

# Ocena przyczyn i stopnia zniszczenia nawodnych podpór mostu hydraulicznego odpopielania

Dr hab. inż. Tomasz Błaszczński, emerytowany prof. uczelni, dr hab. inż. Aldona Łowińska-Kluge, emerytowany prof. uczelni, Politechnika Poznańska

## 1. Wprowadzenie

Do żelbetonowych elementów obiektów przemysłowych od lat przywiązuje się niewiele uwagi. Niestety efektem tego są postępujące zjawiska korozji różnego rodzaju szczególnie, gdy obiekty te znajdują się w warunkach zagrożenia korozyjnego. Wiadomym jest, że zasadniczy wpływ na trwałość obiektów ma korozja materiałów, z jakich są one wykonane [1]. Przyczyny korozji betonu, więc także i żelbetu mogą być różne. Z reguły zachodzi ona pod wpływem oddziaływań zewnętrznych. W ostatnich latach częstym, w praktyce budowlanej, zjawiskiem jest występowanie spękań konstrukcji żelbetonowych na całej grubości, już w momencie ich realizacji. Przyczyną takiego stanu rzeczy, jak udowadniają prace [2–6] jest korozja wewnętrzna w betonie. Beton jako materiał konstrukcyjny narażony jest na oddziaływanie korozyjne środowiska zewnętrznego. Jednym z rodzajów korozji tego materiału, często zaniedbywanym przez projektantów, jest korozja biologiczna, będąca szczególnym przypadkiem korozji chemicznej. Należy zaznaczyć, iż liczne przemiany fizyczne i chemiczne zachodzące w betonie są skutkami aktywności metabolicznej mikroorganizmów, tj. bakterii, grzybów czy glonów. Destrukcja materiału wywołana przez organizmy żywe zachodzi między innymi pod wpływem procesów biogeofizycznych, takich jak zmiana porowatości materiału na skutek tworzenia się błony biologicznej na powierzchni betonu [7, 8].

Jednak jeżeli weźmie się pod uwagę, że beton jest produktem prostej technologii i złożonej wiedzy, to trafne są prognozy, że wiek XXI dla budownictwa może być w dużej mierze wiekiem napraw, rehabilitacji i rozbiórek. Z analizy przyczyn uszkodzeń konstrukcji żelbetonowych, przedstawionej w pracy [9] wynika, że z pojedynczych czynników, największy wpływ ma środowisko (38,5%).

## 2. Krótki opis analizowanego obiektu

Nawodne podpory mostu hydraulicznego odpopielania znajdują się na terenie jednej z elektrowni, a dokładniej przebiegają nad lustrem wody jeziora otaczającego samą elektrownię. Jezioro to służy do naturalnego chłodzenia turbin. Podpory są monolityczną konstrukcją żelbetową w postaci stóp żelbetonowych, które znajdują się na stalowej, rusztowej,



Rys. 1. Widok mostu hydraulicznego odpopielania wraz z analizowaną podporą



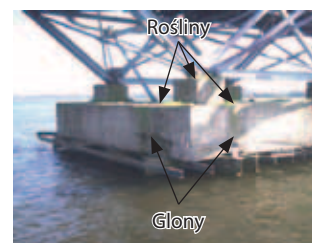
Rys. 2. Widok pojedynczej nawodnej podpory



Rys. 3, 4. Uszkodzenia podpór w postaci odpadającego skorodowanego betonu i skorodowanej stali zbrojeniowej



Rys. 5. Żelbetowa podpora z ogniskami korozji biologicznej



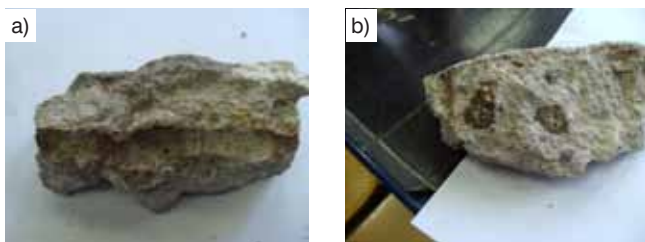
Rys. 6. Żelbetowa podpora wraz porastającymi ją roślinami i glonami



Rys. 7. Widok pobranych próbek w postaci odwiertów rdzeniowych



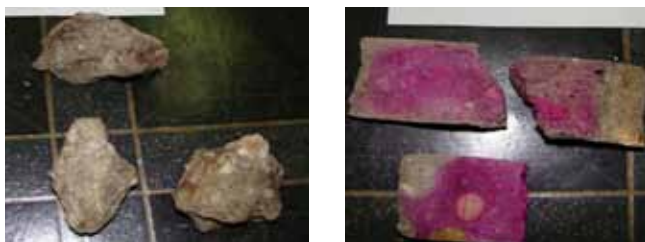
Rys. 8. Widok pobranych betonowych próbek kawałkowych



**Rys. 9.** Próbkki kawałkowe betonu: a) porowata struktura i resztki skorodowanych prętów zbrojeniowych, b) kruszywo węglanowe reagujące z 10% HCl



**Rys. 10.** Próbkki betonu z widocznymi czynnikami biotycznymi



**Rys. 11.** Przełom betonu B; beton całkowicie skarbonizowany (aż do prętów zbrojeniowych) z widocznymi resztkami skorodowanego zbrojenia ( $pH < 9$ )

**Rys. 12.** Przełom betonu A; widoczna warstwa w głąb betonu o  $pH$  zasadowym, skarbonizowana, grubości 1–3 cm

konstrukcji wsporczej, wykonanej głównie na bazie ceowników i dwuteowników (rys. 1, 2).

Po wielu latach eksploatacji podpory mostu hydraulicznego odpopielania znajdują się w złym stanie technicznym. Widać skorodowany i odpadający beton oraz postępującą korozję stali zbrojeniowej (rys. 3, 4).

Widoczne są także ogniska korozji biologicznej (rys. 5 i 6).

### 3. Przeprowadzone badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na pobranych próbkach z obiektów, które obejmowały: odwierty rdzeniowe betonowe o  $\varnothing 4,5$  mm oznaczone jako beton A (rys. 7) oraz betonowe próbkki kawałkowe z miejsc przy prętach zbrojeniowych i oznaczone je jako beton B (rys. 8).

#### 3.1. Badania makroskopowe

Na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdzono w badanych rodzajach betonu występowanie kruszywa naturalnego o podobnej granulacji oraz pewnych ilości kruszywa węglanowego. Próbkki betonu charakteryzują się

porowatą strukturą z zawartością porów o różnych rozmiarach, a na większości próbek stwierdza się resztki skorodowanych prętów zbrojeniowych (rys. 9a) oraz kruszywo węglanowe (rys. 9b).

Na zewnętrznej stronie próbek A i B stwierdza się obecność czynników biotycznych, w postaci glonów i mchów, mogących wywoływać korozję biologiczną (rys. 10).

Aby określić szacunkowy przebieg karbonatyzacji w analizowanych betonach, przełomy próbek spryskano 1% roztworem fenoloftaleiny. Próbkki kawałkowe (beton B) są całkowicie skarbonizowane (rys. 11), a w próbkach z odwiertów rdzeniowych (beton A) warstwa skarbonizowana ma grubość 1–3 cm (rys. 12). Dalej nie stwierdza się karbonatyzacji.

#### 3.2. Określenie nasiąkliwości

Określenie nasiąkliwości pobranego betonu (pełniącego funkcję gładzi cementowej) dokonano metodą suszarkowo-wagową. Zawartość wilgoci określono w [%] ze wzoru (1):

$$n = (m - m_s) / m_s \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – nasiąkliwość [%],

$m$  – masa próbki nasyconej wodą do stałej masy [g],

$m_s$  – masa próbki wysuszonej do stałej wagi [g].

Uzyskane dla badanego betonu wyniki przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Nasiąkliwość badanych betonów

Rodzaj betonu	Beton A	Beton B
Nasiąkliwość [%]	6,77	7,84

Wyniki przedstawione w tabeli są średnią z trzech oznaczeń dla każdego rodzaju betonu.

Wszystkie oznaczone nasiąkliwości przekraczają wartość 5%. Zgodnie z p. 5.2 normy PN-88/B-06250: nasiąkliwość betonu nie powinna być większa niż 5%, w przypadku betonów narażonych na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych, a takie betony właśnie tu analizujemy.

#### 3.3. Określenie odczynu $pH$ betonu

Pomierzono  $pH$  wyciągów wodnych zmielonych próbek betonu pobranych z różnych lokalizacji. Pomiary wykonano za pomocą Pehametu N5170E. Do badań użyto kombinowanej elektrody szklanej. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2. Każdy z wyników jest średnią z trzech oznaczeń.

**Tabela 2.** Wartości odczynu  $pH$  badanych betonów

Rodzaj betonu	Beton A	Beton B
Wartość odczynu $pH$	10,28	7,29

Typowa wartość  $pH$  dla betonów zwykłych wynosi  $pH = 12,3$  do  $12,7$ . Wartości  $pH = 11,8$  jest graniczną wartością, przy której stabilne są fazy C-S-H (tobermorytowe) i glinokrzemianowe w kamieniu cementowym. Beton przy  $pH < 11,8$  przestaje być ochroną dla stali. Wszystkie pobrane próbkki charakteryzowały się  $pH < 11,8$ , co potwierdza przebiegające

wewnątrz betonów procesy korozyjne. Odczyn betonu B świadczy o daleko posuniętych procesach korozyjnych.

### 3.4. Określenie gęstości objętościowej

Oznaczenie gęstości objętościowej betonu wykonano dla próbek wysuszonych do stałej masy według wzoru (2)

$$\gamma = m/V \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

gdzie:

$\gamma$  – gęstość objętościowa [kg/m<sup>3</sup>],

$m$  – masa próbki wysuszonej [kg],

$V$  – objętość próbki [m<sup>3</sup>].

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3. Każdy z wyników jest średnią z trzech oznaczeń.

**Tabela 3.** Gęstość objętościowa betonu pobranego z różnych lokalizacji

Rodzaj betonu	Beton A	Beton B
Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	2446	2391

Oznaczone gęstości objętościowe charakteryzują się zgodnie z PN-EN 206-1:2003 (p 3.1.7) gęstością poprawną dla betonu zwykłego. Gęstość objętościowa pomiędzy 2000 i 2600 kg/m<sup>3</sup> jest gęstością dobrze charakteryzującą większość betonów zwykłych.

### 3.5. Określenie wytrzymałości betonu

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych. Maszyna miała napęd elektrohydrauliczny i hydrauliczny z elektronicznym układem sterującym. Zgodnie ze świadectwem wzorcowania i z p. 4.2.2 normy PN-EN 12390-4:2001 Badania betonu. Część 4: Wytrzymałość na ściskanie. Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych – maszynę należy zaliczyć do klasy 0,5. Maksymalne obciążenie maszyny wynosiło 300 kN.

Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2002. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach wyciętych z dostarczonych odwiertów. W związku z niedużą średnicą wykonanych odwiertów otrzymano jedynie próbki o powierzchni < 22 500 mm<sup>2</sup>, w związku z czym wszystkie wyniki powinny być zmniejszone o wartość od 10 do 15%. W efekcie przeprowadzonych badań otrzymano wytrzymałości ściskanie o wartości od 11,81 MPa do 27,19 MPa. Otrzymane wytrzymałości średnie przy dużym rozrzucie wartości dają jedynie możliwość zakwalifikowania analizowanych betonów do klasy od 10 do 20 MPa, w zależności od stopnia zniszczenia.

Ze względu na silną karbonizację powierzchniowej warstwy betonu, a tym samym jej uszczelnienie, może to dawać przy stosowaniu metod nieniszczących, np. metody sklerometrycznej, znacznie zawyżone wyniki.

## 4. Wybrane badania strukturalno-chemiczne

Dla pobranych próbek wykonano również niezbędne badania strukturalno-chemiczne, takie jak:

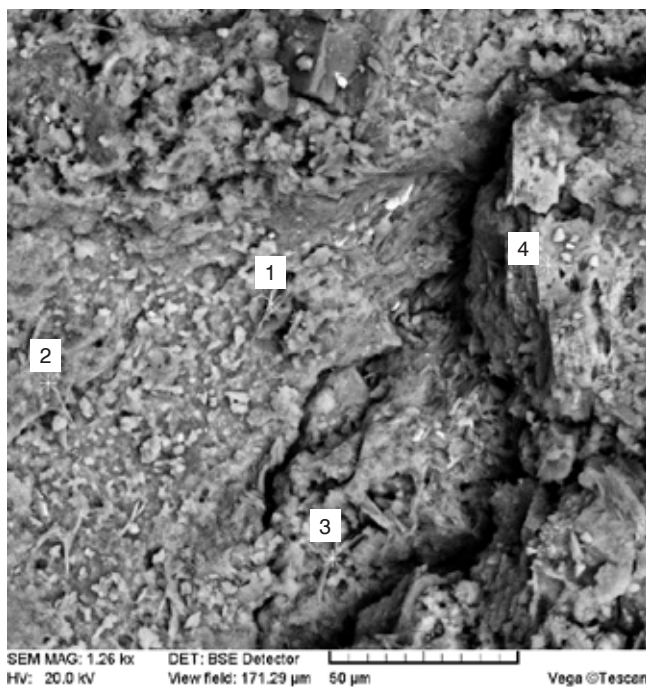
- badania mikroskopowe,
- niezbędne analizy chemiczne.

### 4.1. Badania mikroskopowe

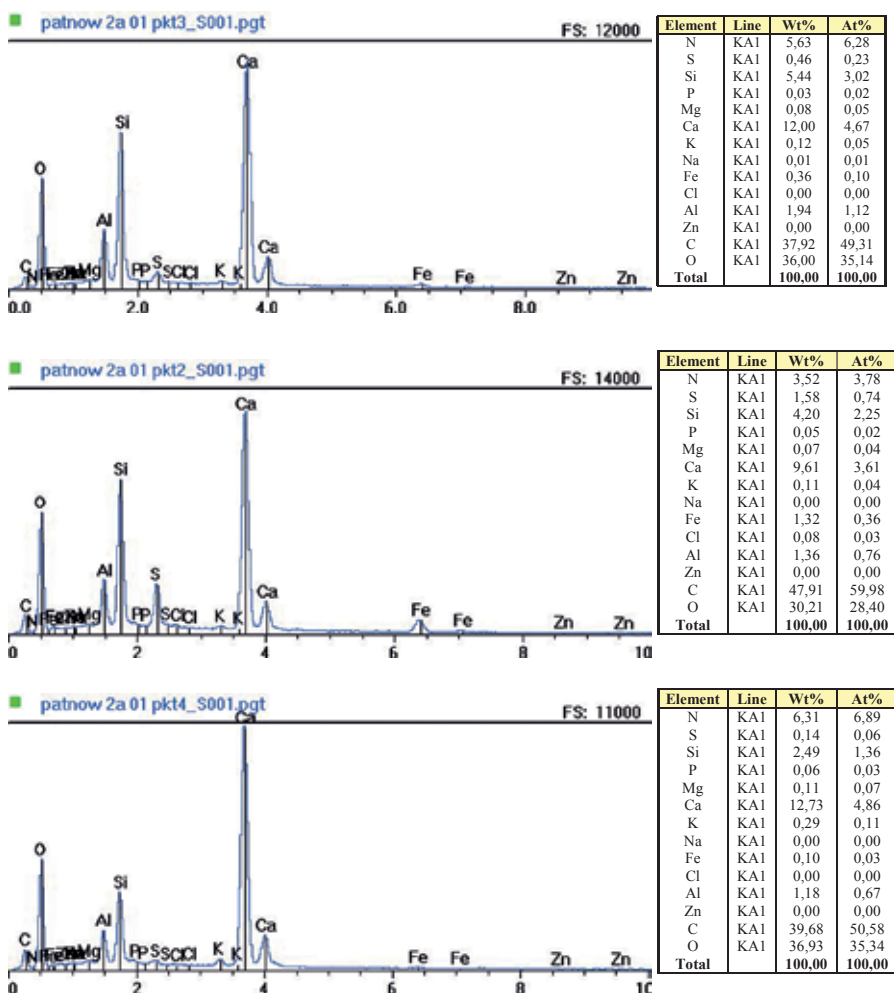
W celu określenia struktury i rodzaju powstałych związków, a także dla oceny możliwości oraz kierunków powstawania dalszych reakcji w analizowanym betonie A i B wykonano badania mikroskopowe.

Badania mikroskopowe miały również służyć ocenie ewentualnych możliwości i kierunków zachodzenia dalszych reakcji w analizowanym betonie [10]. Badania wykonano zgodnie z przyjętymi zasadami badań mikroskopowych przy użyciu mikroskopu skaningowego typu VEGA TS 5135 MM, przy niskiej próżni w elektronach odbitych na próbkach nienapylonych. W trakcie badań wykonano zdjęcia charakterystycznych obszarów badanych próbek. Niektóre wyniki pokazano na rysunkach 13, 15-17 i 19.

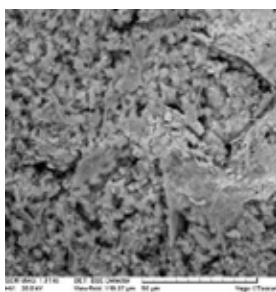
Wykonano również mikroanalizy bezwzorcowe EDS przy użyciu mikroskopy rentgenowskiej charakterystycznych produktów reakcji obserwowanych w betonie gładzi i na blachach okapowych. Niektóre z nich przedstawiono na rysunkach 14, 18 i 20.



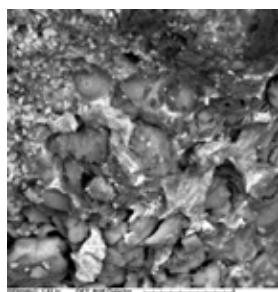
**Rys. 13.** Obraz mikroskopowy betonu A z zaznaczonymi punktami, w których wykonano mikroanalizę bezwzorcową EDS; widoczny portlandyt, drobny wiotki etryngit, fazy C-S-H żelowe i drobnokrystaliczne oraz węglany wapniowe; linie spękania biegnące przez matrycę cementową; struktura porowata; 1, 2, 3 i 4 – miejsca wykonania mikroanaliz EDS



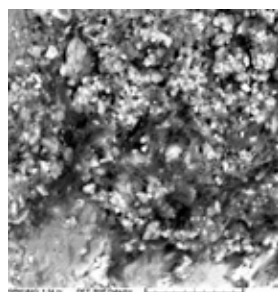
**Rys. 14.** Bezwzorcowa mikroanaliza EDS charakterystycznych produktów obecnych w matrycy cementowej betonu A: a) w punkcie oznaczonym 1 i 3 na rysunku 13, b) w punkcie oznaczonym 2 na rysunku 13, c) w punkcie oznaczonym 4 na rysunku 13



**Rys. 15.** Obraz mikroskopowy betonu A; widoczny portlandyt, fazy C-S-H żelowe i drobnokrystaliczne, drobny ettryngit, fazy żelowe, popiół lotny; struktura porowata z licznymi spękaniemami biegnącymi przez matrycę cementową



**Rys. 16.** Obraz mikroskopowy betonu B; bardzo porowata luźna struktura, ziarna popiołu, dużo substancji żelowych



**Rys. 17.** Obraz mikroskopowy betonu B z zaznaczonymi punktami, w których wykonano rentgenowską mikroanalizę bezwzorcową EDS; nie stwierdza się obecności portlandytu; niewielkie ilości faz C-S-H żelowych i drobnokrystalicznych; niewielkie ilości ettryngitu; dużo faz żelowych; 1–3 – miejsca wykonania mikroanalizy EDS

Bezwzorcowa mikroanaliza EDS w punktach 1–3 (rys. 17) wykazała obecność przede wszystkim węgla i glinu, tlenu oraz niewielkie ilości krzemu i wapnia.

Na podstawie przeprowadzonej bezwzorcowej mikroanalizy rentgenowskiej EDS pola powierzchni betonu B skażonej czynnikami biotycznymi (rys. 19) stwierdza się obecność węgla, wapnia, tlenu, krzemu, fosforu, żelaza, siarki, niewiele azotu oraz w znikomych ilościach potas, cynk i glin. Prawdopodobnie rozłożeniu uległy już krzemiany i gliniany wapniowe.

#### 4.2. Niezbędne analizy chemiczne

W celu dokładnego określenia ilości związków mogących wpływać na właściwości badanych betonów wykonano analizy chemiczne próbek tych betonów.

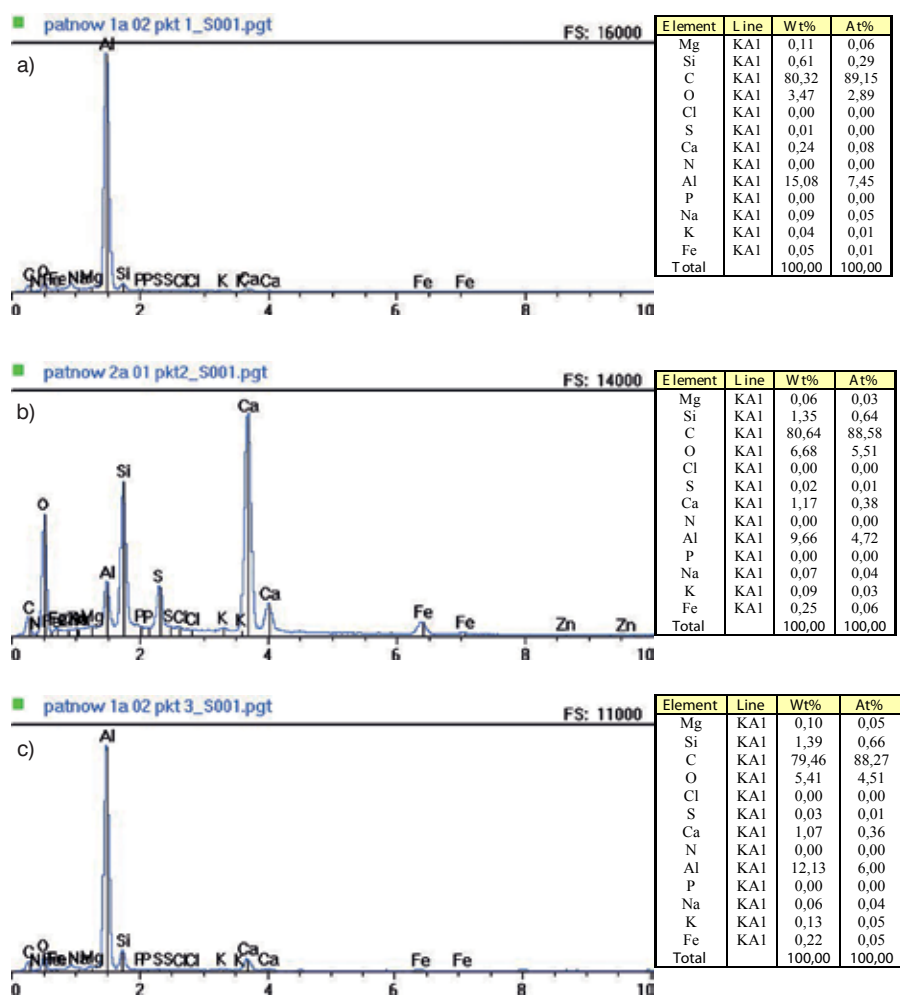
Na pobranych metodą kwartowania o odpowiedniej wielkości próbkach zmielonych betonów A i B wykonano analizy chemiczne zgodnie z normami [11–14] oraz metodą klasycznej analizy chemicznej. Uzyskane wyniki [%] przedstawiono w tabelach 4 i 5.

W betonie A występuje znacznie wyższa zawartość  $SO_3$ , wyższa  $Na_2O$  oraz niższa zawartość  $MgO$ ,  $K_2O$  i  $CaO$  w porównaniu z betonem B.

Szacunkowe przeliczenie ilości oznaczonych związków na betony w kg i odniesienie uzyskanych wartości do samego cementu (%) przedstawiono w tabeli 5.

Do obliczeń przyjęto ilość cementu określoną doświadczalnie w związku z nieznaną rzeczywistą ilością cementu użytej do wytworzenia badanych betonów. Tak więc przyjęto dla betonu A – 306 kg cementu na  $m^3$ , a dla betonu B – 302 kg cementu na  $m^3$ . Beton A ma gęstość pozorną  $2446 \text{ kg}/m^3$ , natomiast beton B ma gęstość pozorną  $2391 \text{ kg}/m^3$ .

Oznaczone ilości  $SO_{3cat}$  dla analizowanych betonów wahają się w granicach od 19,50% (A) do 7,60% (B) w odniesieniu do oszacowanej masy



Rys. 18. Bezwzorcowa mikroanaliza EDS charakterystycznych produktów reakcji obecnych w matrycy cementowej betonu B: a) w punkcie oznaczonym 1 na rysunku 17, b) w punkcie oznaczonym 2 na rysunku 17, c) w punkcie oznaczonym 3 na rysunku 17

Tabela 4. Oznaczenie zawartości  $SO_{3całk.}$ , MgO, CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  i  $Na_2O_{eq}$  w całym betonie

Beton	Zawartość związków w uśrednionej próbce betonu [%] *					
	$SO_{3całk.}$	CaO	MgO	$Na_2O$	$K_2O$	$Na_2O_{eq}$
A	2,44	29,53	1,03	0,14	0,387	0,39
B	0,96	32,87	1,53	0,11	0,70	0,57

\* Wyniki są średnimi z trzech oznaczeń.

cementu. Otrzymane wielkości nie spełniają wymogu z tablicy 3 normy [14] dla cementu portlandzkiego i cementów portlandzkich z dodatkami, która to wielkość zgodnie z normą nie może przekroczyć wartości 3,5%.

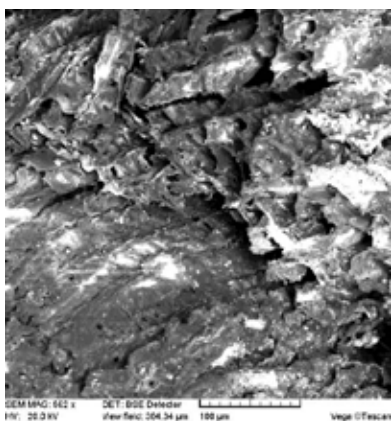
Oznaczona ilość MgO, wynosząca 8,23% w betonie A i 12,11% w betonie B, w odniesieniu do masy cementu przekracza według [15] wartość dopuszczalną wynoszącą 4%. Przez wiele lat w normach większości krajów dopuszczano zawartość MgO w cemencie do 5%. Jednakże przypadki destrukcji wielu obiektów w USA i innych krajach, a także w wyniku długotrwałych badań wykazały, że niezbędne są dodatkowe gwarancje.

Oznaczona ilość alkaliów ( $Na_2O_{eq}$ ) wynosząca 3,11% (A) i 4,51% (B) w stosunku do masy cementu przekracza według [15] wartość dopuszczalną wynoszącą 0,6%.

Związki siarki przeliczone na siarkę całkowitą, zawartość MgO i  $Na_2O_{eq}$  w ocenianych betonach pochodzą z zastosowanych kruszyw i ich zanieczyszczeń oraz z cementu.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie opisu stanu istniejącego, wykonanych badań oraz wcześniejszych analiz można stwierdzić, iż obserwowane zjawiska są głównie spowodowane korozją ługującą, węglanową i biotyczną. Nie stwierdzono oznak korozji siarczanowej, natomiast stwierdzono w betonie zastosowanie kruszywa węglanowego i niedużych ilości popiołów lotnych. Niestety zleceniodawca odmówił dostarczenia danych o skażeniu wody i powietrza, co znacznie utrudniło poszukiwanie przyczyn powstałych zjawisk. Brak dostatecznej szczelności wierzchniej warstw powodował stałe nawilgacanie pozostałych warstw analizowanych betonów. Tak więc wilgoć zawarta i utrzymująca się w betonie powodowała powolne rozpuszczanie związków wapnia z kamienia cementowego. Wilgoć ta będąca wynikiem wód opadowych, czyli wód miękkich o małej twardości węglanowej oraz parującej wody z otaczającego jeziora, powoduje powstanie korozji ługującej. Ługowanie jest procesem dyfuzyjnym, na którego przebieg istotnie wpływa szybkość przepływu i ciśnienie wody. Agresywność wód miękkich zwiększa się w niższych temperaturach. Ługowanie wodorotlenku wapnia rozpoczyna się od warstw powierzchniowych. W miarę upływu czasu  $Ca(OH)_2$  z coraz głębszych warstw jest odprowadzany do środowiska. W pierwszej kolejności następuje rozpuszczenie  $Ca(OH)_2$  (tzw. wolnego wapnia), a w miarę obniżania się pH także wapnia z uwodnionych krzemianów i glinianów wapniowych. Te związki wapnia osadzały się na stalowych prętach zbrojeniowych i w obecności wilgoci wchodziły w reakcje z przedostającym się z atmosfery dwutlenkiem węgla ( $CO_2$ ). Gazy te wraz z wilgocią przedostawały się także, w miarę wypłukiwania związków



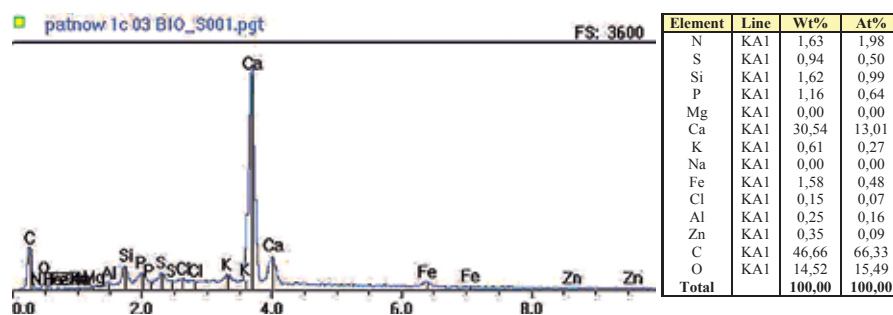
**Rys. 19.** Obraz mikroskopowy SEM powierzchni skażonej czynnikami biotycznymi (mchy, glony, grzyby) betonu B; bardzo porowata struktura matrycy cementowej; widoczne „włókniste wytrawienia” spowodowane działaniem czynników biotycznych, obecne fazy żelowe

Ca, do wnętrza kamienia cementowego. W wyniku zachodzących reakcji powstawały m.in. węgiel wapniowy i węgiel żelaza. Produkty te identyfikują się wyraźnie podczas badań mikroskopowych i w trakcie mikroanalizy EDS. Stalowe pręty zbrojeniowe, w miejscach kontaktu z betonem, znajdowały się stale w środowisku wilgotnym. Bezwzorcowo mikroanaliza EDS wykazała obecność przede wszystkim produktów z matrycy cementowej, „poprzerastanych” produktami korozji prętów zbrojeniowych, a także wykazała występowanie produktów rozkładu matrycy cementowej i prętów zbrojeniowych (w postaci głównie węglianów wapnia, żelaza i cynku). Na podstawie przeprowadzonej bezwzorcowej mikroanalizy rentgenowskiej EDS pola powierzchni betonu B skażonej czynnikami biotycznymi stwierdzono prawdopodobne rozłożenie krzemianów i glinianów wapniowych. Brak portlandytu (znacznie mniejsza liczba faz C-S-H), bardzo duża ilość kalcytu (3,5 raza więcej) i zmniejszona ilość kwarcu (2 razy mniej) w porównaniu z betonem A, wskazuje na daleko posunięty rozkład korozyjny matrycy cementowej w betonie B. Związki siarki przeliczone na siarkę całkowitą, zawartość MgO i Na<sub>2</sub>Oeq w ocenianych betonach pochodzących mogą z zastosowanych kruszyw i ich zanieczyszczeń oraz z cementu.

Jak wynika z przeprowadzonych badań laboratoryjnych i przeprowadzonej analizy, z podór należy usunąć wierzchnią skorodowaną warstwę betonu, aż do prętów zbrojeniowych, z odkryciem i oczyszczeniem prętów. Następnie należy wykonać nowe warstwy według jednej z systemowych technologii naprawczych.

**Tabela 5.** Szacunkowe oznaczenie ilości SO<sub>3całk.</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>Oeq w betonie

Rodzaj betonu	W odniesieniu do:	Ilość oznaczonych związków w betonie		
		SO <sub>3całk.</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> Oeq
Beton A: – gęstość pozorna = 2446 kg/m <sup>3</sup> , – cement = 306 kg/m <sup>3</sup>	masy betonu [kg]	(2,44·2446/100) = 59,68 kg/m <sup>3</sup>	(1,03·2446/100) = 25,19 kg/m <sup>3</sup>	(0,39·2446/100) = 9,53 kg/m <sup>3</sup>
	masy cementu [kg]	(59,68·100/306) = 19,50 %	(25,19·100/306) = 8,23 %	(9,53·100/306) = 3,11 %
Beton B: – gęstość pozorna = 2391 kg/m <sup>3</sup> , – cement = 302 kg/m <sup>3</sup>	masy betonu [kg]	(0,96·2391/100) = 22,95 kg/m <sup>3</sup>	(1,53·2391/100) = 36,58 kg/m <sup>3</sup>	(0,57·2391/100) = 13,63 kg/m <sup>3</sup>
	masy cementu [kg]	(22,95·100/302) = 7,60 %	(36,58·100/302) = 12,11 %	(13,63·100/302) = 4,51 %



**Rys. 20.** Mikroanaliza bezwzorcowo EDS betonu B z pola na rysunku 19, skażonego czynnikami biotycznymi

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Prognoza trwałości obiektu budowlanego na przykładzie, [w:] Trwałość budynków i budowli, ed. T. Błaszczński, DWE, Wrocław, 2012, str. 121–136
- [2] Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Zgoła B, Wpływ wykonawstwa na degradację betonu, Materiały Budowlane 9/2004, str. 84–86
- [3] Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Durability assessment of RC floors based on concrete properties, 6th International Conference AMCM'2008, Łódź, Poland 2008, str. 371–372 + CD
- [4] Runkiewicz L., Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Trwałość współczesnych stropów monolitycznych, [w:] Współczesne metody naprawy w obiektach budowlanych, ed. M. Kamiński, J. Jasiczak, W. Buczkowski, T. Błaszczński, DWE, Wrocław, 2009, str. 324–337
- [5] Łowińska-Kluge A., Błaszczński T., The influence of internal corrosion on the durability of concrete, Archives of Civil and Mechanical Engineering, tom XII, 2/2012, str. 219–227
- [6] Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Diagnostyka konstrukcji betonowych w przypadku korozji wewnętrznej betonu, [w:] Trwałość budynków i budowli, ed. T. Błaszczński, DWE, Wrocław, 2012, str. 279–294
- [7] Horbik D., Łowińska-Kluge A., Górski Z., Stanisław E. & Zgoła-Grzeszkowiak A., Microwave-Assisted Extraction Combined with HPLC-MS/MS for Diagnosis of Fungal Contamination in Building Materials, J. Braz. Chem. Soc., tom 24, 9/2013, str. 1478–1486
- [8] Łowińska-Kluge A., Horbik D., Zgoła-Grzeszkowiak A., Ewa Stanisław E. & Górski Z., A comprehensive study on the risk of biocorrosion of building materials, Corrosion Engineering, Science and Technology, 2016, DOI: 10.1080/1478422X.2016.1174326
- [9] Kucharska L., Katastrofy, awarie i uszkodzenia, a beton i jego rozwój, XX Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie budowlane, Szczecin-Międzydroje, 2001, str. 89–118
- [10] Łowińska-Kluge A., Józwiak K., A study of the resistance of concrete to corrosion using SEM and microanalysis, Microscopy and Analysis, 20, 1, 2006, str. 19–21
- [11] PN-EN 196-2:1996: Metody badania cementu. Analiza chemiczna cementu
- [12] PN-EN 196-21:1997: Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie
- [13] PN-EN 196-21/Ak:1997: Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie
- [14] PN-EN 197-1:2002: Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [15] Peikert S., Cementy powszechnego użytku i specjalne, Polski Cement, Kraków, 2000