VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Degradace betonu a jak jí předcházet

Pavla Rovnaníková
Fakulta stavební VUT v Brně

Prevence havárií 2025, Brno 11. 9. 2025

Beton a železobeton

- **Pojivo** - portlandský nebo směsný cement
- **Kamenivo** - hutné
  - pórovité
  - z druhotných surovin
- **Voda** - musí vyhovovat ČSN EN 1008
- **Příměsi** - vysokopecní struska, popílek, křemičité úlety, mikromletý vápenec
- **Přísady** – plastifikující, těsnící, provzdušňující, a další
- **Vlákna** - ocelová, PP, alkalivzdorná skleněná
- **Výztužná ocel** v ŽB

- **Vlastnosti betonu**

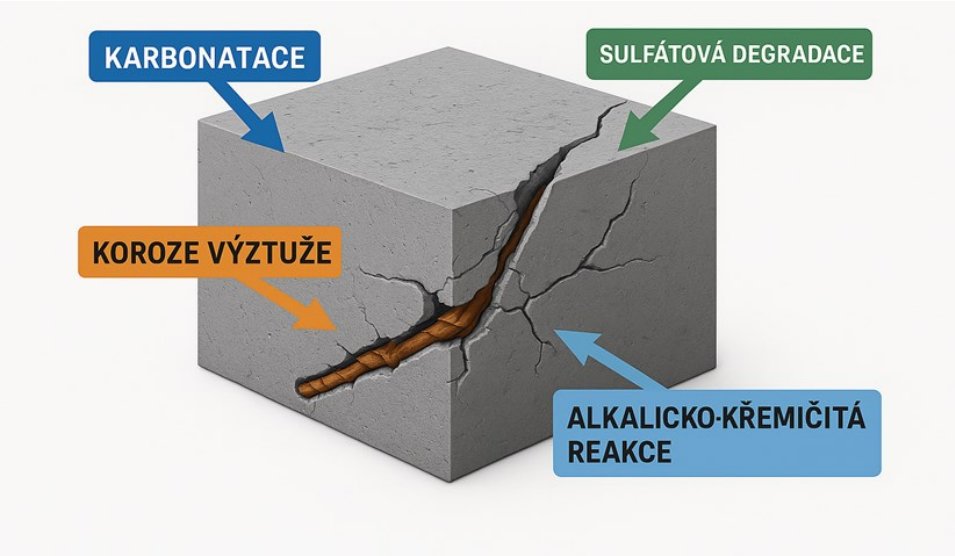
⇒ **vysoká pevnost v tlaku**

⇒ **nízká pevnost v tahu**

C16/20 – 1,9 MPa, C25/30 – 2,6 MPa, C50/60 – 4,1 MPa

Rizikové faktory degradace a destrukce betonu

- Chyby v návrhu konstrukce
- Chyby v návrhu směsi pro výrobu betonu s ohledem na vlivy prostředí
- Chyby při zpracování a ukládání betonu
- Nevhodné suroviny (kamenivo, pojivo)
- Nedostatečná údržba betonové konstrukce
- Neadekvátní mechanické namáhání betonu
  statické i dynamické, únava materiálu
- Vytvoření podmínek pro korozi ocelové výztuže

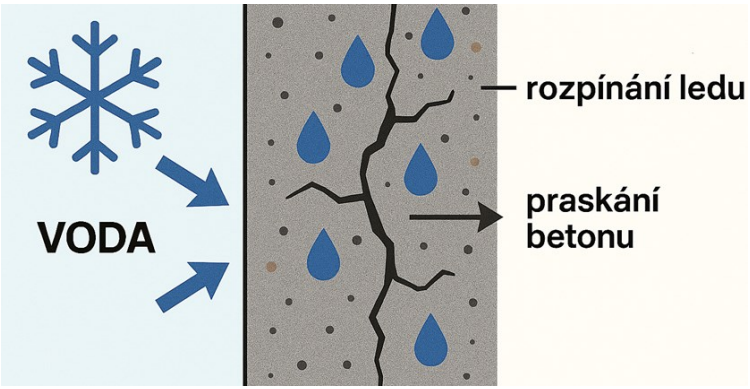


Fyzikální degradace

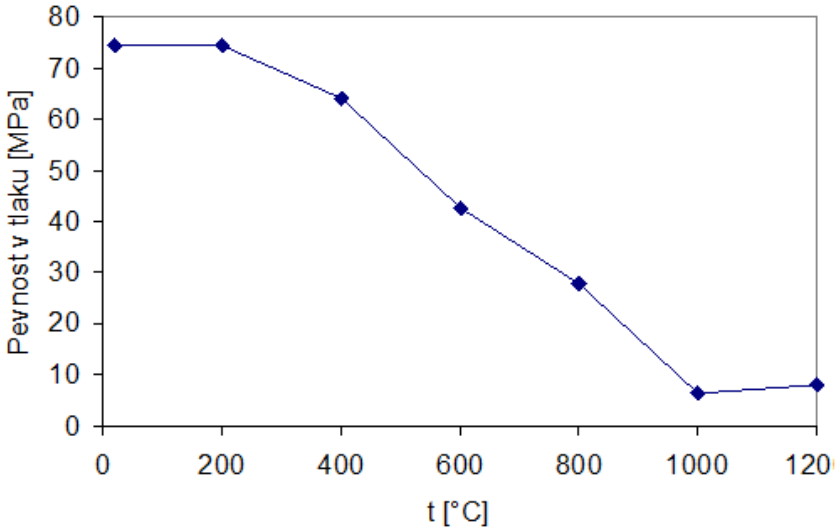
- Mrazové cykly – v pórech betonu se přemění voda na led

  ⇒ změna objemu o 9 %, krystalizační tlak 200 MPa

  ⇒ porušení až rozpad betonu



- Vysoké teploty – dehydratace a rozklad hydratačních produktů cementu, při 1000 °C klesnou původní pevnosti v tlaku na 10 %



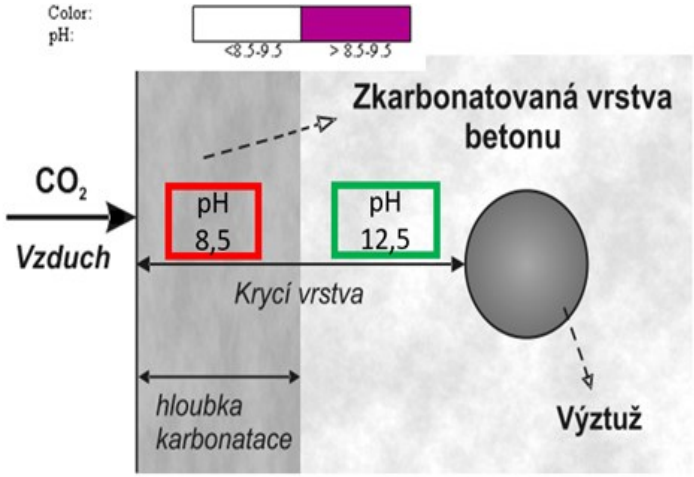
Chemická degradace

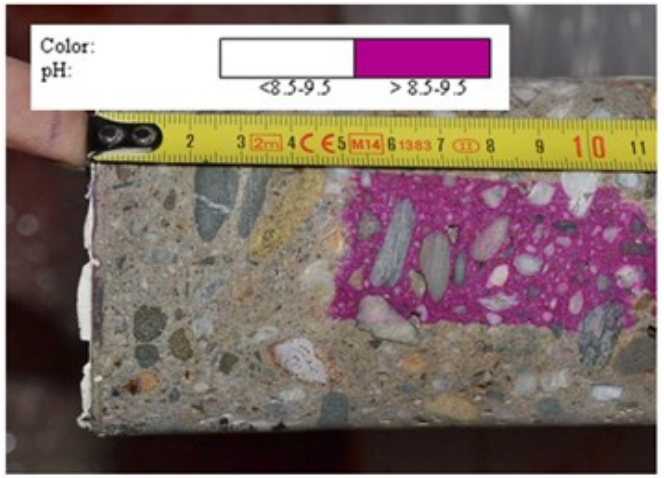
- **Atmosférická koroze**
  - kyselé plyny - **CO_2, SO_2, NO_x** s vodou $\Rightarrow$ kyseliny
  - kyseliny reagují s hydroxidem vápenatým a produkty hydratace cementu
  - důsledek – snížení hodnoty pH betonu pod 9,5 $\Rightarrow$ koroze výztuže
- **Koroze kapalným agresivním prostředím**
  - vyluhování hydroxidu vápenatého vodou $\Rightarrow$ snížení pH
  - působení kyselin a roztoků některých solí $\Rightarrow$ vznik rozpustných a nerozpustných nevazebných sloučenin
  - tvorba produktů s velkým objemem $\Rightarrow$ působení síranů

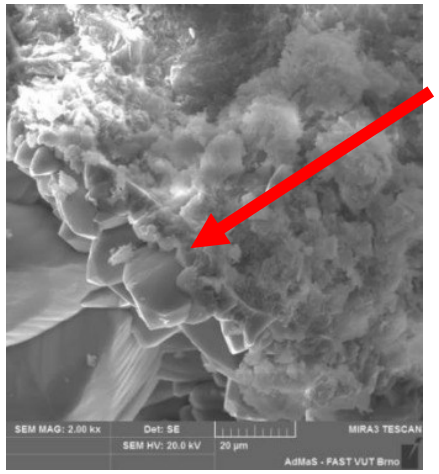
Atmosférická degradace

- Karbonatace – reakce hydratačních produktů cementu se vzdušným CO_2 (ve vzduchu 0,04 % obj.)
- Při hydrataci cementu vzniká **hydroxid vápenatý** udílející cementovému tmelu zásaditou reakci, **pH 12,5**
- **Zásadité prostředí chrání ocelovou výztuž před korozí** – ocel je v pasivním stavu
- Karbonatací vzniká **$CaCO_3$** a **pH se změní na 8,5** – depasivace výztuže
- Karbonatace se zjišťuje fenolftaleinovou zkouškou – **pH > 9,5 – fialové zbarvení**

pH < 9,5 – zbarvení bez změny







Mikrostruktura zkarbonátovaného betonu – krystaly kalcitu

Koroze kapalným agresivním prostředím

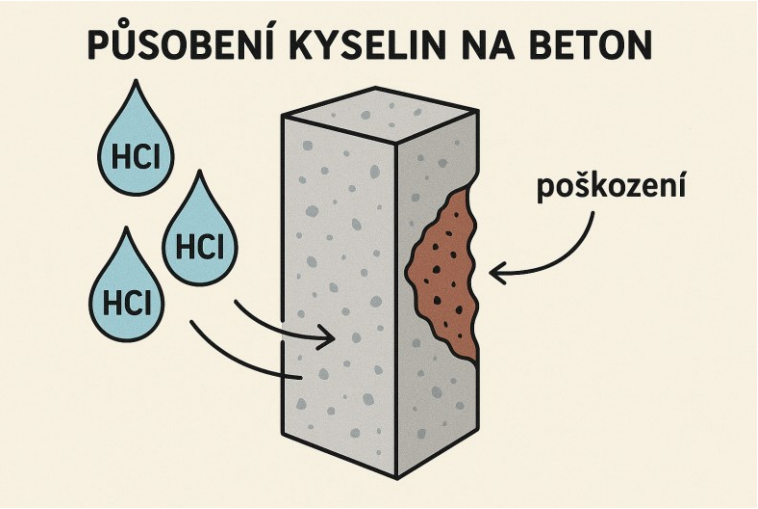
Výluhy z betonu

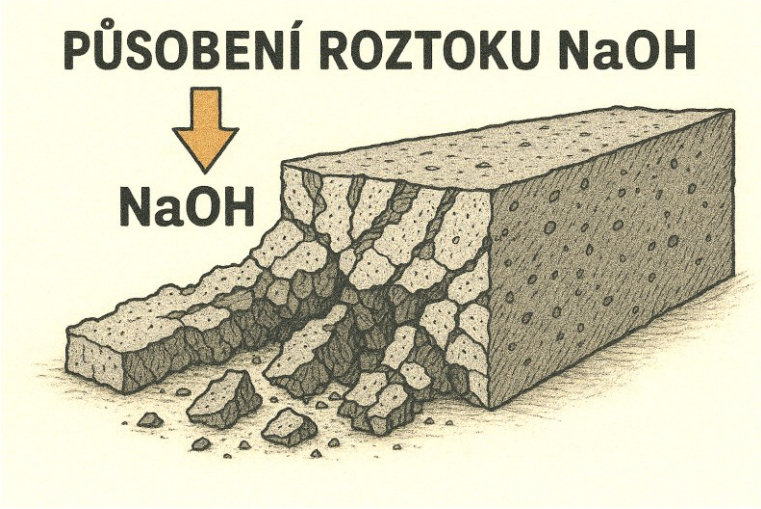
- Rychlost vyluhování závisí na propustnosti betonu pro vodu
- Vyloužený hydroxid vápenatý karbonátuje a na podhledu tvoří krápníky

Koroze kapalným agresivním prostředím

Působení látek kyselého charakteru

- Dochází k chemické reakci mezi kyselinou a hydratačními produkty cementu (zejména hydroxidem vápenatým).
- Vznikají rozpustné soli, které se z betonu mohou vyplavovat.
- Beton ztrácí pevnost, může dojít až k úplnému rozpadu betonu.
- Působení silných hydroxidů (NaOH, KOH) vede rovněž k rozpadu betonu

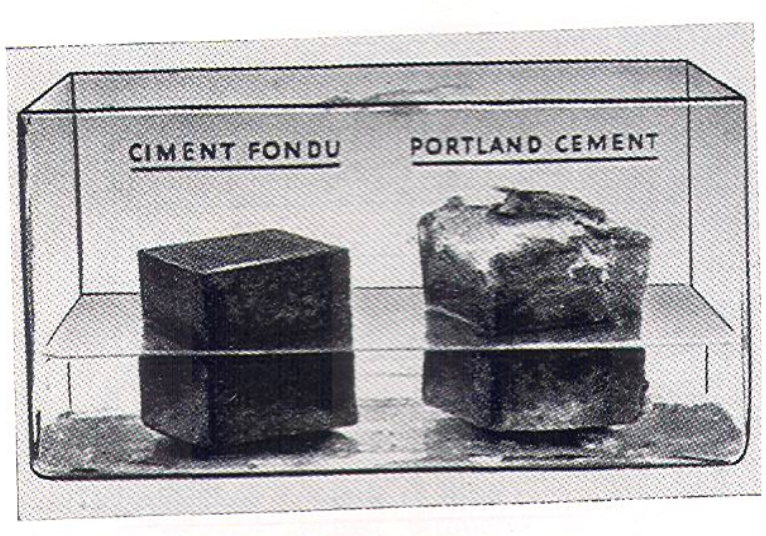


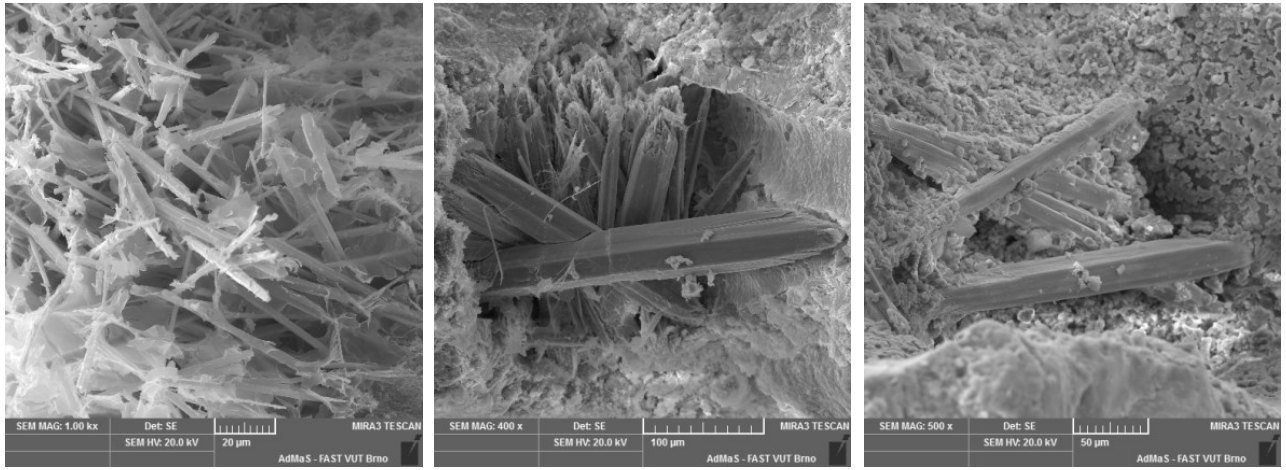


Koroze kapalným agresivním prostředím

Působení síranů

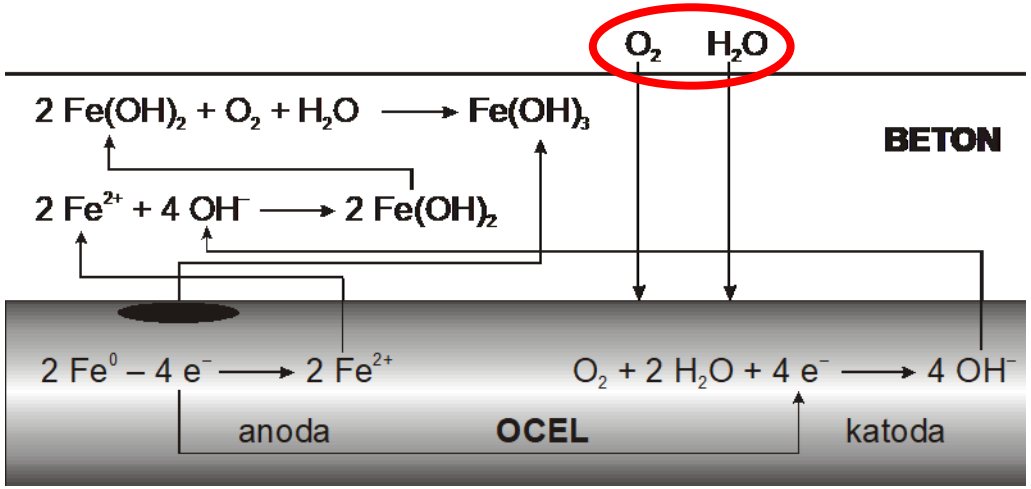
- Reakcí síranů s produkty hydratace cementu vznikají objemné produkty ⇒ destrukce betonu
- Pro konstrukce ve styku s prostředím s obsahem síranů se používá síranovzdorný cement



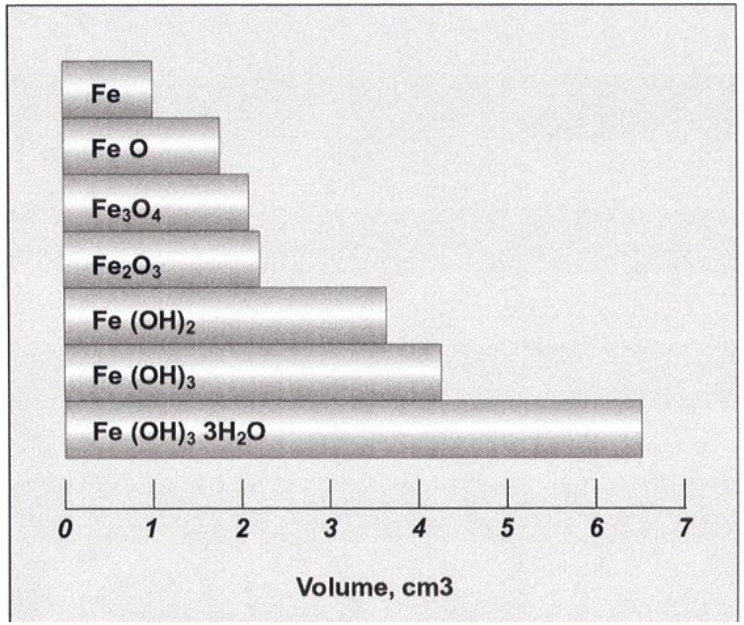


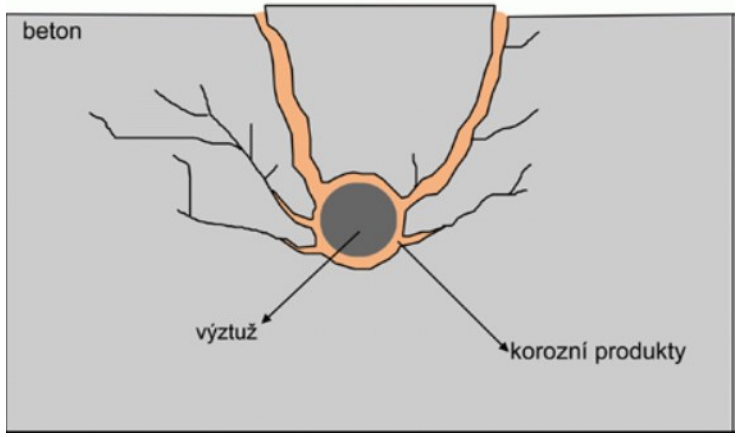
Jehlicovité krystaly ettringitu [$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$] – 2,65× větší objem v porovnání s původními sloučeninami

Koroze výztuže



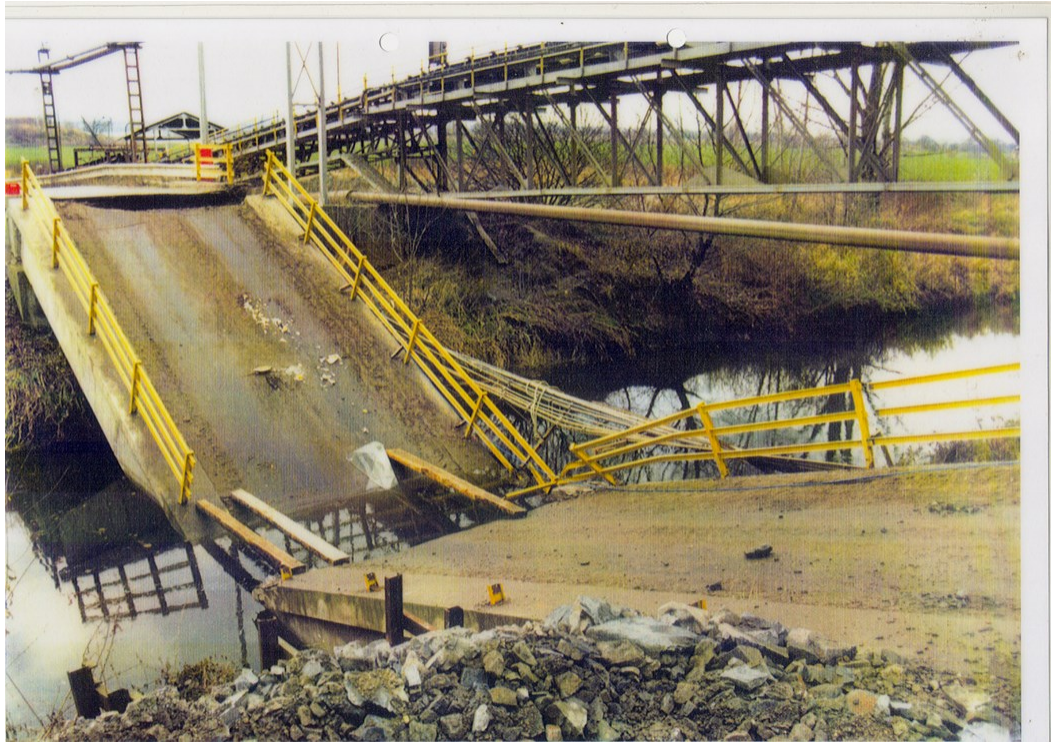
Anoda:	$2\ Fe^0 \longrightarrow 2\ Fe^{2+} + 4\ e^-$
Katoda:	$O_2 + 2\ H_2O + 4\ e^- \longrightarrow 4\ OH^-$
Sumární rovnice:	$2\ Fe^0 + O_2 + 2\ H_2O \longrightarrow 2\ Fe(OH)_2$
Následná oxidace:	$2\ Fe(OH)_2 + ½\ O_2 + H_2O \longrightarrow 2\ Fe(OH)_3$





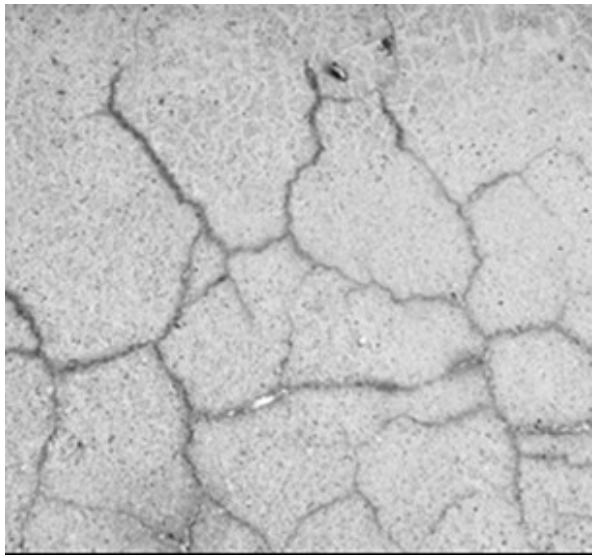
Koroze výztuže

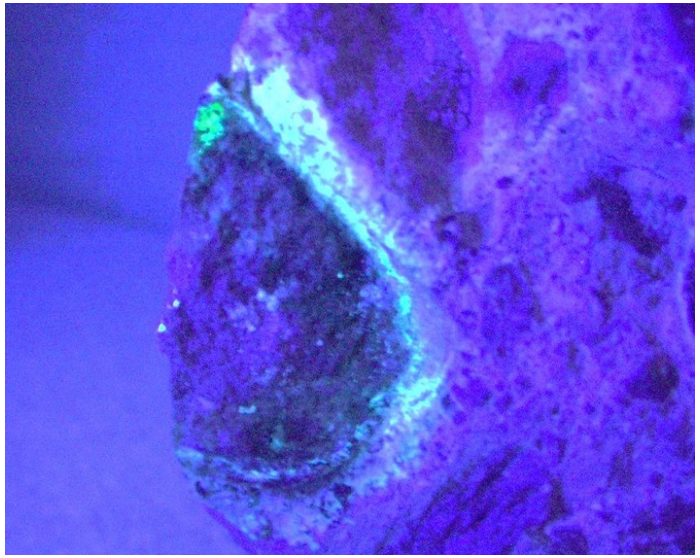
- pH > 9,5 vytváří prostředí pro pasivaci výztuže
- Chloridy funkci zásaditého prostředí výrazně snižují



Alkalicko-silikátová reakce kameniva

- Některé druhy kameniva (opál, chalcedon, silicity apod.) + alkálie a voda ⇒ alkalicko-silikátová reakce ⇒ rozpad betonu





Biologická koroze

- Fyzikální působení – vznik napětí v důsledku růstu kořenů rostlin
- Chemické působení

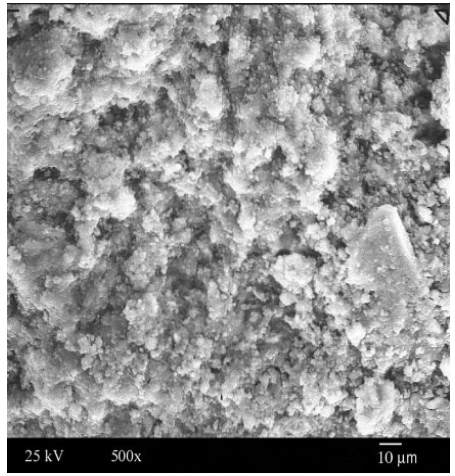
  - produkty metabolických procesů živočichů a rostlin

  - produkty působení mikroorganismů

Hlinitanový cement

- Zcela specifická kapitola betonového stavitelství
- Hlinitanový cement se vyznačuje rychlým nárůstem pevností a jejich vysokými hodnotami.
- Vzniklé hydratační produkty jsou termodynamicky nestálé, dochází ke konverzi na stabilní produkty s menším molárním objemem $\Rightarrow$ příčina kolapsů konstrukcí.
- Tyto konstrukce je nutno snést a nahradit.

Hlinitanový beton



Hutná mikrostruktura před konverzí

Porézní mikrostruktura po konverzi

MESIT Uherské Hradiště (1984)

Příklady havárií betonových konstrukcí

Návrh složení směsi pro výrobu betonu

- souladu s normou ČSN EN 206+A2 – Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- Zohlednění stupňů vlivů prostředí

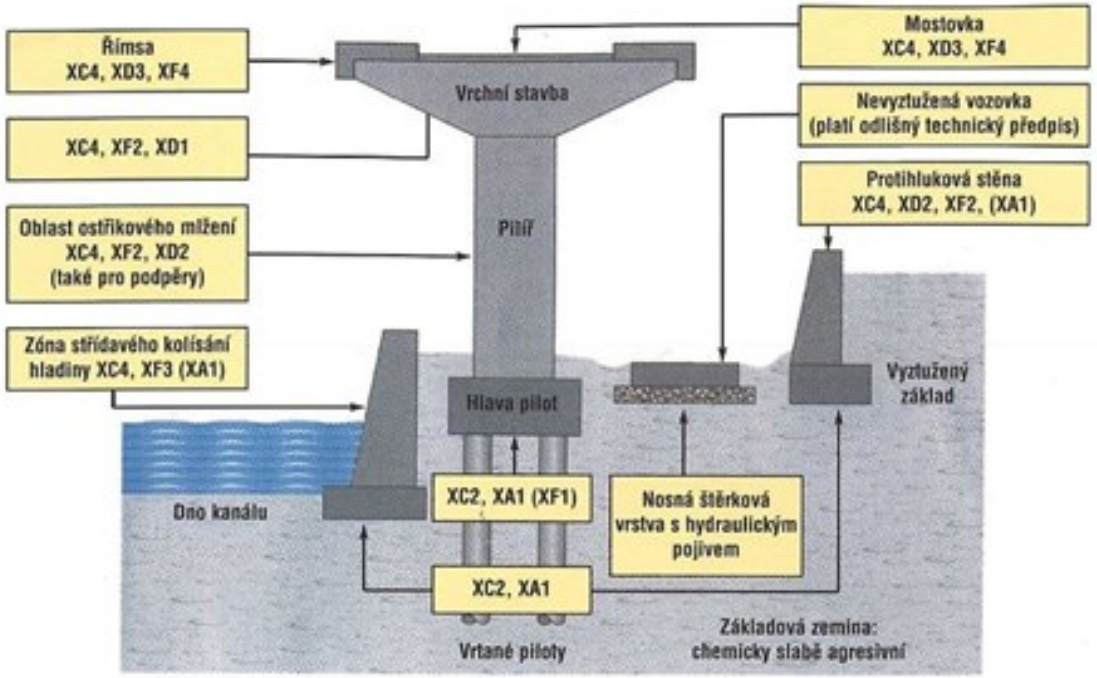
Označení stupně	Popis prostředí
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení
XC 1 až 4	Koroze vlivem karbonatace
XD 1 až 3	Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody
XS 1 až 3	Koroze vlivem chloridů z mořské vody
XF 1 až 4	Působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
XA 1 až 3	Chemické působení
XM 1 až 3	Koroze vlivem mechanického působení (obrus)

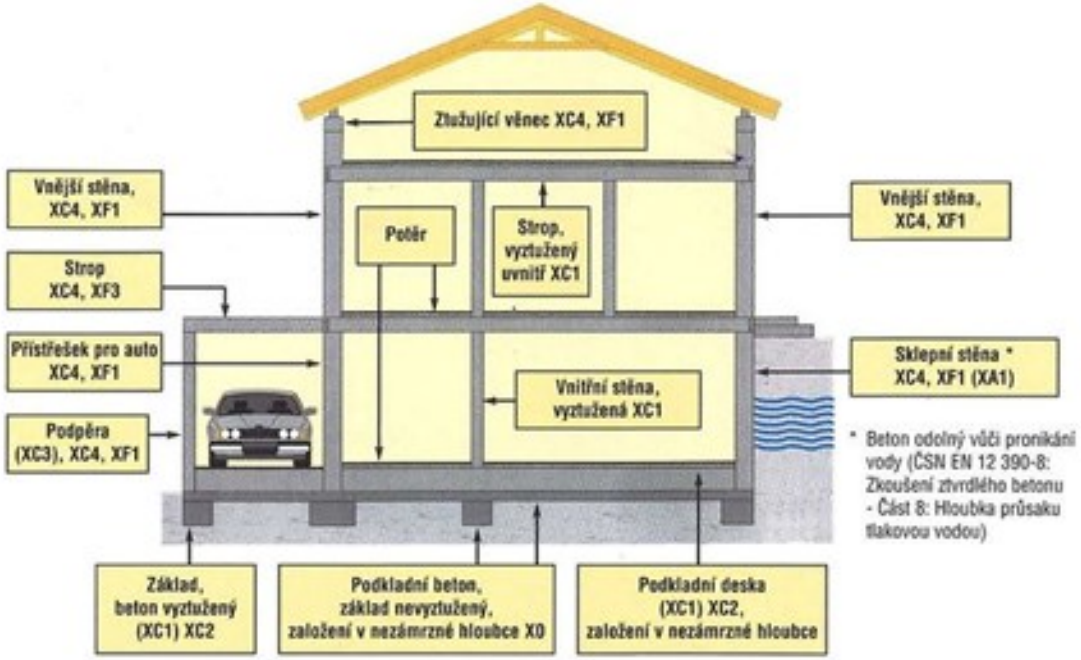
Opatření pro návrh složení betonu

Stupeň vybraných vlivů prostředí								
	Bez nebez-pečí koroze	Koroze způsobená karbonatací				Chemické agresivní prostředí		
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XA1	XA2	XA3
Max. vodní součinitel w/c		0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída (MPa)	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Min. obsah cementu (kg/m³)		260	280	280	300	300	320	360
Jiné požadavky							Síranovzdorný cement	

Vlivy prostředí na konstrukci

- Správné vyhodnocení jednotlivých vlivů



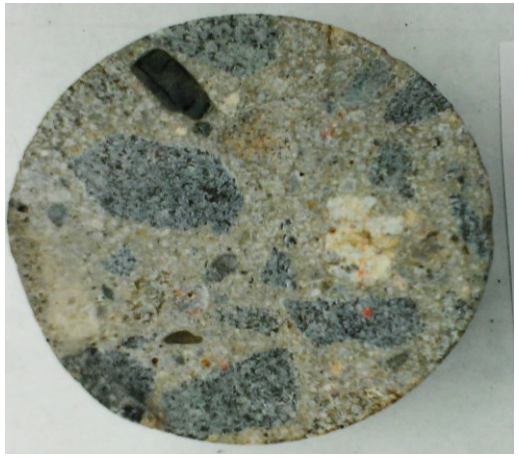


Zdroj: https://www.rebar.cz/post/stupn%C4%9B-vlivu-prost%C5%99ed%C3%AD

Závěr – Jak předcházet degradaci betonu a porušení konstrukcí

Haváriím betonových a železobetonových konstrukcí lze předejít:

- správným návrhem konstrukce
- správným návrhem složení směsi pro výrobu betonu s ohledem na vlivy prostředí v souladu s normou ČSN EN 206+A2
- správně zvolenou technologií výstavby konstrukce
- prováděním pravidelných kontrol stavu konstrukce (diagnostika a monitoring)
- prováděním periodické údržby konstrukce

Při posuzování degradace betonových konstrukcí lze s výhodou využít softwarové nástroje s pravděpodobnostním přístupem, např. FreET-D pro karbonataci, působení chloridů, korozi výztuže.

Děkuji za pozornost