

Kiedy stosujemy cementy odporne na siarczany (SR, HSR) oraz niskoalkaliczne (NA) w składzie betonu

1. Wprowadzenie

Właściwe stosowanie cementów o właściwościach specjalnych - które oprócz podstawowych normowych właściwości zawartych w normie na cementy powszechnego użytku PN-EN 197-1[1] spełniają dodatkowo wymagania dotyczące składu, ułatwiającego projektowanie i wykonywanie konstrukcji betonowych o wysokiej trwałości w warunkach oddziaływań destrukcyjnych (głównie różnego rodzaju agresje chemiczne) – pozwala uniknąć wad betonu, a tym samym przyczynić się do zwiększenia trwałości konstrukcji betonowej.

W niniejszej pracy zwrócono uwagę na właściwe stosowanie w składzie betonów cementów odpornych na siarczany (SR, HSR) i o niskiej zawartości efektywnych alkaliów oznaczonych symbolem NA. Wymagania dla omawianych cementów zawarte są w normie PN-EN 197-1:2013 [1] (cementy odporne na siarczany SR) i PN-EN 19707:2013 [2] (cementy odporne na siarczany HSR i cementy niskoalkaliczne NA).

2. Cementy odporne na siarczany (SR, HSR) w składzie betonu

Cementy odporne na siarczany (SR, HSR) są stosowane w przypadku korozji siarczanowej, której mechanizm jest bardzo złożony. Najczęściej korozja siarczanowa występuje, kiedy wody gruntowe lub grunt zawierają siarczany w mniejszym lub większym stężeniu. Stanowią one środowisko korozyjne dla stwardniałego zaczynu i po wnikięciu do wnętrza reagują ze jego składnikami, głównie uwodnionymi glinianami wapnia i wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 , z utworzeniem ettringitu i/lub gipsu, faz, których krystalizacja odbywa się ze zwiększeniem objętości (ekspansją), powodując szkodliwą destrukcję betonu [3÷5]. Ten rodzaj korozji, według normy PN-EN 206:2016 [6], zaliczany jest do agresji chemicznej i opisany klasami ekspozycji (XA, XA1 i XA2) zawartymi w tabeli 1, gdzie także podano elementy i konstrukcje budowlane najczęściej narażone na ten rodzaj korozji. Wartości graniczne

dotyczące zawartości składników chemicznych dla poszczególnych klas ekspozycji podano w tabeli 2. Z zapisów tabeli 1 wynika, że w przypadku środowiska umiarkowanego (klasa XA2) i silnie agresywnego (klasa XA3) należy stosować cementy odporne na siarczany SR i HSR. Autor zwraca uwagę, iż w tabeli 2 nie ma żadnych zapisów dotyczących korozji chlorkowej. Natomiast bardzo często specyfikujący, zwłaszcza w przypadku obiektów w inżynierii komunikacyjnej (mostów, wiaduktów) i betonowych nawierzchni drogowych, zalecają stosowanie w klasie ekspozycji XD3 (korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej, np. ze środków odladzających) cementu portlandzkiego CEM I odpornego na siarczany SR3 lub SR5. Niestety, nie uzasadniają merytorycznie wyboru cementu odpornego na siarczany SR do betonu narażonego na działanie chlorków (środki odladzające do zimowego utrzymania dróg to głównie NaCl i CaCl_2).

W przypadku korozji chlorkowej istotnym czynnikiem jest ograniczenie migracji jonów chlorkowych w głąb struktury stwardniałego betonu i niedopuszczenie do korozji stali zbrojeniowej. Pierwszą podstawową zasadą jest wykonanie betonu bardzo szczelnego. Można powiedzieć, iż w przypadku każdego rodzaju agresji chemicznej szczelność betonu jest podstawą jego trwałości. Dobór właściwego cementu to dodatkowe zabezpieczenie strukturalne. W uzyskaniu tego celu pomocne są także dodatki typu II do betonu, np. Norwegowie stosowali pył krzemionkowy w składzie betonu przeznaczanego na wykonanie pali platform wiertniczych narażonych na agresywne działanie wody morskiej. Także stosowanie popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopieczowego w składzie cementu (betonu) znacznie ogranicza szybkość dyfuzji jonów chlorkowych w strukturę stwardniałego betonu [7]. Większa niż 5-procentowa zawartość glinianu trójwapniowego w cemencie portlandzkim CEM I nie jest przeszkodą, ponieważ glinian trójwapniowy wiąże jony chlorkowe w sól Friedla

Tabela 1. Agresja chemiczna według PN-EN 206:2016

Oznaczenie klasy ekspozycji	Opis środowiska Przykłady występowania klas ekspozycji	Wartości graniczne składu betonu			
		Maks. w/c ¹⁾	Min. zawartość cementu ¹⁾ , kg	Min. klasa wytrzymałości betonu	Inne wymagania
Agresja chemiczna XA²⁾					
XA1	Słaba agresja chemiczna Fundamenty narażone na wpływ wód gruntowych Podpory mostowe w nurtach rzek	0,55	300	C30/37	–
XA2	Umiarkowana agresja chemiczna Rury i studnie kanalizacyjne, nawierzchnie stacji paliw	0,50	320	C30/37	Cementy odporne na siarczany SR/HSR ³⁾
XA3	Silna agresja chemiczna Kolektory sieci kanalizacyjnej, osadniki w oczyszczalniach ścieków	0,45	360	C35/45	

¹⁾ W przypadku stosowania koncepcji współczynnika k maksymalny współczynnik w/c oraz minimalną zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z PN-EN 206 p 5.2.5.2

²⁾ Środowisko agresywne chemicznie należy kwalifikować do odpowiedniej klasy ekspozycji (XA1 do XA3) na podstawie wartości granicznych podanych w tabeli 2.

³⁾ W przypadku, gdy zawartość siarczanów (SO_4^{2-}) w środowisku pracy betonu wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy zastosować cement odporny na siarczany (SR) zgodny z EN 197-1 lub cement odporny na siarczany (HSR) zgodny z normą PN-B-19707.

i ogranicza dalszą penetrację jonów chlorkowych w głąb struktury stwardniałego betonu. Powstająca sól Friedla wytrąca się w porach betonu i dodatkowo zmniejsza porowatość stwardniałego zaczynu, znacznie utrudniając dyfuzję jonów chlorkowych w głąb struktury betonu [8].

Dlatego też w klasach ekspozycji XD-XD3 należy stosować cementy portlandzkie CEM I bez limitowania w nich zawartości glinianu trójwapiowego C3A, którego zawartość poniżej 5% [cementy CEM SR3 (SR5)] zalecana jest dla cementów odpornych na siarczany i zalecana do stosowania w klasie ekspozycji XA2 i XA3. Niestety, zapisy w tym zakresie w OST [9] są błędne dla klas ekspozycji XD3 i XS3 (tabela 3).

W przypadku wody morskiej, w klasie ekspozycji XS3 – korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej, bogatej zarówno w chlorki jak i siarczany, zalecane jest stosowanie cementów hutniczych CEM III/A,B o wysokiej zawartości żużla, które są zarówno odporne na siarczany (SR, HSR) [1, 2], jak i tworzą szczelną mikrostrukturę stwardniałego zaczynu znacznie utrudniającą dyfuzję jonów chlorkowych [7].

3. Cement niskoalkaliczny NA w składzie betonu

Niektóre formy krzemionki (opal, chalcedon, trydimit, kwarc w stanie naprężeń) będące składnikami kruszyw reagują z alkali, tworząc żel alkaliczno-krzemionkowy na ziarnach kruszywa. W odpowiednich warunkach wilgotności betonu i temperatury powstaje żel krzemianu sodowo-potasowego, który absorbuje wodę, zwiększając objętość i wywołując destrukcyjne naprężenia [3,4].

Najczęściej na korozję alkaliczną narażone są mosty (przyczółki, filary, przęsta), nawierzchnie betonowe (autostrady, pasy startowe na lotniskach, parkingi) oraz zbiorniki wodne (tamy, oczyszczalnie ścieków), tj. elementy narażone na ciągłe lub zmienne oddziaływanie wilgoci.

Przebieg reakcji alkalia-kruszywo jest stosunkowo wolny, a jej negatywne efekty widoczne są dopiero po kilku, a nawet kilkunastu latach (rys. 1) [10]. Szybkość przebiegu tej reakcji zależy od wielu czynników, do których można zaliczyć m.in.:

- ilość reaktywnej krzemionki i jej rozproszenie w masie betonu (wpływ odczynu pH na rozpuszczalność reaktywnej krzemionki z kruszyw reaktywnych pokazano na rys. 2) [11]
- stężenie jonów sodu (Na+) i potasu (K+) w fazie ciekłej w porach betonu
- wilgotność (powstanie żelu krzemianu sodowo-potasowego nie wiąże się jeszcze z procesami destrukcyjnymi, dopiero absorpcja wody prowadzi do pęcznienia i powstawania spękań).



Tabela 2. Wartości graniczne dla klas ekspozycji dotyczących agresji chemicznej XA

Właściwość chemiczna	Metoda badawcza	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 i ≤600	> 600 i ≤3000	> 3000 i ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 i ≥5,5	< 5,5 i ≥4,5	< 4,5 i ≥4,0
CO ₂ mg/l agresywne	prEN 13577	≥15 i ≤40	> 40 i ≤100	> 100 aż do nasycenia
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 lub ISO 7150-2	≥15 i ≤30	> 30 i ≤60	> 60 i ≤100
Mg2+ mg/l	ISO 7980	≥300 i ≤1000	> 1000 i ≤3000	> 3000 aż do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ mg/l ¹⁾ całkowite	EN 196-2 ²⁾	≥200 i ≤3000 ³⁾	> 3000 i ≤12000 ³⁾	> 12000 i ≤24000
Kwasowość ml/kg	prEN 16502	> 200 Baumann Gully	nie spotykane w praktyce	

¹⁾ Grunty gliniaste o przepuszczalności poniżej 10-5 m/s mogą być przesunięte do niższej klasy.

²⁾ Metoda badawcza poleca ekstrakcję SO₄²⁻ kwasem solnym, alternatywnie można wykonywać to wodą, jeżeli są odpowiednie doświadczenia w rejonie, w którym beton jest stosowany.

³⁾ Granicę 3000 mg/kg należy obniżyć do 2000 mg/kg, gdy jest niebezpieczeństwo kumulowania się jonów siarczanowych w betonie w wyniku cyklicznego schnięcia i nawilżania lub podciągania kapilarnego

Tabela 3. Wymagania OST odnośnie rodzaju cementu dla betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim [9]

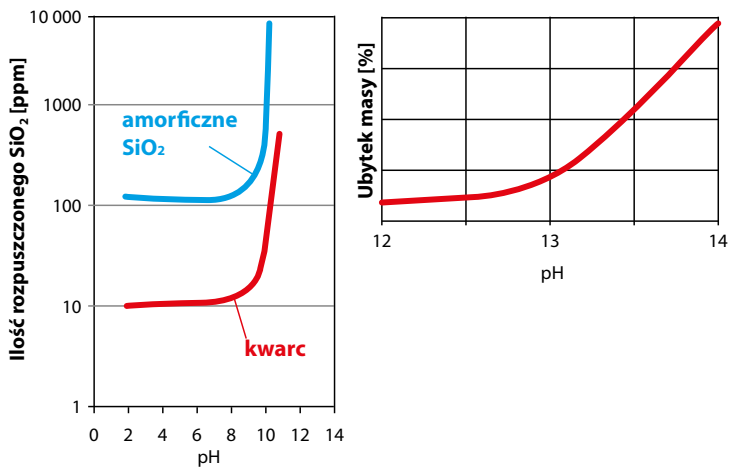
Rodzaj betonu	Wymagania odnośnie cementu
Beton konstrukcyjny	Cement portlandzki CEM I o całkowitej zawartości alkaliów Na ₂ O _{eq} wg PN-EN 196-2 do 0,8% i początku wiązania wg PN-EN 196-3 ≥120 minut
	Cement portlandzki żużlowy CEM II/A-S o całkowitej zawartości alkaliów Na ₂ O _{eq} według PN-EN 196-2 ≤0,8%
	Cement portlandzki żużlowy CEM II/B-S o całkowitej zawartości alkaliów Na ₂ O _{eq} wg PN-EN 196-2 ≤0,9%
Beton konstrukcyjny sprężony	Powinien być stosowany cement portlandzki CEM I
Beton konstrukcyjny masywny	Zaleca się stosowanie cementów takich jak dla betonu konstrukcyjnego lecz o niskim ciepłe hydratacji LH. Dopuszcza się również stosowanie cementu hutniczego CEM III za wyjątkiem klasy ekspozycji XF4
Beton konstrukcyjny w klasach ekspozycji XA2, XA3, XD3 i XS3	Cement portlandzki CEM I odporny na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub cement hutniczy CEM III/A HSR wg PN-B-19707

Dopuszcza się, w razie potrzeby, zastosowanie cementów o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R). Do betonu klasy wytrzymałości na ściskanie wyższej niż C30/37 powinien być stosowany cement klasy nie niższej niż 42,5

Efektom jest zniszczenie struktury betonu, a tym samym obniżenie trwałości obiektu budowlanego. Ekspansja betonu może być również wynikiem reakcji pomiędzy alkali a pewnymi rodzajami kruszyw węglanowych. Do skał podatnych na reakcję alkalia-węglany należy zaliczyć zdolomityzowane wapienie z domieszkami minerałów ilastych o bardzo drobnoziarnistej teksturze, które zawierają kryształy dolomitu rozproszone wśród minerałów ilastych oraz kalcytu.



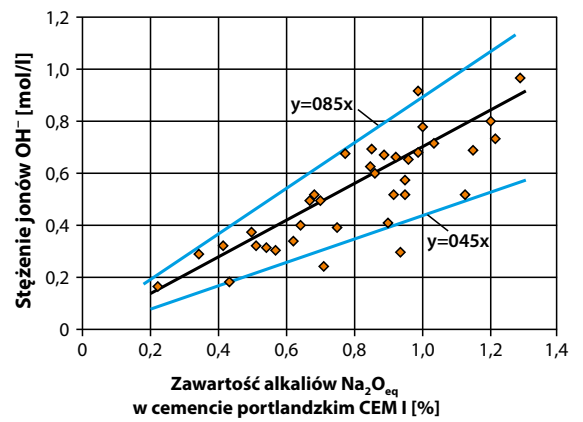
Rys. 1. Korozja alkaliczna kruszywa – przykłady destrukcji betonu [10]



Rys. 2. Wpływ odczynu pH na rozpuszczalność reaktywnej krzemionki [11]

Do najczęściej stosowanych metod zapobiegania reaktywności alkalicznej [3,4,11 ÷ 14] należy zaliczyć:

- stosowanie kruszyw niereaktywnych (nie opracowano do tej pory jednolitej metodyki badań i kryteriów oceny potencjalnej reaktywności kruszyw; przykładem mogą być zasady postępowania w wytycznych niemieckich [12] czy RILEM [13])
- ograniczenie wilgotności w betonie (trudne do spełnienia; wilgotność na poziomie 80% - 85% uznawana jest za minimalną do przebiegu reakcji)
- stosowanie domieszek chemicznych, np. zawierających związki litu [11]
- ograniczanie zawartości aktywnych alkaliów w porach betonu, np. poprzez stosowanie cementów CEM II ÷ CEM V [14], zawierających granulowany żużel wielkopiecowy i/lub popioły lotne krzemionkowe
- odpowiedni dobór rodzaju cementu i jego ilości. Alkalia (jony Na^+ i K^+) w cieczy porowej mogą pochodzić z cementu, wody zarobowej, stosowanych dodatków mineralnych i domieszek chemicznych, kruszywa oraz środków stosowanych w trakcie zimowego utrzymania dróg (najczęściej jest to sól kamienna NaCl).

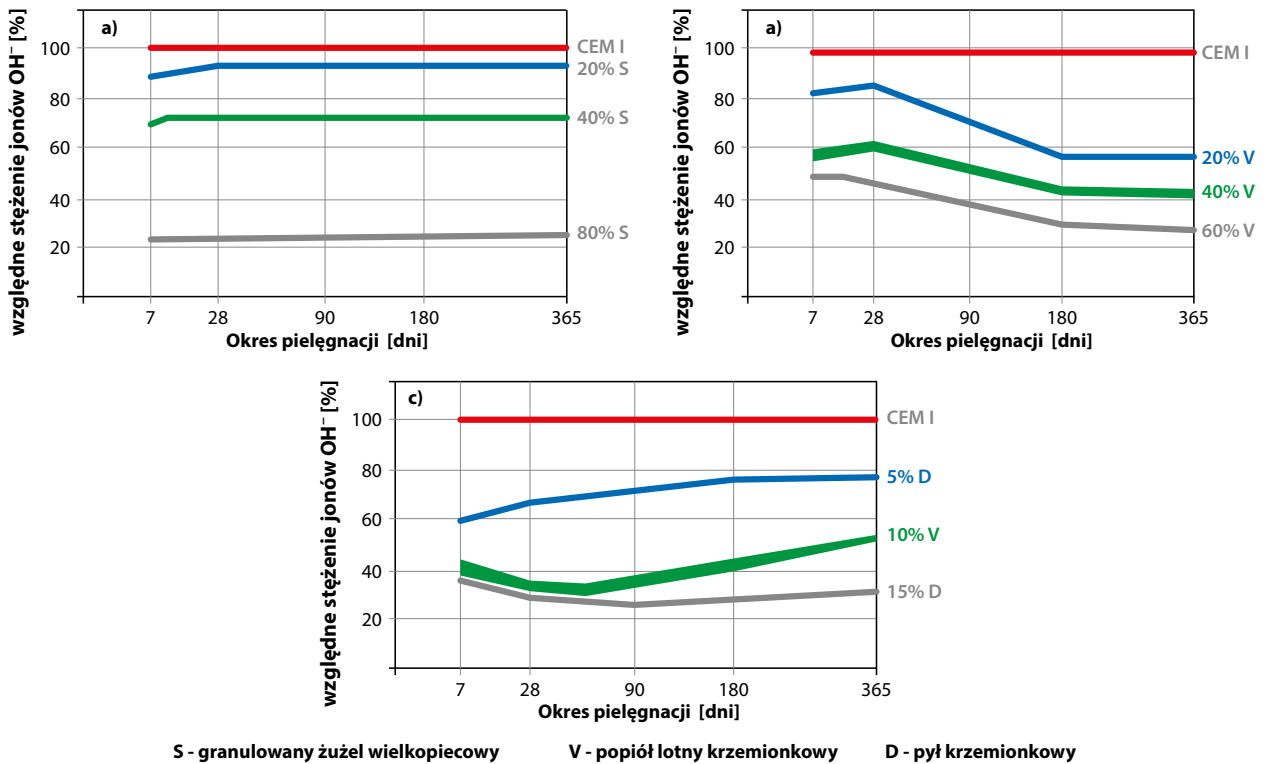


Rys. 3. Zawartość alkaliów w cemencie a stężenie jonów OH^- w roztworze [19]

Jednym ze sposobów ograniczenia skutków reaktywności alkalicznej kruszyw jest stosowanie cementów specjalnych, tzw. niskoalkalicznych (NA) – cementów powszechnego użytku, spełniających dodatkowo wymagania dotyczące zawartości alkaliów, umożliwiającymi projektowanie i wykonywanie konstrukcji odpornych na uszkodzenia w wyniku korozyjnego oddziaływania alkaliów aktywnych w betonie [2]. Norma PN-B-19707 [2] podaje wymagania odnośnie składu tych cementów oraz maksymalnej zawartości alkaliów całkowitych (nie mylić z alkaliami aktywnymi) w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (tabela 4), gdzie podano także zawartość alkaliów aktywnych oznaczonych według normy ASTM C 114-04 [15]. Bardzo często specyfikujący nie rozróżnia tych dwóch terminów – całkowita zawartość alkaliów i zawartość alkaliów aktywnych, czyli potencjalnie biorących udział w reakcji z aktywnymi składnikami kruszyw. I tak np. cement hutniczy niskoalkaliczny CEM III/B NA może zawierać do 2% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, ale zawartość alkaliów ak-

Tabela 4. Wymagania dotyczące cementów specjalnych niskoalkalicznych NA [2] oraz zawartość alkaliów aktywnych w cementach oznaczona wg [15]

Rodzaj cementu niskoalkalicznego NA	Wymagania		Alkalia aktywne $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [% masy]
	Udział nieklinkierowych składników głównych cementu [% masy]	Całkowita zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [% masy]	
CEM I CEM II/A-LL	brak wymagań	$\leq 0,60\%$	$0,30 \pm 0,47$
CEM II/A-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego V $\geq 14\%$	$\leq 1,20\%$	0,51
CEM II/A-S	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 14\%$	$\leq 0,70\%$	0,48
CEM II/A-M (S-V)	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\geq 14\%$	$\leq 1,20\%$	0,47
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego V $\geq 25\%$	$\leq 1,50\%$	0,52
CEM II/B-S	brak wymagań	$\leq 0,80\%$	0,48
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego V $\geq 20\%$	$\leq 1,30\%$	0,51
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 49\%$	$\leq 0,95\%$	0,28
	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 50\%$	$\leq 1,10\%$	0,34
CEM III/B CEM III/C	brak wymagań	$\leq 2,00\%$	$0,18 \pm 0,25$
CEM IV/A (V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego V $\geq 25\%$	$\leq 1,50\%$	0,48
CEM IV/B (V)	brak wymagań	$\leq 2,00\%$	0,36
CEM V/A (S-V)	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\geq 49\%$	$\leq 1,60\%$	0,28
	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\geq 50\%$	$\leq 2,00\%$	0,16
CEM V/B (S-V)	brak wymagań	$\leq 2,00\%$	$0,16 \pm 0,21$



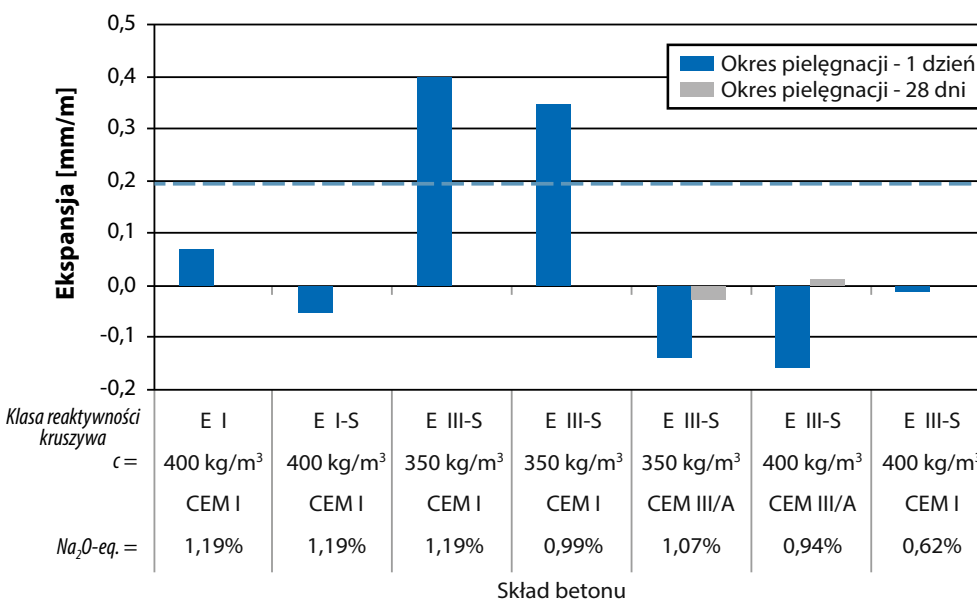
S - granulowany żużel wielkopiecowy V - popiół lotny krzemionkowy D - pył krzemionkowy

tywnych z tego rodzaju cementu będzie bardzo niska, zawierając się w przedziale $0,18 \div 0,25\%$ (tabela 4).

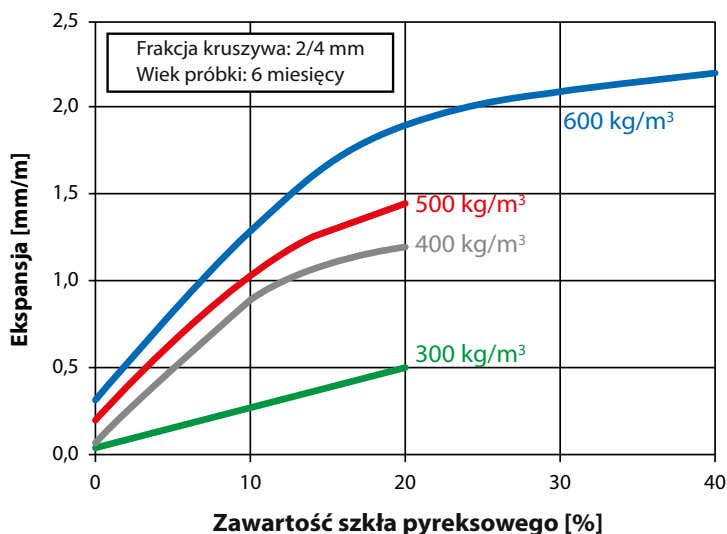
Analizując i oceniając zawartość alkaliów aktywnych w poszczególnych rodzajach cementów (tabela 4), wyraźnie widzimy, że stosowanie w składzie cementu innych niż klinkier portlandzki składników głównych (granulowanego żużla wielkopiecowego S, popiołu lotnego krzemionkowego V) jest bardzo skutecznym sposobem redukowania zawartości alkaliów aktywnych, a tym samym znacznego ograniczania negatywnych skutków reakcji alkalia-krzemionka [16÷18]. Potwierdzają to wyniki licznych prac badawczych, że jednym z mechanizmów ograniczania reakcji alkalia-krzemionka w obecności dodatków mineralnych jest obniżanie stężenia jonów hydroksylowych w fazie ciekłej betonu. Na rys. 4 pokazano zmienność stężenia jonów OH⁻

w zależności od zawartości Na₂O_{eq} w cemencie portlandzkim CEM I [19], z kolei na rys. 5 stężenie jonów OH⁻ w roztworze porowym w zależności od rodzaju i ilości dodatku [19]. Przyjmuje się, że dodatki mineralne prowadzą do obniżenia pH fazy ciekłej w betonie oraz do zwiększenia szczelności (zmniejszenia przepuszczalności). W wyniku aktywności pucolanowo-hydraulicznej dodatków powstaje głównie faza C-S-H (lub fazy C-A-S-H) o mniejszym stosunku C/S i większej zdolności do wiązania (inkorporacji) w swojej strukturze alkaliów w porównaniu do fazy C-S-H powstającej podczas hydratacji cementu portlandzkiego CEM I. Wynika to z faktu, że w granulowanym żużlu wielkopiecowym i popiołach lotnych większość alkaliów zawarta jest w fazie szklistej i jest bardzo trudno rozpuszczalna. Tylko bardzo niewielka część występuje w postaci siarczanów łatwo

Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości dodatków mineralnych na poziom stężenia jonów OH⁻ [19]



Rys. 5. Ekspansja betonów przechowywanych 140 dni w temp. 60°C bez dostępu alkaliów z zewnątrz, wstępny okres pielęgnacji: 1 dzień (kolor niebieski) i 28 dni (kolor szary) w 20°C/100% RH, (E I – kruszywo niereaktywne; EII – kruszywo potencjalnie reaktywne; EIII – kruszywo reaktywne) [22]



Rys. 6. Wpływ zawartości cementu na ekspansję wywołaną reaktywnością alkaliczną szkła pyreksowego [19]

rozpuszczalnych w wodzie. Właściwość ta czyni popioły lotne krzemionkowe i granulowany żużel wielkopiecowy bardzo przydatnymi w wykonawstwie betonów odpornych na korozję alkaliczną, co zostało udokumentowane i potwierdzone w rekomendacjach i wytycznych technicznych wielu krajów [9,20,21]. Potwierdzają to również wyniki badań przeprowadzone w Niemczech, przedstawione na rys. 5 [22]. Cement hutniczy CEM III/A okazał się bardzo skutecznym składnikiem w ograniczaniu ekspansji betonu z kruszywem reaktywnym E III [22].

Na sumaryczną zawartość aktywnych alkaliów w mieszance betonowej wpływ ma także ilość cementu w recepturze betonu. Na rys. 6 pokazano, jak zwiększa się ekspansja wywołana reaktywnością alkaliczną kruszywa przy zwiększaniu ilości cementu [19].

W tabeli 5 zaprezentowano z kolei, jak zmienia się sumaryczna zawartość alkaliów w 1 m³ betonu w przeliczeniu na Na₂O_{eq} w zależności od ilości cementu i zawartych w nim związków alkalicznych. Niektóre kraje limitują zawartość alkaliów w m³ mieszanki betonowej [20].

W procesie zimowego utrzymania dróg najczęściej stosowana jest sól kamienna. Według autorów [10] fakt ten nie jest obojętny dla reaktywności alkalicznej kruszyw zawierających aktywne formy

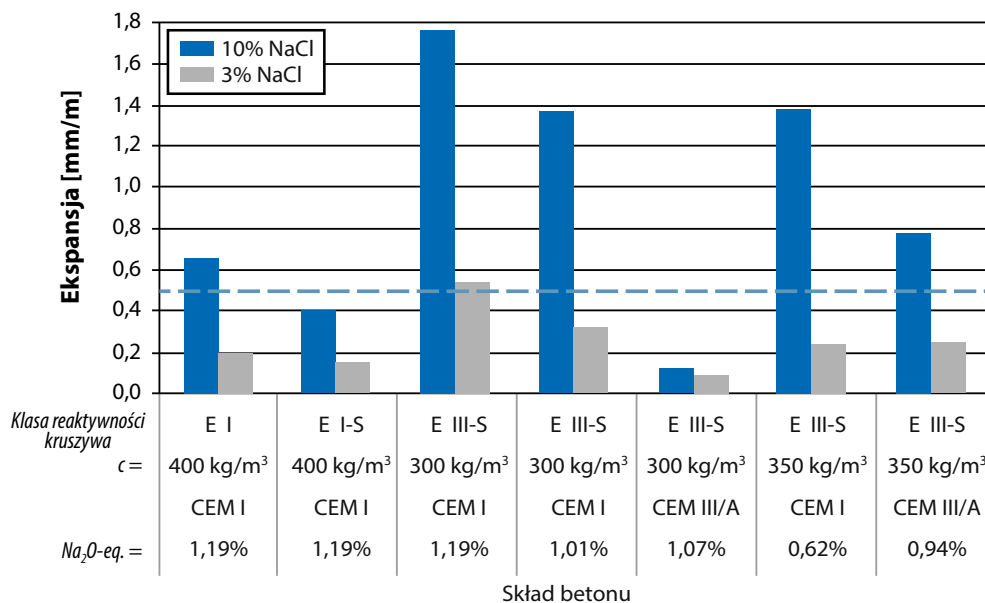
krzemionki (E III), co obrazuje rys. 7 [22]. Wyniki te jednoznacznie wskazują, iż w budowie dróg i mostów należy stosować kruszywa niereaktywne.

4. Podsumowanie

Projektant elementu (konstrukcji budowlanej), zwłaszcza w budowie obiektów w inżynierii komunikacyjnej (drogi, mosty, wiadukty), w doborze cementu powinien kierować się jego właściwościami użytkowymi oraz faktycznymi warunkami eksploatacji betonu, wynikającymi z klas ekspozycji wg PN-EN 206 [6]. Natomiast bardzo często w zapisach specyfikacji technicznych mamy wpisane błędnie dobrane cementy o właściwościach specjalnych (głównie dotyczy to cementów portlandzkich CEM I SR) bez merytorycznego uzasadnienia dokonanego wyboru. W przypadku środowisk oddziałujących agresywnie na beton (agresja siarczanowa, korozja alkaliczna) pomocne są właściwości specjalne cementu, tj. odporność na siarczany (SR, HSR), a w przypadku stosowania kruszyw potencjalnie reaktywnych właściwy jest dobór cementu o niskiej zawartości alkaliów aktywnych (NA). Pomocna w tym zakresie jest zarówno norma PN-EN 197-1 [1], a zwłaszcza norma krajowa na cementy specjalne PN-B 198707 [2], która w szerokim zakresie promuje stosowanie nie tylko cementów portlandzkich CEM I o ograniczonej do poziomu 0,6% zawartości Na₂O_{eq} (Na₂O + 0,658 K₂O), ale także cementów zawierających w swoim składzie popiół lotny krzemionkowy oraz granulowany żużel wielkopiecowy. Niestety, nadal możemy spotkać się z niewłaściwym doбором cementu, wynikającym z wieloletnich przyzwyczajień lub konserwatywnych zapisów w ciągle aktualnych i obowiązujących dokumentach [23]. Opracowane w ostatnich latach w GDDKiA Ogólne Specyfikacje Techniczne [9] są dobrym krokiem w kwestii szerszego wykorzystania cementów z dodatkami mineralnymi, szczególnie cementów z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego, tj. cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A,B i cementu hutniczego CEM III/A. Szersze stosowanie tego rodzaju cementów pozwoli nie tylko na osiągnięcie zamierzonych efektów technicznych, ale także ekonomicznych i ekologicznych. Należy mieć nadzieję, iż OST po niewielkich zmianach (dobór cementu

Tabela 5. Zawartość cementu w składzie cementu a zawartość alkaliów w 1 m³ betonu

Zawartość cementu [kg]	Zawartość alkaliów w cemencie Na ₂ O _{eq} [%]							
	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30
Zawartość alkaliów Na ₂ O _{eq} (pochodzących z cementu) w betonie [kg/m ³]								
250	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25
275	1,65	1,93	2,20	2,48	2,75	3,03	3,30	3,58
300	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90
325	1,95	2,28	2,60	2,93	3,25	3,58	3,90	4,23
350	2,10	2,45	2,80	3,15	3,50	3,85	4,20	4,55
375	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75	4,13	4,50	4,88
400	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,40	4,80	5,20
425	2,55	2,98	3,40	3,83	4,25	4,68	5,10	5,53
450	2,70	3,15	3,60	4,05	4,50	4,95	5,40	5,85
475	2,85	3,33	3,80	4,28	4,75	5,23	5,70	6,18
500	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50
600	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	6,60	7,20	7,80



Rys. 7. Wpływ zewnętrznego źródła alkaliów (3% i 10% roztworu NaCl) na wielkość ekspansji wywołanej reakcją alkalia-reaktywna krzemionka [22]. Oznaczenia jak na rys. 5

w przypadku korozji chlorkowej klasa ekspozycji XD3 (ma tam błędne zapisy) zostaną szybko wdrożone do praktycznego stosowania w budownictwie. Z przeprowadzonych rozważań wynika także, iż w budowie mostów i nawierzchni drogowych należy stosować kruszywa o zerowej reaktywności alkalicznej z dwóch powodów: zmienne warunki środowiskowe (wilgoć, temperatura), a także stosowanie środków odładczych, głównie soli kamiennej NaCl, do zimowego utrzymania dróg.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Giergiczyński
Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

Literatura

1. PN-EN 197-1:2012 Cement 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
2. PN-B-19707:2013 Cement. Cementy specjalne. Skład, wymagania i kryteria zgodności
3. Bapat J.D.: Performance of cement concrete with mineral admixtures. *Advances in Cement Research*. 2001, Vol. 13, No 4, pp. 139-155.
4. Owsiak Z.: Wewnętrzna korozja siarczanowa betonu. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Świętokrzyska, 2008
5. Praca zbiorowa. *Vademecum Technologa Betonu*, Górażdże, 2016
6. PN-EN 206:2016 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
7. Deja J.: Odporność korozyjna cementów o wysokiej zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego. *Materiały Sympozjum Naukowo-Technicznego, Chorula 1998*
8. Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts Schweizerische Eidgenossenschaft. *Forschungsprojekt AGB 2011/002 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)*, February 2016
9. OST M-13.01.00 Beton konstrukcyjny i OST D-05.03.04 Nawierzchnia Betonowa, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, <http://www.gddkia.gov.pl/pl/Wzorcowe-Warunki-Kontraktowe-WWK-dla-systemu-Projektuj-i-buduj> (aktualnie archiwum)
10. Hunkeler F., Merz Ch., Kronenberg P.: *Alkali-Aggregate-Reaktion (AAR) Grundlagen und Massnahmen bei neuen und bestehenden Kunstbauten. Bundesaamt für Strassen ASTRA Abteilung Strassennetze Standards, Forschung, Sicherheit, Bern, 2007.*
11. Borchers J.: *Mechanism of ASR. ECRA European Cement Research Academy, Seminar S06-04, Dusseldorf, October 24, 2006*
12. *DafStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*, Ausgabe Oktober 2013
13. Babińska J., Bobrowicz J.: *Trwałość betonu w kontekście reaktywności alkalicznej kruszyw. Monografie Technologii Betonu, IX Konferencja Dni Betonu, Wiśła 2016, T.1, s.539-552*
14. Borchers I., Christoph Müller Ch.: *Practical testing of alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in ASR performance tests. Concrete Technology Reports, 2013 – 2015, VDZ, Dusseldorf, pp. 39-48.*
15. ASTM C114-04. *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*
16. Shebata M.H., Thomas M.D.A.: *The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing material. Cement and Concrete Research 40 (2010)569-574*
17. Drożdż W.: *Wpływ popiołu lotnego wapiennego na przebieg korozji alkalicznej w betonie, Praca doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, Gliwice, 2014.*
18. Blight G., Alexander M.: *Alkali-Aggregate Reaction and Structural Damage to Concrete. CRC Press/Balkema, Leiden, 2011*
19. Böhm M.: *Cement and Additions. European Cement Research Academy Seminar S06-04, Dusseldorf, October 24, 2006*
20. *Recommendation 89 (second, revised edition) Measures to prevent damage to concrete by alkali-silica reaction (ASR) Stichting CURNET, Groningenweg 10, P.O. Box 420, 2800 AG GOUDA, The Netherlands, April, 2008*
21. ASTM C 1260-14 *Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*
22. Borchers I., Christoph Müller Ch.: *Practical testing of alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in ASR performance tests. Concrete Technology Reports, 2013 – 2015, VDZ, Dusseldorf, pp. 39-48.*
23. *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 63/2000, poz. 735)*