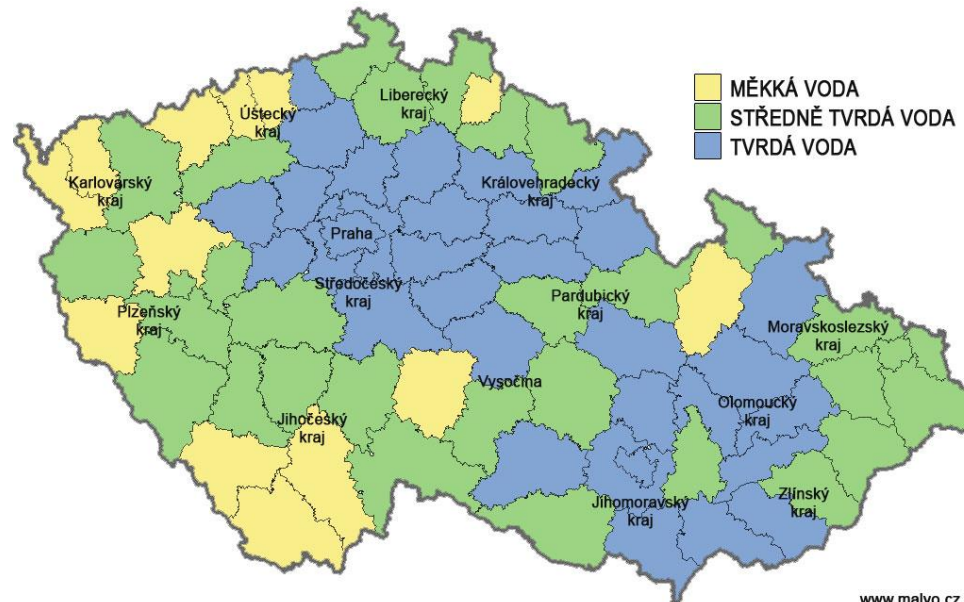


Krok stranou

# „Tvrdość vody“



- zastaralý a pochybný koncept..
- (součet) **koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$**  (obvyklý anion  $\text{HCO}_3^-$ )
- tvrdość podle převažujícího aniontu: chloridová, síranová...
- **tvorba „vodního kamene“ – vylučování  $\text{CaCO}_3$  (nejen na teplosměnných plochách)**



- „změkčování vody“
  - v energetice, průmyslu
  - vysrážení  $\text{Ca}+\text{Mg}$  pomocí jiné látky (soda, vápno, fosforečnany)
  - iontová výměna

# Rozpouštění $\text{CaCO}_3$ působením agresivního $\text{CO}_2$

- reálné prostředí – horniny na bázi  $\text{CaCO}_3$ , zkarbonatovaný beton, vápenná malta...

K hydrogenuhličitanové rovnováze se přidává rozpouštění  $\text{CaCO}_3$



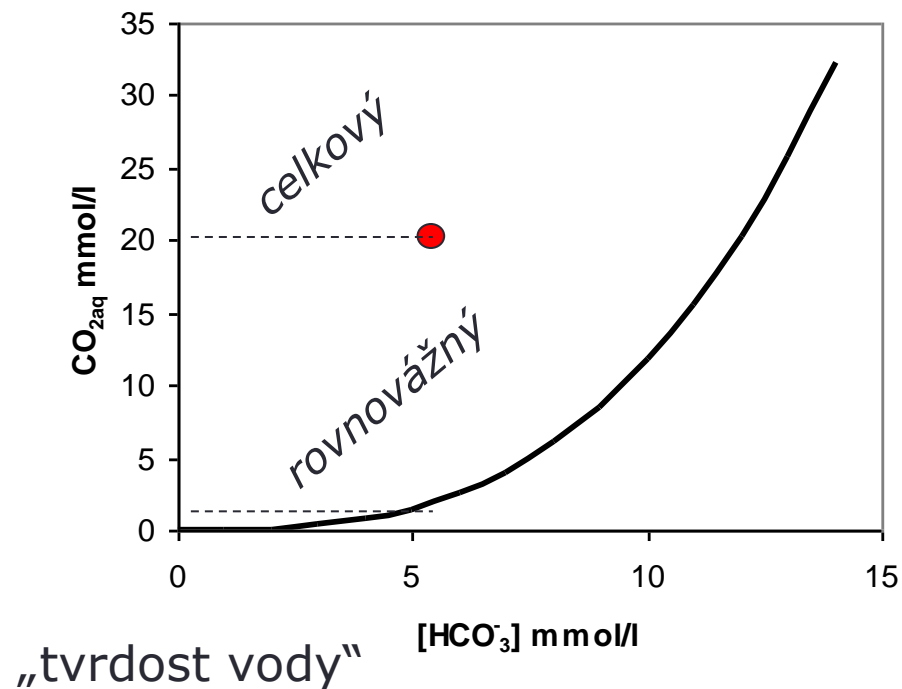
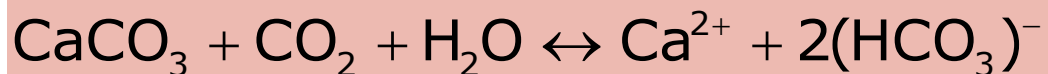
$$K_{S,\text{CaCO}_3} = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] = 4,5 \cdot 10^{-9}$$

velmi malá rozpustnost v čisté vodě

## Agresivní voda

více volného  $\text{CO}_2$  než odpovídá rovnováze → systém se snaží dosáhnout rovnováhy

uplatňuje se vratná reakce:

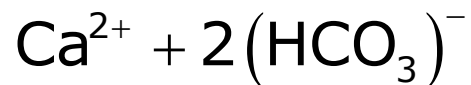


## Agresivní voda

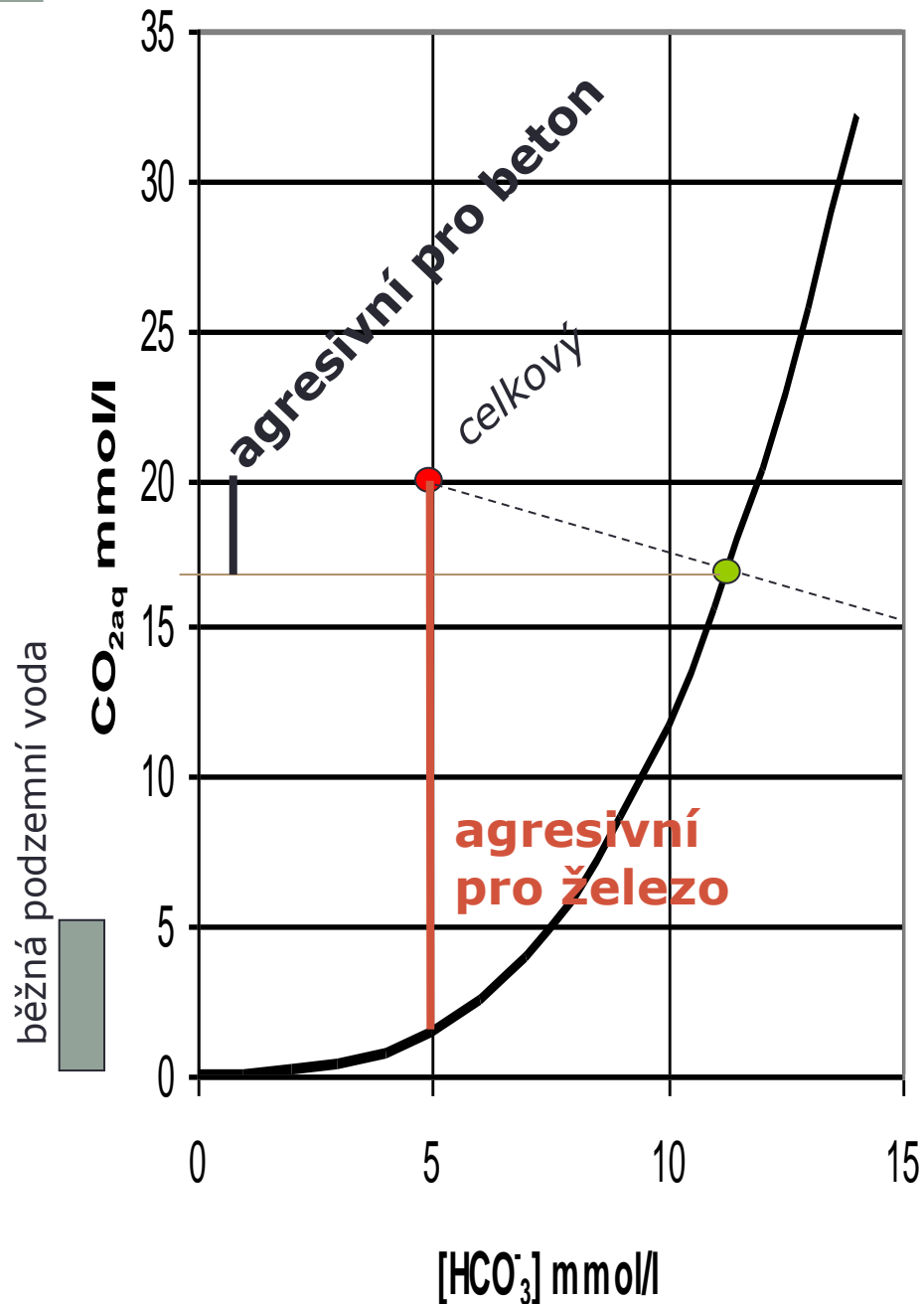
více volného  $\text{CO}_2$  než odpovídá rovnováze  $\rightarrow$  systém se snaží dosáhnout rovnováhy

|                   | pH    | volný $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ |
|-------------------|-------|---------------------------------|
| neagresivní       | >6    | <0,2 mmol/l                     |
| slabě agresivní   | 6-5,5 | 0,2-0,9                         |
| středně agresivní | 5,5-5 | 0,2-2                           |
| silně agresivní   | 5-4   | >2                              |
| velmi silně ag.   | 4-3   |                                 |

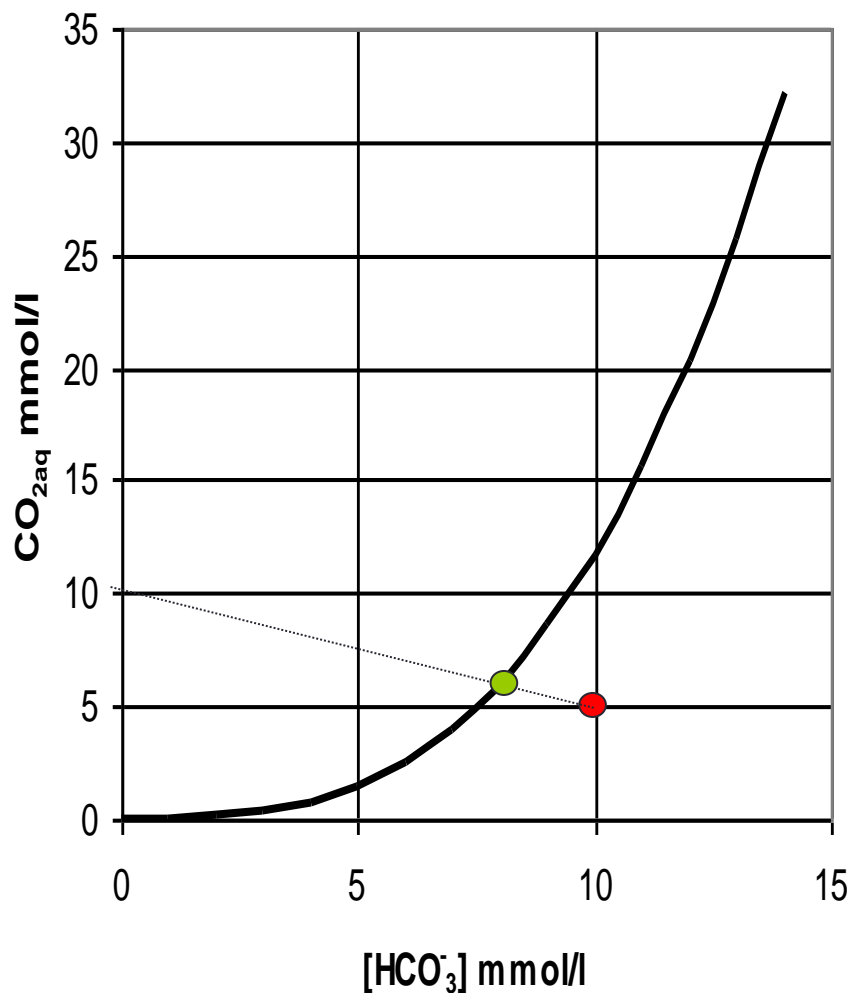
agresivní voda („pro beton“)  
rozpouští  $\text{CaCO}_3$ :



agresivní pro železo - karbonatce



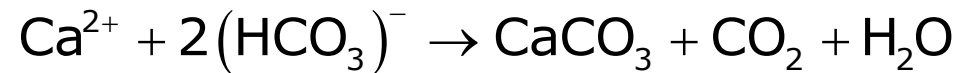
# Tvorba vodního kamene



## Inkrustující voda:

Nízká koncentrace CO<sub>2</sub>, vysoká HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (přechodná tvrdost)

Vylučuje se CaCO<sub>3</sub>



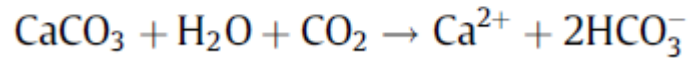
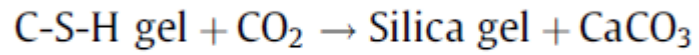
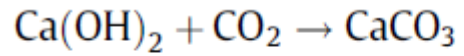
Vliv teploty – vodní kámen zejména na teplosměnných plochách

# Působení vody s agresivním CO<sub>2</sub> na beton

- ❑ příležitostné - rozpouští zkarbonatovanou vrstvu (CaCO<sub>3</sub>)
- ❑ „doplňování“ Ca<sup>2+</sup> na povrchu difuzí Ca(OH)<sub>2</sub> z jádra betonu –
- ❑ pokles alkality, rozpad rovnováhy CSH a CAH
  
- ❑ beton trvale vystavený agresivní vodě – pokrývá se hutnou karbonatovanou vrstvou, která se následně rozpouští
- ❑ proudící voda – neustálý přísun CO<sub>2</sub> – rozklad cementového tmelu
- ❑ agresivní je zpravidla voda měkká – přidává se problém s **vyluhováním**



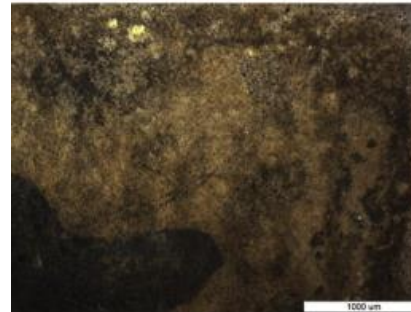
## Atak CO<sub>2</sub> nasycené vody na beton:



(a) After 7 days corrosion



(b) Drying after 7 days corrosion



(c) After 28 days corrosion



(d) Drying after 28 days corrosion



(e) After 90 days corrosion



(f) Drying after 90 days corrosion



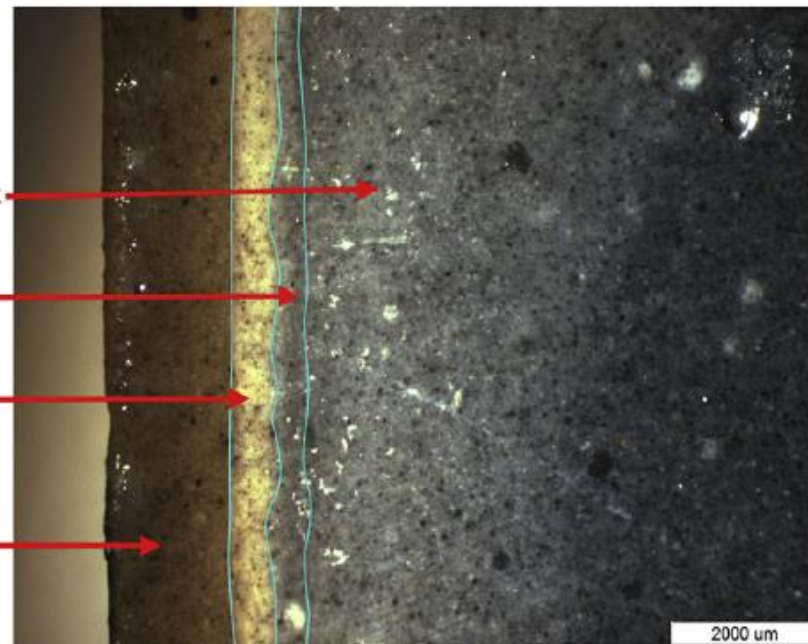
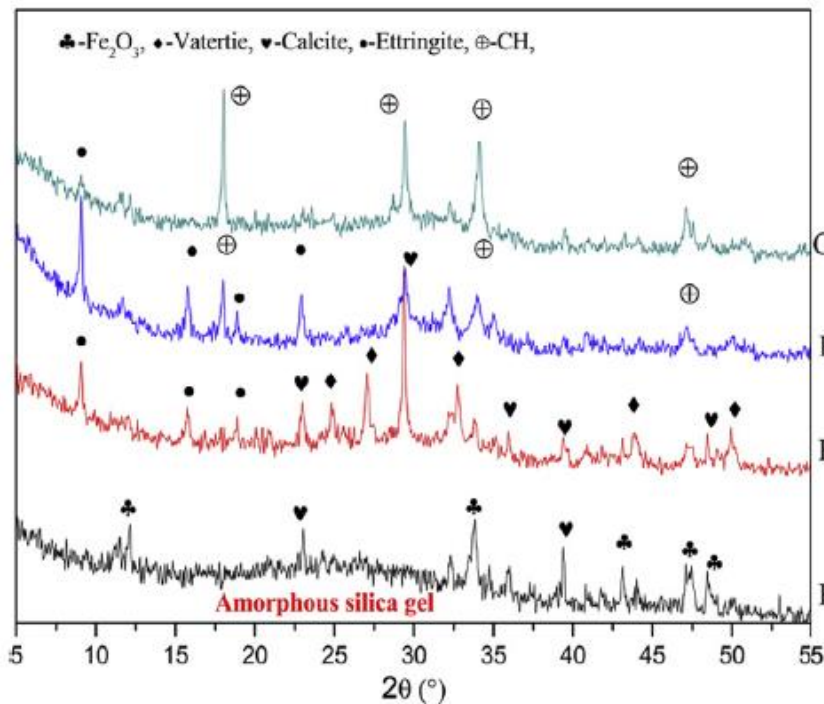
(g) After 180 days corrosion



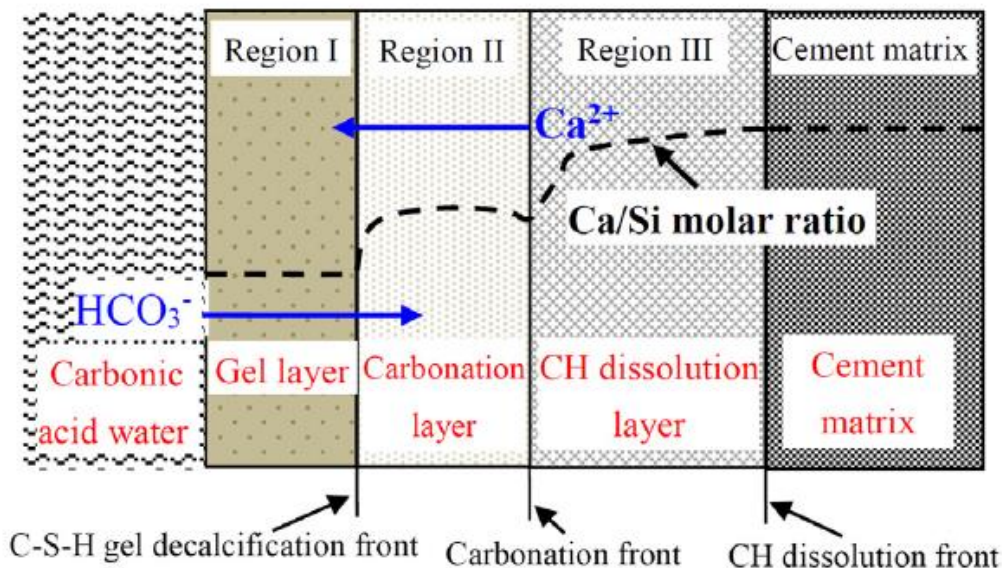
(h) Drying after 180 days corrosion



# Fázová analýza:

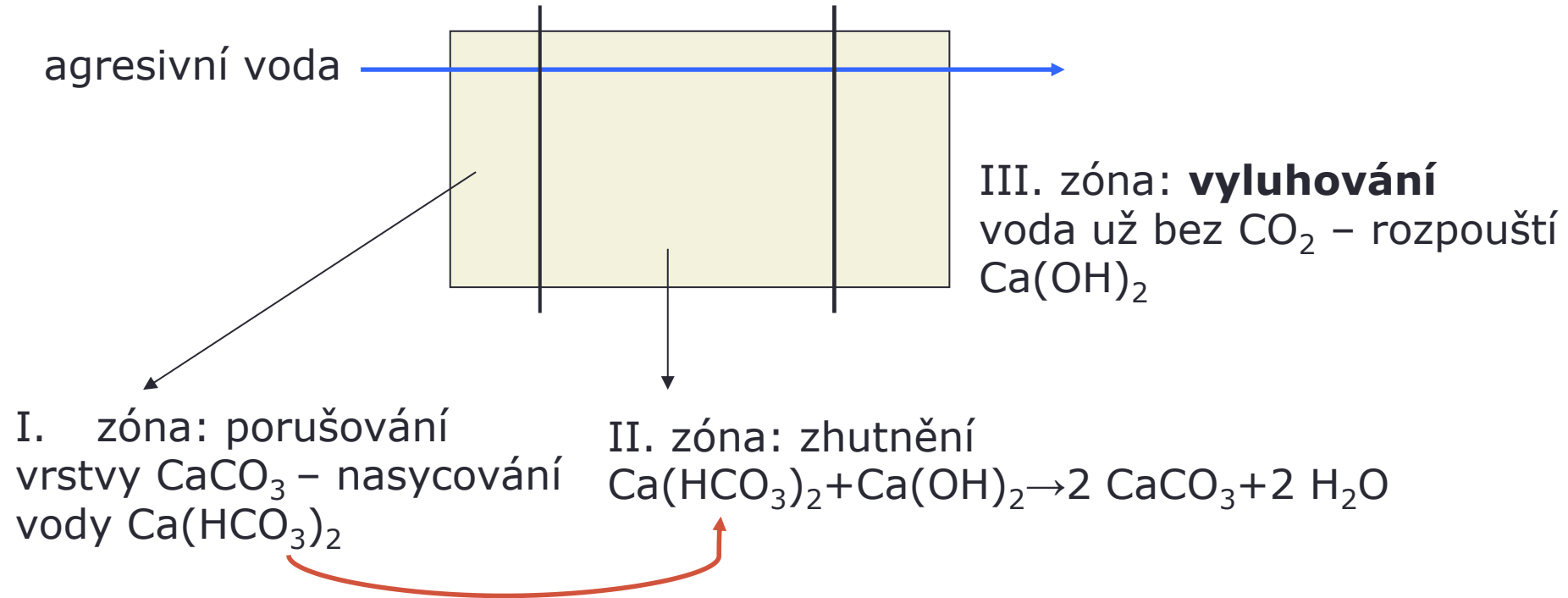


# Působení vody s agresivním CO<sub>2</sub> na beton



# Působení vody s agresivním CO<sub>2</sub> na beton

**voda prosakující konstrukcí** pod hydrostatickým tlakem (přehrady, tunely)



# Působení vody s agresivním CO<sub>2</sub> na beton

## Prevence:

- hydroizolace
- jílová vrstva kolem základů
- asfaltový nátěr
- hlinitanový cement
- **obsypání konstrukce vápencem**

*dlouhodobá hladina vody v jeskyni*



*Srdcová chodba - Jeskyně na Špičáku (Jeseníky)*