

Dr inż. Grażyna Bundyra-Oracz
Dr inż. Dorota Siemaszko-Lotkowska

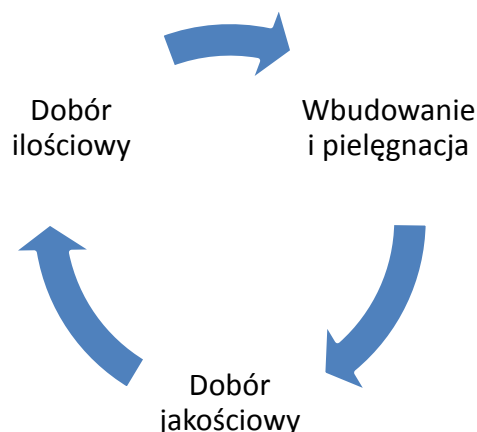
Trwałość betonu w warunkach agresji chemicznej klasa ekspozycji XC według PN-EN 206-1

1. Wstęp

Beton podobnie do innych materiałów budowlanych narażony jest na niszczące oddziaływanie środowisk w wyniku których ulegają zmianie jego właściwości użytkowe. Dlatego obecnie rozwój technologii betonu ukierunkowany jest przede wszystkim na uzyskanie betonów zapewniających utrzymanie właściwości związanych z trwałością na wymaganym projektowanym poziomie. Trwałość obiektów budowlanych została wpisana do wymagań podstawowych dyrektywy europejskiej 89/106/ECC i Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i jest traktowana jako ważny element zrównoważonego rozwoju.

Jeżeli konstrukcje betonowe i żelbetowe, zostały zaprojektowane i wykonane przy spełnieniu postawionych warunków to powinny charakteryzować się wysoką trwałością [S1].

W ciągu ostatnich dziesięcioleci stwierdzono wiele przypadków, że pomimo spełnienia istniejących przepisów odnośnie wykonawstwa i doboru materiałowego konstrukcje betonowe nie spełniały założonych wymagań co do trwałości. Przyczyną powyższego było nieuwzględnienie oddziaływania środowiska na beton [M1]. Obecnie wiadomo, że powyższego można uniknąć poprzez uwzględnienie na etapie projektowania przewidywanego charakteru oddziaływań na beton oraz stosując większe wymagania dla otuliny. Nie bez znaczenia pozostaje właściwy sposób wbudowania i zagęszczania mieszanki betonowej oraz odpowiednie zabiegi pielęgnacyjne. Powyższe zilustrowano na rysunku 1.



Rysunek 1. Czynniki decydujące o trwałości betonu w przewidywanych klasach użytkowania

Metody, które są obecnie wykorzystywane w celu otrzymania betonu trwałego to między innymi dobór odpowiedniego kruszywa, cementu, ale także modyfikacja mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego. Trwałość konstrukcji żelbetowej przede wszystkim powinien zapewnić beton, odporny na wpływy środowiska, w którym obiekt będzie użytkowany. Procesy na jakie jest narażony beton zostały przedstawione poniżej.

Tabela 1. Procesy powodujące zniszczenie betonu

Procesy fizyczne	Procesy chemiczne	Procesy biologiczne
<ul style="list-style-type: none"> - ścieranie - obciążenie mechaniczne - oddziaływanie mrozu 	<ul style="list-style-type: none"> - reakcja alkalia-krzemionka - oddziaływanie substancji agresywnych - korozja stali zbrojeniowej <ul style="list-style-type: none"> a) karbonatyzacja betonu b) chlorki 	<ul style="list-style-type: none"> - bakterie (utlenianie siarki oraz uwodnionych siarczków do siarczanów) - mięczaki (wydzielanie węglanu amonu)

Wg Dyrektywy 89/106/EWG *trwałość wyrobu to jego zdolność do utrzymania wymaganych właściwości użytkowych w czasie, pod wpływem możliwych do przewidzenia oddziaływań. Wyrób powinien umożliwić prawidłowo zaprojektowanym i wykonanym obiektom spełnienie wymagań podstawowych w ekonomicznie uzasadnionym okresie użytkowania.* Dyrektywa wymaga, aby normy europejskie zharmonizowane z dyrektywą były formułowane na tyle precyzyjnie na ile jest to możliwe przy uwzględnianiu właściwości użytkowych wyrobów.

W odniesieniu do betonu klasy tych środowisk zostały znormalizowane i są przedmiotem wymagań normy PN- EN 206-1.

Jednym z procesów wywołującym zniszczenie betonu jest karbonatyzacja betonu, która została omówiona w niniejszym artykule.

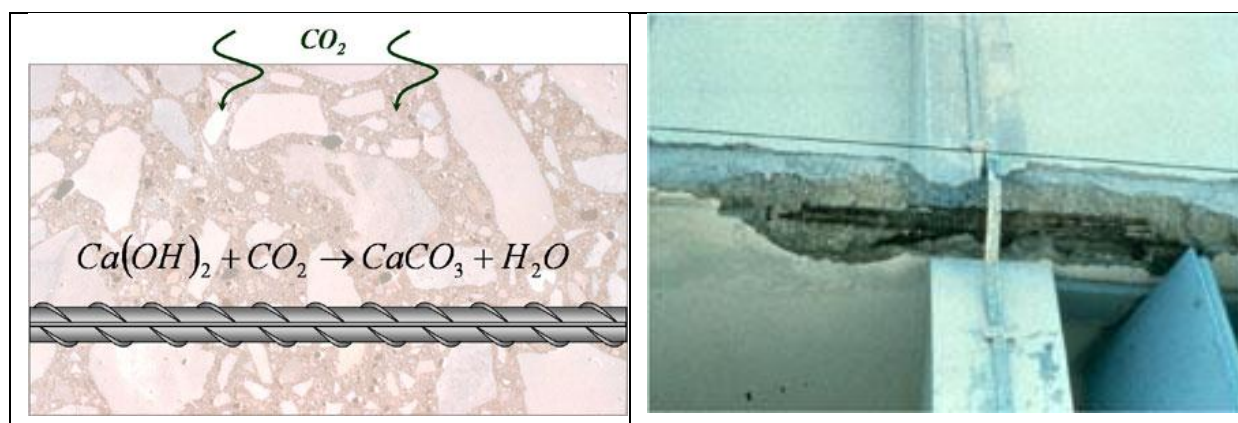
2. Karbonatyzacja

Korozja chemiczna betonu związana jest z oddziaływaniem różnych substancji chemicznych w postaci ciekłej lub gazowej.



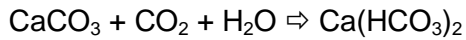
Rysunek 2 Korozja chemiczna i jej skutki

Dwutlenek węgla jest gazem, którego stężenie w powietrzu jest największe w porównaniu z innymi agresywnymi gazami. Zawartość CO₂ w powietrzu atmosferycznym wynosi 0,03 do 0,1 % [S1]. W połączeniu z wilgocią dochodzi do procesu karbonatyzacji betonu (rysunek 3).



Rysunek 3. Schemat dyfuzji CO₂ w betonie [P1]

Jak widać z rysunku 3 dwutlenek węgla reaguje z fazami zaczynu cementowego, przy czym najszybciej ulega karbonatyzacji portlandyt, chociaż niektóre wyniki wydają się wskazywać także na szybką karbonatyzację fazy C-S-H [K1]. Z jednej strony powstający trudno rozpuszczalny węglan wapnia uszczelnia strukturę betonu i zwiększa jego odporność, niemniej w fazie następnej węglan wapniowy przechodzi, pod wpływem dostarczanych przez wodę dalszych ilości kwasu węglowego, w bardzo łatwo rozpuszczalny wodorowęglan wapniowy.



Woda deszczowa, która jest wodą miękką wypłukuje ze struktury betonu łatwo rozpuszczalne związki wapnia co objawia się charakterystycznymi naciekami o białej barwie (rysunek 4). Powyższe powoduje spadek wytrzymałości i zwiększenie porowatości betonu co w konsekwencji ułatwia dalszą karbonatyzację, a następnie korozję stali zbrojeniowej w konstrukcji.



Rysunek 4. Wykwyty o białej barwie na powierzchni betonu [W1]

Istotny wpływ na postęp procesu karbonatyzacji ma rodzaj i ilość zastosowanego cementu, co wpływa na ilość powstającego wodorotlenku wapnia. Z [B1] wynika, że zwiększenie zawartości cementu zmniejsza szybkość wnikania CO_2 . Zawartość cementu na poziomie 300 kg/m^3 powinna być wystarczająca do uzyskania betonu o małej przepuszczalności, jeżeli jednocześnie współczynnik w/c jest na odpowiednim poziomie.

Przy doborze jakościowym cementu ważnym elementem jest stosowanie dodatków. Jak wynika z badań [M2], szybkość karbonatyzacji na zaprawach wykonanych z zastosowaniem spoiwa żużlowego była mniejsza w porównaniu do zapraw wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I. Powyższe uzasadnione zostało większą szczelnością zapraw



wykonanych z zastosowaniem spoiwa żużlowego.

Karbonatyzacja ma istotne znaczenie dla właściwości betonu – wpływa ona na skurcz, wytrzymałość, odporność na działanie środowisk agresywnych [K1].

Karbonatyzacja może także prowadzić do pozytywnych efektów odnośnie do trwałości betonu, szczególnie w początkowym stadium, tzn. do wzrostu wytrzymałości na ściskanie i obniżenia przepuszczalności [U1].

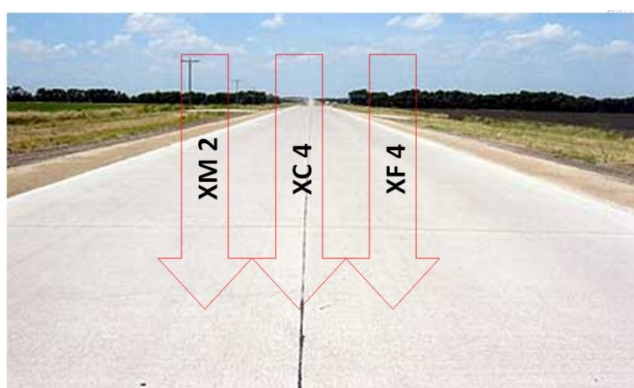
Rysunek 5. Korozja stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych [K2]

Proces karbonatyzacji jest niebezpieczny dla żelbetu, ponieważ przy pełnej karbonatyzacji betonu wartość pH w porach betonu może obniżyć się do wartości 8,3, a jak wykazały liczne badania beton traci właściwości ochronne w stosunku do zbrojenia, gdy wartość pH fazy ciekłej w porach betonu obniży się poniżej 11,8. Zatem niepełna karbonatyzacja powoduje utratę właściwości ochronnych otuliny.

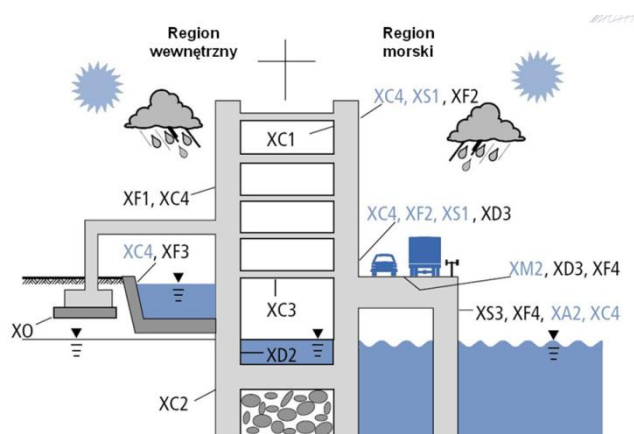
3 Projektowanie konstrukcji betonowych narażonych na karbonatyzację

Projektowanie składu betonu jest procesem składającym się z kilku etapów, a jednym z nich jest ustalenie możliwych klas ekspozycji oddziaływujących na beton w trakcie użytkowania.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono możliwe klasy ekspozycji dla wybranych konstrukcji.



Rysunek 6. Możliwe klasy ekspozycji dla betonowej nawierzchni drogowej



Rysunek 7. Możliwe klasy ekspozycji dla budynku użytkowanego w regionie morskim i poza

Jak widać z przytoczonych przykładów karbonatyzacja jest obecna praktycznie w każdym elemencie i wymagania w odniesieniu do tej klasy ekspozycji należy uwzględnić podczas projektowania składu betonu.

Po wskazaniu możliwych agresywnych oddziaływań na beton kolejnym etapem jest dobór jakościowy składników betonu. Tutaj pomocne są dotychczasowe doświadczenia oraz norma PN-EN 206-1 wraz z krajowym uzupełnieniem. Następnie istotny jest dobór ilościowy składników.

Powyższe przedstawiono na przykładzie.

Rodzaj konstrukcji		Krawężniki zbrojone na otwartym parkingu		
Możliwe klasy ekspozycji		XC4	XD3	XF4
Wymagania dla zdefiniowanych klas ekspozycji wg PN-EN 206-1	Maksymalne w/c	0,50	0,45	0,45
	Minimalna klasa wytrzymałości	C30/37	C35/45	C30/37
	Minimalna zawartość cementu [kg/m ³]	300	320	340
	Minimalna zawartość powietrza [%]	-	-	4,0
Wymagania dla zdefiniowanych klas ekspozycji wg PN-B-06265	Maksymalne w/c	0,50	0,45	0,45
	Minimalna klasa wytrzymałości	C25/30	C35/45	C30/37
	Minimalna zawartość cementu [kg/m ³]	300	320	340
	Minimalna zawartość powietrza [%]	-	-	4,0

Komentarz:

Analizowana konstrukcja w trakcie eksploatacji narażona będzie na trzy klasy ekspozycji agresywnego oddziaływania środowiska. Najbardziej restrykcyjne wymagania w tym przypadku nie wynikają z korozji wywołanej karbonatyzacją lecz korozji spowodowanej chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej i zamrażaniem/rozmarzaniem. Zatem w odniesieniu do tych wymagań należy sformułować ostateczne wymagania co do składu betonu. Przedstawiają się one następująco:

Maksymalne w/c: 0,45
 Minimalna klasa wytrzymałości: C35/45
 Minimalna zawartość cementu: 340
 Minimalna zawartość powietrza: 4,0

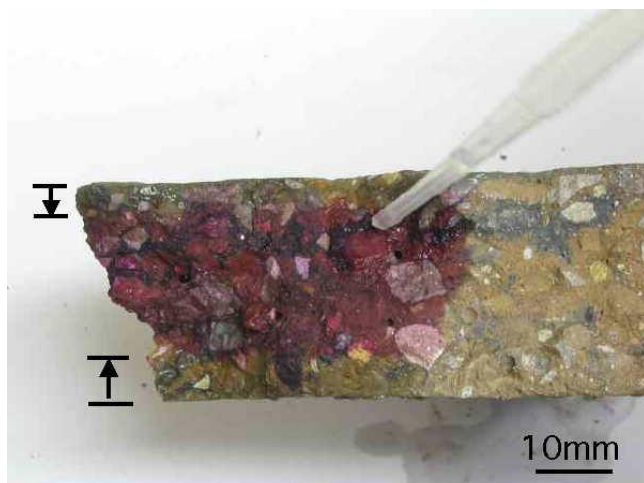
Ważne jest, aby dla każdej konstrukcji przeprowadzić analizy dotyczące każdej potencjalnej korozji.

W przypadku budownictwa mieszkaniowego, dla elementów budowli znajdujących się wewnątrz, karbonatyzacja często jest jedynym czynnikiem korozyjnym.

4. Ocena głębokości karbonatyzacji otuliny betonowej

Kontrola głębokości karbonatyzacji przypowierzchniowych warstw betonu powinna być realizowana w celu wykonania ewentualnych prac naprawczych mających na celu

zabezpieczenie konstrukcji przed dalszym postępowaniem karbonatyzacji. Powinno się wykonywać ocenę postępu procesu karbonatyzacji, na przykład każdorazowo w czasie okresowej kontroli stanu technicznego obiektu, w sytuacji gdy zachodzi ryzyko wystąpienia korozji zbrojenia, w czasie realizacji innych prac, na przykład remontowych. Najprostszym i często stosowanym narzędziem do pomiaru głębokości karbonatyzacji betonu jest zastosowanie wskaźników pH (indykatorów): fenoloftaleiny lub tymoloftaleiny. Wskaźniki te charakteryzują się określonym zabarwieniem dla wybranego zakresu pH. Fenoloftaleina zmienia kolor z bezbarwnego na czerwony przy pH 8,5 – 10,0, natomiast tymoloftaleina zmienia barwę z bezbarwnego na niebieski przy pH równym 9,3 – 10,5. W praktyce pomiaru głębokości karbonatyzacji dokonuje się przez natrysk roztworu wskaźnika na zwilżony świeży przełam betonu. W ten sposób określa się w przybliżeniu grubość warstwy skarbonatyzowanej. Przykłady z zastosowaniem fenoloftaleiny przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rysunek 8. Badanie karbonatyzacji w betonie [W3]

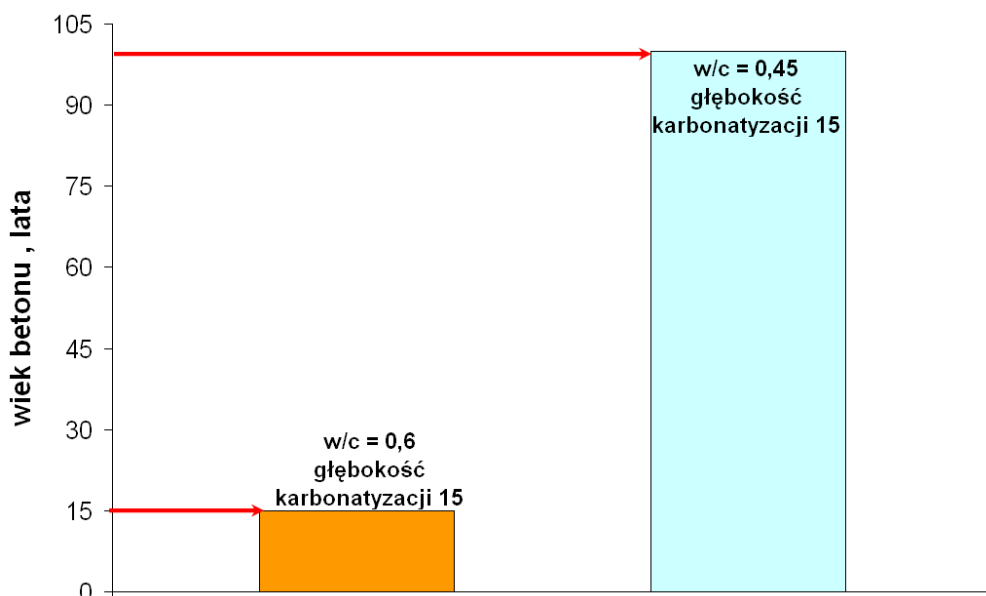


Rysunek 9. Próbką betonowa – karbonatyzacja powierzchniowa [W4]

Testy przedstawione powyżej umożliwiają ocenę grubości skarbonatyzowanej warstwy betonu. Na rynku dostępne są również inne testy umożliwiające ocenę rozkładu wartości pH w badanym przekroju betonu, np. rainbow-test opracowany przez duńską firmę Germann Instruments, umożliwiający pomiar pH w zakresie od 5 do 13.

5. Podsumowanie

Proces niszczenia betonu przebiega przeważnie stosunkowo wolno. Szybkość postępu korozji pod wpływem agresywnego CO₂ zależy od warunków oddziaływania środowiska na obiekt budowlany, a odporność betonu – w dużym stopniu od jego jakości. Jeśli beton jest przepuszczalny to proces będzie przebiegał szybciej, zatem szybkość karbonatyzacji maleje ze zmniejszeniem stosunku w/c oraz ze wzrostem udziału cementu w betonie [K1].



Rysunek 5. Szybkość karbonatyzacji w zależności od stosunku w/c [A1]

Posługując się eurokodem PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu, dla klasy ekspozycji XC1 przy zastosowaniu stali zwykłej minimalna grubość otulenia wynosi 15 mm, zatem dla betonu o w/c = 0,6 przy głębokości karbonatyzacji po 15 latach na poziomie 15 mm rozpocznie się proces korozji zbrojenia przy zastosowaniu minimalnej grubości otulenia.

Oczywiście bezdyskusyjne jest, że warunki wbudowania i dojrzewania betonu mają istotny wpływ na szybkość przebiegu procesu karbonatyzacji, ze względu na decydujący wpływ tego etapu na zagęszczenie mieszanki betonowej.

Bardzo ważne jest, aby każdą konstrukcję monitorować w prawidłowy sposób w celu podjęcia określonych działań eliminujących ryzyko zniszczenia betonu.

Literatura

[A1] A.M. Newille, *Właściwości betonu*, Kraków 2000

[B1] Bulletin d'Information CEB no 182, 19889 r. *Durable concrete structures. CEB design guide*

[K1] Wiesław Kurdowski, *Chemia Cementu*, Kraków 2010

[K2] Thomas Kline & Jorge Costa *Corrosion - Hidden in Plain Sight Hydrocarbon Engineering*, March 2008

[M1] Mehta P. K.: „High-Performance Concrete, High-Volume fly Ash Concrete for Sustainable Development” Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology

[M2] Małolepszy J. Deja J., *Korozja stali w betonach ze spoiwa żużlowego aktywowanego związkami sodu*, Cement Wapno Gips 4-5, 1987

[P1] Portland Cement Association, *Concrete Technology* <http://www.cement.org/>

[S1] Zbigniew Ściślewski, *Trwałość konstrukcji żelbetowych*, Prace naukowe ITB, Warszawa 1995

[U1] Peter Utgenannt; Lunds Universitet.; Lund University.; *The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete*, University dissertation from Div of Building Materials LTH, Lund University. 2004

[W1] http://www.concretenetwork.com/blogs/chris_sullivan/2007/03/efflorescence-on-black-concrete.html

[W2] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Tymoloftaleina>

[W3] <http://www.understanding-cement.com/carbonation.html>

[W4] <http://www.math.uni-bremen.de/zetem/detail.php?id=4996&language=en>