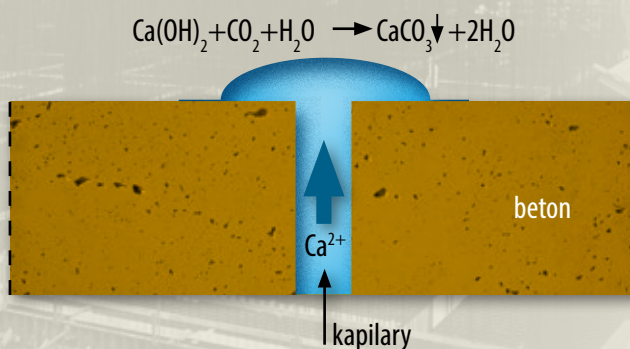


Wykwity węglanowe, nazywane także wapiennymi, powstają w wyniku karbonatyzacji wodorotlenku wapnia – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, czyli portlandyt lub potocznie „wapno”, jest jednym z produktów hydratacji cementu (faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego). Wykwity węglanowe powstają, gdy transportowany systemem porów kapilarnych wodorotlenek wapnia dostanie się na powierzchnię elementu betonowego (rys.1).



Rys. 1. Wykwity węglanowe na powierzchni kostki brukowej

W pierwszym etapie, jako produkt reakcji karbonatyzacji wodorotlenku wapnia, powstaje trudno rozpuszczalny węglan wapnia (klacyt) CaCO_3 (rys. 2). Na szybkość i intensywność karbonatyzacji wpływ ma zarówno stężenie CO_2 , jak i wilgotność otoczenia. W betonie nasyconym wodą proces karbonatyzacji praktycznie nie występuje, zaś w przypadku betonu wysuszonego, karbonatyzacja zachodzi bardzo powoli. Najlepsze warunki do przebiegu karbonatyzacji zachodzą wtedy, gdy na powierzchni kapilar występuje warstewka wody, w której szybko dyfundujący CO_2 rozpuszcza się i reaguje z jonami wapnia. Maksymalna szybkość karbonatyzacji występuje w zakresie od 50% do 70% wilgotności względnej powietrza.



Rys. 2. Schemat przebiegu reakcji karbonatyzacji – powstanie wykwitów wapiennych pierwotnych

Powstawanie wykwitów nie jest efektem złej jakości cementu lub betonu. Obecność wykwitów węglanowych, w szczególności na galerii betonowej, głównie kostce brukowej, wpływa na estetykę wyrobu. Wymagania zawarte w normach i aprobaty technicznych nie definiują wykwitu węglanowego jako kryterium oceny jakości wyrobu. Zapisy zawarte w normie PN-EN 1338 „Betonowa kostka brukowa. Wymagania” stanowią, że „ewentualne wykwity nie mają szkodliwego wpływu na właściwości użytkowe kostek brukowych i nie są uważane za istotne”. Nie oznacza to jednak, że nie należy podejmować działań technologicznych w kierunku ograniczania występowania wykwitów węglanowych na powierzchni elementów betonowych.

Problem wykwitów węglanowych najbardziej odczuwalny jest dla producentów kostki brukowej. W zależności od okresu powstania, wyróżnia się trzy rodzaje wykwitów węglanowych – tabela 1.

Tabela 1. Rodzaje wykwitów węglanowych

Rodzaj	Okres powstania	Czynnik decydujący
Pierwotne	w czasie dojrzewania kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • szybkość reakcji cementu • warunki w komorze dojrzewania • szczelność betonu (w stopniu ograniczonym)
Wtórne	w trakcie składowania i po ułożeniu kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • szczelność betonu • szybkość reakcji cementu (w niewielkim stopniu)
Trzeciorzędne	po ułożeniu kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • sposób ułożenia wyrobów • jakość wyrobów • sposób użytkowania nawierzchni

Prawidłowe rozpoznanie rodzaju wykwitów węglanowych, stanowi podstawę do rozpoczęcia działań w kierunku mającym na celu jego usunięcie lub ograniczenie występowania.

Wykwit węglanowy pierwotny powstają, gdy woda skrapla się na powierzchni np. dojrzewających wyrobów betonowych, w wyniku czego dochodzi do kontaktu wody na powierzchni z wodą kapilarną z dużą zawartością wapnia. Wodorotlenek wapnia przenika do wody powierzchniowej, zaś przy parowaniu wody krystalizuje w górnej powierzchni wyrobu betonowego i ulega karbonatacji. Schemat powstania wykwitów pierwotnych przedstawiono na rys. 3.

Wykwit węglanowy wtórny powstają w późniejszym okresie dojrzewania betonu, gdy w strukturze betonu ukształtował się system porów kapilarnych o dużej średnicy. Schemat przebiegu reakcji powstawania wykwitów wtórnych jest analogiczny jak dla wykwitów pierwotnych. Poprzez system porów kapilarnych transportowany jest, na wilgotną powierzchnię betonu, wodorotlenek wapnia (Ca(OH)_2), który następnie ulega karbonatacji. Decydującym czynnikiem ograniczającym powstawanie wykwitów węglanowych wtórnych jest szczelność matrycy betonowej.

Wykwit węglanowy trzeciorzędny powstają w trakcie użytkowania wyrobów, zasadniczo o możliwości ich wystąpienia decyduje jakość wyrobu, sposób ułożenia i użytkowania. Układając nawierzchnię z betonowej kostki brukowej należy zwrócić uwagę na przepuszczalność warstw podbudowy. Niewystarczająca przepuszczalność podłoża, prowadzi do stałego nasiąkania wyrobów prefabrykowanych wodą, co w efekcie skutkuje transportem wodorotlenku wapnia na powierzchnię betonu i widocznym wykwitem.

Sposób użytkowania w dużym stopniu wpływa na możliwość powstania wykwitów węglanowych na powierzchni betonu. Warunki w jakich użytkowany jest beton, mogą prowadzić na przykład do powstania mikrorys. Zarysowanie struktury wpływa na przyspieszenie transportu wody w głąb betonu, a tym samym wylugowywania wodorotlenku wapnia.

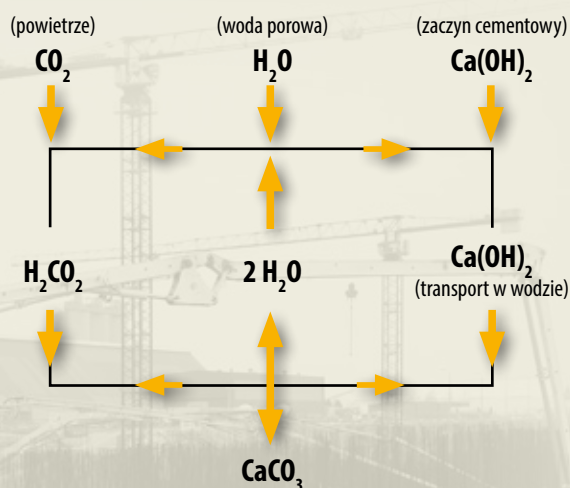
Działania ograniczające powstanie oraz intensywność wykwitów węglanowych można podzielić na trzy obszary - rys. 4.

Działania na etapie projektowania składu mieszanki betonowej:

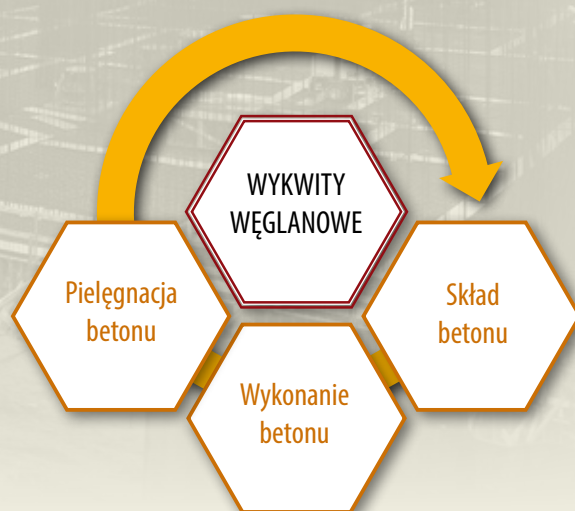
- stosowanie cementów zawierających nieklinkierowe składniki główne, np. granulowany żużel wielkopiecowy – CEM II i CEM III,
- optymalizacja (obniżenie) współczynnika w/c ,
- dobór kruszywa zapewniający optymalną krzywą uziarnienia,
- stosowanie dodatków do betonu,
- stosowanie domieszek hydrofobizujących.

Działania na etapie wykonawstwa - układanie betonu:

- prawidłowe – szczelne wykonanie deskowania,
- naniesienie środka antyadhezyjnego na poszycie deskowania lub formy,
- właściwe zagęszczanie mieszanki betonowej.



Rys. 3. Schemat przebiegu reakcji powstania wykwitów



Rys. 4. Obszary działań dla ograniczenia powstania wykwitów węglanowych

Działania na etapie pielęgnacji:

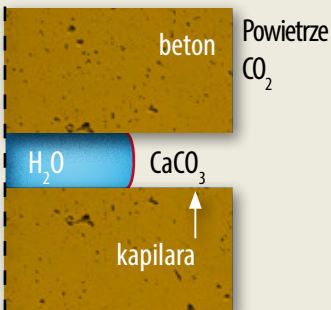
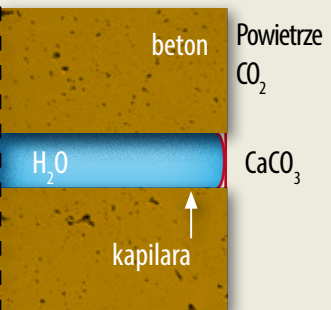
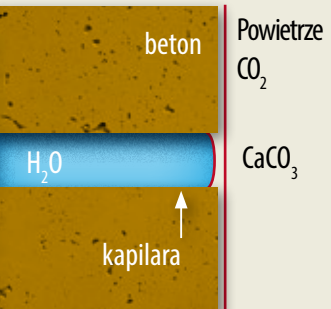
- zapewnienie optymalnych warunków dojrzewania (temperatura i wilgotność powietrza),
- zapewnienie optymalnego czasu trwania pielęgnacji,
- zapewnienie prawidłowych warunków składowania i magazynowania wyrobów.

Występowanie wykwitów węglanowych na betonowych wyrobach wibroprasowanych jest problemem natury estetycznej. Z tego względu optymalizacja produkcji kostki brukowej powinna być także prowadzona w kierunku ograniczania pojawiania się wykwitów węglanowych. Uwagi dotyczące produkcji kostki brukowej:

- widoczny wykwit pierwotny powstaje w komorze dojrzewalni tylko w przypadku, gdy pory kapilarne wyrobu betonowego, podczas pierwszej fazy dojrzewania, wypełnione są wodą; odpowiednie sterowanie temperaturą i wilgotnością powietrza przy sezonowaniu wyrobów – utrzymywanie suchej powierzchni betonu (istnieje ryzyko zbytniego przesuszenia wierzchniej warstwy kostki brukowej, co utrudni hydratację cementu), może spowodować powstanie tzw. niewidocznych wykwitów węglanowych – powstaną one tuż pod powierzchnią wyrobu,
- warunki sezonowania można optymalizować poprzez zastosowanie technologii VAPOR – naporzanie niskoprężne z przyspieszonym procesem karbonatyzacji betonu (w efekcie wyrób po 24 godzinach dojrzewania osiąga wytrzymałość na poziomie 70% wytrzymałości końcowej, podwyższone stężenie CO_2 powoduje przyspieszenie procesu przejścia wodorotlenku wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w węglan wapnia CaCO_3 , czego rezultatem jest zwiększenie szczelności powierzchni betonu, poprzez zmniejszenie wymiaru i zamknięcie kapilar),
- istotnym czynnikiem jest dobór cementu o szybkiej dynamice narastania wytrzymałości – zapewnia wysoki stopień zhydratyzowania cementu w wierzchniej warstwie,
- w celu ograniczania ryzyka powstania wykwitów węglanowych wtórnych, zalecane jest stosowanie domieszki hydrofobizującej,
- stosowanie tzw. kapturowania, czyli przykrywania ułożonych na palecie wyrobów gotowych, folią PE, pomaga ograniczyć ryzyko powstania wykwitów (skuteczność zależy jednak od tego czy pakowane wyroby są mokre czy suche, w przypadku pakowania wyrobów mokrych występuje możliwość powstania wykwitów węglanowych).

W produkcji betonowych wyrobów wibroprasowanych, kluczowy jest nadzór nad prawidłową wilgotnością betonu w wierzchniej warstwie wyrobu. Uwzględnienie wilgotności i nasiąkliwości kruszyw oraz prawidłowy dobór cementu i domieszek chemicznych (kompatybilność) jest decydujące dla zapewnienia optymalnego efektywnego współczynnika w/c (tabela 2). Wpływ wilgotności betonu w warstwie wierzchniej na powstawanie wykwitów przedstawiono na tabeli 2.

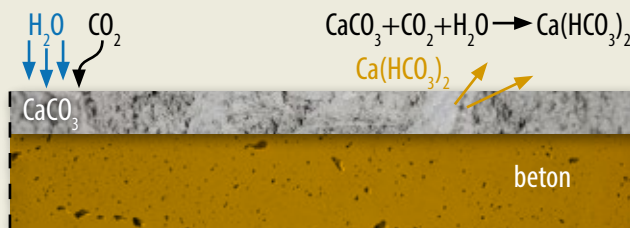
Tabela 2. Wpływ współczynnika w/c przy produkcji kostki brukowej na powstawanie wykwitów.

	Efektywny współczynnik w/c		
	Niski	Optymalny	Wysoki
Wykwity pierwotne	niewidoczny	słabe	silne
Wykwity wtórne	niewidoczny	typowe dla materiałów budowlanych	silne
Miejsce powstania wykwitów			

W okresie użytkowania, trudno rozpuszczalny węglan wapnia CaCO_3 w wyniku dalszej reakcji z CO_2 zawartym w powietrzu, przechodzi w łatwo rozpuszczalny w wodzie kwaśny węglan wapnia (rys. 5), który może być następnie spłukiwany przez deszcz oraz ścierany przy użytkowaniu betonu. Proces ten przyczynia się do zanikania wykwitów węglanowych na powierzchni elementów betonowych.

W przypadku bardzo rozległych wykwitów można podjąć działania w kierunku ich usunięcia. Metody usuwania wykwitów węglanowych można podzielić na dwie grupy (tabela 3):

- mechaniczne – polegające na usunięciu wykwitów przez piaskowanie lub szlifowanie powierzchni,
- chemiczne – polegające na usunięciu wykwitów przez ługowanie powierzchni betonu niskoprocentowym roztworem kwasów nieorganicznych i organicznych.



Rys. 5. Schemat przebiegu reakcji karbonatyzacji w okresie eksploatacji

Tabela 3. Metody usuwania wykwitów węglanowych

Metoda	Uwagi
Mechaniczna	<ul style="list-style-type: none"> • metoda pracochłonna, wymagająca odpowiedniego sprzętu oraz materiałów, np. hydropiaskowanie (ciśnienie wody nie powinno przekraczać 3 bar, średnica ziaren wykorzystwanego piasku powinna być jak najmniejsza)
Chemiczna	<ul style="list-style-type: none"> • powoduje otwarcie porów powietrznych, co może doprowadzić do powstania nowych wykwitów węglanowych, • powierzchnia betonu staje się bardziej szorstka – zdolność powierzchni do oczyszczania ulega pogorszeniu