

PATOLOGICKÉ ZMĚNY BETONŮ PANELOVÝCH DOMŮ SÍDLIŠTĚ BRNO-KOMÍN

Pathological changes in concrete prefabricates of block of flats in town district Komín

Martin Boháč, Miroslava Gregerová

Ústav geologických věd. PřF MU Kotlářská 2, 61137 Brno;

e-mail: 15492@mail.muni.cz, mirka@sci.muni.cz

(24-32 Brno)

Key words: *Petrology, technical petrology, degradation of concrete, carbonation.*

Abstract

The study is focused on monitoring of irreversible changes in concrete prefabricates in dependence of degradation factors in conditions of town district agglomeration.

Attention is paid to degradation level of bonding agent and stone agent. The study applies methods of polarization and electron microscopy, X-ray powder diffraction, cathode-luminous methods also chemical analysis, partial EDX analysis. There is a detailed description of bonding agent and distinguishing of carbonates by staining. There is main dependence between the concentration of acid-producing oxids and the carbonation of concrete.

The depth profiling of carbonates formed during a natural carbonation of concrete exposed to rain have been measured. Carbonation presented by micrite calcite in samples of concrete prefabricates from the surface to about 4 cm depth was detected.

Úvod

Většina panelových domů města Brna byla postavena v druhé polovině minulého století a řadí se tím do kategorie historických stavebních konstrukcí. Řada z nich je silně poškozena a měly by být rekonstruovány. Příspěvek byl orientován na posouzení nevratných změn betonových panelů s použitím metod mineralogicko-petrologického studia. Cílem je stanovení plošného a hloubkového dosahu degradačních procesů ve stavebně-historickém vývoji komínských panelových domů, které byly postaveny před zhruba 30ti lety (Boháč 2003). Zabývá se vzájemnými vztahy mezi degradačními procesy, klimatickými podmínkami, geologickým podložím, kamenivem, pískem a pojivem betonu.

Vedle základní materiálové analýzy (optické mikroskopie) využívá možností chemických (silikátových a EDX) a RTG analýz pro identifikaci primárního a sekundárního minerálního složení betonu. Interakce panelů s ovzduším a možnou souvislost degradace s dlouhodobou expozicí při zvýšených koncentracích acidotvorných oxidů (C, S a N), obsažených v atmosféře, hodnotí s využitím dat ze samoměřicí stanice ČHMÚ na ulici Kroftova a údajů o dlouhodobém měření imisních hodnot.

Metody výzkumu

Odběrem vzorků otlučením panelů, ve výšce cca 0–240 cm od podkladu, byla sestavena reprezentativní kolekce degradovaných betonů. Pro postižení do hloubkového dosahu degradace byly provedeny malopřůměrové vrty „za sucha“. Hloubkový dosah vrty byl 2–6 cm, šířka jádra 1,4 cm. U jednotlivých panelů byla pozornost zaměřena na místa jejich mechanického namáhání, bylo sledováno zda jsou prohnuté, rozpraskané, nebo zda mají olámané hrany a rohy. Studovány byly povrchové eflorescenty a podpovrchové subflorescenty, nebo spoluúčast organismů.

Při studiu minerálního složení a mikrostruktur se významně uplatnily mikroskopické analýzy výbrusů a nábrusů (*výbrusové a nábrusové preparáty byly zhotoveny v přípravně vzorků na Ústavu geologických věd, PřF, MU v Brně. Zhotovil: J. Povolný*) v procházejícím a dopadajícím polarizovaném světle. Výsledky byly dokumentovány řadou mikrofotografií z polarizačního mikroskopu s digitálním fotoaparátem Olympus C-5060.

Pro zpřesnění poznatků o novotvořených minerálních fázích bylo využito elektronové mikroskopie.

Barvení karbonátů bylo provedeno pro odlišení jednotlivých typů a generací karbonátů, podle Slobodníka (1996) jde o postupy známé poměrně dlouho. Tyto barvicí metody se v technické praxi uplatňují např. při studiu karbonatace.

Pro zjištění vztahů degradačních procesů kameniva a pojiva betonu bylo využito i katodové luminescence (*Analyzováno na Ústavu geologických věd, PřF, MU v Brně. Analyzoval: J. Leichmann*). Ze serveru ČHMÚ (www.chmi.cz) byly staženy údaje o koncentraci oxidů C, S a N v ovzduší a o teplotě a vlhkosti na sledovaném území (stanice Brno-Kroftova) za roky 2000–2003. Tyto hodnoty byly sumarizovány v grafech a srovnány s dlouhodobými trendy a imisními limity. Hodnoty vlhkosti a koncentrace jednotlivých kyselinotvorných oxidů představují výchozí data pro posouzení vztahů a identifikaci degradačních procesů soustavy materiál–ovzduší. Mikrochemické analýzy byly provedeny pomocí EDX analýz (*Elektronový mikroskop Cam Scan s připojením ED analyzátoru LINK 10 000. EDX analýzy (20 kV, 0,1 nA), pracovní vzdálenost 35 mm, fotky – elektronový mikroskop (30 kV), pracovní vzdálenost 20–24 mm. Analýzy byly stanoveny v laboratoři Ústavu geologických věd, PřF, MU v Brně. Analyzovali: R. Čopjaková, R. Škoda*). Pro kvalitativní identifikaci minerálních fází bylo použito RTG analýz (*RTG transmisní práškový*

difraktometr STOE. Analýzy byly stanoveny v laboratoři Ústavu geologických věd, PřF, MU v Brně. Analyzoval: V. Vávra) z pojiva degradovaných betonů.

Výsledky studia

Studium bylo provedeno na vzorcích panelů komínského sídliště.

Hlavním degradačním procesem probíhajícím v betonových panelech je karbonatace. Podle Matouška – Drochytky (1998) lze vysledovat 4 stádia karbonatace. Ta postupuje od povrchu panelu do jeho hloubky a ve stejném směru postupně vyznívá (obr. 1–4). Karbonatace může být doprovázena sulfatací. V souboru studovaných betonů byly sírany přítomny v jednom typu panelů. Sulfataci prezentují drobné jehličkovité až tabulkovité agregáty thaumasitu $Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12H_2O$ vyplňující póry betonu.

Tři ze studovaných 14ti vzorků byly karbonatizovány. Analyzován byl kalcit, s malými příměsemi Mg a Si. Velmi drobné krystaly kalcitu jsou rozptýleny v pojivu. Hloubkový dosah je do 4 cm. Celkové chemické analýzy vzorků neprokázaly přítomnost síranů. Pouze v jednom vzorku byl EDX analýzou potvrzen thaumasit $Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12H_2O$ a sádrovec $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Gregerová – Fojt – Vávra 2002). Porovnáme-li karbonataci a sulfataci,

pak sulfáty jsou především v pórovém systému betonů a nejsou závislé na hloubce .

EDX analýzy umožnily identifikaci slínkových minerálů, jejich hydratovaných produktů (obr. 5, tab. 1, 2, 3) a sekundárních produktů (kalcitu – tab. 4, thaumasitu - tab. 5). Ve chemickém vzorci dikalciumsilikátu není poměr $CaO:SiO_2$ roven 2:1, ale obsah CaO je obvykle nižší.

RTG analýzy potvrdily v pojivu přítomnost kalcitu a křemene (z jemné frakce), ale současně prokázaly přítomnost hydratovaných kalciumsilikátů /nekoit: $Ca_3Si_6O_{15} \cdot 7(H_2O)$, tobermorit $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)$, foshagit $Ca_4Si_3O_9(OH)_2$ a hydrátů trikalcialuminátů / $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot xH_2O$ atd./ . Spolu s nimi se v RTG záznamu objevují linie bezvodých forem kalciumsilikátů (reliktů slínkových minerálů). Identifikace a objem hydratovaných forem kalciumsilikátů odráží proces „stárnutí“ betonu. RTG analýzou byla potvrzena i přítomnost thaumasitu $Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12H_2O$ (obr.6).

Pro ověření možnosti využití změny barvy jako identifikátoru jednotlivých stádií karbonatace (Dickson in Slobodnik 1996) a na druhé straně pro ověření zda na zvolené činidlo reagují hydratované fáze slínkových minerálů byl použit roztok 0,1M HCl v ethylalkoholu s alizarinem ($C_{14}H_7NaO_7 \cdot H_2O$). Roztok působil na vzorek 5 minut.

R48							
	$C_4A_xF_y$	C_3S	C_2S	C_2S	C_2S	C_2S	C_2S
CaO	55	72	62	61	60	64	66
MgO	2	1	0	0	0	0	0
Al_2O_3	25	0	1	1	0	2	3
SiO_2	6	26	32	31	31	32	31
SO_3	0	0	0	0	0	0	0
K_2O	0	0	0	0	0	0	0
FeO	12	0	1	0	0	0	1
MnO	0	0	0	0	0	0	0
TiO_2	0	0	0	0	0	0	0
Σ	102	100	97	96	93	100	103
Přepočít na 20 O							
Ca^{2+}	9	12	10	10	10	10	10
Mg^{2+}	0	0	0	0	0	0	0
Al^{3+}	5	0	0	0	0	0	0
Si^{4+}	0	4	5	5	5	5	4
S^{6+}	0	0	0	0	0	0	0
K^+	0	0	0	0	0	0	0
Fe^{2+}	2	0	0	0	0	0	0
Mn^{2+}	0	0	0	0	0	0	0
Ti^{4+}	0	0	0	0	0	0	0
Σ	17	16	15	15	15	15	15

Tab. 1 – Mikrochemické složení reliktů portlandského slínku. Vzorek R48, ulice Řezáčova 48, severní strana objektu, výška 110 cm od podkladu.

Tab. 1 – Microchemical composition of Portland cement clinker relicts. Sample R48, 48 Řezáčova street, north side, 110 cm from foundation.

UB22							
	C_2S	C_2S	C_2S	C_2S	C_3S	$C_4A_xF_y$	$C_4A_xF_y$
CaO	65	63	62	66	73	52	54
MgO	0	0	0	0	0	2	2
Al_2O_3	7	1	2	1	2	25	20
SiO_2	27	33	32	34	25	4	12
SO_3	0	0	0	0	0	0	0
K_2O	0	0	1	0	0	0	1
FeO	0	0	1	0	0	13	11
MnO	0	0	0	0	0	0	0
TiO_2	0	0	0	0	0	0	0
Σ	100	99	99	102	101	98	101
Přepočít na 20 O							
Ca^{2+}	10	10	9	10	10	9	12
Mg^{2+}	0	0	0	0	0	0	0
Al^{3+}	1	0	5	0	0	4	0
Si^{4+}	4	5	0	5	5	2	4
S^{6+}	0	0	0	0	0	0	0
K^+	0	0	0	0	0	0	0
Fe^{2+}	0	0	2	0	0	1	0
Mn^{2+}	0	0	0	0	0	0	0
Ti^{4+}	0	0	0	0	0	0	0
Σ	15	15	17	15	15	16	16

Tab. 2 – Mikrochemické složení reliktů portlandského slínku. Vzorek UB22, ulice Urbánkova 22, severní strana objektu, výška 5 cm od podkladu.

Tab. 2 – Microchemical composition of Portland cement clinker relicts. Sample UB22, 22 Urbánkova street, north side, 5 cm from foundation.

portlandit	přepočít na 1 O		
CaO	71	Ca ²⁺	1
FeO	0	Fe ²⁺	0
MgO	0	Mg ²⁺	0
MnO	0	Mn ²⁺	0
Al ₂ O ₃	0	Al ³⁺	0
SiO ₂	0	Si ⁴⁺	0
Σ	72		1

Tab. 3 – Mikrochemické složení portlanditu ve vzorku UB22, ulice Urbánkova 22, severní strana objektu, výška 5 cm od podkladu.

Tab. 3 – Microchemical composition of portlandite in sample UB22, 22 Urbánkova street, north side, 5 cm from foundation.

UX14	C16a				
	kalcit	kalcit	kalcit	kalcit	kalcit
CaO	55	54	51	52	49
SiO ₂	0	0	2	4	6
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	1
MgO	0	0	0	0	0
FeO	0	0	0	0	0
MnO	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0
SO ₃	0	0	2	1	2
	56	55	54	57	57
přepočít na 1 O					
Ca ²⁺	1	1	0	0	0
Si ⁴⁺	0	0	0	0	0
Al ³⁺	0	0	0	0	0
Mg ²⁺	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	0	0	0	0	0
Mn ²⁺	0	0	0	0	0
P ⁵⁺	0	0	0	0	0
S ⁶⁺	0	0	0	0	0
Σ	1	1	0	0	0

Tab. 4 – Mikrochemické složení kalcitu, vzorek UX1, ulice Urxova 14, severní str. objektu. C16a, vzorek odebraný suchým vrtáním, ulice Čoupkových 16, severní str. objektu.

Tab. 4 – Microchemical composition of calcite in sample UX1, 14 Urxova street, north side. C16a, dry drilling sample, 16 Čoupkových street, north side.

UB22	thauomasit	thauomasit	thauomasit	thauomasit	thauomasit	thauomasit
CaO	36	36	30	33	30	36
SiO ₂	9	13	8	11	9	11
Al ₂ O ₃	3	0	0	0	0	1
SO ₃	17	14	12	15	14	14
Cl ⁻	0	0	0	0	0	1
	65	63	51	61	52	63
Přepočít na 16 O						
Ca ²⁺	6	6	7	6	6	7
Si ⁴⁺	2	2	2	2	2	2
Al ³⁺	0	0	0	0	0	0
S ⁶⁺	2	2	2	2	2	2
Cl ⁻	0	0	0	0	0	0
	10	10	10	10	10	11

Tab. 5 – Mikrochemické složení síranů ve vzorku UB22, ulice Urbánkova 22, severní strana objektu, výška 5 cm od podkladu.

Tab. 5 – Microchemical composition of sulphates in sample UB22, 22 Urbánkova street, north side, 5 cm from foundation.

Výsledkem barvení bylo barevné odlišení karbonatizovaného pojiva od zbývajících složek betonu (kamenivo, písčité frakce). Prokazatelná je pouze barevná změna karbonatizovaného pojiva, které se zabarvilo intenzivně do fialova. Zbývající složky zůstaly beze změny.

Z dostupných záznamů o emisích kyselinotvorných oxidů C, N a S (CO, NO, NO₂, NO_x a SO₂), o teplotě a relativní vlhkosti byly vybrány ty, které se vztahují k území sídliště Brno-Komín, a to s použitím údajů ze stanice ČHMÚ na ulici Kroftova. Tyto údaje byly srovnány s imisními limity. Bylo zjištěno, že roční hodnoty kyselinotvorných oxidů byly v Brně-Komíně v posledních několika letech překračovaly limit stanovený pro SO₂. Zhodnocení dlouhodobých trendů dokládá, že od konce 80. let minulého století dochází, zvláště u oxidu siřičitého, k poklesu. Koncentrace CO₂ se neměří jako polutant, ale jeho koncentrace se vypočítává z celkového obsahu oxidů.

Z provedených analýz studovaných stavebních prvků je zřejmé, že oxid uhličitý se významněji uplatňuje při degradaci betonu pouze v těch částech, kde může docházet k interakcím mezi slabou kyselinou uhličitou (atmosférický CO₂ + vzdušná vlhkost) a pojivovou složkou betonu.

Souhrn a diskuse výsledků

Výsledky studia stavebních panelů komínského sídliště lze shrnout do následujících bodů:

Panely byly zhotoveny z portlandského cementu. Přítomnost volného vápna (CaO) či periklasu (MgO) nebyla prokázána.

Ve všech studovaných objektech lze identifikovat částice slínku portlandského cementu s relikty primárních kalciumsilikátů a tetrakalciumaluminátferitu. Trikciumsilikát je velmi vzácný.

Karbonatace studovaných stavebních dílců je dle Matouška – Drochytky (1998) středně pokročilá. Jde o stádium charakteristické vznikem jemnozrných krystalů CaCO₃. Spolu s nimi se objevují i větší klenče kalcitu. Podle Emmonse (1999) je karbonatace betonu proces průběžný.

Velikost a kvantitativní zastoupení kalcitu směrem do hloubky dílců klesá, karbonatace je sledovatelná cca do hloubky 4 centimetrů. Kalcit vzniká nejprve v intergranulárních a pórech a od nich postupně prostupuje do pojiva složeného z různě hydratovaných fází kalciumsilikátů a portlanditu. Problém nastává, když se karbonatace dostává až k výztuži. Karbonatace úzce souvisí s korozi výztuže. Hloubka výztuže se pohybuje od 3 do 10 cm. Problematiku studoval např. Steffens (2002). Novotvořené minerály Fe (Iepidokrokít, goethit) vznikající v důsledku koroze ocelové výztuže panelů vyvolávají objemové změny. Zvětšující se objem se projevuje jako mechanické namáhání panelu. Objevují se jemné, postupem času otevřené a rozevírající se systémy prasklin. Růstový tlak

krystalů narušuje povrchovou vrstvu betonu. Povrchová vrstva se odlupuje, vlivem větru a gravitace se vydrolují klasty kameniva a písku. Zvětšuje se „plocha“ pro další rekrystalizaci kalcitu a proces postupuje čím dál tím více do nitra panelu. Odlupování betonu od výztuže je patrné na tenkých panelech. U obvodových panelů (exponovaných po dobu více než 30ti let) karbonatace dosahuje hloubky cca 4cm. Pokud se nezamezí přístupu vlhkosti do betonové konstrukce mohla by karbonatace dostoupit až k ocelové výztuži betonu. Životnost panelů se tak výrazně snižuje na maximum 40–60 let.

Poděkování

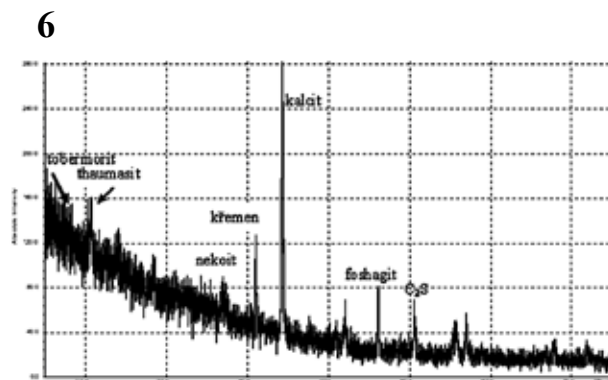
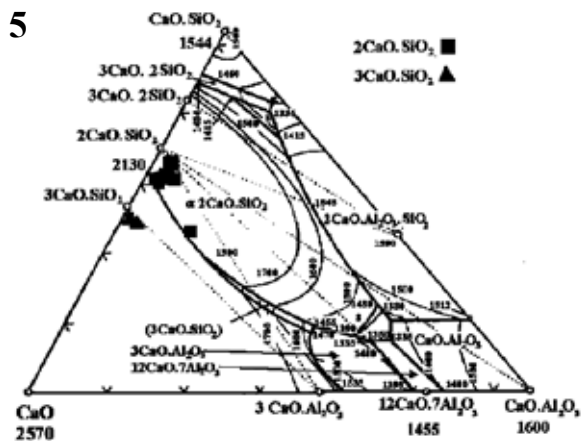
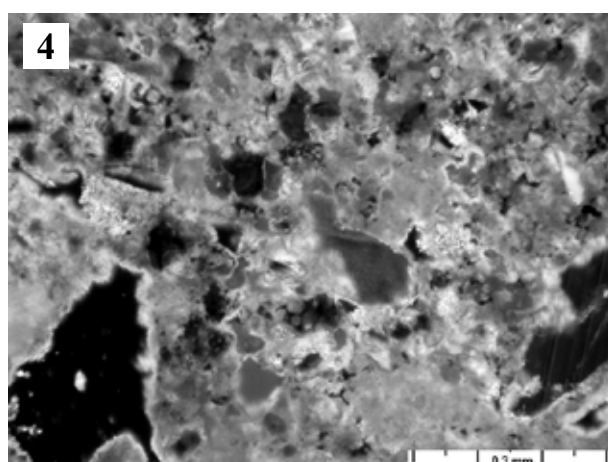
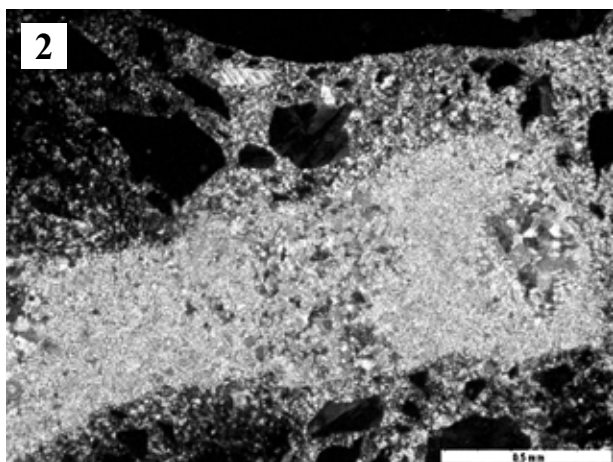
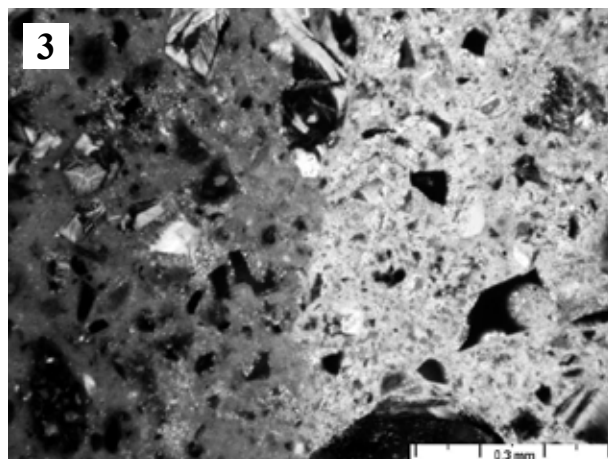
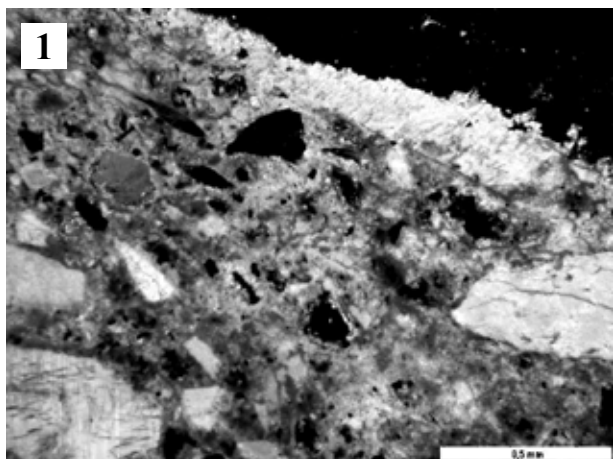
Príspevek byl řešen jako součást výzkumného záměru MSM 0021622418 „Dynamická geovizualizace v krizovém managementu“ a za podpory GAČR č. 103/06/1801 „Analýza spolehlivosti vlastností stavebních materiálů a konstrukcí s přihlédnutím k jejich změnám v čase a časově proměnným vlivům“.

Literatura

- Bárta, R. (1961): Chemie a technologie cementu. – Nakl. Česk. AV, 307 str. Praha.
- Bílčík, J. (1996): Sanácia betónových konštrukcií. – Jaga, 135 str. Bratislava.
- Boháč, M. (2003): Patologické změny panelů na panelových domech v sídlišti Komín. – MS, Diplomová práce, ÚGV PŘF MU. Brno.
- Emmons, H. – Drochytka, R. – Jeřábek, Z. (1999): Sanace a údržba betonu v ilustracích. – Akad.nakl. CERM, s.r.o., 334 str. Brno.
- Gregerová, M. – Fojt, B. – Vávra, V. (2002): Mikroskopie horninotvorných a technických materiálů. – Mor. zem. muz., 354 str. Brno.
- Matoušek, M. – Drochytka, R. (1998): Atmosferická koroze betonů. – Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků, 171 str. Praha.
- Slobodník, M. (1996): Rozlišování karbonátů barvením. – Geol. výzk. Mor. Slez., 3, 164-165. Brno.
- Steffens, A. – Dinkler, D. – Ahrens, H. (2002): Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. – Cement and Concrete Research, 32, 935-941. Brno.

Bílčík (1996) specifikuje vliv atmosféry jako vliv agresivního prostředí. Předpokládá, že se uplatňují zvýšené koncentrace exhalátů (CO₂, SO₂ atd.) a voda z ovzduší. Zdroje síry mohou být i jiné. Může pocházet z portlandského slínku, cementové směsi nebo i z geologického podloží. I přesto, že sulfatace panelů byla prokázána pouze v jednom vzorku ze sledované série, byla ověřena její pozitivní korelace s vlhkostí.

Studium karbonatace katodovou luminiscencí je náročné vzhledem k jemnosti vznikajícího kalcitu.



Obr. 1 – Karbonatace betonu patrná v povrchové zóně. Polarizační mikroskop Olympus BX 51. XPL. Zvětš. 75×.

Fig. 1 – Carbonation of concrete noticeable in surface zone. Polarizing microscope Olympus BX 51. XPL. Magnification 75×.

Obr. 2 – Karbonatace betonu patrná v povrchové zóně. Jiný prefabrikát. Polarizační mikroskop Olympus BX 51. XPL. Zvětš. 75×.

Fig. 2 – Carbonation of concrete noticeable in surface zone. Another prefabricated element. Magnification 75×.

Obr. 3 – Karbonatace vyskytující se v pojivu, pórech a mikrotrhlinách betonu v zóně 1–3 cm od povrchu. Zvětš. 75×.

Fig. 3 – Carbonation of concrete presented in cement binder, pores and microcracks in zone 1–3 cm under surface. Magnification 75×.

Obr. 4 – Hranice mezi karbonatizovanou a nepřeměněnou částí betonu v hloubce 4 cm od povrchu. Zvětš. 75×.

Fig. 4 – Boundary between carbonated and noncarbonated part of concrete in 4 cm depth. Magnification 75×.

Obr. 1–4 Polarizační mikroskop Olympus BX 51. XPL. Foto M. Gregerová.

Fig. 1–4 Polarizing microscope Olympus BX 51. XPL. Photo M. Gregerová.

Obr. 5 – Vynesení výsledků bodové EDX analýzy slínkových minerálů do ternárního diagramu CaO–CaO.Al₂O₃–CaO.SiO₂ (výsek z diagramu Rankin in Bárta 1961).

Fig. 5 – SEM/EDX microanalysis of clinker minerals in CaO–CaO.Al₂O₃–CaO.SiO₂ ternary plot (Rankin in Bárta 1961).

Obr. 6 – Difraktogram pojiva vzorku betonu UB 22.

Fig. 6 – X-ray analysis of cement binder of concrete UB 22.