

STAVEBNÍ POJIVA

Pojivo: látka, kterou lze připravit jako suspenzi (*kaši*), případně kapalinu, která je schopna relativně rychle přejít na tuhou látku



Ronchamp

Anorganická pojiva užívaná ve stavebnictví

obvykle...

- produkována a dodávána jako prášek
- smícháním s vodou vytvoří suspenzi
- tuhnutí a tvrdnutí nastává v řádu jednotek hodin a je způsobeno průběhem (různých) chemických reakcí, jež vedou k přechodu suspenze na pevnou látku
- spolu s plnivem (kamenivo) tvoří maltu (do 4 mm) nebo beton (nad 4 mm)
- křehké materiály – vyztužování (ocelové pruty, rozptýlená výztuž – vlákna)

- **hydraulická pojiva:**-pro tuhnutí a tvrdnutí nepotřebují kontakt se vzduchem (neboli - ztuhnou i pod vodou)
 - mají delší životnost ve vlhkém prostředí
 - cementy**, hydraulické vápno

- **vzdušná pojiva:**
 - pro tuhnutí a tvrdnutí potřebují kontakt se vzduchem
 - obvykle hůře snášejí vlhké prostředí (exteriér) – ztrácejí pevnost a soudržnost
 - vzdušné vápno, sádra, vodní sklo, nepálená hlína

HYDRAULICKÁ POJIVA

- hydraulická pojiva obsahují **hydraulické látky**
 - **hydraulické látky** (*bez přívlastku*) – tuhnou po smíchání s vodou
křemičitanové cementy, hlinitanové cementy...
 - **latentně hydraulické látky** – pro dosažení rychlého tuhnutí a vysoké pevnosti potřebují **aktivovat** pomocí alkalické látky
vysokopecní struska
 - **pucolány** – vyžadují aktivaci větším množstvím alkalické látky; např. hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (vápno)
popílek ze spalování uhlí, přírodní pucolány (určité horniny), křemičitý úlet, pálené jíly (metakaolin)...

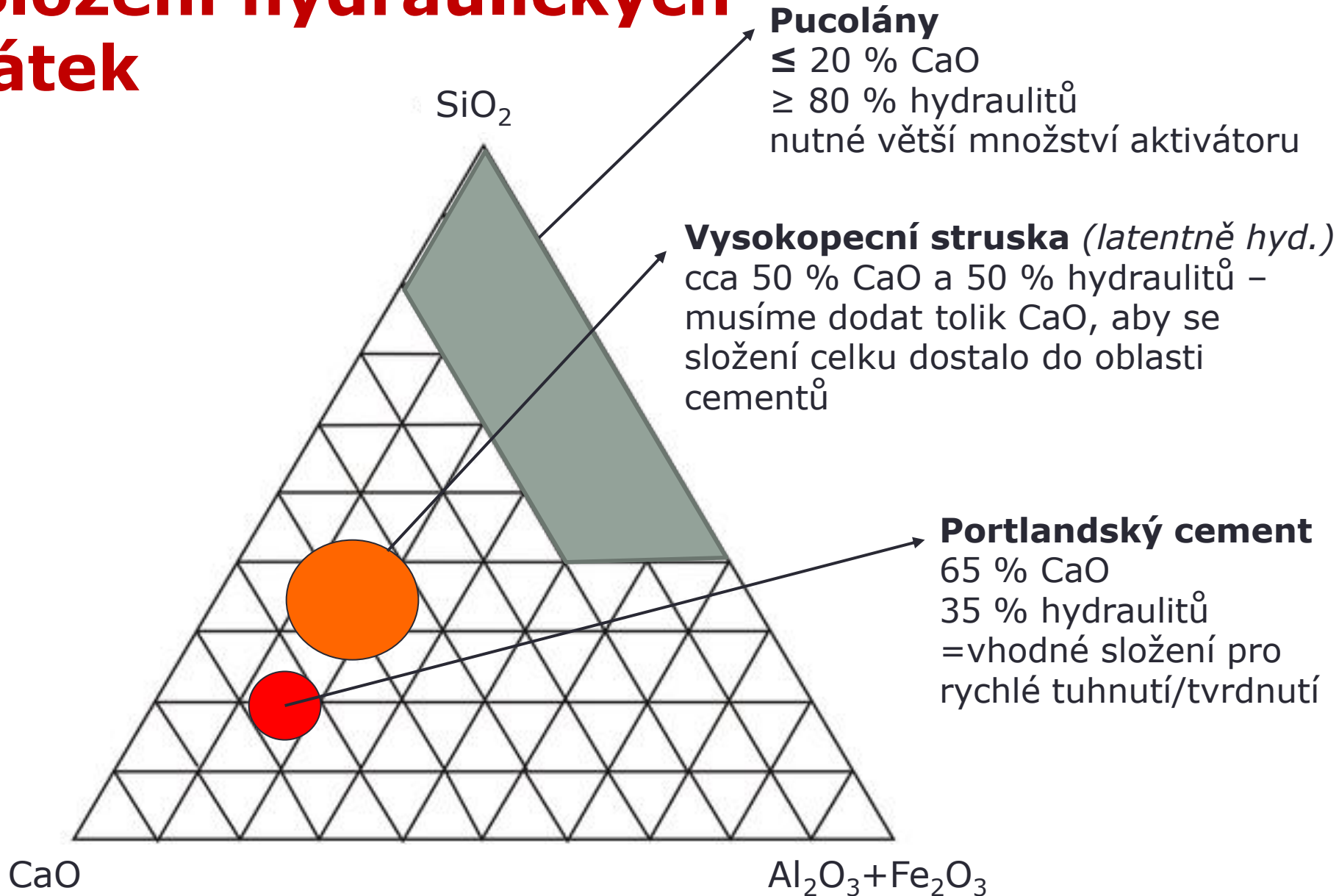
Nositelé hydraulických vlastností – **hydraulické oxidy** (hydraulity)

SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve **vhodné** formě, která reaguje s **aktivátorem**

*Vesuv – Pozzuoli – těžba sopečného popela
užívaného ve směsi s vápnem jako pojiva*



Složení hydraulických látek



Cementářská notace a vyjadřování složení „v oxidech“

- všechny hydraulické látky jsou oxidové povahy (stejně jako většina minerálů, skel, keramických materiálů...)
- jejich složky – chemické sloučeniny – můžeme virtuálně vyjádřit jako „směsi oxidů“



$$w_{\text{CaO}} = 56 \text{ hm. \%}$$

$$w_{\text{CO}_2} = 44 \text{ hm. \%}$$

- ve skutečnosti se o směsi nejedná, jsou to chemické sloučeniny
- cementářská notace:** přepis vzorců pomocí jednopísmenných zkratek

C	CaO
S	SiO ₂
A	Al ₂ O ₃
F	Fe ₂ O ₃
H	H ₂ O
$\overline{\text{S}}$	SO ₃
$\overline{\text{C}}$	CO ₂

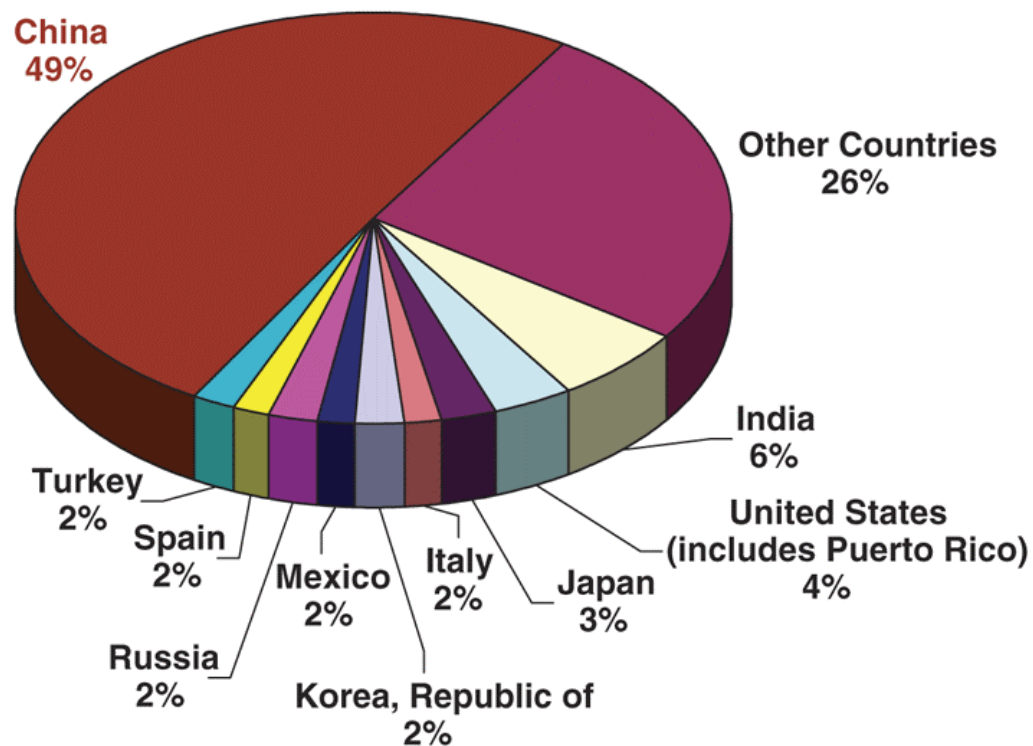


CEMENT

- cement **pro všeobecné použití** dle ČSN EN 197-1:
křemičitanový cement na bázi **portlandského slínku** a dalších složek

- celosvětově nejdůležitější poji
- roční výroba cem. 4,3 mld. tun
- těžba ropy 4,4 mld. tun
- roční výroba v ČR 4 mil. tun (1

- využití cementu v ČR:
transportbeton 65 %
prefabrikáty 17 %
pytlovaný cement 10 %
suché maltové
a omítkové směsi 3 %
střešní krytina 3 %



Druhy cementu podle složení

- cementy dle ČSN EN 197-1:
- křemičitanové cementy vždy obsahují **portlandský slínek** a **sádrovec** (sádrovec zpomaluje tuhnutí – prodlužuje zpracovatelnost)
- další „hlavní složky“ používané v cementech:
 - latentně hydraulické látky (vysokopecní struska)
 - pucolány (elektrárenský popílek, přírodní pucolány)
 - mletý vápenec

Druhy cementu:

- CEM I – portlandský (≥ 95 % slínku)
- CEM II – portlandský směsný (65-94 % slínku, zbytek viz tabulka)
- CEM III – vysokopecní cement (slínek+struska v širokém rozmezí)
- CEM IV – pucolánový cement (slínek+pucolány v širokém rozmezí)
- CEM V – směsný cement (slínek+struska+pucolány)

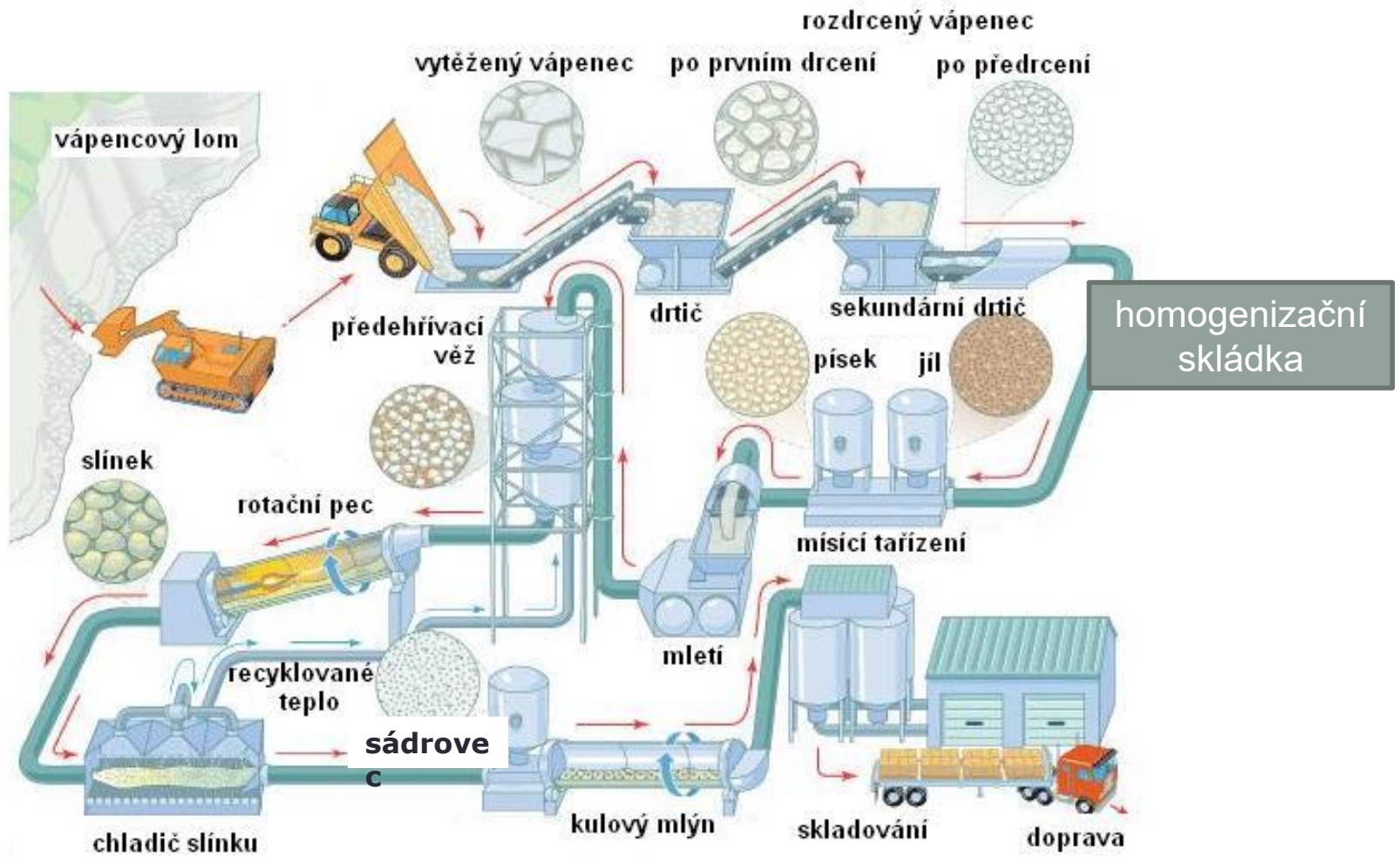
Další třídění cementů: podle pevnosti (3 třídy) a podle rychlosti tuhnutí (3 třídy)

Cement pro zdění

Speciální cementy: bílý, síranovzdorný, nízkoalkáliový, hlinitanový...

Hlavní druhy	Označení 27 druhů cementů pro obecné použití		Složení (poměry složek podle hmotnosti)										
			Hlavní složky									Dopřilující složky	
			Slínek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílky		Kalcinov. břidlice	Vápenec		
						přírodní	přir. kalcin.	křemičité	vápenaté		L		LL
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-D	65-79	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s kalcinov. břidlicí	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
CEM II/A-LL		80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Portlandský směsný cement	CEM II/A-M	80-94	< 6-20 >									0-5	
	CEM II/B-M	65-79	< 21-35 >									0-5	
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolánový cement	CEM IV/A	65-89	-	< 11-35 >					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	< 36-55 >					-	-	-	0-5
CEM V	Směsný cement	CEM V/A	40-64	18-30	-	< 18-30 >			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	-	< 31-50 >			-	-	-	-	0-5

Schéma cementárny



cementárna Radotín



Suroviny pro výrobu slínku

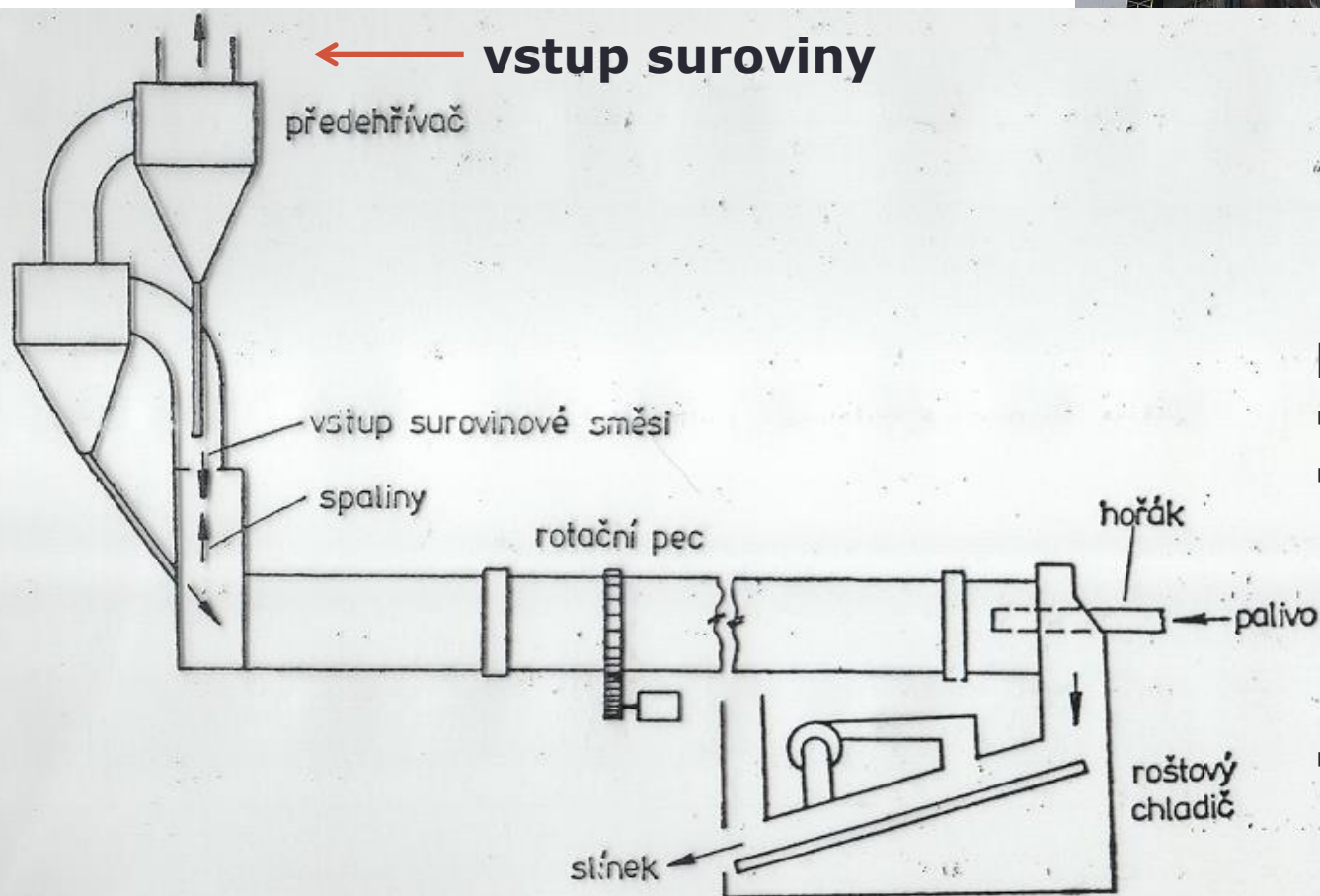
- základní surovina je hornina vápenec; hlavní složka je uhličitan vápenatý CaCO_3
- surovinová směs musí odpovídat složením vyráběnému slínku: 65 % CaO , zbytek hydraulické oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)
- **hydraulický modul** (musí být kolem **2**)

$$M_H = \frac{[\text{CaO}]}{[\text{SiO}_2] + [\text{Al}_2\text{O}_3] + [\text{Fe}_2\text{O}_3]}$$

- optimální situace: je k dispozici vápenec „přiměřeně“ znečištěný jílovými minerály (zdroj hydraulických oxidů) tak, že má vhodné složení pro výrobu slínku
- reálná situace: složení vápence je třeba **upravovat** (jíl, písek, železná ruda, velmi čistý CaCO_3)
- všechny složky se melou v **kulovém mlýně**: požadovaná jemnost částic **homogenizace** surovin

Výpal slínku v rotační peci

- rychlost otáčení 1 za minutu
- délka cca 50 m, průměr 5 m
- doba průchodu 40-60 minut



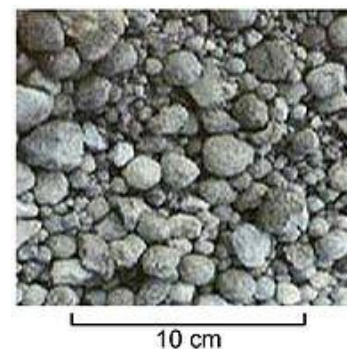
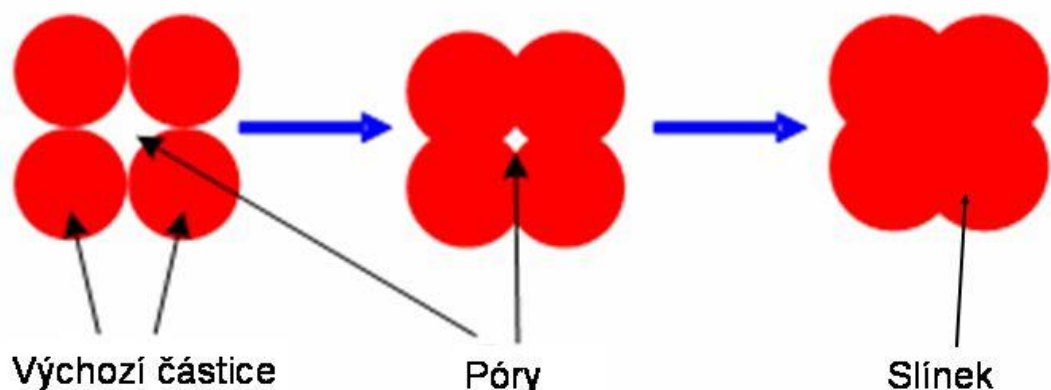
Palivo:

- **uhlí**
- „tuhá alternativní paliva“ – likvidace odpadů (pneu, recyklované plasty, masokostní moučka)
- mazut, zemní plyn

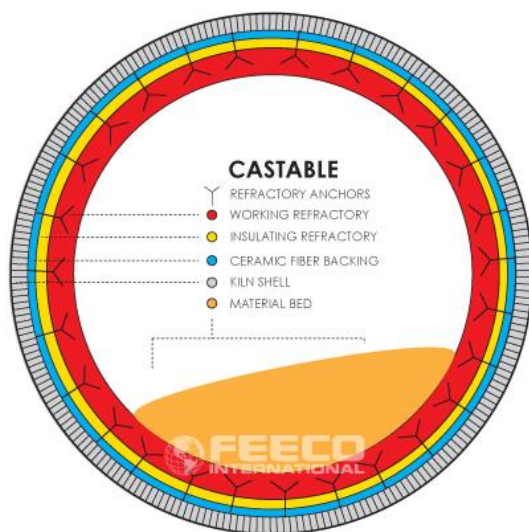
Výpal slínku v rotační peci

Co se tam děje?

- definice slinování: „spojování částic materiálu při teplotách nižších i vyšších než je teplota tání“
- reálná situace: část obsahu pece (20-30 %) se taví



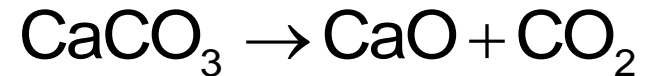
Portlandský
slínek



Výpal slínku v rotační peci

Reakce při výpalu slínku

1. tepelný rozklad surovinové směsi:



z **CaCO₃** vzniká CaO (od 800 °C):

z **jílových minerálů** vznikají dehydratací (od 400 °C) reaktivní mezi obsahující hydraulické oxidy (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)

2. z **C, S, A a F** vznikají nové sloučeniny - **slínkové minerály**:

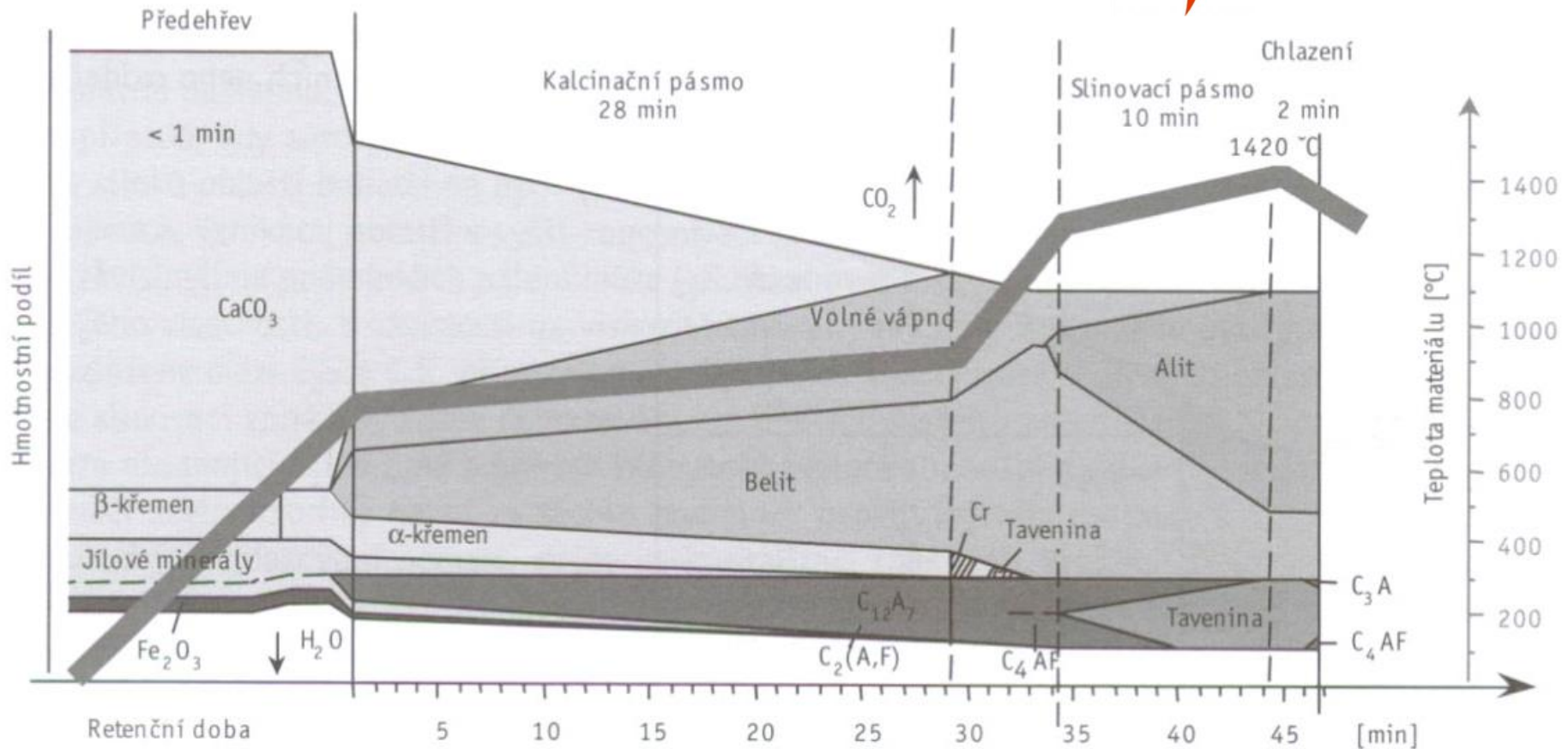
do 1250 °C (v pevné fázi): **C₂S belit** (di-kalcium-silikát)

1300-1500 °C – slinovací pásmo: $\text{C}_2\text{S} + \text{C} = \text{C}_3\text{S}$ **alit**

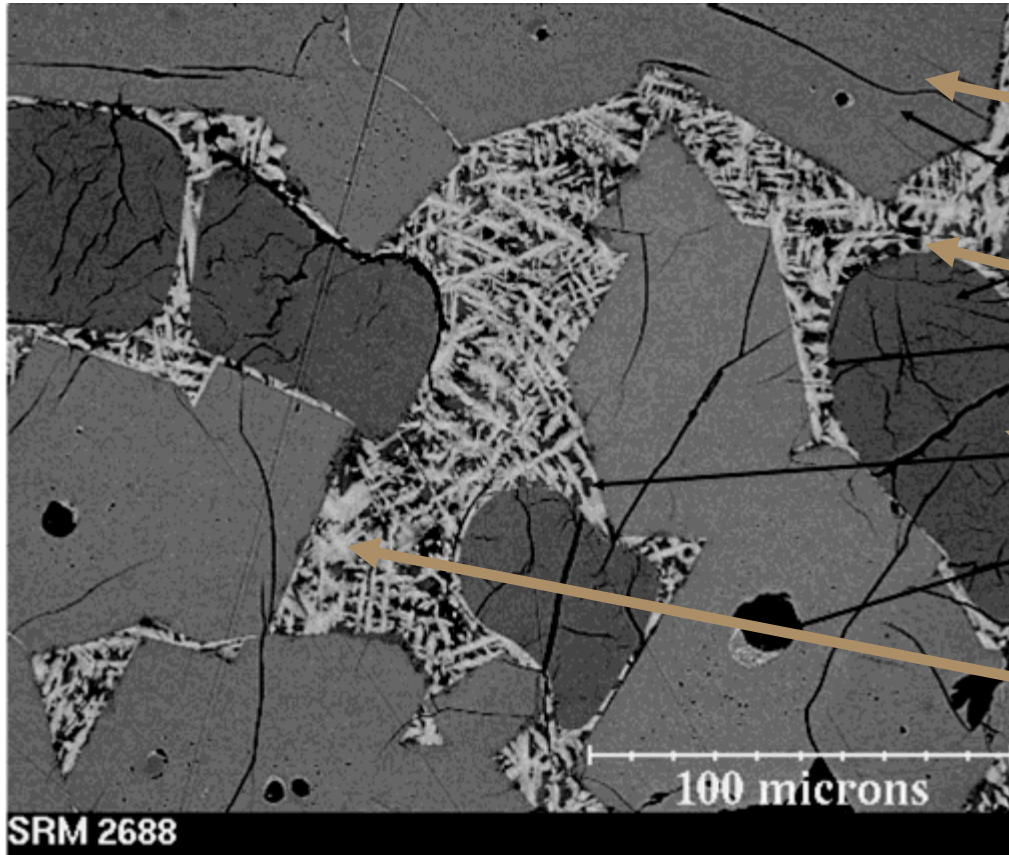
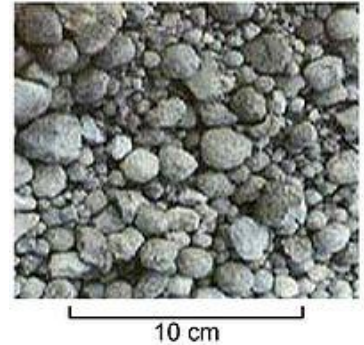
z taveniny vznikají: **C₃A**
C₄AF

tri-kalcium-aluminát
alumino-ferit (celit)

Výpal slínku v rotační peci



Mikroskopický snímek zrna slínku



Alit C_3S

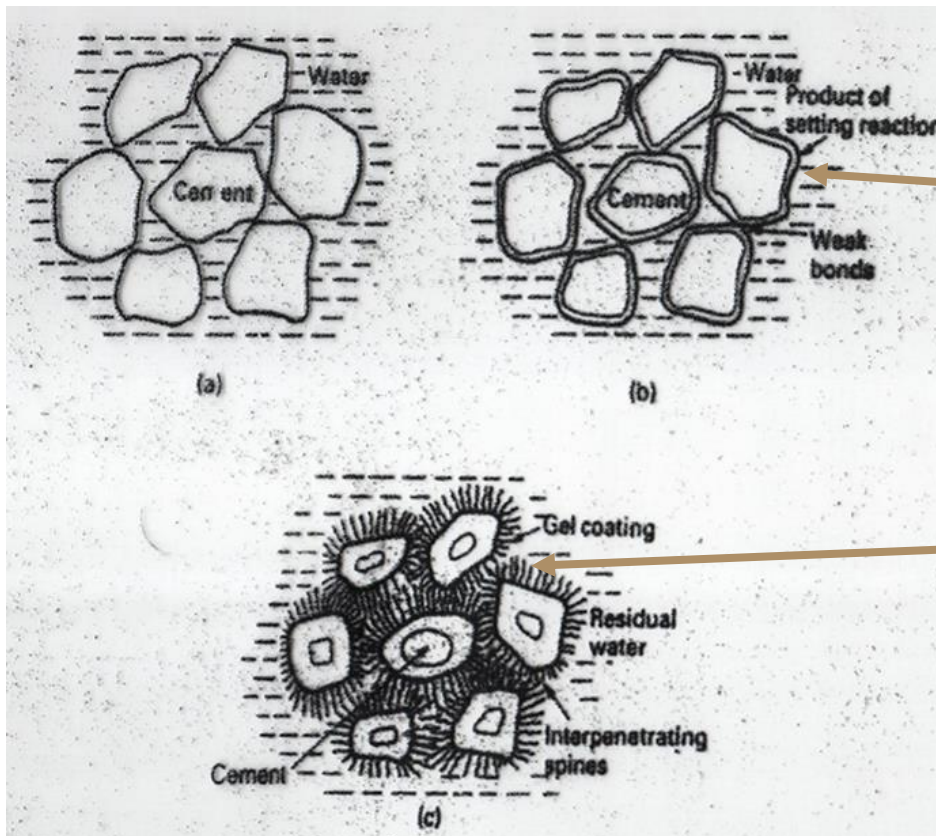
Tmavá mezerní
hmota - C_3A

Belit C_2S

Světlá mezerní
hmota -
Celit C_4AF

Trochu předběhněme: **hydratace slínkových minerálů**

- hydratace slínkových minerálů – reakce s vodou
- vznikají hydratační produkty – nerozpustné sloučeniny způsobující „propojení“ jednotlivých zrn cementu a tím tuhnutí a tvrdnutí cementové kaše/betonu



**vrstva
hydratačních
produktů**

**vzniká souvislý
gel → zpevnění
materiálu**

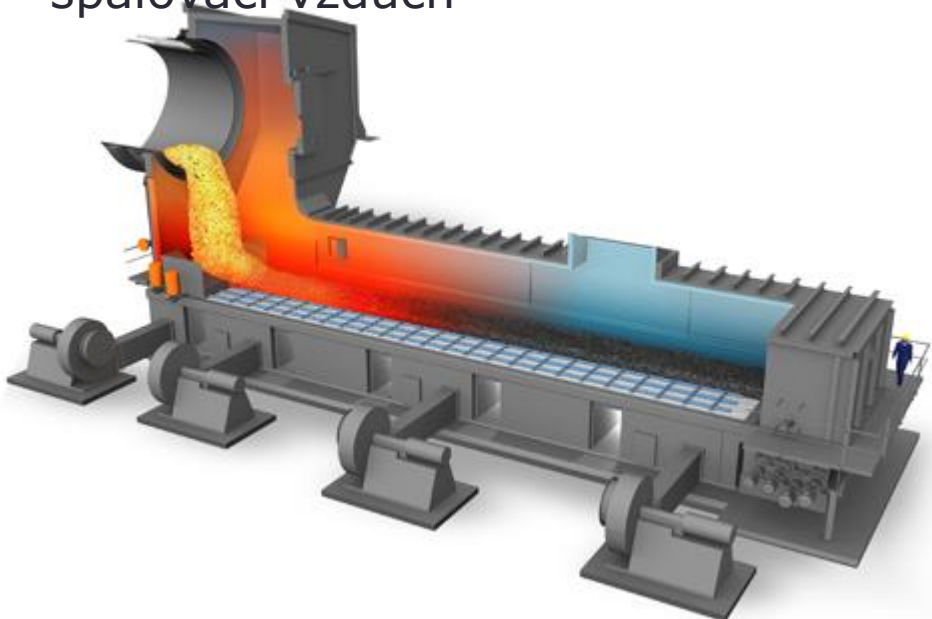
Důležité vlastnosti slínkových minerálů

	<i>obsah ve slínku</i>	<i>rychlost hydratace</i>	<i>poznámky</i>
C₃S	60-75 %	rychlá	nositel počáteční pevnosti betonu, vzniká při teplotách nad 1250 °C
C₂S	5-30 %	střední	přispívá k pevnosti betonu až v čase řádu desítek až stovek dní
C₃A	5-15 %	velmi rychlá	slínkové minerály s A způsobují
C₄AF	5-15 %	rychlá	citlivost betonu vůči síranové korozi

Ve slínku jsou dále přítomny volné CaO a MgO – jsou nežádoucí, způsobují praskání betonu (kvůli své pomalé hydrataci na objemné Ca(OH)₂ a Mg(OH)₂ ve zrajícím betonu) – soudobé technologie volné CaO a MgO výrazně eliminují.

Chlazení slínku

- slínek opouští pec při teplotě 1300-1400 °C
- je nutné ho rychle ochladit – co nejrychleji a co nejvíce (na cca 150 °C)
- **proč?** Alit C_3S je pod 1250 °C nestabilní – má tendenci se rozpadnout na belit a volné vápno $C_3S = C_2S + C$. Rychlým ochlazením tomu zabráníme – „zmrazíme“ nestabilní strukturu, tím zlepšíme „kvalitu cementu“.
- realizace chlazení – slínek vypadává na pohyblivý rošt a chladí se proudem vzduchu, který se tak ohřeje a vstupuje do pece jako spalovací vzduch



Mletí slínku / cementu

- provádí se opět v kulovém mlýnu
- při mletí se přidávají ke slínku všechny další složky právě vyráběného cementu (sádrovec, struska, popílek, vápenec...)
- mlýn je vybaven třidičem částic – , nedostatečně namletý materiál se vrací do
- finální částice cementu mají průměr 10-30



Expedice cementu

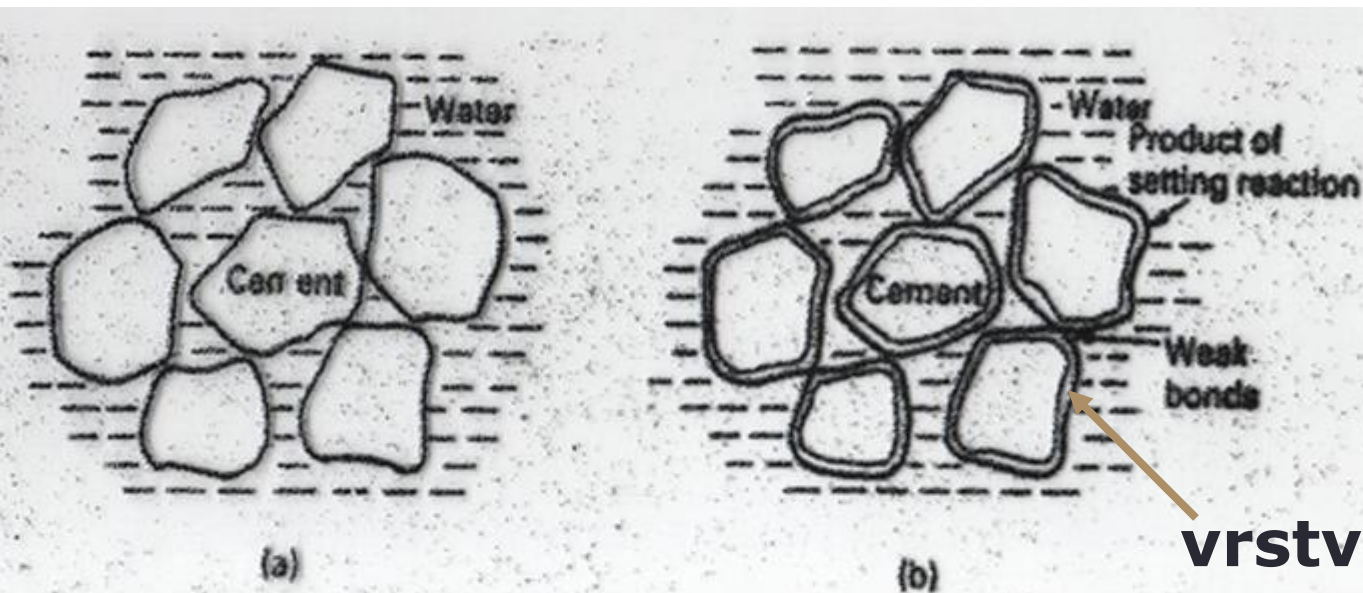


Hydratace cementu

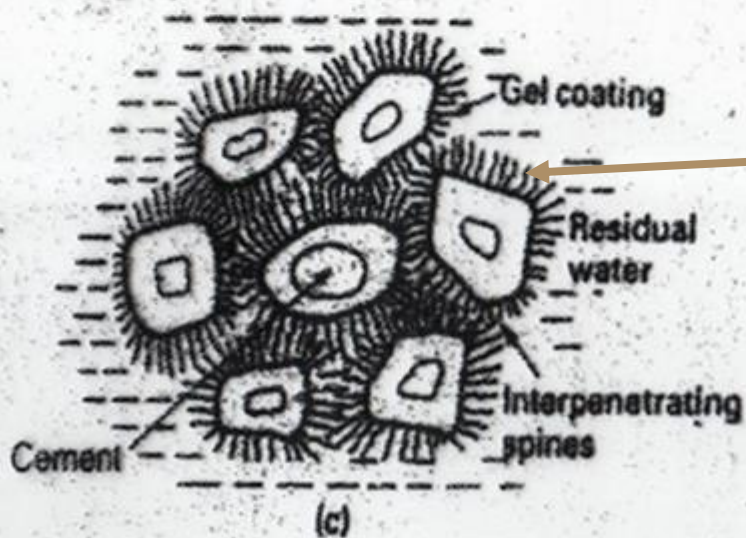
- hydratace = chemická reakce cementu s vodou
- hydratace hydraulických pojiv → **tuhnutí a tvrdnutí**, vznikají **pevné, nerozpustné, soudržné a časově stálé sloučeniny**, schopné pojít částice kameniva a vytvářet kompaktní pevný produkt (beton)
- **smíchání pojiva, vody a plniva (kameniva) → produkt beton**



Hydratace – několik zrn cementu ve vodě



vrstva hydratačních produktů

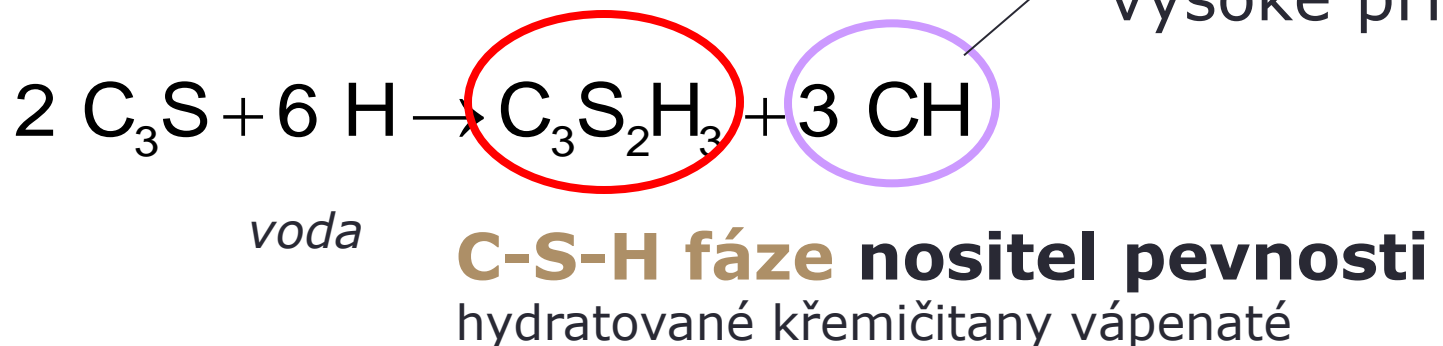


vlákna hydratačních produktů → zpevnění

Hydratace jednotlivých slínkových minerálů

- hydratace **C₃S** (60-75 % slínku)
 - rychlá – počáteční nárůst pevnosti
 - vysoké hydratační teplo
 - (zimní betonáž)

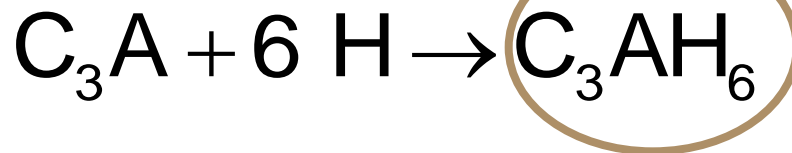
Příklad hydratační reakce:



- hydratace **C₂S** pomalejší, menší hydratační teplo

Hydratace slínekových minerálů

- hydratace C_4AF 5-15 % slínku
vzniká C_3FH_6 a C_3AH_6 – krystalizují z roztoku
poměrně rychlá, vysoké hydratační teplo
- hydratace C_3A 5-15 % slínku
rychlá, velmi vysoké hydratační teplo



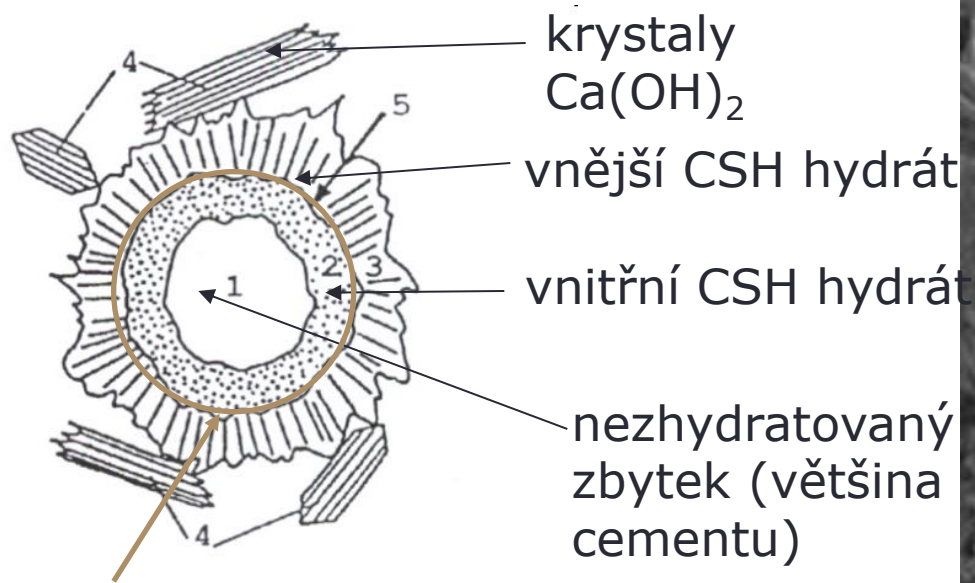
C-A-H fáze

hydratované hlinitany vápenaté

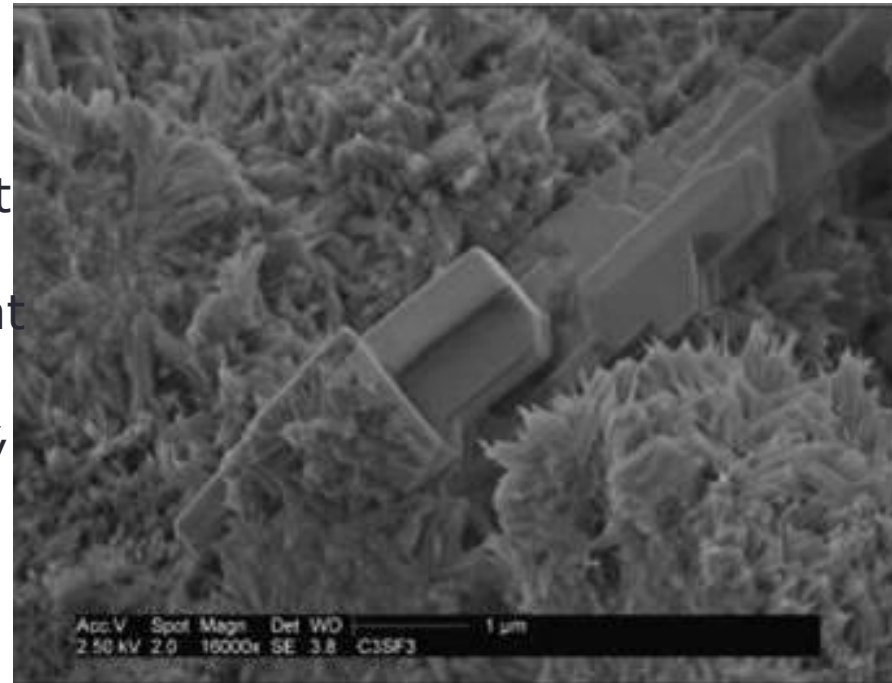
Souhrnný „chemický“ průběh hydratace portlandského cementu:

**slínekové minerály (C_3S ; C_2S ; C_4AF ; C_3A) + $H_2O \rightarrow CSH$; C_3AH_6 ; C_3FH_6 ; CH
sádrovec (několik %) \rightarrow ettringit**

Téměř úplně zhydratované zrno cementu



**původní zrno cementu
(průměr cca 20 μm)**



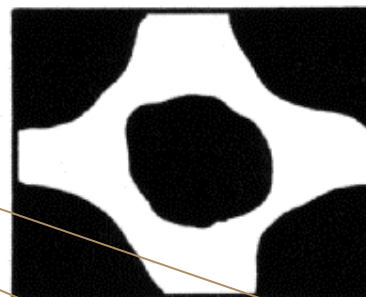
Souhrnný „chemický“ průběh hydratace portlandského cementu:

slínkové minerály (C_3S ; C_2S) + H_2O → CSH + CH

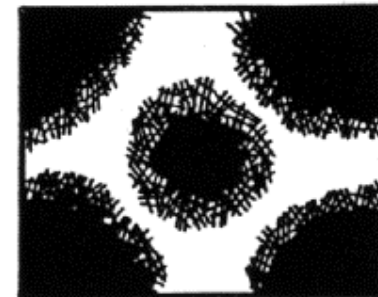
AFT a AFm fáze – produkty hydratace C_4AF a C_3A – malý příspěvek k pevnosti
sádrovec (několik %) → ettringit (typ Aft fáze)

Složení cementového kamene

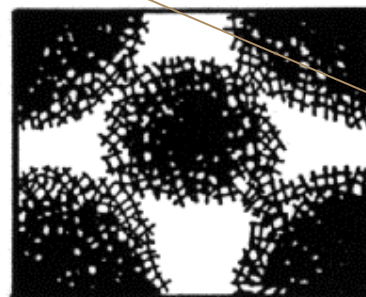
1. C-S-H a C-A-H hydráty -
hlavní nositelé pevnosti (až 2/3 objemu kamene)
2. nezhydratovaný slínek (obalený hydráty)
3. krystaly Ca(OH)_2 (až 25 % objemu)
4. gelové póry (průměr v nm)
5. kapilární póry
(průměr v desítkách nm až μm)
6. technologické póry (μm až mm)



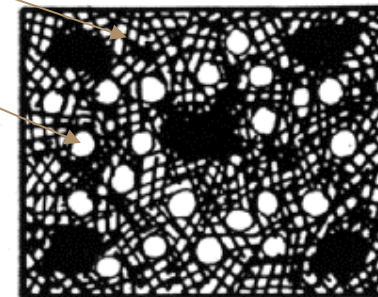
A



B



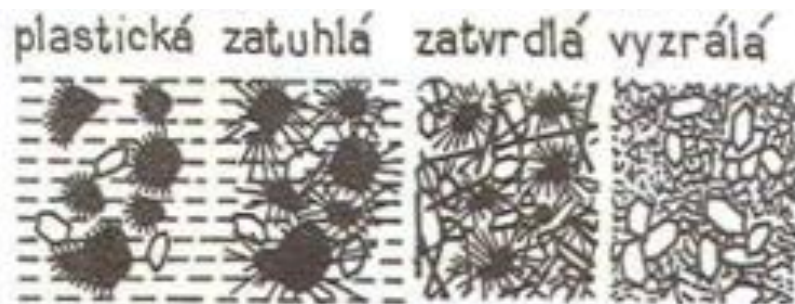
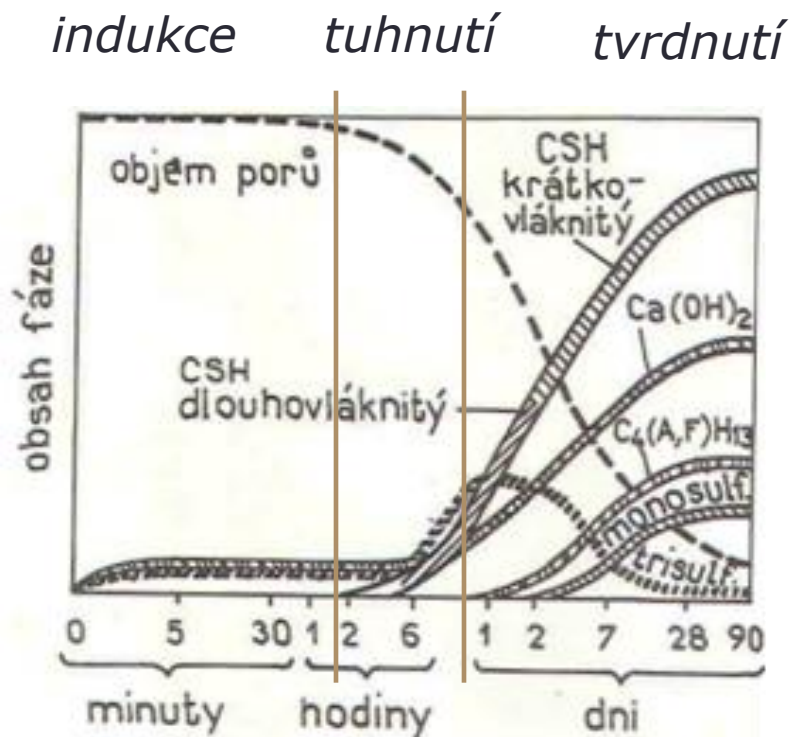
C



D

Průběh hydratace p-slínku jako celku

1. **indukční perioda:** 1-2 hodiny
smáčení zrn cementu
tvoří se zárodky CSH, Ca(OH)_2
a ettringitu
pevnost $< 0,1$ MPa
2. **tuhnutí:** do 24 hodin
probíhá hydratace C_3S , C_3A a C_4AF
tvoří se **dlouhovláknitý C-S-H**
pevnost 1-20 MPa
3. **tvrdnutí:** do 28 dní hydratace,
pak zrání (léta)
probíhá hydratace C_2S
tvoří se **krátkovláknitý C-S-H**
dosahuje se konečná pevnost



D23IMP Interakce materiálů a prostředí

STRUKTURNÍ ZMĚNY ANORGANICKÝCH PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ VLIVEM PROSTŘEDÍ

Martin Keppert



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

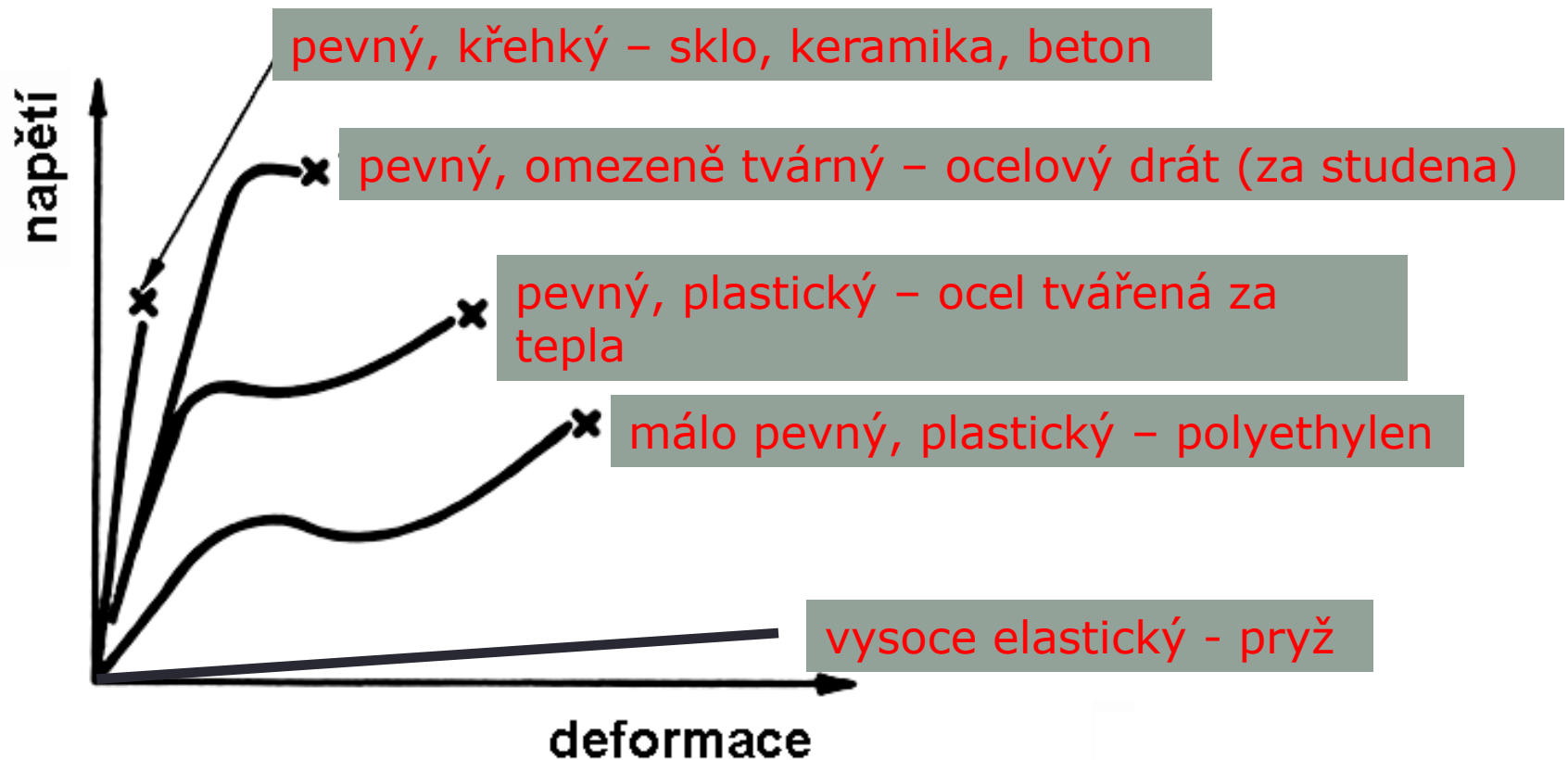

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Motivace: okolní prostředí působí na materiály „fyzikálně“ a „chemicky“
„prostředí“ proniká do materiálu póry, chemické reakce mezi
prostředím a materiálem (objemové změny, rozpouštění)
materiál reaguje: praskliny (je křehký), pokles pevnosti, rozpad



Anorganické stavební materiály: jejich slabá místa

1. **jsou křehké:** při jejich lomu (téměř) neprobíhá deformace, lom nastává rychle

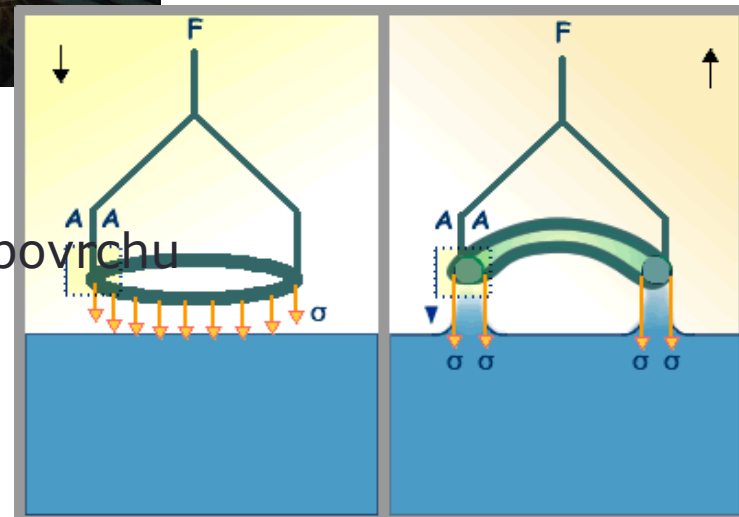
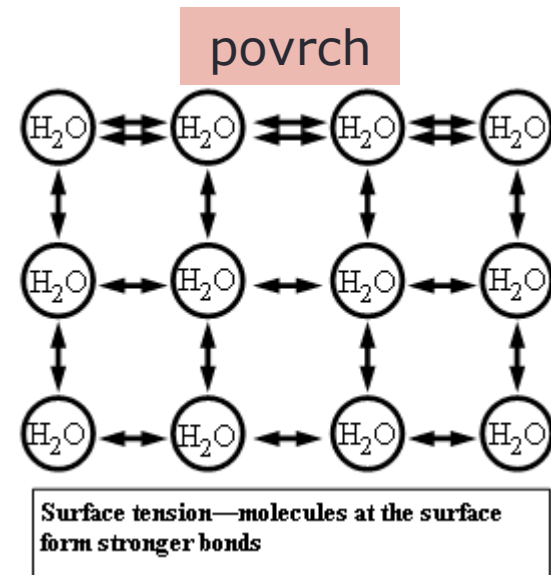


Anorganické stavební materiály: jejich slabá místa

2. jsou hydrofilní – smáčivé pro vodu

Krok stranou: povrchové napětí

- mezimolekulární přitažlivé a odpuzivé síly – ve vodě **vodíkové můstky**
- každá molekula chce vytvořit „svůj konstatní“ počet vazeb – sil – k sousedním molekulám
- povrch kapaliny – méně sousedních molekul = silnější síly k „zbývajícím“ sousedům = vzniká povrchový film
- **povrchové napětí σ** (nebo γ) : energie (práce) potřebná na jednotkové zvětšení povrchu
- v J/m^2 nebo N/m
- Povrchovou energii mají i pevné látky

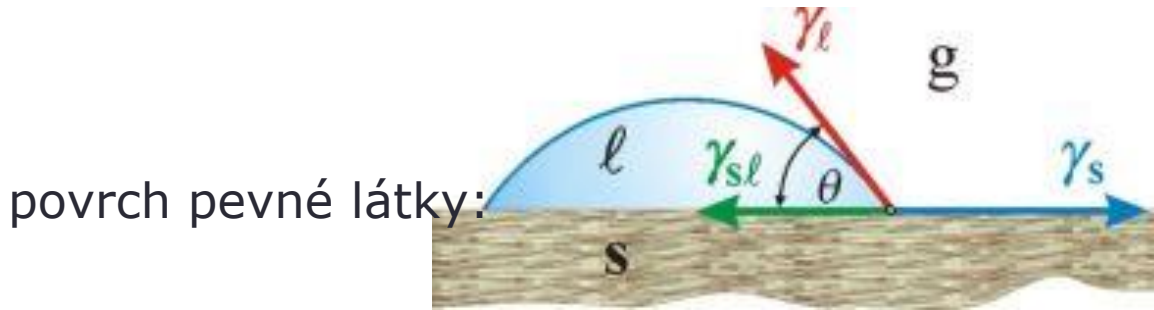


Měří se síla potřebná k odtržení prstence od hladiny

Anorganické stavební materiály: jejich slabá místa

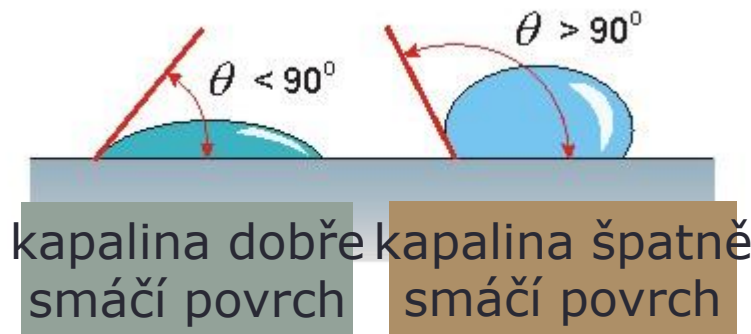
2. jsou hydrofilní – smáčivé pro vodu

Situace na rozhraní pevná látka - kapalina



γ_s ..povrchová energie pevné látky
 γ_l ..povrchové napětí kapaliny
 γ_{sl} ..mezifázová energie pevná
látka-kapalina
 θ ..úhel smáčení

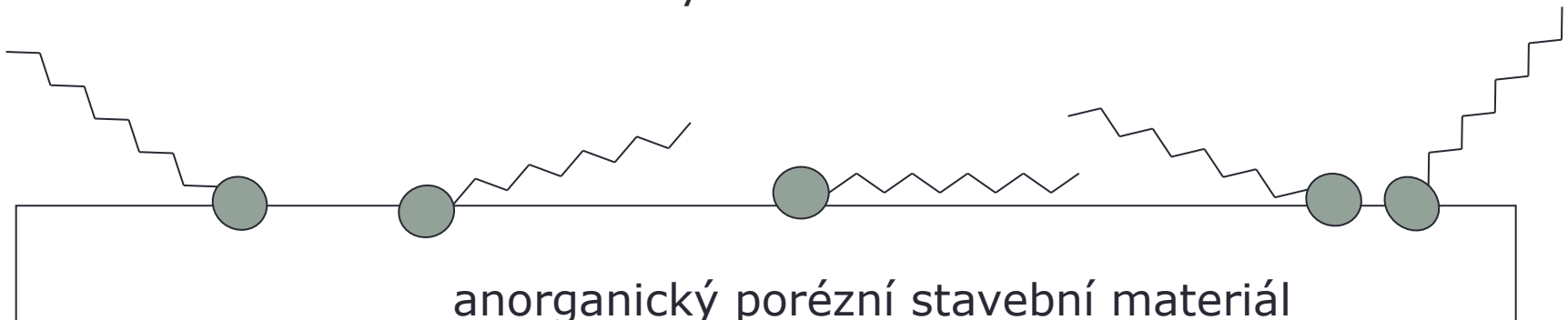
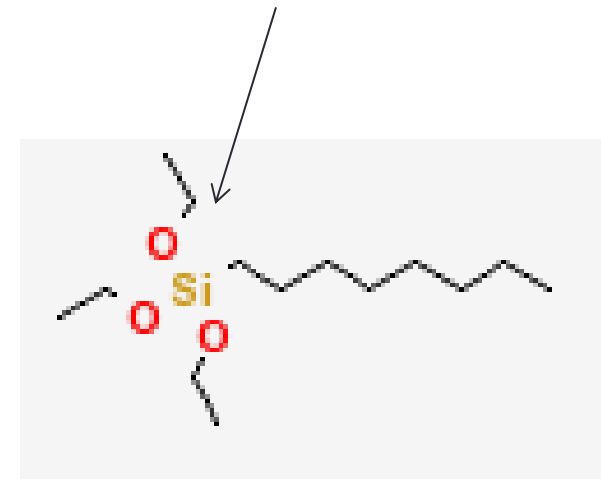
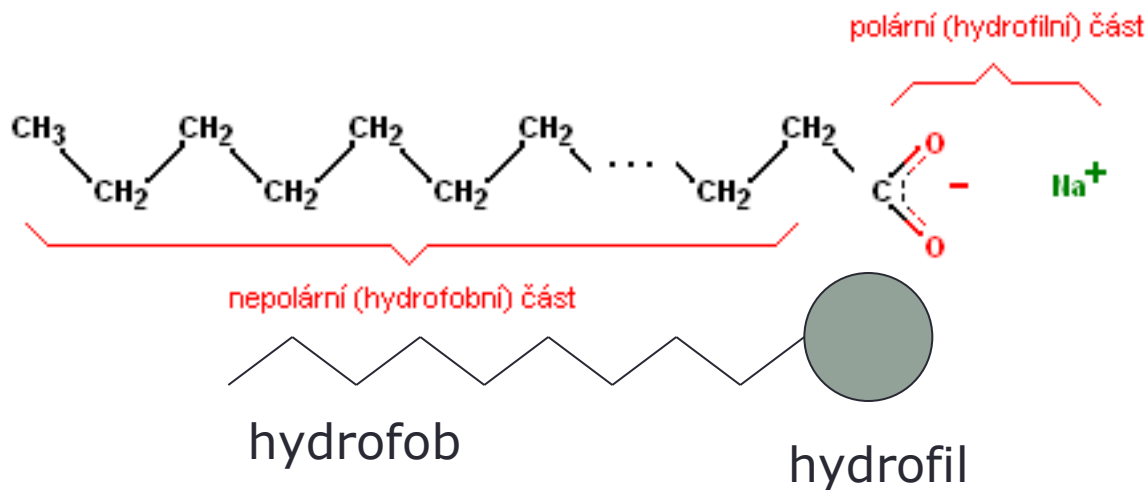
rovnováha sil na povrchu (vektorový součet): $\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cdot \cos\theta$



- kapalina na „**přátelském**“ povrchu
- kapalina na „**nepřátelském**“ povrchu

Hydrofobizace

- změna povahy povrchu materiálu z hydrofilního (smáčivého) na hydrofobní
- používají se organické sloučeniny, obsahující v jedné molekule část **hydrofilní** (funkční skupina s kyslíkem (sulfoskupina $-\text{SO}_3\text{H}$, karboxyl COO , siloxanová skupina) i **hydrofobní** – uhlovodíkový řetězec

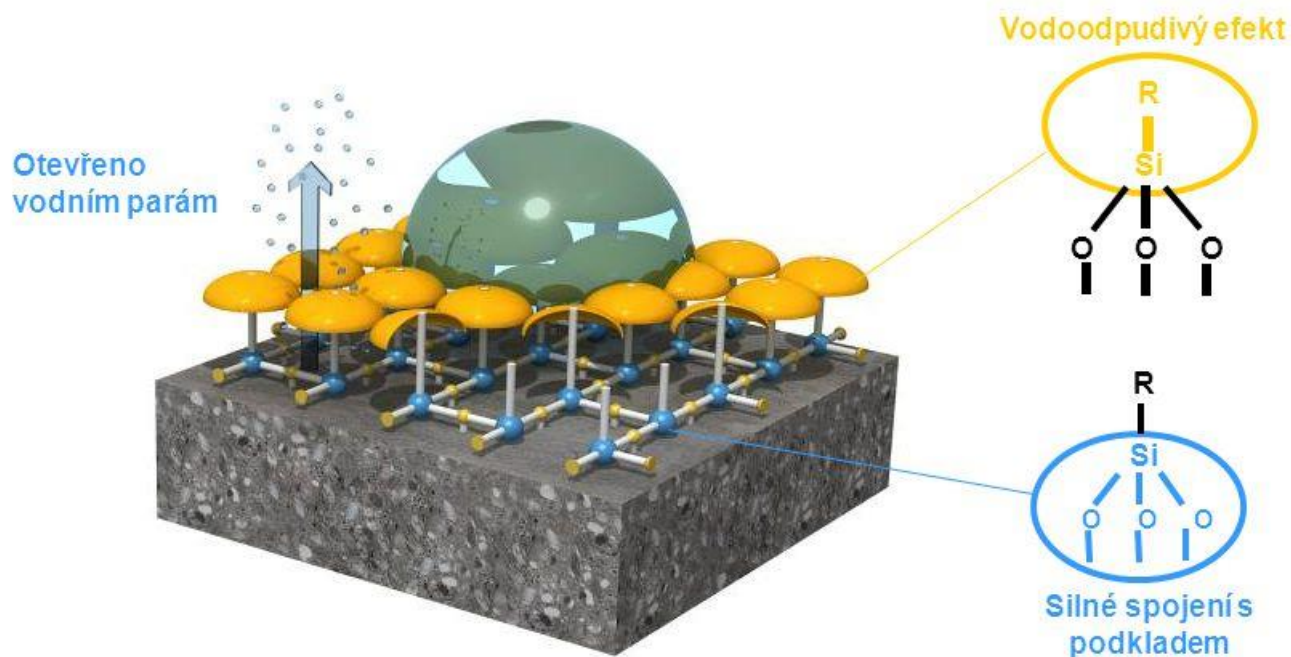


Co je to hydrofobní impregnace?

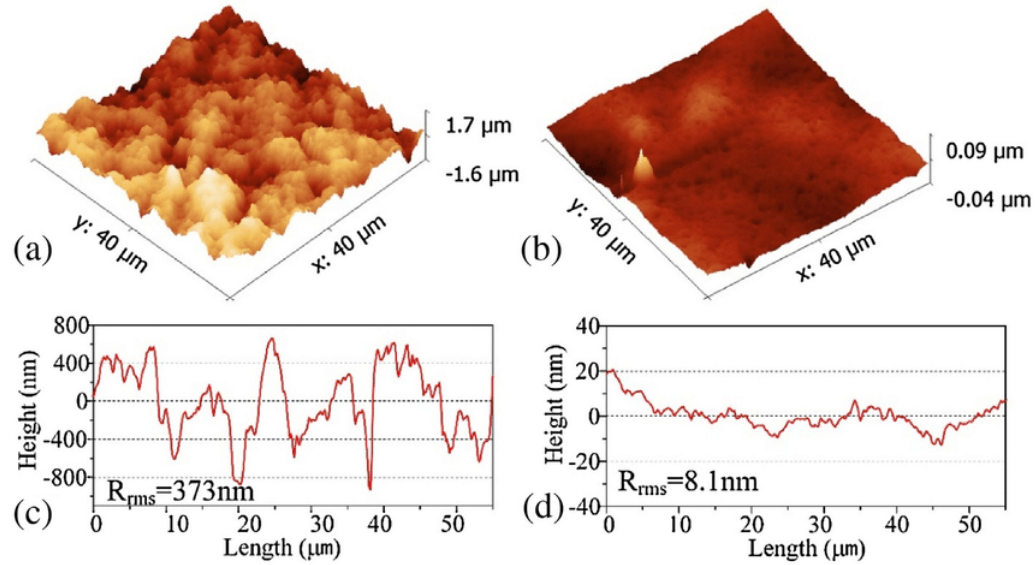
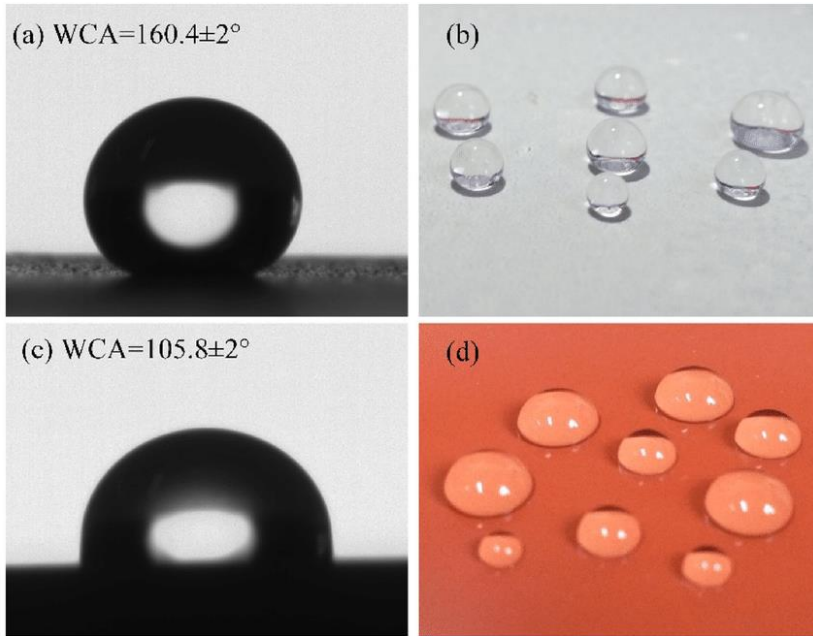
Struktura silikonové pryskyřice

Hydrofobní impregnace mění povrchové napětí minerálních podkladů vč. Betonu, malty a zdiva.

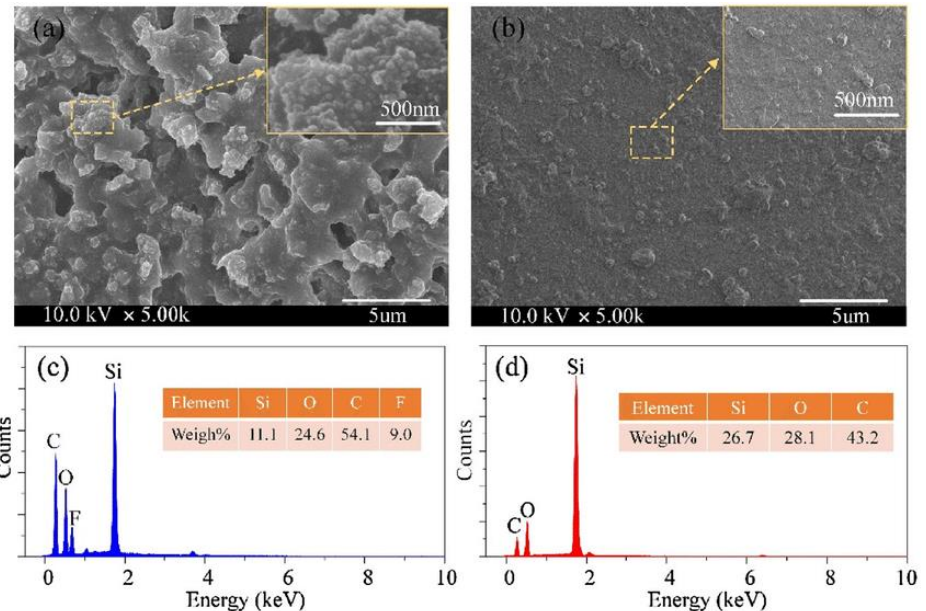
Tvoří povrch odpuzující vodu a v ní rozpuštěných agresivních solí, jako chloridy a sírany.



„super hydrofobní povrch“



silikonový kaučuk



*Applied Surface Science 403
(2017) 133–140*

Anorganické stavební materiály: jejich slabá místa

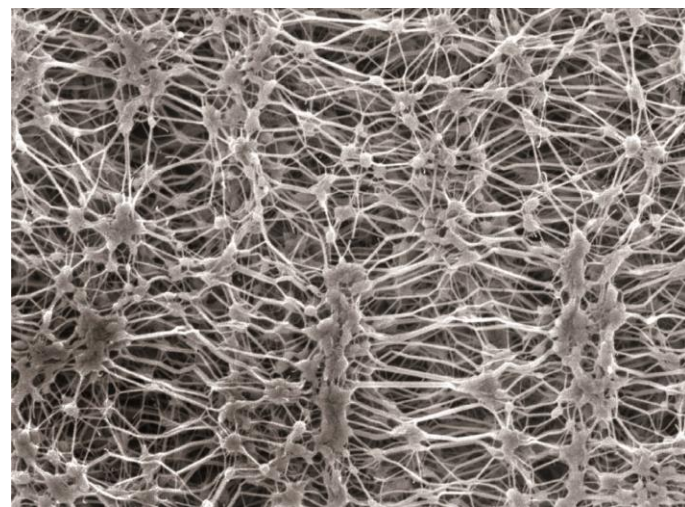
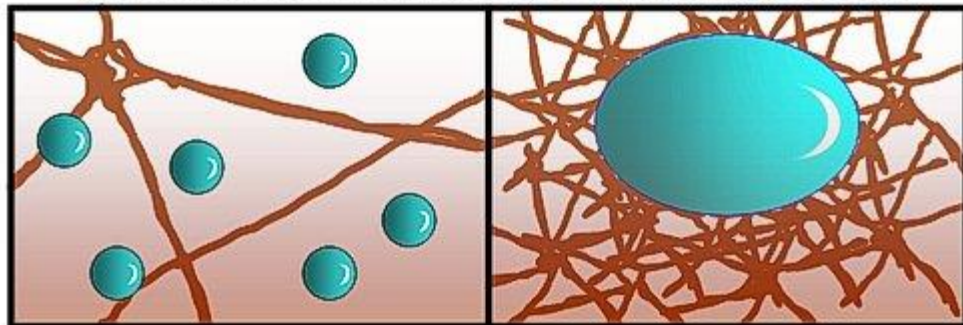
2. jsou hydrofilní – smáčivé pro vodu

Přátelské a nepřátelské povrchy

- rozhoduje polarita pevné látky a kapaliny
- **podobné se má rádo – smáčí se – podobným**
- voda – silně polární kapalina – dobře smáčí povrchy anorganických látek
- organické látky – dobře smáčí organické povrchy – plasty, vosky

Gore-texová membrána: polyurethanová síť – nesmáčivá pro vodu – kapky neprojdou, ale jednotlivé molekuly H_2O (pára) projdou

Micro pores (L) allow water vapor molecules to escape while preventing larger water drops (R) from passing through.



Anorganické stavební materiály: jejich slabá místa

3. jsou porézní:

póry představují cestu pro pronikání **vody** a dalších látek
(porozita samozřejmě také snižuje pevnost)

v pórech se uplatňuje **kapilární vztlínání (elevace) vody** (a
všeho v ní rozpuštěného)

↑ vztlínání – nad zakřiveným povrchem (meniskem)

je nižší tlak, než nad rovným povrchem

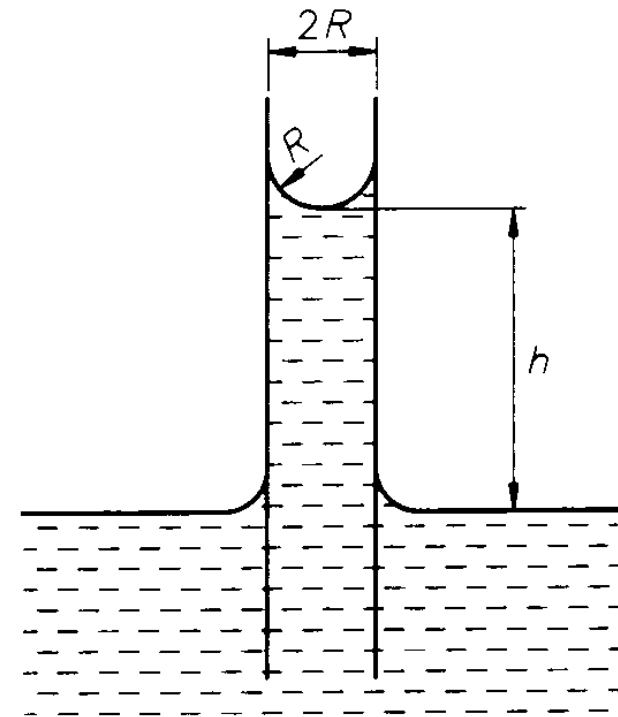
– kapalina stoupá vzhůru

↓ hydrostatický tlak kapaliny v kapiláře

obě síly v rovnováze = ustálená výška
kapaliny v kapiláře:

$$\downarrow h\rho g = \frac{2\gamma \cos\theta}{R} \uparrow$$

**vztlínání podporuje: dobrá smáčivost,
úzká kapilára**



Degradační působení

Negativní účinky prostředí na materiál/konstrukci můžeme rozdělit:

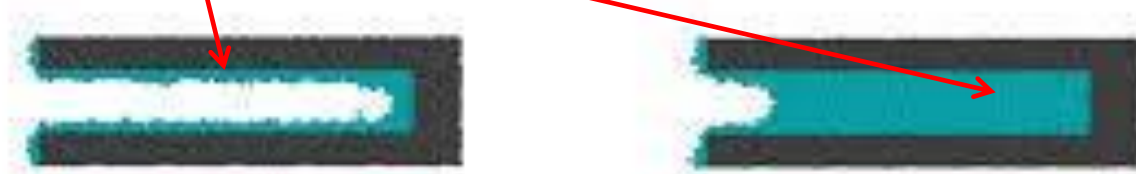
- **Fyzikální působení:** na materiál působí síly, které ho zatěžují, deformují, porušují (praskání, rozpad). Nemění se chemické složení materiálu.
- **Chemické působení:** nějaká složka okolního prostředí chemicky reaguje s materiálem – mění jeho složení, rozpouští ho (kyselina..)
- **Biologické působení:** v korozním procesu figuruje nějaký živý organismus (dřevomorka, bakterie, vyšší rostliny...)

Borovice – živý organismus (biologické působení)
Kořen borovice – roste ve skále, zvětšuje svůj
objem a trhá ji (fyzikální působení)
Kořenová čepička vylučuje kyselinu, ta leptá skálu
(chemické působení)

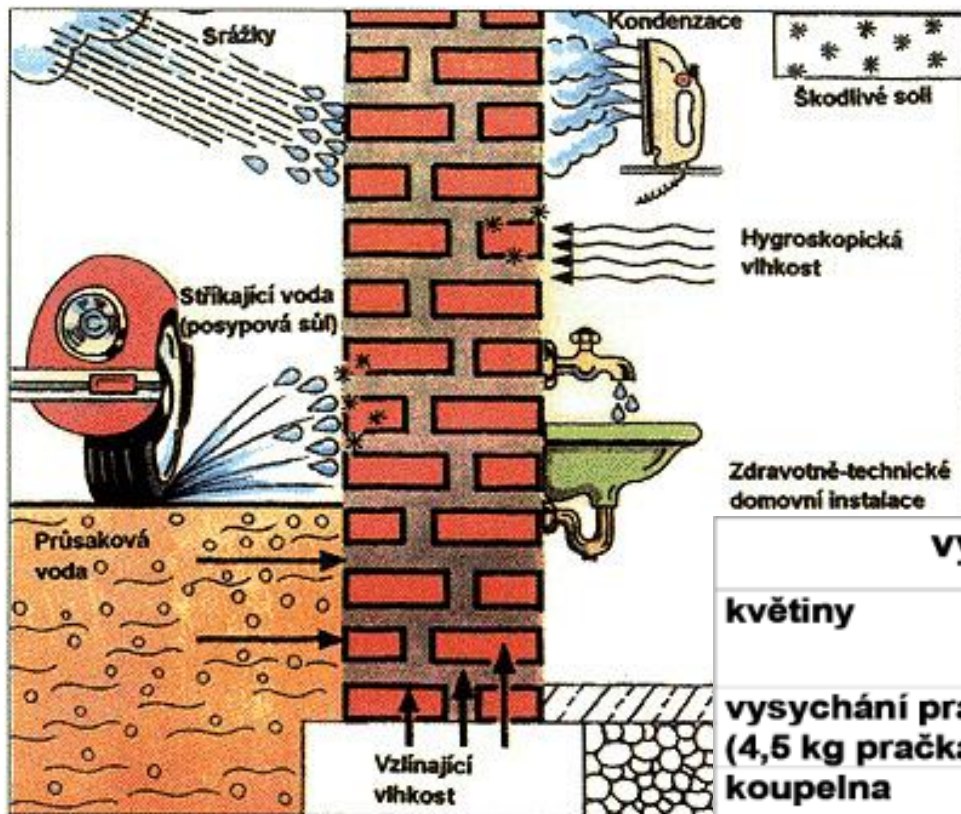


Vlhkost v materiálech a konstrukcích

- vlhkost – obsah vody **odstranitelný sušením**
- jedná se o „fyzikálně vázanou“ vodu, nikoliv tedy o molekuly vody, jež tvoří součást materiálu (těm se říká „**chemicky vázaná voda**“)
- vlhkost je v každém materiálu v konstrukci (*a nezbavíme se jí*)
- **sorbovaná (sorpční): jednotlivé molekuly** vody povrchu materiálu – při pokračující sorpci dochází ke **kondenzaci** – vzniká **volná vlhkost**
- **volná vlhkost: kapalina** vyskytující se v pórech materiálu – vzlíná, funguje jako rozpouštědlo, mrzne – tedy **škodí**



Zdroje vlhkosti v konstrukcích



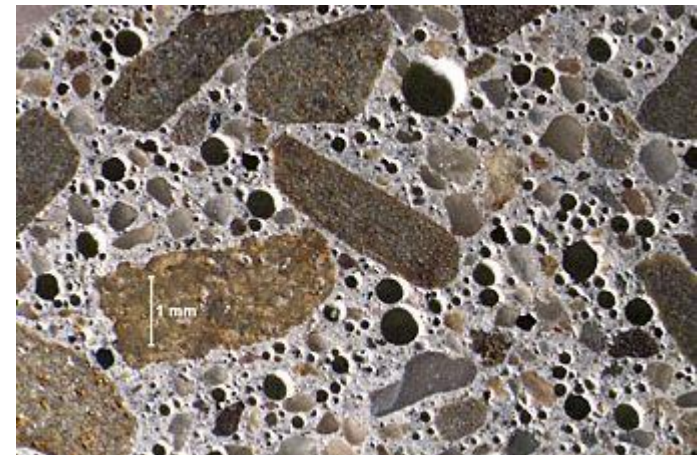
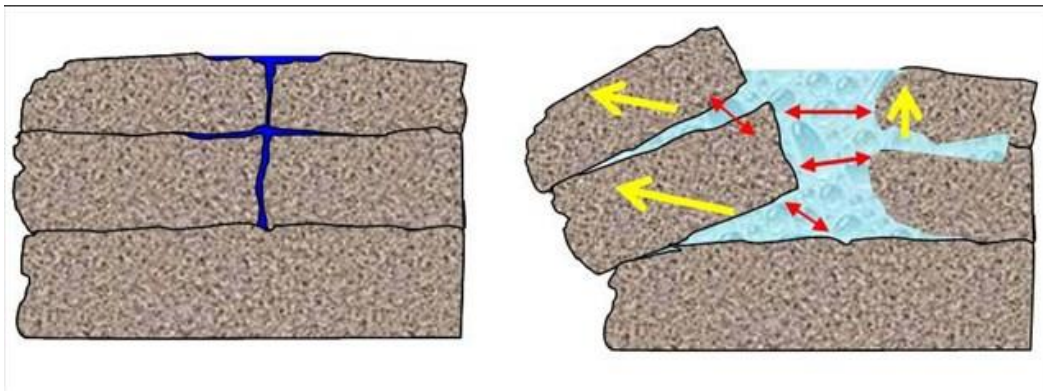
Do konstrukcí proniká jak kapalná voda, tak vodní pára, která ovšem v pórech materiálu kondenzuje a tak přechází na kapalinu.

výdej vlhkosti v obytném prostoru

květiny	břečťan	7 – 5 g/h
	fikus stř. velký	10 – 20 g/h
vysychání prádla (4,5 kg pračka)	odstředěné	50 – 200 g/h
	mokrě	100 – 500 g/hod
koupelna	vana	1100 g/hod
	sprcha	1700 g/hod
kuchyně	rychlé jídlo	400–500 g/h vaření
	dlouhé vaření	450-900 g/h vaření
	pečení	cca. 600 g/h pečení
mytí, praní	myčka nádobí	cca. 200 g/mytí
	pračka	200-350 g/praní
člověk	spaní	40-50 g/hod
	domácí práce	cca. 90 g/hod
	namáhavá fyzická práce	cca. 175 g/hod

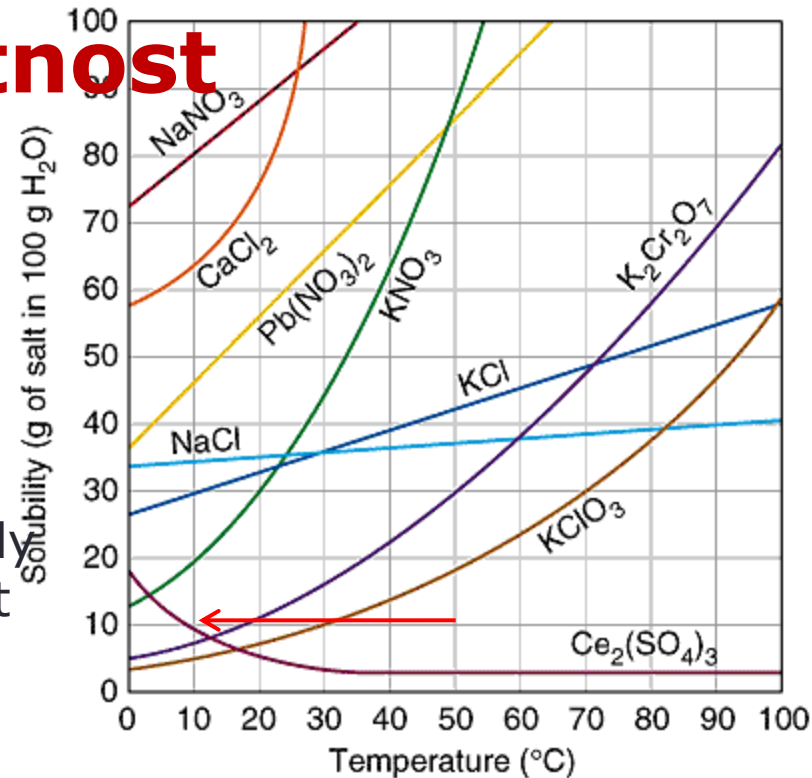
Působení kapalné vody v konstrukcích

- mrazové poškození – led má o cca 10 % větší objem, než kapalná voda
 - „funguje“ ve všech porézních materiálech
 - kapilární póry vedou vodu, která následně může mrznout – větší objem – napětí – trhliny
 - prevence: „umístění“ dutinek (100-300 μm průměr) v materiálu, které slouží jako prostor pro krystalizaci ledu – provzdušnění betonu
- voda je dobré rozpouštědlo a transportní médium pro agresivní složky prostředí
- voda je podmínkou pro život – biologická degradace
- keramika – voda rehydratuje vypálené jílové minerály – nárůst objemu – trhliny



Krok stranou: rozpustnost solí ve vodě

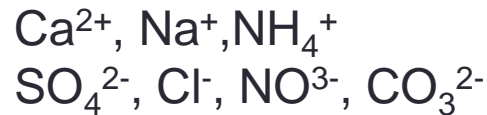
- všechny soli jsou ve vodě rozpustné
- „málo“ rozpustné soli – rozpustnost se udává pomocí součinnu rozpustnosti
- „hodně“ rozpustné soli – rozpustnost v g/l roztoku nebo g soli na 100 g vody
- závisí na teplotě – **obvykle** rozpustnost s teplotou roste



- **nasycený roztok** – maximální možná koncentrace při dané teplotě
- pokud z nasyceného roztoku odpaříme vodu, začne sůl krystalizovat
- pokud při 50 °C připravíme 10% roztok KClO₃ a ochladíme ho na 10 °C, stane se nasyceným a začnou z něj růst krystaly KClO₃

Fyzikální degradace porézních materiálů rozpustnými solemi

Nejběžnější ionty přítomné v pórovém roztoku v materiálech:



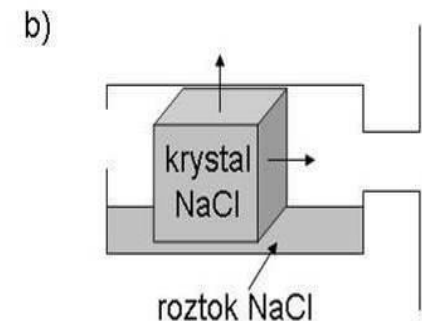
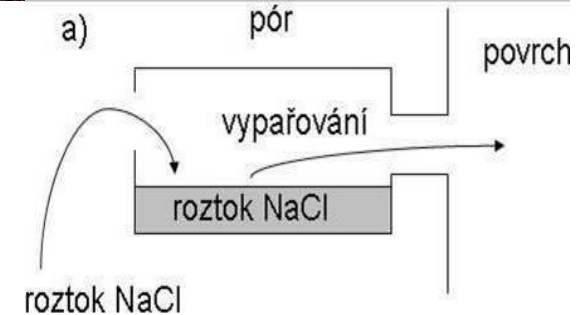
Zdroje solí ve stavebních konstrukcích:

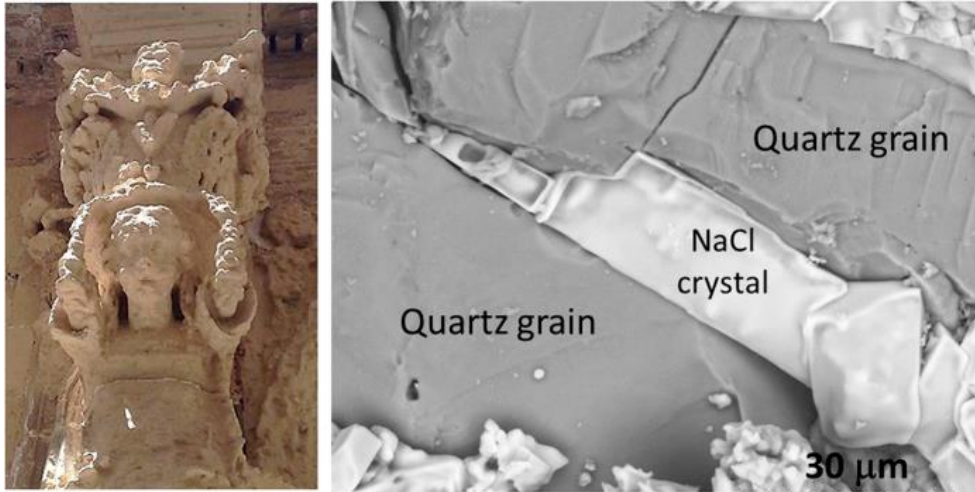
- vlastní složka materiálu ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ v sádře)
- rozpuštěné ve vodě vzlínající z podzákladí
- produkty degradace působením kyselých dešťů
- následky lidské činnosti – zimní údržba silnic solí
- **metabolické produkty mikroorganismů** i vyšších živočichů (splaškové vody, živočišná výroba)
- **sírné a nitrifikační bakterie**: získávají energii oxidací sloučenin S a N v organických hmotách (rozkládající se těla, exkrementy) – produkují tak sírany a dusičnany
 - velmi významné zdroje solí v konstrukcích



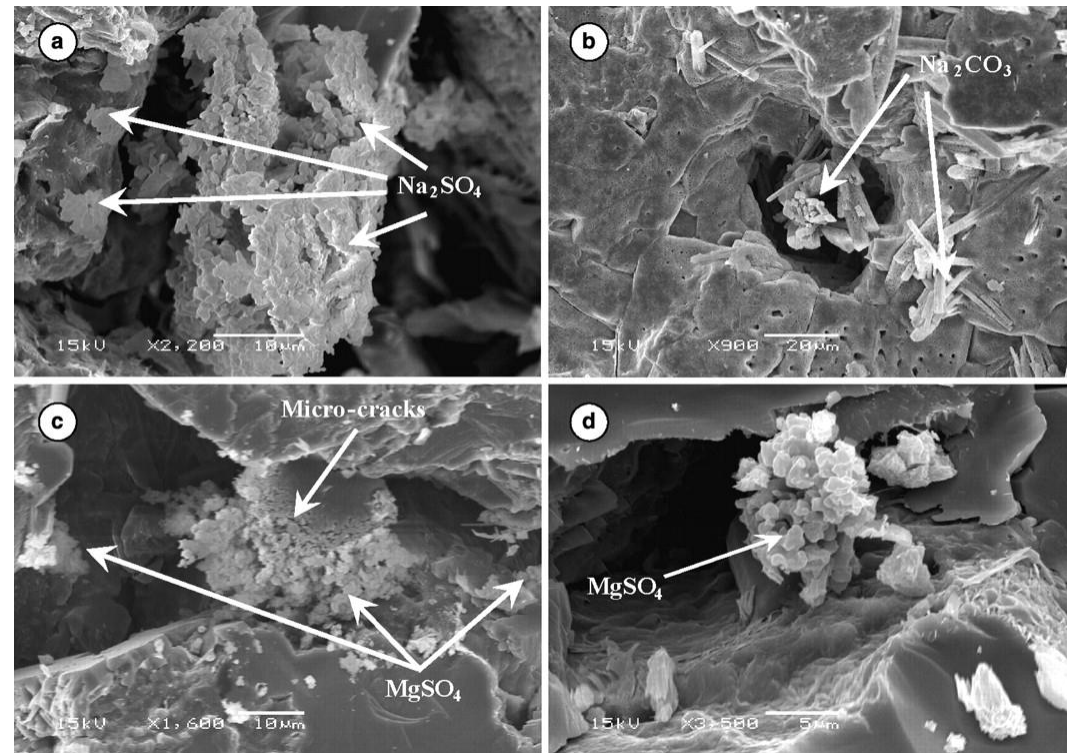
Fyzikální degradace porézních materiálů rozpustnými solemi

- soli (jako roztok) se pohybují konstrukcí společně se vztlínající vodou
- krystalizace soli na povrchu konstrukce
 - vzniká **výkvět** – „pouze“ estetický problém
- krystalizace soli v póru – rostoucí krystal působí na stěny póru **krystalizačním tlakem** který může převýšit pevnost materiálu – nastává praskání a rozpad materiálu
- prevence – stejná jako u mrazového poškození – vytvořením prostoru pro krystalizaci – dutinky o průměru 100-300 μm **sanační omítka** – porézní, aplikuje se na zasolené zdivo, dává prostor pro krystalizaci pokud není odstraněn zdroj solí, po několika letech se nasytí a začne praskat

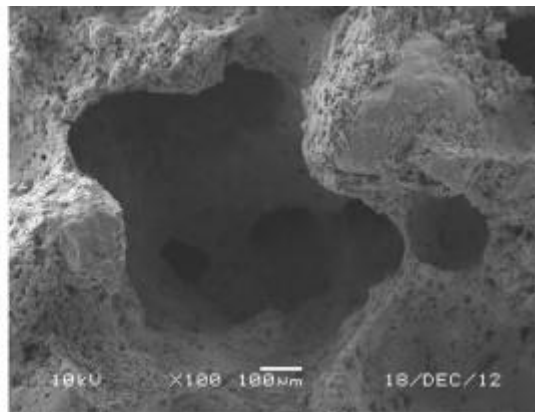
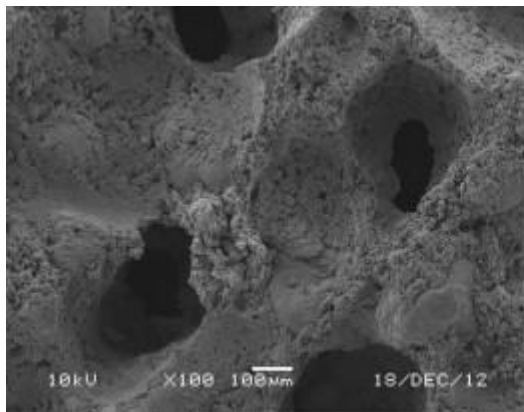




Sci Rep. 2016; 6: 30856.



různé soli v pískovci
Swe Yu and Chiaki T. Oguchi
Geological Society, London, Special
Publications, 333, 43-58



sanační omítka
Construction and Building Materials
Volume 49, 575-582



krystaly NaCl v sanační omítce
Poraver®



Höchstsp. = 20.00 kV
Arbeitsabstand = 22 mm

Detektor = SE1

26 Jan 2016

Prüflabor
Lang

DEGRADACE BETONU



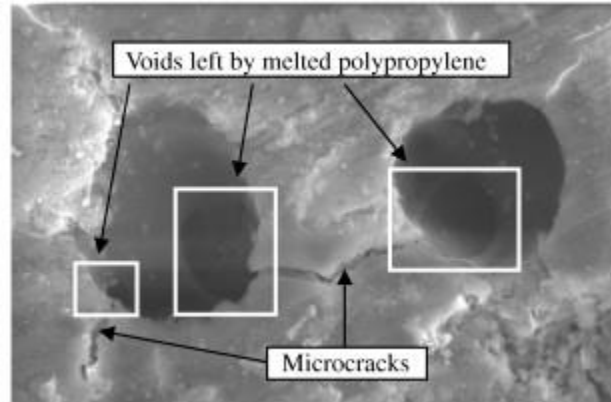
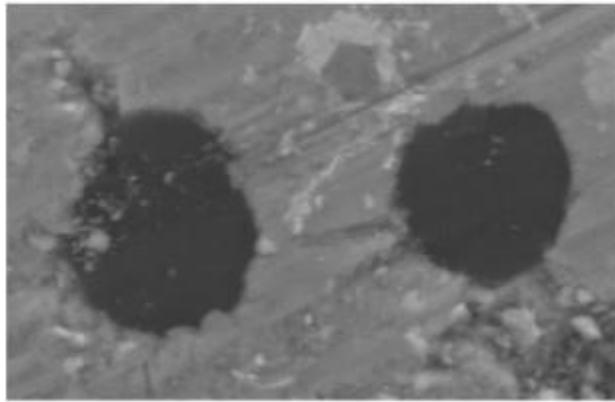
Degradace betonu působením vysokých teplot

- **teplotní roztažnost** – s rostoucí teplotou se zvětšuje objem jednotlivých částic v betonu – zejména **křemenné kamenivo** – praskliny na kontaktu kameniva s tmelem, rozpad betonu
- chemický rozklad vlivem vysoké teploty – rozkládají se CSH a CAH hydráty – ztráta soudržnosti
- **vystřelování betonu** při rozkladu hydrátů se uvolňuje voda
→ vodí pára → vyšší objem páry → vyšší tlak → vystřelování betonu

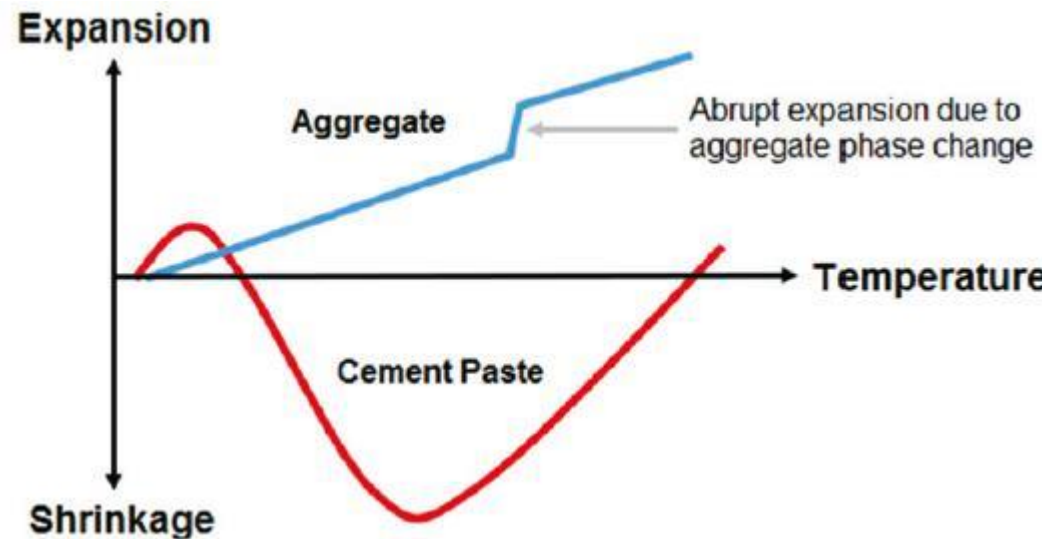
tunelové požáry



Prevence: použití polypropylenových vláken – při požáru „zmizí“, vzniklými kanálky uniká pára – neroste napětí v betonu

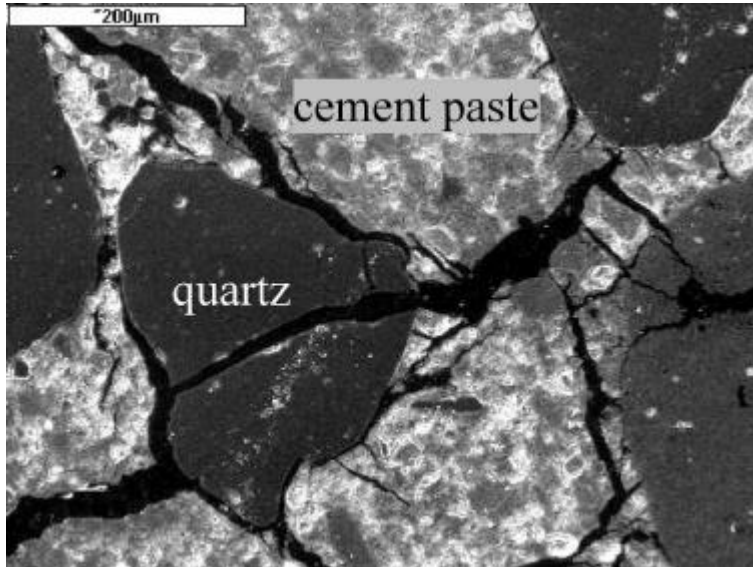


*beton s PP vlákny
200 C, 2 dny
Cement and
Concrete Research
53, 104-111*

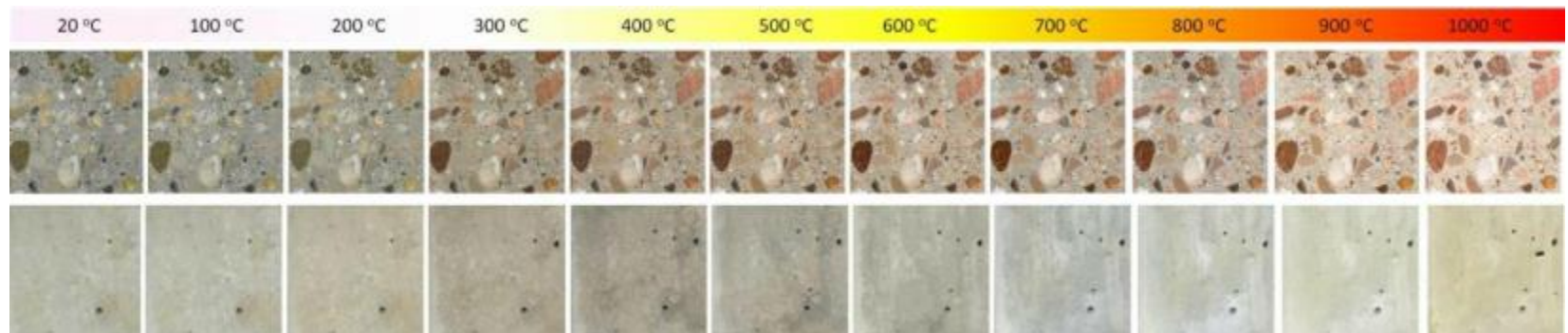


Temperature range	Changes
20–200°C	slow capillary water loss and reduction in cohesive forces as water expands; 80–150°C ettringite dehydration; C-S-H gel dehydration; 150–170°C gypsum decomposition ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); physically bound water loss;
300–400°C	approx. 350°C break up of some siliceous aggregates (flint); 374°C critical temperature of water;
400–500°C	460–540°C portlandite decomposition $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$;
500–600°C	573°C quartz phase change $\beta - \alpha$ in aggregates and sands;
600–800°C	second phase of the C-S-H decomposition, formation of $\beta\text{-C}_2\text{S}$;
800–1000°C	840°C dolomite decomposition; 930–960°C calcite decomposition $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, carbon dioxide release; ceramic binding initiation which replaces hydraulic bonds;
1000–1200°C	1050°C basalt melting;
1300°C	total decomposition of concrete, melting.

I. Hager, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences 61(1)



*praskání následkem objemových změn
barevná změna betonu
I. Hager, Bulletin of the Polish Academy of
Sciences, Technical Sciences 61(1)*



Chemická degradace betonu

1. „**první druh**“ rozpouštění a vyluhování složek tmele
2. „**druhý druh**“ chemické **reakce tmele se složkami prostředí**, které vedou na nevazebné produkty
(často provázené tvorbou **výkvětů**)
3. „**třetí druh**“ reakce s tvorbou **objemných produktů**
(rozpínání)

Všechny vedou ke **ztrátě pevnosti** a v extrémním případě k rozpadu betonu

4. **korozí ocelové výztuže**
5. **korozí kameniva**

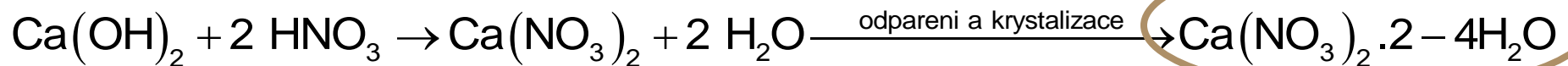
Beton: koroze 1. druhu - vyluhování

- vyluhování – rozpouštění Ca(OH)_2 a jeho vyplavování
- způsobeno měkkou (hladovou – málo minerálů) vodou protékající betonem
- **pokles koncentrace Ca(OH)_2** v betonu způsobuje **porušení rovnováhy složek tmele** → dochází k rozpadu CSH a CAH hydrátů → **pokles pevnosti**
- dále způsobuje: **pokles pH** → nebezpečné pro korozi ocelové výztuže
- na povrchu se tvoří **kalcitový výluh** (bílá mapy)



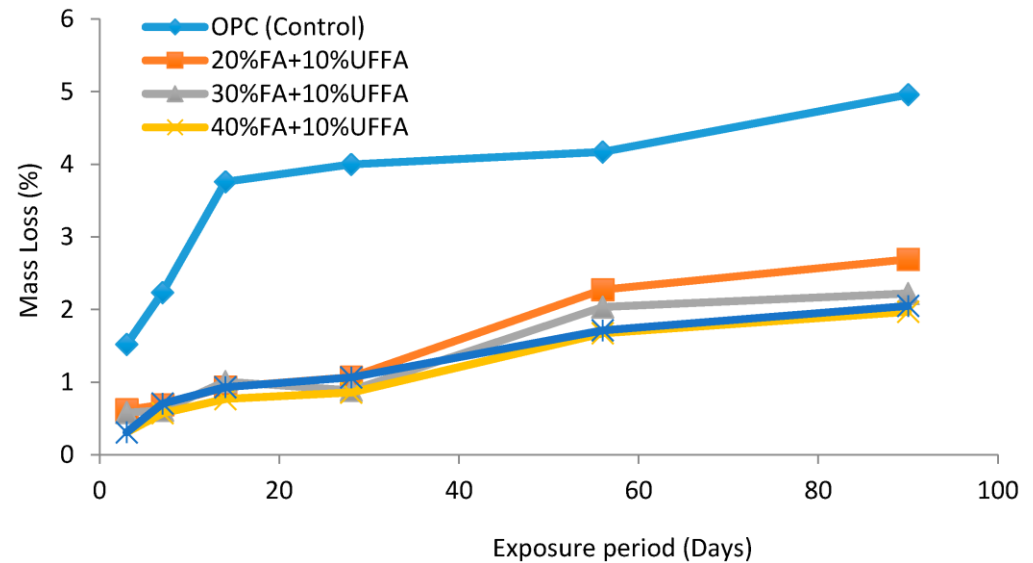
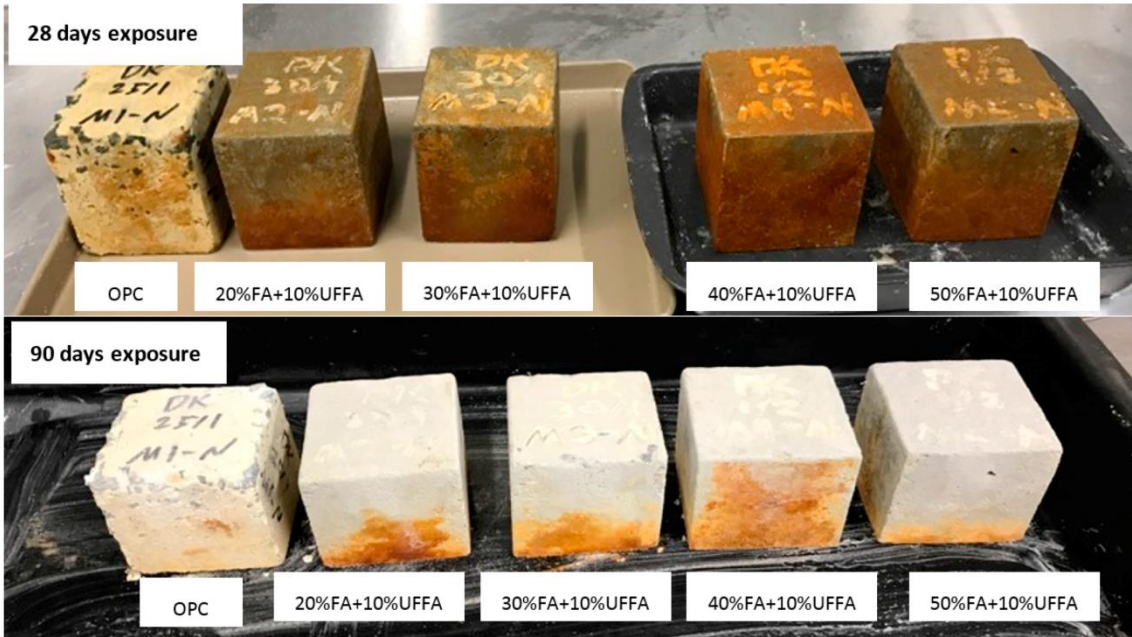
Beton: koroze 2. druhu – nevazebné produkty

- ❑ **kyselinová koroze:** reakce $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z betonu s kyselými složkami prostředí (kyseliny S a N z kyselých dešťů, organické kyseliny z biokoroze..)
 - vznikají vápenaté soli – **nemají vazebné schopnosti**
 - pokles koncentrace $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vede k porušení rovnováhy tmele a k rozpadu CSH a CAH
 - vznikající soli mohou být rozpustné → **tvorba výkvětů – zejména HNO_3**



výkvěty

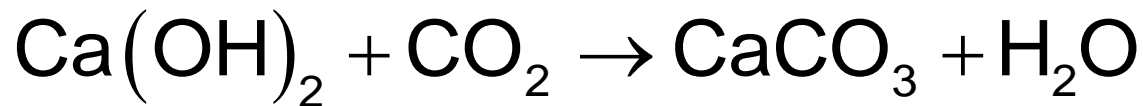
1,5% HNO₃ (Sustainability 2017, 9(9), 1556)



Beton: 2. druh – karbonatace

□ **karbonatace betonu:** reakce Ca(OH)_2 z tmelu s CO_2 ze vzduchu nebo vody (vodní stavby)

▪ vzniká uhličitan vápenatý CaCO_3



▪ pokles koncentrace Ca(OH)_2 vede k:

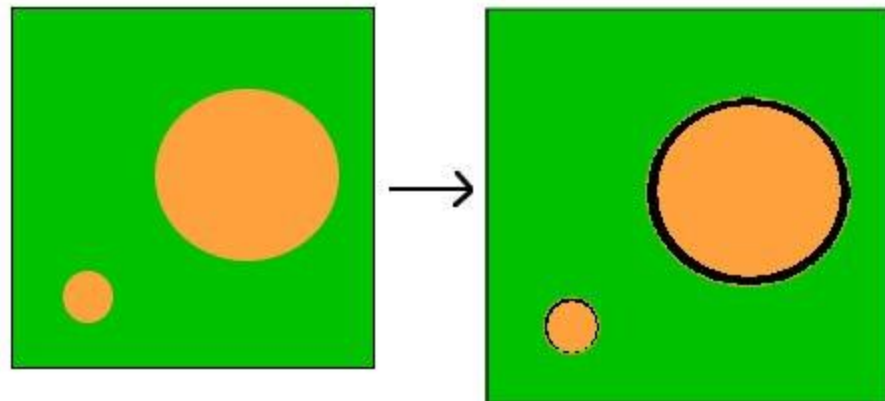
poklesu pH → **koroze výztuže (pod pH 9,5)**

porušení rovnováhy tmele a k rozpadu CSH a CAH

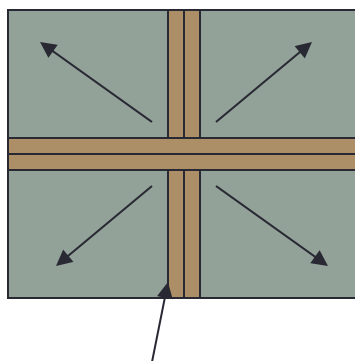
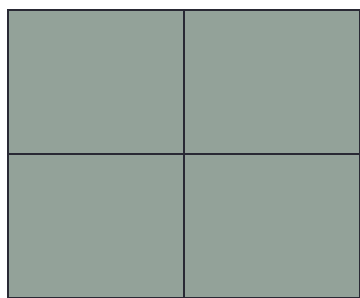
▪ v extrémních případech může probíhat karbonatace CSH a CAH za vzniku SiO_2 , Al_2O_3 a dalších oxidů → pokles pevnosti

příští přednáška...

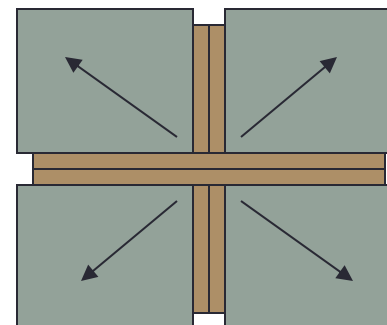
Beton: 3. druh — rozpínání



- reakce, při nichž vznikají **objemné produkty** → krystalizují v betonu a svým **krystalizačním tlakem** trhají strukturu betonu: **pokles pevnosti, vydrolování, rozpad**



*objemný produkt
na hranicích zrn*



*rozpínání zrn
tmele a kameniva*

Beton: 3. druh – rozpínání

- **síranové (sádrovcové) rozpínání**

sírany útočící na beton: spodní voda

mořská voda

splaškové vody (sírné bakterie)

chemické provozy

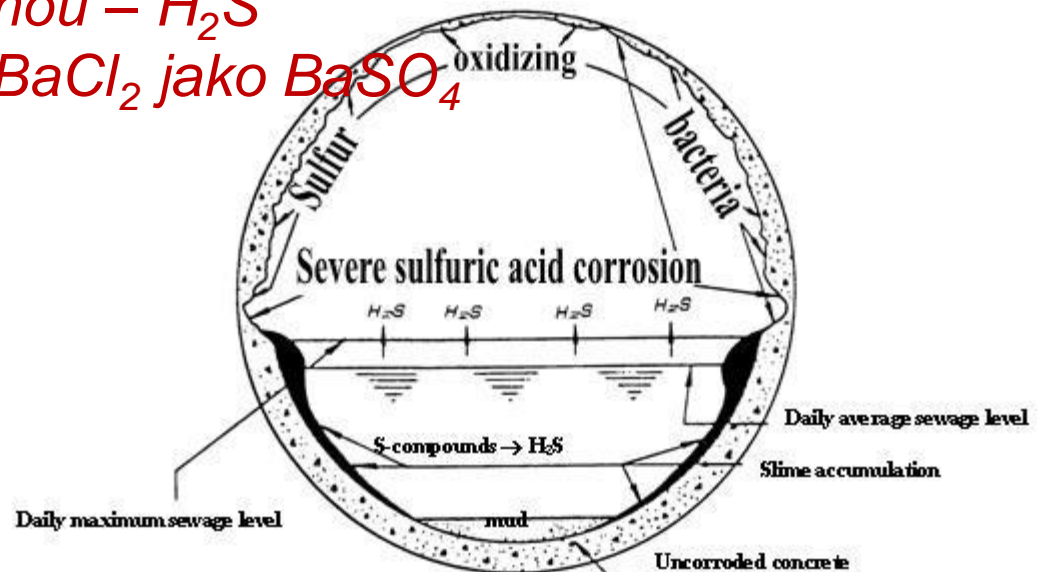
přítomné v kamenivu

sulfidy: mohou být v kamenivu, oxidují se na sírany

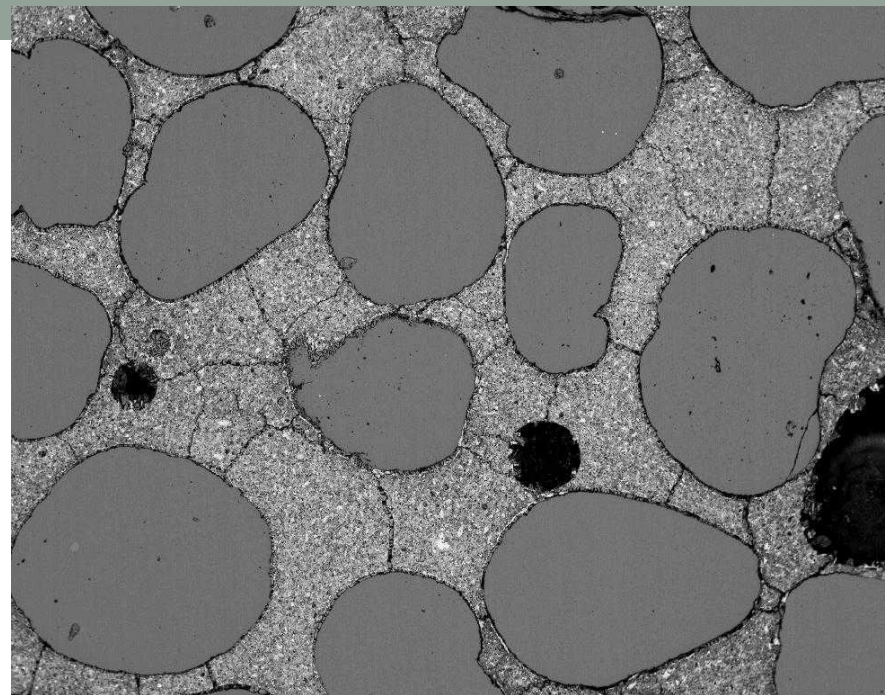
zkouška kameniva na přítomnost sulfidů a síranů!!

1. sulfidy po okyselení páchnou – H_2S

2. sírany se sráží roztokem $BaCl_2$ jako $BaSO_4$

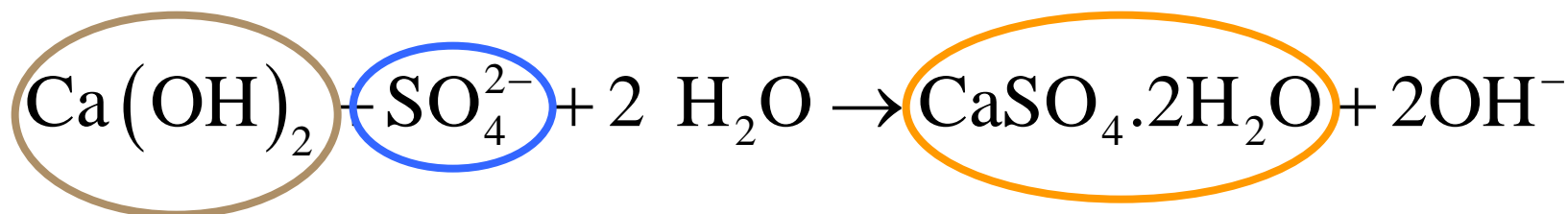


Beton: 3. druh – rozpínání



Paul Stutzman

- síranové (sádrovcové) rozpínání
 - mechanismus:
 1. vznik sádrovce



v betonu

sádrovec
objem vyšší o 17 %

Beton: 3. druh – rozpínání

□ síranové (sádrovcové) rozpínání

■ mechanismus:

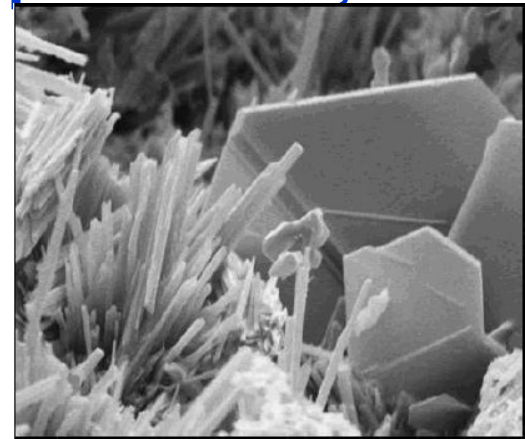
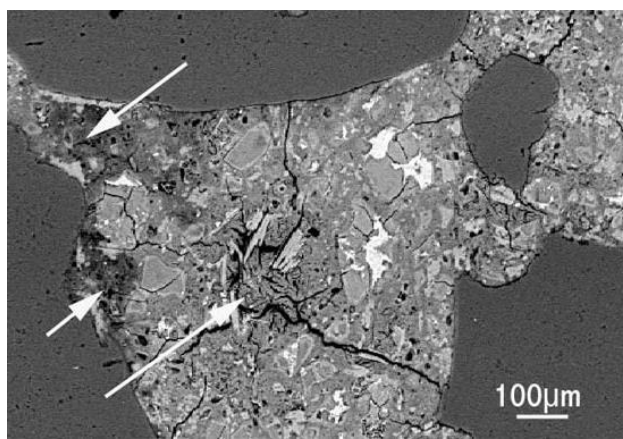
2. vznik ettringitu



hydrát C_3AH_6
z betonu

sádrovec
z 1. etapy

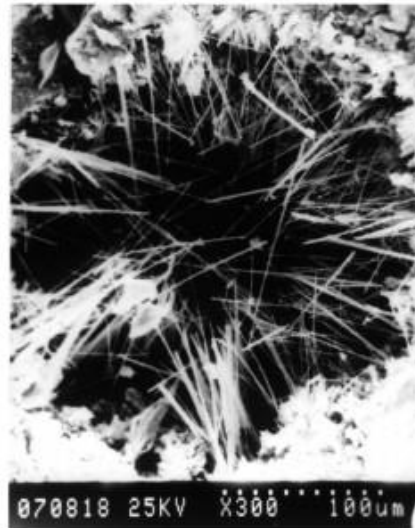
ettringit
expanze na 2,65x



(a)



(b)



(c)



*krystalizace etringittu (do 400 dnů) ve směsném
roztoku chloridů a síranů
Cement and Concrete Research 37, 2007*

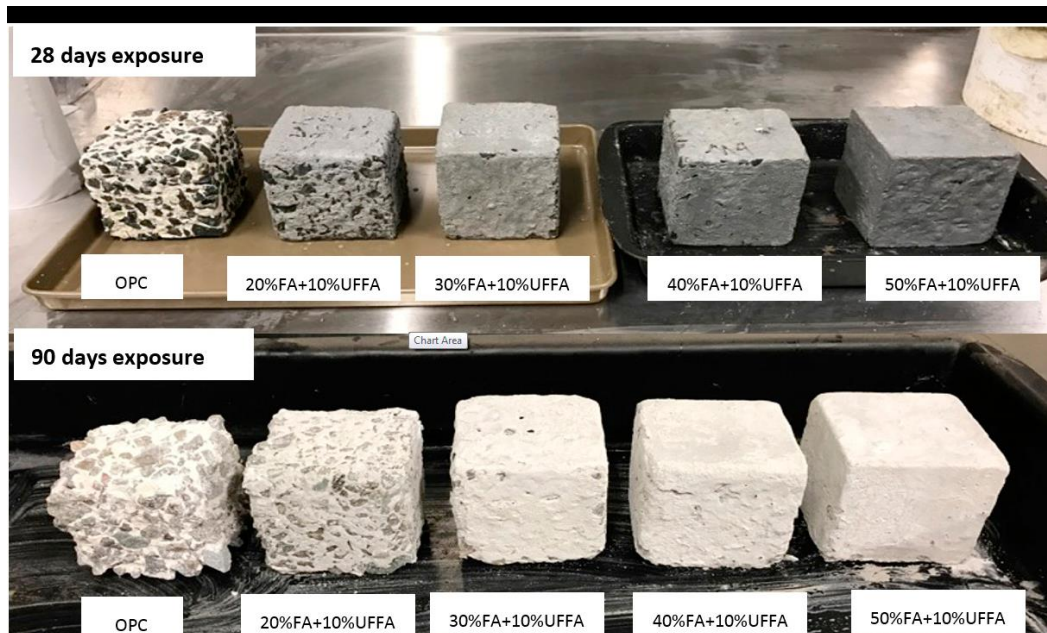
Beton: 3. druh – rozpínání



- **ochrana betonu proti síranové korozi**
 - zamezit styku betonu a vody s vysokým obsahem síranů
 - **pokud to nejde (např. mořské stavitelství):**
 - cement s nízkým obsahem C_3A (do 5 %
je to síranovzdorný cement)
 - nízká porozita betonu (nízké v/c)
 - přídavek pucolánu (struska, směsné cementy) → reaguje přednostně s $Ca(OH)_2$ a ten nemůže tvořit sádrovec a ettringit

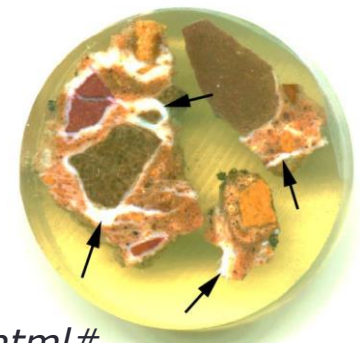
Koroze kyselinou sírovou

- kombinace kyselinové koroze (neutralizace $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a síranového rozpínání



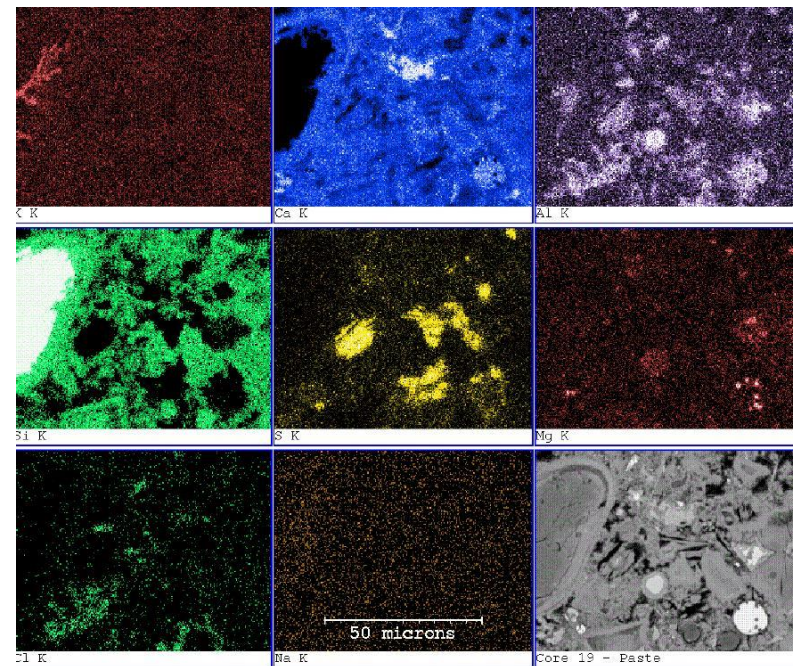
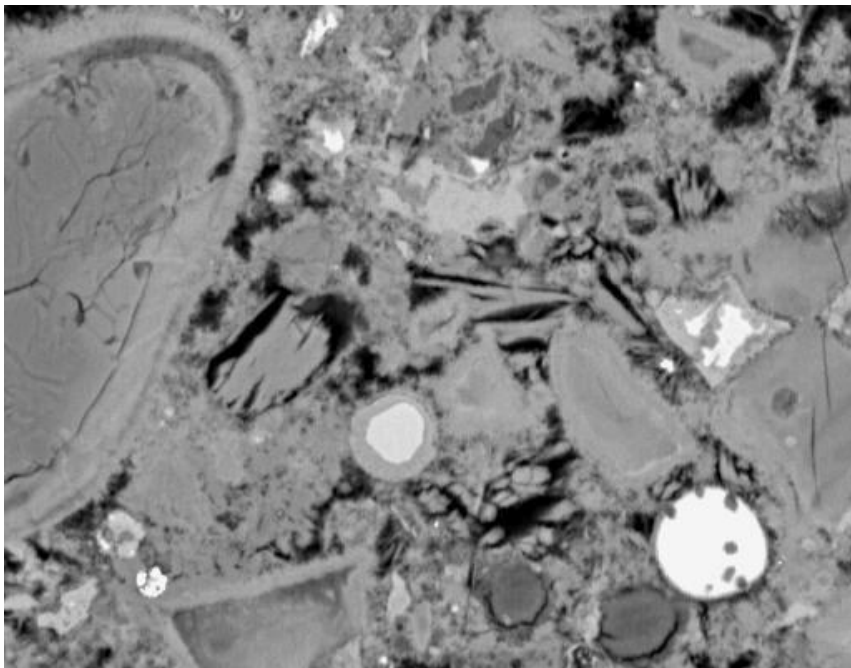
3% H_2SO_4 (*Sustainability 2017, 9(9), 1556*)

Thaumasit: $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
-ve zkarbonatovaném betonu, při nízké teplotě



Chloridová koroze

- chloridy aktivují korozi oceli
- cyklická krystalizace (sucho-vlhko)
- krystalizace Friedlovy soli $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (AFm)



Komplexní poškození silničního betonu

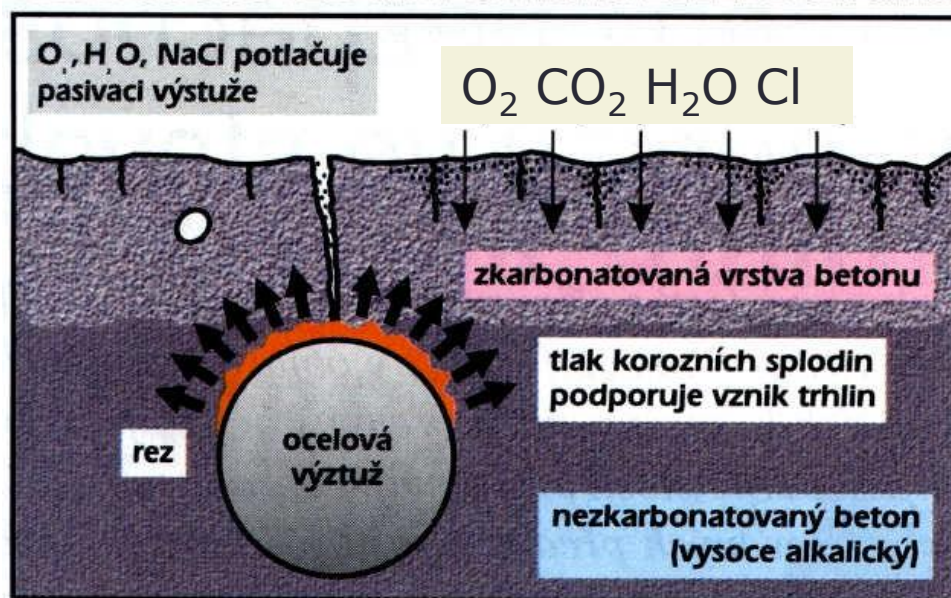
<https://ciks.cbt.nist.gov/garbocz/nistir6399/node22.htm>

Beton: koroze ocelové výztuže

- čerstvý beton: pH silně alkalické ($\approx 12,5$)
ocel se **pasivuje** – vrstva $\text{Fe}(\text{OH})_3$ chrání ocel proti korozi
- ❑ karbonatovaný beton: pH postupně klesá → při pH cca 9,5 pasivní vrstva přestává být kompaktní → probíhá intenzivní koroze výztuže
- ❑ **ztráta kontaktu betonu a výztuže – výztuž nepůsobí**

- ❑ korozi výztuže podporují
(aktivují) chloridy a sírany
- sledují se ve složkách
betonu i v okolním prostředí

KOROZNÍ PROCESY NA POVRCHU ŽELEZOBETONU



Alkáliová reakce kameniva

- horniny používané (v ČR) jako kamenivo: na bázi křemičitanů – chemicky odolné
- **těžené kamenivo s vyšším obsahem amorfního SiO_2** (opál, chalcedon) při kontaktu se cementem → alkálie v cementu (NaOH, KOH) způsobují „alkáliovou reakci kameniva“:

!Alkali-silica reaction ASR!

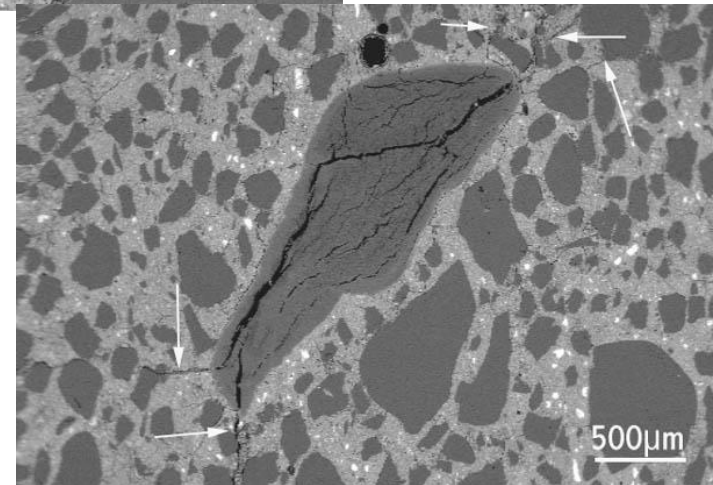
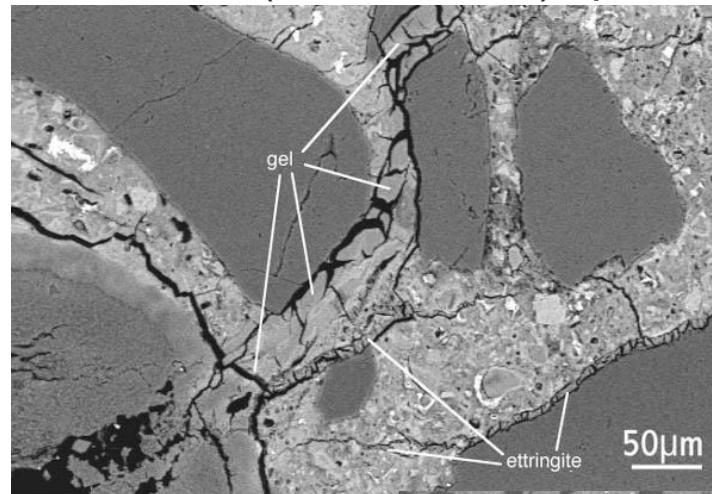
amorfní SiO_2 + NaOH (KOH)



gel křemičitanu sodného



s vodou bobtná a způsobuje rozpínání



Alkáliová reakce kameniva

- **prevence alkali-silica reaction**

- 1. vyhnout se obsahu amorfního SiO_2 v kamenivu**

riziko jsou jednotky procent

vyšší výskyt je v říčních naplaveninách

- 2. omezit obsah alkálií (Na_2O , K_2O) v používaném cementu**



Degradace keramických výrobků

- keramické výrobky: velmi odolné tepelně a chemicky – odolávají všemu kromě HF
- fyzikální koroze: slabší odolnost
působení mrazu a solí

- ❑ složení keramiky ovlivňuje odolnost (Winklerův diagram)
- ❑ výrobky z nepálené hlíny: citlivé na povodeň





Fort Jefferson, Florida