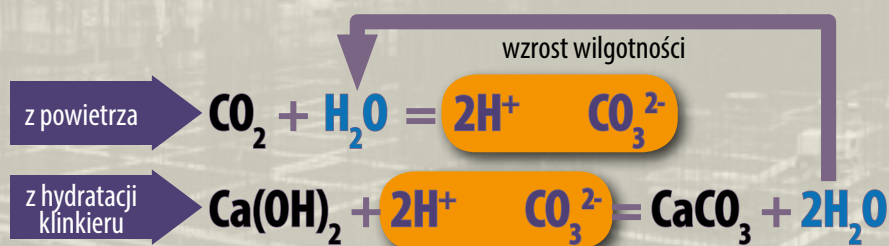


Karbonatyzacja jest jedną z głównych przyczyn niszczenia (korozji) zbrojonych elementów betonowych i stwardniałego betonu. Dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) zawarty w powietrzu reaguje z produktami hydratacji cementu. Reakcji karbonatyzacji ulega przede wszystkim wodorotlenek wapnia ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), w wyniku czego tworzy się węglan wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ). Karbonatyzacja stanowi zagrożenie dla konstrukcji betonowych, w których zastosowano stalowe zbrojenie. Poprzez obniżenie poziomu pH w okolicach zbrojenia następuje zanik warstwy pasywacyjnej na stali zbrojeniowej. Produkt reakcji (tlenek żelaza – rdza) ma większą objętość od substratów. Zwiększając swoją objętość generuje naprężenia powodujące pęknięcie betonu, a nawet rozwarstwienie betonu wzdłuż skorodowanej stali (rys. 1). Proces ten jest zależny od warunków, w jakich eksploatowany jest element betonowy, głównie stężenia  $\text{CO}_2$  i wilgotności.

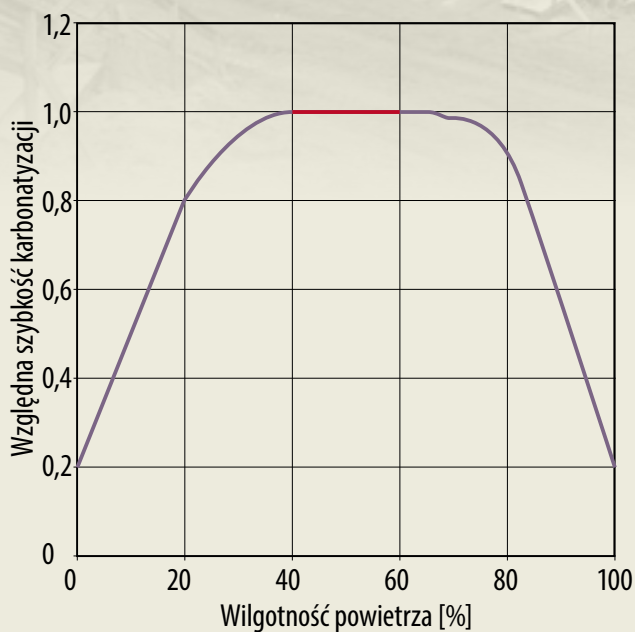


Rys. 1. Uszkodzenie elementu konstrukcyjnego w skutek karbonatyzacji

Ponieważ reakcja karbonatyzacji jest reakcją bardzo powolną, dlatego do oceny odporności betonu na działanie  $\text{CO}_2$  stosuje się metody przyspieszone. Pierwszym etapem procesu korozyjnego jest wnikanie  $\text{CO}_2$  do wnętrza betonu i rozpuszczania go w wodzie. Drugi etap to reakcja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z  $\text{CO}_2$  rozpuszczonym w wodzie. Przebieg reakcji zaprezentowano na rys. 2.



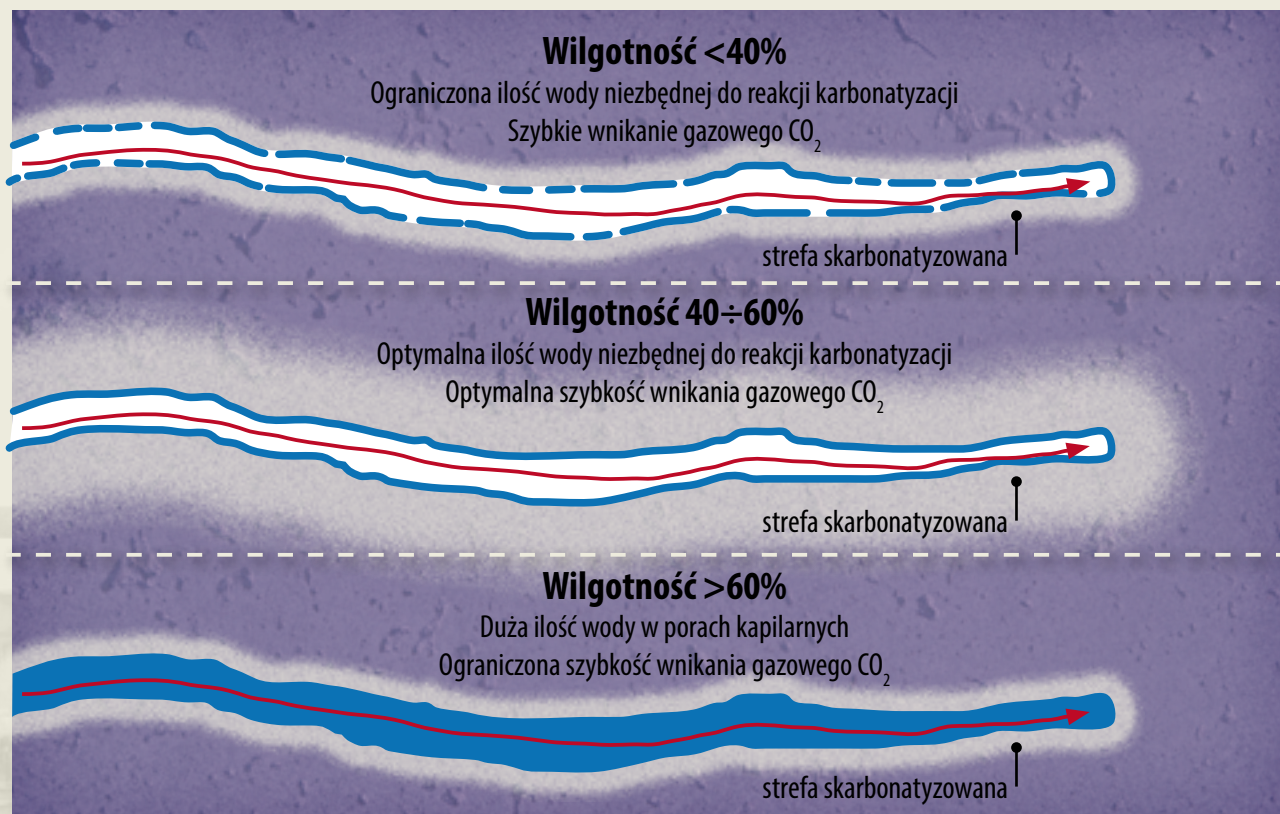
Rys. 2. Reakcje chemiczne prowadzące do karbonatyzacji betonu



Rys. 3. Względna szybkość karbonatyzacji w zależności od wilgotności powietrza

Efektom tych reakcji jest powstanie węglanu wapnia i dodatkowej ilości wody, która bierze udział w kolejnej reakcji. W ten sposób zmniejsza się ilość  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , co wpływa na lokalny spadek poziomu pH betonu. Linia brzegowa strefy o obniżonym poziomie pH nazywana jest frontem karbonatyzacji.

Przemieszczanie się frontu karbonatyzacji wynika z szybkości przebiegu reakcji chemicznych (rys. 2). Przyspieszenie karbonatyzacji można uzyskać poprzez zwiększoną dostępność czynników korozyjnych –  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . Woda i dwutlenek węgla wnikają do wnętrza betonu poprzez pory kapilarne. Mała wilgotność betonu mocno ogranicza szybkość karbonatyzacji. Z kolei przy dużej wilgotności betonu pory kapilarne są wypełnione wodą poprzez co wnikanie  $\text{CO}_2$  jest mocno ograniczone. Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań względnej szybkości karbonatyzacji w zależności od wilgotności powietrza. Szybkość karbonatyzacji jest najwyższa dla wilgotności względnej powietrza 40–60%. Schematycznie zaprezentowano to na rys. 4.



Rys. 4. Wpływ wilgotności powietrza na szybkość transportu CO<sub>2</sub>

Szybkość karbonatyzacji zależy również od stężenia CO<sub>2</sub>. Badania szybkości karbonatyzacji w zależności od stężenia CO<sub>2</sub> wykazały, że optymalne stężenie CO<sub>2</sub> wynosi 1%. Zwiększenie stężenia do poziomu 4% powoduje nieznaczne przyspieszenie karbonatyzacji. Zastosowanie bardzo wysokiego stężenia CO<sub>2</sub> zakłóca pomiar karbonatyzacji.

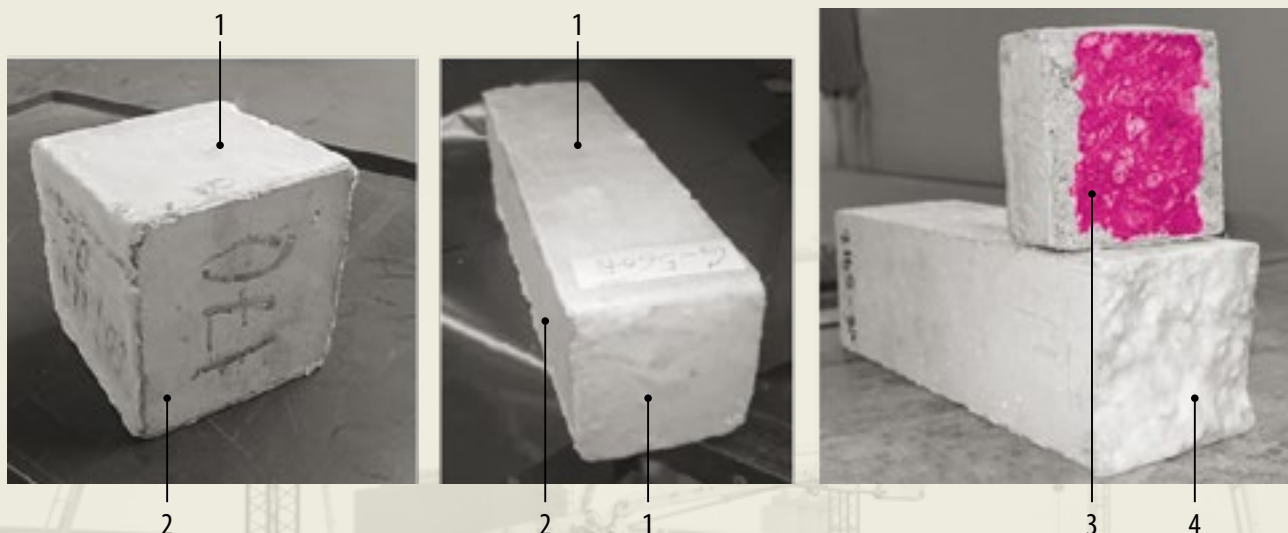
Przyspieszone badanie karbonatyzacji można wykonać na podstawie metod zawartych w:

- projekcie normy europejskiej prEN 12390-12:2010 „Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method”,
- normie PN-EN 13295 „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie odporności na karbonatyzację”,
- skandynawskiej specyfikacji technicznej NT Build 357 „Concrete, repairing materials and protective coating. Carbonation resistance”.

## BADANIE WG prEN 12390-12

Powszechnie w kraju stosuje się oznaczenie głębokości karbonatyzacji w oparciu o metodę opisaną w projekcie normy europejskiej prEN 12390-12:2010 „Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method.” Metodę tą stosuje się do określenia potencjalnej odporności betonu na karbonatyzację i nie ma ona zastosowania do pomiaru karbonatyzacji w istniejących konstrukcjach betonowych.

Oznaczenie głębokości karbonatyzacji przeprowadza się na 2 próbkach betonowych. W przypadku pomiaru w jednym wyznaczonym terminie stosuje się próbki sześciennie o wymiarze boku 100 mm. Dopuszcza się stosowanie próbek o większych wymiarach. Jeżeli planowany jest więcej niż 1 termin badania, można przygotować próbki w kształcie graniastostupa o przekroju 70x70 mm i długości przynajmniej 280 mm. Wielkość próbek należy dobrać w taki sposób, aby najmniejszy ich wymiar nie był mniejszy od 4-krotności maksymalnego wymiaru kruszywa zastosowanego w betonie. Należy także zminimalizować lub wyeliminować stosowanie środka antyadhezyjnego do form, ponieważ może wpływać na wynik badania. Próbki należy zaformować i pielęgnować przez 28 dni zgodnie z normą PN-EN 12390-2, a następnie przechowywać przez 14 dni w warunkach powietrzno-suchych (18÷25°C, wilgotność względna 50÷65 %). Po tym czasie należy, przy użyciu parafiny, zabezpieczyć górną, dolną oraz dwie boczne przeciwległe powierzchnie próbek - patrz rys. 5. Po zabezpieczeniu powierzchni próbek należy umieścić je w komorze karbonatyzacyjnej, w której stężenie CO<sub>2</sub> wynosi 4,0±0,5%, temperatura wynosi 20±2°C, a wilgotność względna 55±5%. Próbki sześciennie powinny być poddawane badaniu po 70 dniach, graniastostupowe po 56, 63 i 70 dniach, jeżeli nie ustalono inaczej.



Rys. 5. Uszczelnione próbki do badania głębokości karbonatyzacji: 1-powierzchnia pokryta parafiną, 2-powierzchnia odsłonięta, 3-przełam pokryty roztworem fenoloftaleiny, 4-przełam pokryty parafiną

Głębokość karbonatyzacji mierzy się przez nałożenie wskaźnika fenoloftaleinowego na powierzchnię świeżego przełamu próbki. Próbki sześciennie należy przełamać w połowie, prostopadle do niezabezpieczonych parafiną powierzchni. Próbki graniastosłupowe należy przełamać w taki sposób, aby uzyskać kawałki o grubości przynajmniej 50 mm, które zostaną poddane badaniu. Pozostałe części próbek graniastosłupowych należy zabezpieczyć parafiną i umieścić w komorze karbonatyzacyjnej do kolejnego terminu badania (rys. 5). Odczyt głębokości karbonatyzacji następuje po  $60 \pm 15$  min po rozpyleniu roztworu fenoloftaleiny sporządzonego z 1g fenoloftaleiny, 70 ml alkoholu etylowego i 30ml wody dejonizowanej lub destylowanej. Głębokość karbonatyzacji jest średnią głębokością zmierzoną w 5 punktach na wszystkich 4 bokach z dokładnością 1 mm (rys. 6). Najpierw oblicza się średnią głębokość z jednego boku, a następnie średnią głębokość karbonatyzacji na bokach ze wzorów:

$$d_{k1} = \frac{\Sigma(p_{1-5})}{5}$$

$$d_k = \frac{\Sigma(d_{k1-4})}{4}$$

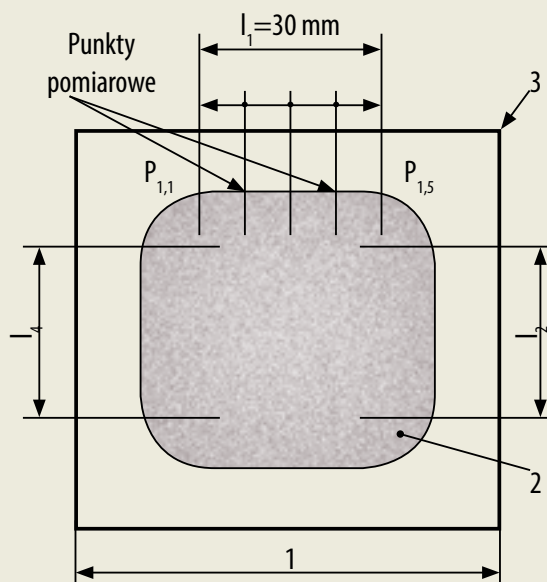
gdzie:

$d_{k1}$  – średnia głębokość karbonatyzacji na boku [mm],

$p$  – pojedynczy pomiar [mm],

$d_k$  – średnia głębokość karbonatyzacji [mm],

$d_{k1-4}$  – średnia głębokość karbonatyzacji na bokach [mm].



Rys. 6. Sposób odczytywania głębokości karbonatyzacji

## BADANIE WG PN-EN 13295

Normę PN-EN 13295 „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie odporności na karbonatyzację” stosuje się do badania odporności zaczynów, zapraw i betonów naprawczych, na które nie nakłada się powłok ochronnych. Można ją również stosować do betonów zwykłych. Metoda nie ma zastosowania do oceny odporności na obniżenie pH, które może być skutkiem działania agresji chemicznej.

Badanie przeprowadza się na 2 próbkach kompozytu (zaczynu, zaprawy, betonu), jednocześnie badając 2 próbki betonu wzorcowego typu C wykonanego wg normy PN-EN 1766:2001 „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Betony wzorcowe do badań” (zawartość cementu  $360 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0,45$ , maksymalny wymiar kruszywa do 16 mm). Stosuje się próbki prostopadłościennie o różnej wielkości. W przypadku zapraw zalecane są o wymiarach  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ . W przypadku betonów o maksymalnym wymiarze kruszywa większym niż 10 mm minimalne wymiary próbki powinny wynosić  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ . Identyczne próbki przygotowuje się z betonu wzorcowego. Po 28 dniach pielęgnowania w wodzie (temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), belki należy pielęgnować w warunkach powietrzno-suchych ( $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotność  $60 \pm 10\%$ ) przynajmniej przez 14 dni, aż do momentu, kiedy zmiana masy nie będzie większa niż 0,2% na dzień. Następnie belki umieszcza się w komorze karbonatyzacyjnej (stężenie  $\text{CO}_2$  1%, temp.  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilg. powietrza  $60 \pm 10\%$ ).

Głębokość karbonatyzacji mierzy się przez nałożenie wskaźnika fenoloftaleinowego na powierzchnię świeżego przełamu próbki. Odczyt głębokości karbonatyzacji następuje po  $60 \pm 5 \text{ min}$  po rozpyleniu. Stosowany wskaźnik to 1% roztwór fenoloftaleiny w 70 ml alkoholu etylowego i rozcieńczonego wodą (dejonizowaną lub destylowaną) do 100 ml. Pomiar wykonuje się przed umieszczeniem betonu w komorze i po 56 dniach przebywania w komorze. Ta sama próbka może być stosowana wielokrotnie do pomiaru postępu karbonatyzacji w czasie. Do każdego pomiaru należy pobrać, oderwany przy pomocy dłuta, kawałek próbki o grubości przynajmniej 15 mm. Procedura obliczania głębokości karbonatyzacji jest identyczna jak w europejskim projekcie normy prEN 12390-12:2010.

## BADANIE WG NT BUILD 357

Kolejną metodą jest skandynawski test NT Build 357 „Concrete, repairing materials and protective coating. Carbonation resistance” (Beton, materiały naprawcze i powłoki ochronne. Odporność na karbonatyzację), który również przeznaczony jest do badania materiałów naprawczych konstrukcji betonowych. Oznaczenie głębokości karbonatyzacji przeprowadza się na 2–3 próbkach (zaprawy, betonu), w porównaniu do betonu wzorcowego ( $300\text{--}350 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0,6$ , opad stożka  $120 \pm 20 \text{ mm}$ ). Dla betonu badanie przeprowadza się na próbkach prostopadłościennych o wymiarach  $100 \times 100 \times 300\text{--}500 \text{ mm}$ . Dla zapraw formuje się belki  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ . Po rozformowaniu belki pielęgnuje się w wodzie do 14 dnia, a następnie przetrzymuje w warunkach powietrzno-suchych (temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotność  $60 \pm 5\%$ ) przez przynajmniej 14 dni. Następnie belki umieszcza się w komorze, wystawiając je na działanie atmosfery zawierającej 3%  $\text{CO}_2$ , przy wilgotności  $60 \pm 5\%$ .

Głębokość karbonatyzacji mierzona jest analogicznie jak w normie PN-EN 13295, z tym że stosuje się roztwór fenoloftaleiny o innym stężeniu (1g fenoloftaleiny rozpuszczony w 500 ml alkoholu etylowego i 500 ml wody destylowanej lub dejonizowanej). Pomiar głębokości karbonatyzacji powinno się odczytywać przynajmniej raz w miesiącu. W normie nie jest określony czas końca badania. Jako wynik przedstawia się średnią głębokość karbonatyzacji w zależności od czasu ekspozycji. Procedura obliczania głębokości karbonatyzacji jest identyczna jak w europejskim projekcie normy prEN 12390-12:2010.