

Reaktywność alkaliczna kruszyw jest zjawiskiem złożonym pod względem chemicznym, jak i różnorodności czynników mineralogicznych i atmosferycznych wpływających na jej wystąpienie i przebieg. Ze względu na powolny przebieg zachodzących reakcji potrzeba nawet kilku lat w celu odróżnienia zniszczeń spowodowanych reakcją z alkaliami od innych procesów destrukcyjnych. Metody badań oraz kryteria oceny zjawiska reaktywności alkalicznej są różne, a ich ujednoczenie jest skomplikowane.

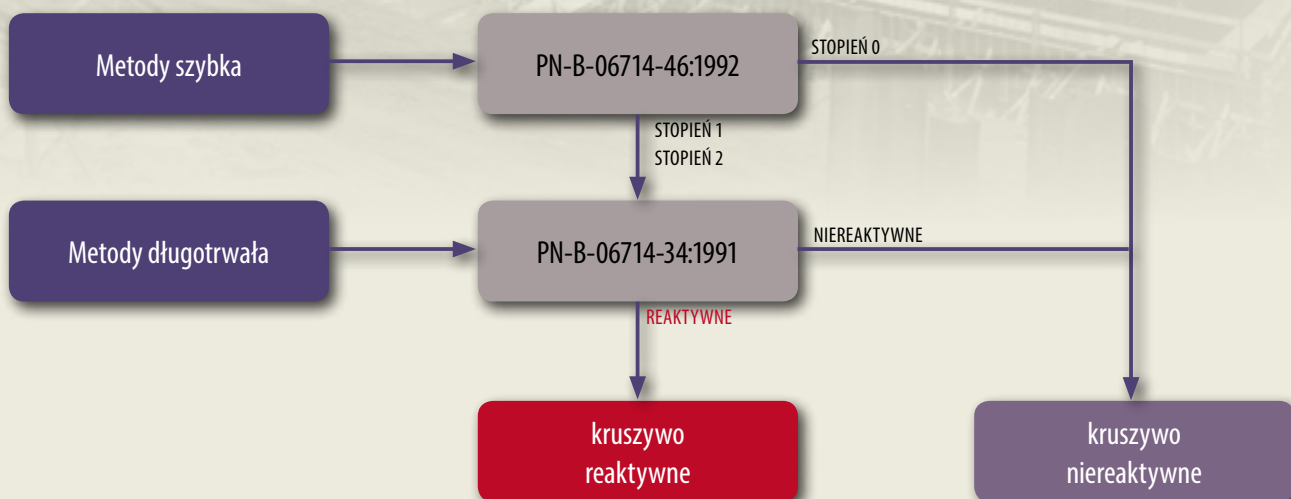
Wśród metod oceny reaktywności alkalicznej kruszyw wyróżnia się następujące rodzaje:

- bezpośrednie – polegające na pomiarze ekspansji próbek z betonu lub zaprawy,
- chemiczne – m. in. poprzez wymywanie alkaliów ze składników betonu
- petrograficzne – stwierdzające występowanie minerałów potencjalnie reaktywnych.

Zgodnie z normą PN-EN 12620+A1:2010 dotyczącą kruszyw stosowanych w betonie, jeśli jest to wymagane, reaktywność alkaliczną kruszyw należy oceniać zgodnie z przepisami obowiązującymi w miejscu stosowania, a wyniki deklarować. Aktualnie w Polsce do oceny reaktywności kruszyw stosuje się trzy metody:

- PN-B-06714-34:1991 "Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej. Metoda ta obejmuje pomiary zmian liniowych"
- PN-B-06714-46:1992 "Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką." Metoda polega na przeprowadzeniu reakcji kruszywa z NaOH, oznaczeniu ubytku masy kruszywa oraz określeniu zawartości krzemieni w kruszywie.
- PN-B-06714-47:1988 "Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej – Oznaczenie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym (NaOH)" Badane polega na określeniu metodą masową krzemionki rozpuszczalnej po przechowywaniu próbki kruszywa w roztworze wodorotlenku sodowego o stałym stężeniu  $C(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol/l}$ , w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  w ciągu 24 h.

W praktyce potencjalną reaktywność alkaliczną określa się wg normy PN-B-06714-46:1992 oraz PN-B-06714-34:1991. Schemat oceny i sposób postępowania przy określaniu reaktywności alkalicznej wg wytycznych krajowych przedstawiono na rys.1.

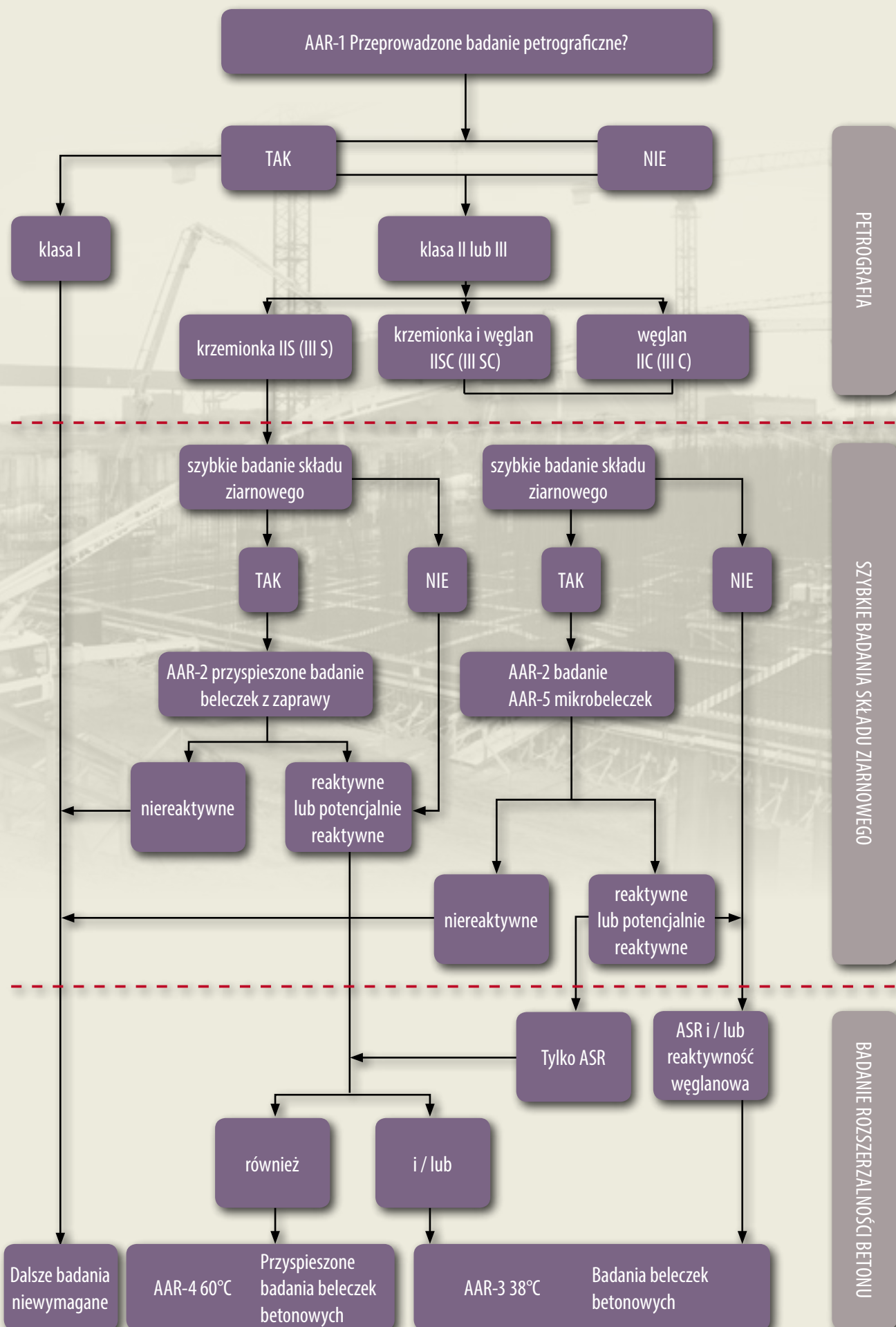


Rys. 1. Sposób postępowania przy określaniu reaktywności alkalicznej kruszyw

W 2000 r. podjęto prace nad ujednoczeniem metod badawczych, kryteriów oceny występowania reakcji alkalicznych w betonie. Efektem pracy zespołów badawczych jest 5 procedur oceny reaktywności kruszyw rekomendowanych przez RILEM:

- AAR-1 - podstawowa metoda, służąca do kwalifikacji i oceny kruszywa pod względem reaktywności – badanie petrograficzne
- AAR-2 - metoda badania próbek z zaprawy (metoda przyspieszona)
- AAR-3 - metoda badania mieszanek kruszywa na próbkach betonu w temp.  $38^\circ\text{C}$
- AAR-4 - przyspieszona metoda badania mieszanek kruszyw na próbkach betonu w temp.  $60^\circ\text{C}$
- AAR-5 - badanie kruszyw węglanowych

Schemat oceny reaktywności kruszyw wg RILEM przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat oceny reaktywności kruszyw według procedury RILEM



Wobec braku ogólnoeuropejskich norm badań reaktywności alkalicznej kruszyw, stosowane są także procedury wg norm amerykańskich ASTM. Większość norm opisujących badania i stosowanych w różnych krajach powstało na bazie norm ASTM. Najczęściej stosowanymi metodami badań są:

- ASTM C295 – badanie petrograficzne kruszyw do betonu
- ASTM C289 – ocena potencjalnej reaktywności kruszywa (metoda chemiczna)
- ASTM C1260 – badanie ekspansji alkalicznej próbek z zapraw metodą przyspieszoną
- ASTM C227 – badanie ekspansji próbek z zapraw metodą długoterminową
- ASTM C1293 – badanie ekspansji beleczek z betonu metodą długoterminową

## METODY PETROGRAFICZNE

Metody petrograficzne są pierwszym etapem do oceny potencjalnej reaktywności kruszyw. Chociaż badania petrograficzne są bardzo przydatne do identyfikacji składników, nie wykazują czy badany materiał spowoduje ekspansję. Stąd konieczne jest wykonanie dalszych badań celem potwierdzenia, czy badane kruszywo jest reaktywne. Rozpoznanie składników opiera się na określeniu typów mineralogicznych i petrograficznych kruszyw.

Metodyka zawarta w procedurze AAR-1 jest stosowana do wszystkich kruszyw jako badanie rozpoznawcze. Poza metodą mikroskopową, w przypadku kruszyw węglanowych, stosuje się jeszcze metody fluorescencyjnej analizy rentgenowskiej (XRF) oraz elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM). Na tej podstawie, z uwzględnieniem dominującego charakteru chemicznego kruszywa (krzemionkowe S, węglanowe C, krzemionkowo-węglanowe SC), wyróżnia się 3 klasy:

- klasa I: kruszywo najprawdopodobniej niereaktywne;
- klasa II: kruszywo wątpliwie reaktywne;
- klasa III: kruszywo bardzo prawdopodobnie reaktywne.

Dla kruszyw z klas II i III zalecane jest wykonanie dalszych badań z wykorzystaniem pozostałych metod.

Metodykę zawartą w normie ASTM C295 można stosować zarówno do oceny reaktywności alkalia-krzemiany, jak i alkalia-węglany. Z wykorzystaniem mikroskopii optycznej określa się typ i podstawowe cechy kruszywa. Stwierdza się również obecność żelaznego krzemionkowego wypełniającego pęknięcia. Wyniki badań umożliwiają identyfikację reaktywnych form  $\text{SiO}_2$  w kruszywach, są to m.in.: opał, kryształit, trydymit, szkła wulkaniczne, niektóre ility, łupki, gnejsy, kwarcyty i inne.

## METODY CHEMICZNE

Metoda chemiczna pozwala na bardzo szybką ocenę potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszywa. Niestety metody te są niedokładne, gdyż nie dają jednoznacznej odpowiedzi czy uszkodzenie kruszywa nastąpiło w wyniku reakcji alkalia-kruszywo czy było skutkiem innego procesu. Dlatego wyniki otrzymane przy użyciu metod chemicznych muszą być zweryfikowane przy użyciu innych metod. Można tu wyróżnić normę krajową PN-B-06714-46:1992 oraz amerykańską ASTM C289.

1. Badanie wg normy PN-B-06714-46:1992 polega na przeprowadzeniu reakcji kruszywa z NaOH i oznaczeniu ubytku masy kruszywa drobnego i grubego oraz zawartości reaktywnych krzemieni w kruszywie grubym. Próbkę kruszywa podgrzaną do temp. 105°C umieszcza się w zlewce i zalewa 4% roztworem NaOH (lub 10% dla kruszyw grubych) o temp. 90°C. Umieszcza się w łaźni wodnej o temp. 90°C mieszając co 15 minut. Po 1 godzinie zlać roztwór na sito 0,5 mm (dla frakcji 1÷2 mm) lub 1 mm (dla frakcji 2÷4 mm), przemyć kruszywo silnym strumieniem wody, ponownie wysuszyć w temp. 105°C i zważyć. Dodatkowo oznacza się zawartość krzemieni w kruszywie. W tabeli 1 przedstawiono kryteria oceny stopnia potencjalnej reaktywności alkalicznej.

Tabela 1. Ocena stopnia potencjalnej reaktywności alkalicznej wg normy PN-B-06714-46:1992

Cecha	Stopień reaktywności alkalicznej		
	0	1	2
Ubytek masy dla danej frakcji kruszywa drobnego ( $X_1$ ) lub grubego ( $X_4$ ) pod działaniem NaOH [%]	$\leq 0,5$	$> 0,5$ i $\leq 2,0$	$> 2,0$
Zawartość reaktywnego krzemienia ( $X_3$ ) [%]	$\leq 3,0$	$> 3,0$ i $\leq 10,0$	$> 10,0$
$5 \cdot X_4 + X_3$	$\leq 4,0$	$> 4,0$ i $\leq 15,0$	$> 15,0$
Stopnie potencjalnej reaktywności alkalicznej: 0 – kruszywo niereaktywne 1 – kruszywo potencjalnie reaktywne 2 – kruszywo reaktywne			

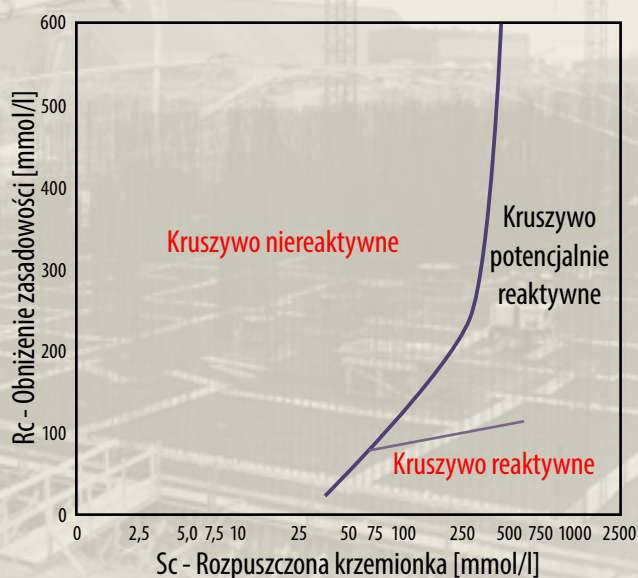
Kruszywo o stopniu 0 reaktywności alkalicznej można bez przeszkód stosować do betonu. Kruszywo zakwalifikowane do 1 lub 2 stopnia reaktywności alkalicznej, w celu ostatecznej oceny, należy poddać badaniu metodą beleczkową wg normy PN-B-06714-34:1991

- Badanie wg metody ASTM C289 polega na wyznaczeniu obniżenia alkaliczności  $R_c$  roztworu NaOH o znanym stężeniu. Do 25 g próbki rozdrobnionego kruszywa do frakcji 150-300  $\mu\text{m}$  dodaje się 25 ml 1N roztworu NaOH i ogrzewa w specjalnym cylindrze (rys.3) przez 24 h w temp. 80°C. Następnie mierzy się spadek alkaliczności poprzez miareczkowanie przesącza 0,05 N roztworem HCl oraz ilość rozpuszczonej krzemionki  $S_c$  w NaOH. Oceny potencjalnej reaktywności dokonuje się na podstawie usytuowania punktów pomiarowych  $S_c$  i  $R_c$  na diagramie przedstawionym na rys. 4.

Metoda amerykańska umożliwia szybkie uzyskanie wyniku, natomiast otrzymane wyniki dają jedynie pogląd na temat potencjalnej reaktywności kruszywa i możliwości wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka. Z drugiej strony podczas rozdrabniania kruszywa mogą być tracone pewne ilości reaktywnych form kruszywa. Z tego powodu metoda ta nie jest zalecana jako rozstrzygająca, ale mimo tego jest dosyć często stosowana.



Rys. 3. Cylinder do badania kruszyw wg ASTM C289



Rys. 4. Diagram do oceny reaktywności kruszywa wg ASTM C289

## METODY BEZPOŚREDNIE - BADANIA NA ZAPRAWACH

Wyróżnia się dwa rodzaje badań na zaprawach:

- badania metodami przyspieszonymi, trwające 16 dni, polegające na przechowywaniu próbek w roztworze korozyjnym w wysokiej temperaturze,
- badania metodami długoterminowymi, trwające od 6 do 12 miesięcy.

Metody przyspieszone są bardzo przydatne do oceny kruszyw, które reagują bardzo wolno lub wytwarzają opóźnioną ekspansję. Jednakże nie pozwalają na ocenę zachowania się kruszyw w eksploatowanym betonie. Z kolei metody długoterminowe są zalecane do badań kruszyw szybko reagujących z alkaliemi. Wykazują dobrą korelację z zachowaniem się kruszyw w betonie wbudowanym w obiekty. Metod opartych na badaniach zapraw nie zaleca się do oceny kruszyw węglanowych, gdyż może nie powstać nadmierna ekspansja w wyniku reakcji alkalia-węglany. Inną wadą tych metod jest możliwe wymywanie alkaliów z próbek, przez co czasami można otrzymać zaniżone wyniki ekspansji. Stąd zaleca się zwiększenie zawartości alkaliów w cemencie do 1,25%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . Porównanie najczęściej stosowanych metod badań na zaprawach przedstawiono w tabeli 2.



Tabela 2. Porównanie metod badań na zaprawach.

	Metody przyspieszone		Metody długoterminowe	
	ASTM C1260	RILEM AAR-2	ASTM C227	PN-B-06714-34
Kryteria oceny	≤ 0,10% kruszywo niereaktywne 0,10÷0,20% odporne lub potencjalnie reaktywne ≥ 0,20% potencjalnie reaktywne	≤ 0,10% kruszywo niereaktywne 0,10÷0,20% odporne lub potencjalnie reaktywne ≥ 0,20% potencjalnie reaktywne	< 0,05% po 3 miesiącach < 0,10% po 6 miesiącach	< 0,1% Gdy kryterium jest zachowane, ale pojawią się pęknięcia, to kruszywo zostaje zdyskwalifikowane
Wielkość próbki	25×25×285 mm	AAR 2.1: 25×25×285 mm AAR 2.2: 40×40×160 mm	25×25×285 mm	25×25×250 mm
Ilość próbek	3	3	3	6
Zawartość alkaliów w cemencie NaO <sub>2,eq</sub>	Pomija się	≥ 1,0%	> 0,6%	1,2%
Rodzaj cementu	Cement zgodny z ASTM C 150 ekspansja < 0,2%	CEM I lub ASTM typ I pow. wł. ≥ 4500 cm <sup>2</sup> /g ekspansja < 0,2% lub LeChatelier = 0	Cement zgodny z ASTM C150 ekspansja < 0,2%	Cement klasy 32,5 lub 42,5
Stosunek cement:kruszywo	1:2,25 440:990g	1:2,25 AAR 2.1 – 400:900g AAR 2.2 – 600:1350g	1:2,25 300:675g	1:2 1175:2350g
w/c	0,47	0,47	określane rozplywem 105-120 mm	określane rozplywem 110-120 mm
Warunki przechowywania w formach	23 ± 1,7°C, wilgotność ≥ 95%, 24 ± 2 h	20 ± 2°C, RH ≥ 90%, 24 ± 2 h	23 ± 2°C, RH = 95%, 24 ± 2 h	20 ± 2°C, nad lustrem wody 48 h
Pielęgnacja po rozformowaniu	W wodzie destylowanej o temp. 80 ± 2°C przez 24 h Rys.5	W wodzie destylowanej o temp. 80 ± 2°C przez 24 h Rys.5	W szczelnym pojemniku, nad lustrem wody o temp. 38 ± 2°C, Rys.6	Pionowo w szczelnie zamkniętym pojemniku na lustrem wody o temp. 38 ± 2°C
Czas/warunki przechowywania w 1 M NaOH	14 dni 80 ± 1°C	14 dni 80 ± 2°C	-	-
Czas trwania badania	16 dni	16 dni	6 miesięcy lub rok	6 miesięcy



Rys. 5. Próbkę zapraw stosowane w metodach przyspieszonych



Rys. 6. Sposób przechowywania próbek wg ASTM C227

## METODY BEZPOŚREDNIE - BADANIA NA PRÓBKACH Z BETONU

Badania reaktywności kruszyw na próbkach z betonu stanowią ostateczny etap oceny. Stosowanie tych metod jest konieczne, gdy badania petrograficzne nie dostarczyły jednoznacznej odpowiedzi, czy kruszywo jest reaktywne, natomiast badania na zaprawach zakwalifikowały kruszywo jako reaktywne. Metody te zakładają ekstremalne oddziaływania alkaliów z cementu na kruszywo. Metoda ASTM C1293 jest aktualnie uważana za najbardziej reprezentatywną metodę w odniesieniu do zachowania kruszywa w betonie w konstrukcji. Niewątpliwie wadą tych metod jest czas badania, wynoszący co najmniej rok. W tabeli 3 zamieszczono porównanie wybranych metod oceny reaktywności na próbkach z betonu.

Tabela 3. Porównanie metod badań na belkach betonowych

	Metody długoterminowe		Metoda przyspieszona	
	ASTM C 1293	RILEM AAR-3		RILEM AAR-4.1
Kryteria oceny	< 0,04% po roku lub 2 latach	< 0,05% po roku		< 0,03% po 15 tygodniach
Wielkość próbki	75×75×285 mm	75×75×250 mm		75×75×250 mm
Ilość próbek	3	3		3
Zawartość alkaliów w cemencie Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	0,9% Wprowadzenie z wodą dodatkowej ilości NaOH tak aby zawartość NaO <sub>eq</sub> wzrosła do 1,25 ± 0,5%	AAR-3.1 0,9 – 1,3%	AAR-3.2 4 betony o różnej zawartości alkaliów (2 - 5 kg/m <sup>3</sup> )	0,9% - 1,3% Wprowadzenie z wodą dodatkowej ilości NaOH tak, aby zawartość NaO <sub>eq</sub> wzrosła do 1,25 ± 0,5%
Rodzaj cementu	ASTM Typ I	CEM I lub ASTM typ I		CEM I lub ASTM typ I
Ilość cementu	420 kg/m <sup>3</sup>	440 kg/m <sup>3</sup>		440 kg/m <sup>3</sup>
w/c	0,42 ÷ 0,45	0,50		0,50
Konsystencja mieszanki - rozpliw	90 ± 15 mm	100 ÷ 180 mm		100 ÷ 180 mm
Stosunek piasek : kruszywo grube	40:60	40:60		40:60
Warunki przechowywania w formach	23 ± 0,5°C, RH ≥ 95%, 23,5 ± 0,5 h	20 ± 2°C, RH ≥ 90%, 24 ± 2 h		20 ± 2°C, RH ≥ 90%, 24 ± 1 h
Przechowywanie próbek	W szczelnym pojemniku nad lustrem wody o temp. 38 ± 2°C, RH = 100% Rys.7	W szczelnym pojemniku, okryte plastikowym workiem i tkaniną bawełnianą nad lustrem wody w temp. 20 ± 2°C przez pierwsze 6 dni, a później w temp. 38 ± 2°C RH = 100%		W szczelnym pojemniku nad lustrem wody o temp. 60 ± 2°C, RH = 100% Rys.8
Czas trwania badania	1 rok lub 2 lata	1 rok		20 tygodni





Rys. 7. Przechowywanie próbek wg metody RILEM AAR-4.1



Rys. 8. Przechowywanie próbek wg metody ASTM C1293

## METODA BADAŃ REAKTYWNOŚCI ALKALICZNEJ KRUSZYW WĘGLANOWYCH RILEM AAR-5

Metoda dotyczy badania kruszyw, które zawierają w swoim składzie węglany. Procedury AAR-2 i AAR-5 opisują w podobny sposób przebieg oceny, ale w przypadku metody AAR-5 stosuje się próbki  $40 \times 40 \times 160$  mm (kruszywo  $4/8$  mm w przeciwieństwie do metody AAR-2, gdzie stosuje się kruszywo frakcji  $0/4$  mm). Badanie wykonuje się na zaprawie o składzie: 900 g cementu, 900 g kruszywa oraz 290 ml wody, z której wykonuje się 3 próbki do badań. Suma zawartości alkaliów w betonie w przeliczeniu na masę cementu powinna wynosić 1,5%. Korekty dokonuje się poprzez dodanie odpowiedniej ilości wodorotlenku sodu NaOH. Rozplływ tak przygotowanej zaprawy powinien wynosić co najmniej 115 mm. Dopuszcza się stosowanie plastyfikatora w celu korekty konsystencji mieszanki. Sposób przechowywania próbek jest analogiczny jak w metodzie AAR-2. Pierwszy pomiar (zerowy) długości belek (rys.9) wykonujemy przed umieszczeniem ich w roztworze NaOH. Kolejne pomiary zmian liniowych wykonujemy po 1, 2, 7, 14, 21 i 28 dniach. Ocenę reaktywności kruszyw węglanowych dokonuje się poprzez porównanie wyników badań z metod AAR-2 i AAR-5. W typowej reakcji alkalia-krzemiany ekspansja może być większa na próbkach z zapraw niż na próbkach z betonu. W przypadku kruszyw węglanowych ekspansja jest większa na próbkach z betonu i jest zbliżona do ekspansji kruszyw w betonie w konstrukcji. Oznacza to, że kruszywa węglanowe nie są jednoznacznie identyfikowane przy użyciu metody AAR-2. Dlatego też, jeśli ekspansja próbek z betonu jest większa niż próbek wykonanych z zapraw, prawdopodobnie zachodzi nie tylko reakcja alkalia-krzemiany i konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań metodami AAR 4.1 i/lub AAR-3.



Rys. 9. Pomiar długości próbek z betonu

Zależności dotyczące kryteriów pomiędzy metodami AAR-2 i AAR-5 (tylko dla krótszych beleczek) oraz typów reakcji, które mogą występować w kruszywach węglanowych są następujące:

- a) dla  $AAR-2 > 0,08\%$  (należy przeprowadzić dalsze badania wg AAR-3 i/lub AAR-4.1):  
 $AAR-5 < AAR-2$  potencjalnie występuje reakcja ASR,  
 $AAR-5 \geq AAR-2$  możliwość kombinacji reakcji ASR i ACR,
- b) dla  $AAR-2 < 0,08\%$ :  
 $AAR-5 \geq AAR-2$  potencjalnie występuje reakcja ACR (należy przeprowadzić dalsze badania wg AAR-3 i/lub AAR-4.1),  
 $AAR-5 < AAR-2$  nie ma potrzeby dalszych badań.

