

# Szkolenie dla projektantów i technologów drogowych

## Reaktywność alkaliczna kruszyw w teorii i praktyce

dr inż. Katarzyna Synowiec

Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.



Warszawa, 28 marca 2023

ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu  
Polish Cement Association

PARTNERZY



Stowarzyszenie Producentów  
Betonu Towarowego w Polsce



Polski Związek  
Producentów Kruszyw



# Agenda

1. Wprowadzenie
2. Aspekty teoretyczne
3. Uwarunkowania praktyczne
4. Wymagania dokumentów technicznych
5. Podsumowanie

## Wprowadzenie

### Reaktywność alkaliczna kruszyw

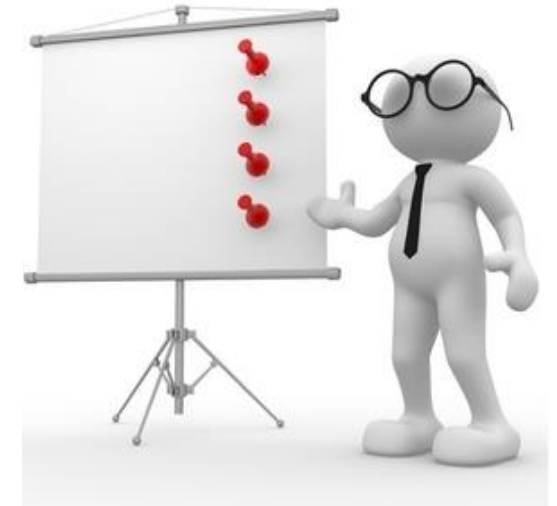
Podatność pewnych rodzajów kruszyw, zawierających reaktywne składniki mineralne (reaktywną krzemionkę), na reakcję chemiczną z alkaliami zawartymi w roztworze obecnym w porach betonu.

Zjawisko jest złożone, zarówno pod względem typów reakcji alkalicznych, ale też czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych wpływających na ich wystąpienie i przebieg.

**1** alkalia – krzemionka bezpostaciowa

**2** alkalia – węglany

**3** alkalia – krzemiany (glinokrzemiany)



# Wprowadzenie

## Reaktywność alkaliczna kruszyw

REAKCJA ALKALIA-KRZEMIONKA (ASR) – reakcja chemiczna zachodząca w betonie pomiędzy alkaliarni (sodem i potasem występującymi w postaci kationów) pochodzącymi z cementu lub innych źródeł, jonami wodorotlenowymi oraz reaktywnymi składnikami krzemionkowymi (m.in. opal, trydymit, chalcedon) obecnymi w niektórych kruszywach.

PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu, określa właściwości kruszyw stosowanych do betonu:

- skład ziarnowy,
- kształt i szorstkość ziaren,
- obecność zanieczyszczeń,
- nasiąkliwość,
- wytrzymałość/ścieralność,
- mrozoodporność,
- reaktywność (alkaliczna).

**Problem jest szczególnie istotny dla obiektów betonowych o wysokim znaczeniu, np. infrastruktura drogowo – mostowa.**



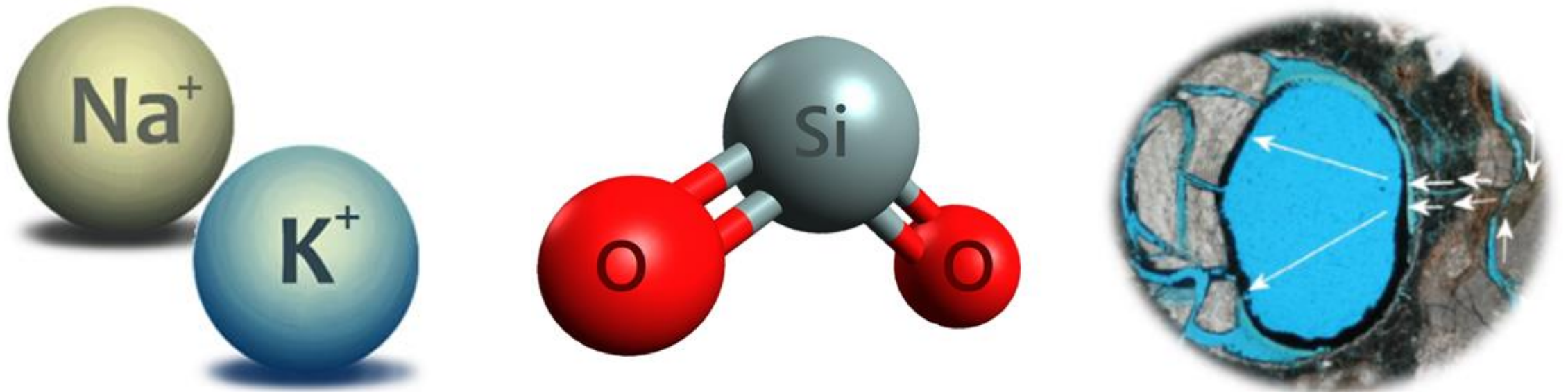
## Aspekty teoretyczne

### Czynniki warunkujące przebieg reakcji

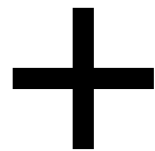


## Aspekty teoretyczne

### Mechanizm przebiegu reakcji



ŹRÓDŁO ALKALIÓW



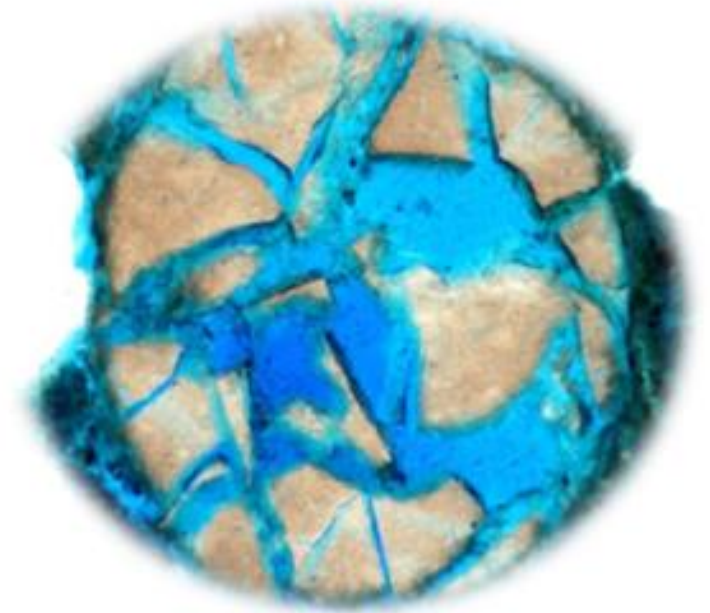
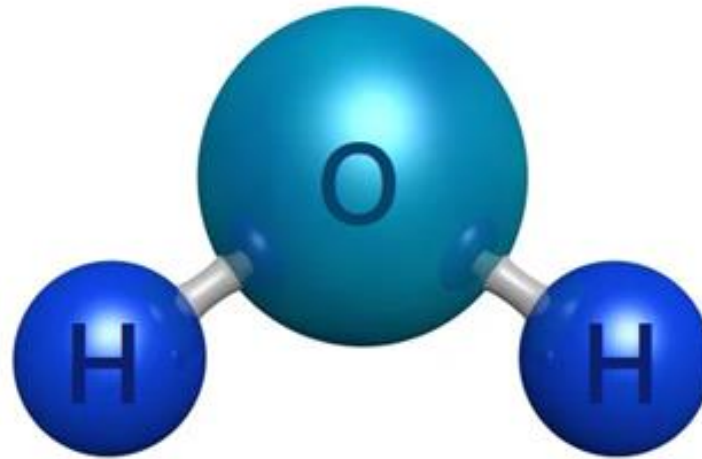
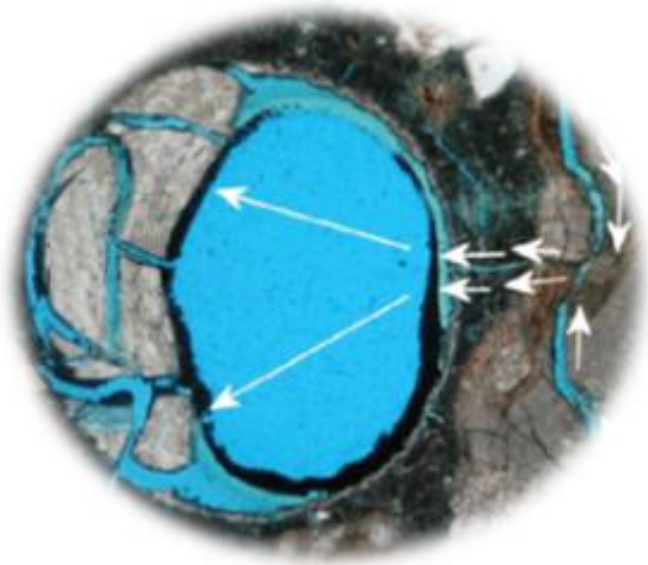
REAKTYWNE FORMY KRZEMIONKI



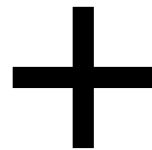
PRODUKTY ŻELOWE

## Aspekty teoretyczne

### Mechanizm przebiegu reakcji



PRODUKTY ŻELOWE



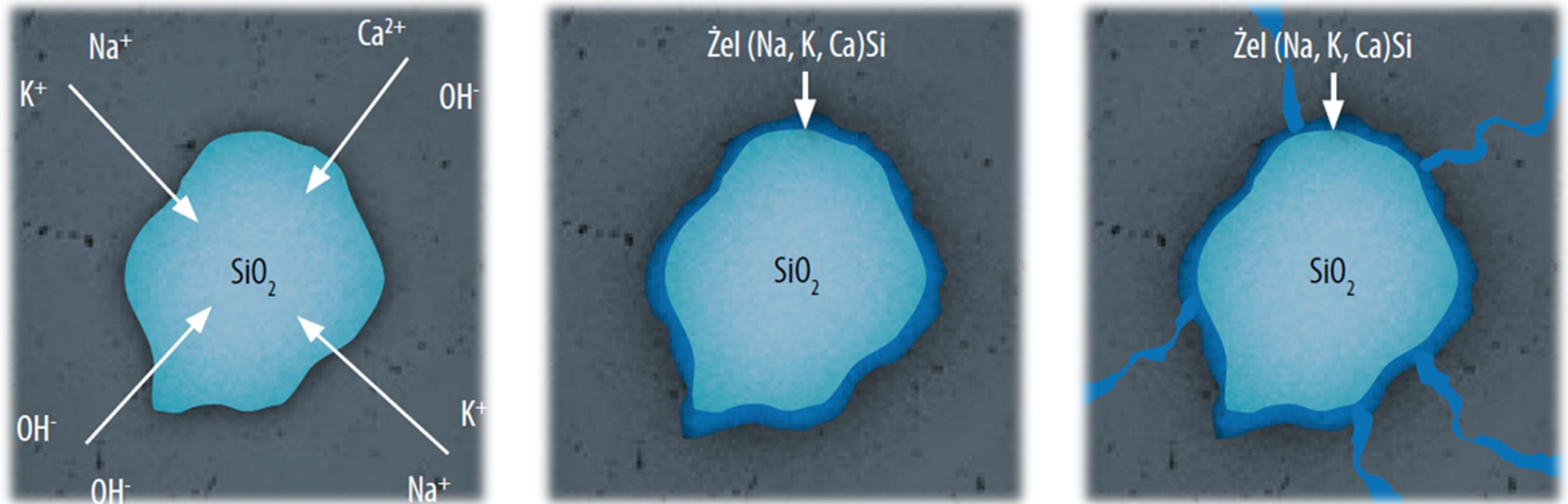
WODA (WILGOTNOŚĆ > 80%)



EKSPANSJA

## Aspekty teoretyczne

### Mechanizm przebiegu reakcji

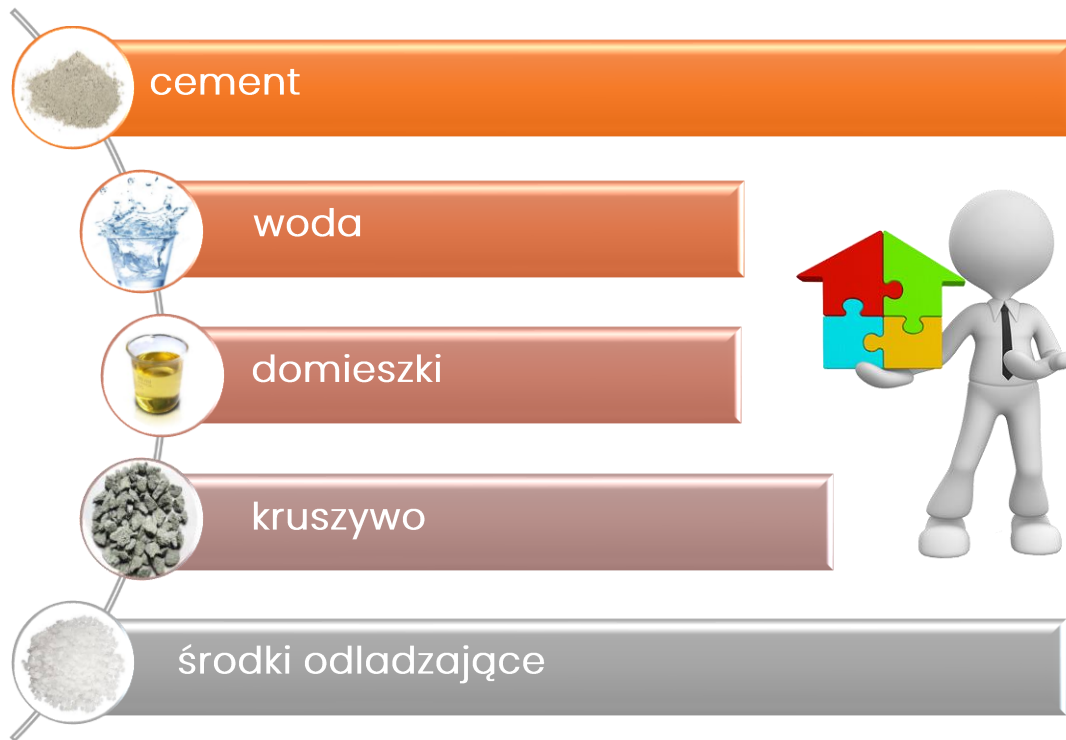




## Aspekty teoretyczne

### Źródła alkaliów

Alkalia – metale alkaliczne, głównie sód i potas, w cieczy porowej betonu występujące w postaci jonowej, zliczane jako tlenki  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  lub ekwiwalent  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$



### Reaktywne formy krzemionki

Reaktywność kruszywa wynika z zawartości pewnych składników, tj. opal, chalcedon, trydymit, itd. Kruszywa charakteryzujące się porowatą, szklistą powierzchnią są bardziej narażone na oddziaływanie jonów alkalicznych.

Skąły zawierające krytyczne ilości potencjalnie reaktywnych form krzemionkowych :

- rogowiec i krzemień zawierające chalcedon,
- skały wulkaniczne (melafir, porfir, bazalt oliwinowy),
- tufy wulkaniczne,
- szkliwo wulkaniczne,
- piaskowce o spoiwie ilastym,
- łupki ilasto-mikowe,
- kwarcyty,
- szarogłazy,
- granity i granodioryty,
- gnejsy.



## Aspekty teoretyczna – Uwarunkowania praktyczne

### Źródła alkaliów

Kluczowa jest zawartość alkaliów w cemencie oraz zawartość cementu w betonie.

Rozróżnia się:

- całkowitą zawartość alkaliów,
- zawartość alkaliów rozpuszczalnych w wodzie
- zawartość alkaliów „aktywnych”, odpowiadającą  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  przechodzących do roztworu

Jedynie niewielka część alkaliów rozpuszczalnych w wodzie wpływa na stężenie sodu i potasu w roztworze porowym betonu we wczesnych etapach hydratacji.

Alkalia związane w fazie szklistej (w popiołach lotnych, żużlu wielkopieczowym) przechodzą do roztworu wolniej, niż alkalia w postaci siarczanów (w klinkierze).

### Reaktywność kruszywa

Większość rodzajów litologicznych skał może być potencjalnie reaktywna. Można szacunkowo określić, że dotyczy to przynajmniej 30% kruszyw w Polsce, głównie surowca z północno-wschodniej części kraju.



## Uwarunkowania praktyczne

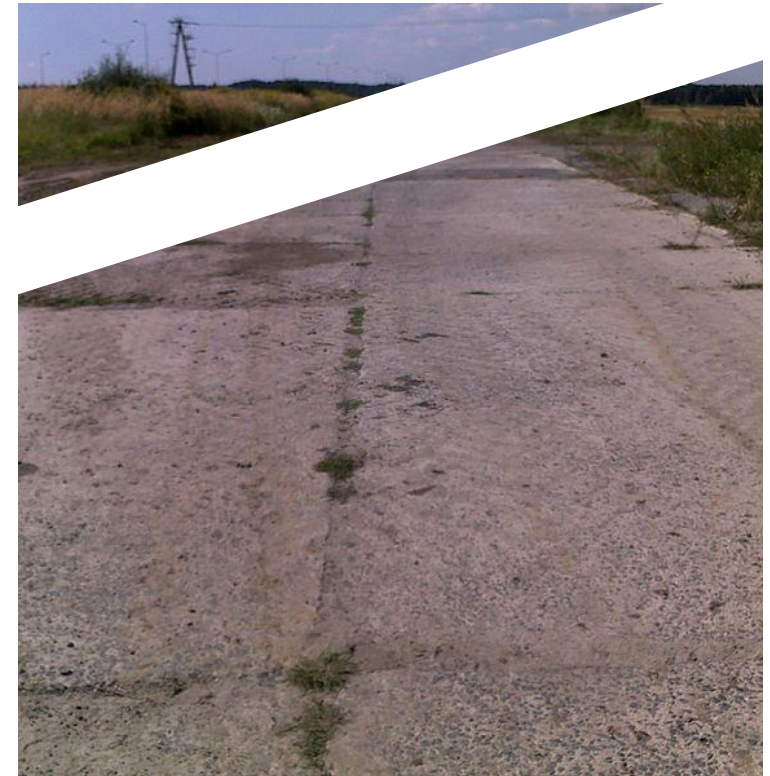
### Uszkodzenia konstrukcji w wyniku reakcji alkalia-kruszywa



A4 nawierzchnia na odcinku  
Jędrzychowice-Krzyżowa



A4 filar wiaduktu na odcinku  
Wrocław-Legnica (fot. 2010)



Autostrada RAB 29 1936r. (fot. 2010),  
na wysokości węzła A4 Kleszczów

## Uwarunkowania praktyczne

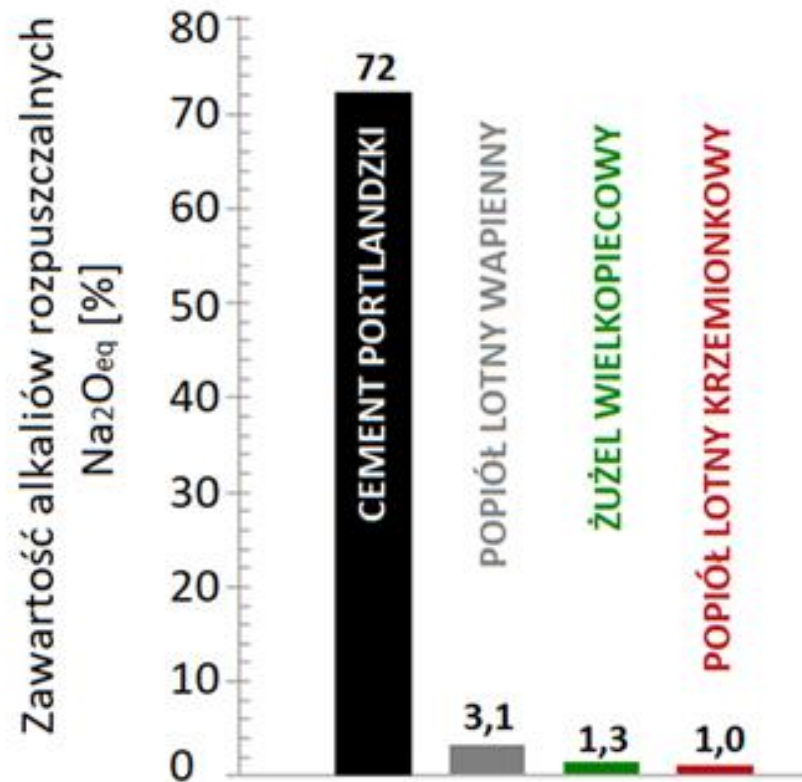
### Uszkodzenia konstrukcji w wyniku reakcji alkalia-kruszywa

# Diagnostyka betonu w nawierzchni drogi S8 Wolbórz- Polichno na podstawie badań odwiertów



## Uwarunkowania praktyczne

### Cementy niskoalkaliczne NA wg PN-B-19707



### Reaktywność kruszywa

PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu

Jeśli to wymagane, reaktywność alkaliczno-krzemionkową kruszyw należy ocenić zgodnie z postanowieniami ważnymi w miejscu zastosowania, a wyniki deklorować.



W przypadku braku wystarczająco długich doświadczeń dotyczących negatywnych skutków reaktywności w określonych połączeniach cementu i kruszywa, może zachodzić potrzeba uwzględnienia środków zaradczych...

PN-EN 932-3:2022-12

Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 3: Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego

## Wymagania dokumentów technicznych

### Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich

**KATEGORIA REAKTYWNOŚCI** – R0, R1, R2, R3, opisuje podatność kruszywa na reakcję z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie cementowym

**KLASA KONSTRUKCJI** – S1, S2, S3, S4, klasyfikacje konstrukcje budowlane i inżynierskie w odniesieniu do wagi konsekwencji wystąpienia reakcji alkalia-kruszywo w betonie, uzależniona od znaczenia danego obiektu budowlanego, projektowanego czasu użytkowania i oczekiwanego poziomu niezawodności; klasa obiektu jest związana z konsekwencjami ekonomicznymi, społecznymi i środowiskowymi wystąpienia uszkodzeń z powodu reakcji kruszywa z alkaliami

**KATEGORIA ŚRODOWISKA** – E1, E2, E3, klasyfikuje środowisko w odniesieniu do możliwości wystąpienia w betonie zagrożenia destrukcyjną reakcją alkalia-kruszywo



## Wymagania dokumentów technicznych

### Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich

1. Należy stosować kruszywa mineralne niewykazujące szkodliwej reakcji z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie.
2. Oznaczenie kategorii reaktywności alkalicznej kruszywa jest warunkiem koniecznym jego zastosowania w betonie konstrukcyjnym drogowych obiektów inżynierskich. Stosowanie kruszywa o nieznannej kategorii reaktywności jest wykluczone.

Metoda badawcza	Kategoria reaktywności kruszywa					
	Niereaktywne R0		Umiarkowanie reaktywne R1		Silnie reaktywne R2	Bardzo silnie reaktywne R3
	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne; kruszywo grube	
GDDKiA PB/1/18	Wydłużenie próbek zaprawy po 14 dniach, %					
	≤ 0,15	≤ 0,10	> 0,15 ≤ 0,30	> 0,10 ≤ 0,30	> 0,30 ≤ 0,45	> 0,45
GDDKiA PB/2/18	Wydłużenie próbek betonu po 365 dniach, %					
	≤ 0,04		> 0,04 ≤ 0,12		> 0,12 ≤ 0,24	> 0,24

## Wymagania dokumentów technicznych

### Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich

PB/1/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyśpieszoną w 1 M roztworze NaOH w temp. 80°C

PB/2/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3

PB/3/18 Zalecenia dotyczące analizy petrograficznej kruszywa

Wyniki metody przyspieszonej (PB/1/18) stanowią kryterium klasyfikacji do czasu otrzymania wyników wg metody PB/2/18

Jeżeli kategoryzacja kruszywa na podstawie przyśpieszonej metody pomiaru ekspansji zaprawy (wg PB/1/18) wskazuje  $R_1$ ,  
a na podstawie długoterminowej metody pomiaru ekspansji betonu (wg PB/2/18)  $R_0$ ,  
to kategorię reaktywności badanego kruszywa przyjmij według metody długoterminowej.



## Wymagania dokumentów technicznych

### Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich

Klasa obiektu	Konsekwencje wystąpienia reakcji AAR	Akceptowalność szkodliwych efektów AAR	Przykłady
S1	Pomijalne	Wobec krótkiego czasu użytkowania pewne ryzyko uszkodzenia wskutek AAR można tolerować.	<ul style="list-style-type: none"> <li>elementy konstrukcji tymczasowych lub krótkożyłowych (projektowany okres użytkowania do 5 lat)</li> </ul>
S2	Nieznaczne konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Niewielkie ryzyko uszkodzenia wskutek AAR w okresie użytkowania można tolerować z uwagi na łatwość wymiany i mniejsze znaczenie obiektu. Ryzyko obniżone przez warunki otoczenia – dotyczy technologii głębokiego fundamentowania.	<ul style="list-style-type: none"> <li>prefabrykowane elementy nawierzchni dróg, które łatwo wymienić, np. chodniki, krawężniki oraz betonowe elementy odwodnieniowe</li> <li>nawierzchnie placów postojowych i dróg KR0*</li> <li>beton w technologii głębokiego fundamentowania.</li> </ul>
S3	Znaczące konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Ryzyko uszkodzeń wskutek AAR jest pod kontrolą poprzez selekcję kruszywa, składu cementu. Akceptowalne min. uszkodzenia bez wpływu na trwałość eksploatacyjną.	<ul style="list-style-type: none"> <li>elementy drogowych obiektów inżynierskich o projektowanym okresie użytkowania do 50 lat ;</li> <li>nawierzchnie dróg kat. ruchu KR1 – KR4;</li> <li>bariery autostradowe i elementy ekranów akustycznych</li> </ul>
S4	Bardzo poważne konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Nietolerowane żadne ryzyko uszkodzenia wskutek AAR i najwyższy stopień zapobiegania takim uszkodzeniom.	<ul style="list-style-type: none"> <li>elementy drogowych obiektów inżynierskich o projektowanym okresie użytkowania powyżej 50 lat;</li> <li>elementy bardzo trudne do wymiany/naprawy;</li> <li>nawierzchnie dróg kat. ruchu KR5 – KR7</li> </ul>

## Wymagania dokumentów technicznych

### Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich

Kategoria środowiska	Opis środowiska	Ekspozycja elementów obiektu z betonu – przykłady obiektów drogowych
<del>E1</del>	<del>Środowisko suche, chronione przed wilgocią zewnętrzną</del>	<del> <ul style="list-style-type: none"> <li>elementy wewnętrzne w budynkach w środowisku suchym</li> </ul> </del>
E2	Środowisko wilgotne bez oddziaływania agresywnego czynników zewnętrznych	<ul style="list-style-type: none"> <li>elementy wewnętrzne w budynkach o wysokiej wilgotności;</li> <li>elementy wystawione na działanie wilgoci z powietrza, nieagresywnych wód podziemnych, zanurzone w wodzie słodkiej lub stale zanurzone w wodzie morskiej;</li> <li>wewnętrzne elementy masywne</li> </ul>
E3	Środowisko wilgotne z agresywnym oddziaływaniem czynników zewnętrznych	<ul style="list-style-type: none"> <li>elementy drogowych obiektów inż. narażone bezpośrednio na odladzanie solami;</li> <li>elementy wystawione na cykliczne działanie wody morskiej (zanurzanie i suszenie) lub słony oprysk (strefy rozbryzgu);</li> <li>wilgotne elementy wystawione na naprzemienne działanie zamarzania i rozmarzania;</li> <li>wilgotne elementy wystawione na długotrwałe działanie wysokiej temperatury;</li> <li>jezdnie dróg i parkingi narażone na oddziaływanie soli odladzających;</li> <li>jezdnie drogowe poddane obciążeniom zmęczeniowym.</li> </ul>

## Wymagania dokumentów technicznych

### Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich

Klasa obiektu	Kategoria oddziaływań środowiska	Kruszywo niereaktywne R0	Kruszywo umiarkowanie reaktywne R1
		Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ na 1 m <sup>3</sup> betonu	
S4	E2	- maks. 3,0 kg/m <sup>3</sup>	- nie dopuszcza się
	E3	- maks. 3,0 kg/m <sup>3</sup> - dla elementów drogowych obiektów inżynierskich oraz elementów konstrukcji bardzo trudnych do wymiany lub naprawy	

## Wymagania dokumentów technicznych

### Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich

Klasa obiektu	Kategoria oddziaływań środowiska	Kruszywo niereaktywne R0	Kruszywo umiarkowanie reaktywne R1
		Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ na 1 m <sup>3</sup> betonu	
S3	E2	- bez ograniczeń	- maks. 2,4 kg/m <sup>3</sup> cement CEM I
			- min. 20% V albo 35% S jako dodatek typu II*
	E3	- maks. 3,0 kg/m <sup>3</sup>	- maks. 2,4 kg/m <sup>3</sup> i cement NA** CEM II/B-V-NA, CEM II/B-M (S-V)-NA, CEM III/A-NA, CEM V/A (S-V)-NA
			- maks. 2,4 kg/m <sup>3</sup> cement CEM I i min. 25% V albo 50% S jako dodatek typu II*
			- maks. 2,4 kg/m <sup>3</sup> i cement NA** CEM II/B-V-NA, CEM II/B-M (S-V)-NA, CEM III/A-NA, CEM V/A (S-V)-NA

## Wymagania dokumentów technicznych

### Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich

$$Na_2O_{eq} = \sum_i \frac{w_i}{100\%} \frac{x_i}{100\%} z_i \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Do obliczania zawartości alkaliów aktywnych należy przyjąć współczynnik  $w_i$ :

- 85% ×  $Na_2O_{eq}$  w CEM I lub CEM II/A-LL-NA;
- 80% ×  $Na_2O_{eq}$  w CEM II/A-S-NA, CEM II/A-M (S-LL)-NA;
- 70% ×  $Na_2O_{eq}$  w CEM II/A-V-NA, CEM II/B-S-NA, CEM II/A-M (S-V)-NA;
- 60% ×  $Na_2O_{eq}$  w CEM II/B-V-NA, CEM II/B-M (S-V)-NA, CEM III/A-NA;
- 50% ×  $Na_2O_{eq}$  w cemencie CEM V/A (S-V)-NA;
- 30% ×  $Na_2O_{eq}$  w granulowanym żużlu wielopieczowym,
- 10% ×  $Na_2O_{eq}$  w popiele lotnym krzemionkowym,
- 100% ×  $Na_2O_{eq}$  w domieszkach do betonu,
- 100% ×  $Na_2O_{eq}$  w wodzie zarobowej (nie dotyczy wody wodociągowej),
- w przypadku kruszyw naturalnych ze złóż krajowych ze skał litych i okrucowych nie stwierdza się znaczącego wymywania alkaliów, zatem, alkalia wymywalne z kruszywa pomija się w bilansie  $Na_2O_{eq}$

gdzie:

$w_i$  – wsp. uwzględniający udział alkaliów wymywanych dla składnika [%],

$x_i$  – zawartość  $Na_2O_{eq}$  dla składnika [%],

$z_i$  – zawartość składnika w betonie [ $kg/m^3$ ].

Do betonu konstrukcyjnego powinny być stosowane cementy:

zgodne z PN-EN 197-1	zgodne z PN-B-19707
CEM I	CEM I – NA
CEM II/A-S	CEM II/A-S – NA
CEM II/A-M (S-LL)	CEM II/A-M (S-LL) – NA
CEM II/A-M (S-V)	CEM II/A-M (S-V) – NA
CEM II/B-S	CEM II/B-S – NA
CEM II/A-V	CEM II/A-V – NA
CEM II/A-LL	CEM II/A-LL – NA

## Wymagania dokumentów technicznych

### Przykłady obliczeń zawartości alkaliów w betonie

Receptura I C30/37	Zawartość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]	W <sub>i</sub> [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [% masy]	Receptura II C30/37	Zawartość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]	W <sub>i</sub> [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [% masy]
CEM I 42,5R-NA	360	85	0,57	CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	360	60	0,74
Superplastyfikator PCE	1,84	100	1,50	Superplastyfikator PCE	1,94	100	1,50
Plastyfikator BV	1,44	100	3,00	Plastyfikator BV	0,72	100	3,00
Dom. opóźniająca	0,54	100	0,30	---	---	100	
Dom. napowietrzająca	0,79	100	1,00	Dom. napowietrzająca	0,36	100	1,00

$$Na_2O_{eq} = \sum_i \frac{w_i}{100\%} \frac{x_i}{100\%} z_i \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

1,82

1,65

## Wymagania dokumentów technicznych

### Przykłady obliczeń zawartości alkaliów w betonie

Receptura I C50/60	Zawartość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]	W <sub>i</sub> [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [% masy]	Receptura II C50/60	Zawartość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]	W <sub>i</sub> [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [% masy]
CEM I 52,5R	430	85	0,60	CEM I 52,5R	410	85	0,60
---	---	---	---	Popiół lotny	50	10	3,4
Superplastyfikator PCE	2,49	100	1,50	Superplastyfikator PCE	1,94	100	1,50
Plastyfikator BV	1,50	100	3,00	Plastyfikator BV	0,72	100	3,00
Dom. opóźniająca	0,64	100	0,30	---	---	100	
Dom. napowietrzająca	0,64	100	1,00	Dom. napowietrzająca	0,36	100	1,00

$$Na_2O_{eq} = \sum_i \frac{w_i}{100\%} \frac{x_i}{100\%} z_i \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

2,28

2,35

## Podsumowanie

Poprawnie zaprojektowany i zabudowany beton powinien charakteryzować się minimum 50-letnią trwałością. W przypadku obiektów takich jak mosty, tamy, nawierzchnie lotnisk i autostrad wymagania co do trwałości wynoszą 100 lat, a nawet 200 lat.

Możliwe środki zaradcze w kwestii negatywnych skutków reaktywności:

- ograniczenie całkowitej zawartości alkaliów w mieszance betonowej,
- stosowanie cementu z niską zawartością alkaliów,
- stosowanie mieszaniny kruszywa niereaktywnego,
- ograniczenie stopnia nasycenia betonu wodą.





# Szkolenie dla projektantów i technologów drogowych

## Reaktywność alkaliczna kruszyw w teorii i praktyce

dr inż. Katarzyna Synowiec

Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.



Warszawa, 28 marca 2023

ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu  
Polish Cement Association

PARTNERZY



Stowarzyszenie Producentów  
Betonu Towarowego w Polsce



Polski Związek  
Producentów  
Kruszyw

