

dr Wiktor Jasiński<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6612-4207

dr inż. Andrzej Duszyński<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8842-5630

mgr inż. Aneta Pryga-Szulc<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4233-3017

dr Wojciech Bartz<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-7267-2776

# Ocena wybranych kruszyw wapiennych pod kątem wystąpienia potencjalnej reaktywności alkalicznej w betonie

## *Assessment of selected limestone aggregates for potential alkaline reactivity in concrete*

DOI: 10.15199/33.2023.12.08

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wyniki pracy badawczej dotyczącej zjawiska potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw wapiennych. Badania wykonano pod kątem reakcji alkalia-węglany (ACR) wg Procedury GDDKiA nr PB/2/18 (z dopuszczoną modyfikacją w przypadku kruszyw węglanowych). Natomiast w badaniach petrograficznych wg wytycznych zawartych w Procedurze GDDKiA nr PB/3/18 starano się przeanalizować możliwość wystąpienia dwóch rodzajów reakcji alkalicznej, tj. alkalia-węglany (ACR) i alkalia-krzemionka (ASR). Badano trzy wybrane kruszywa wapienne w celu oceny możliwości ich stosowania do betonu. Na podstawie uzyskanych pozytywnych wyników badań potwierdzono możliwość stosowania tych kruszyw do betonów.

**Słowa kluczowe:** kruszywo wapienne; reaktywność alkaliczna; petrografia.

**Abstract.** The article presents the results of research work of potential alkaline reactivity of limestone aggregates. Potential alkaline reactivity tests were performed for the alkali-carbonate reaction (ACR) according to GDDKiA Procedure No. PB/2/18 (with permitted modifications for carbonate aggregates). However, in petrographic tests according to the guidelines contained in GDDKiA Procedure No. PB/3/18, attempts were made to include the possibility of two types of alkaline reactions, alkali-carbonates (ACR) and alkali-silica (ASR). The tests were carried out for three selected limestone aggregates in order to assess the possibility of their use in concrete. Based on the positive test results, the possibility of using these aggregates for concrete was confirmed.

**Keywords:** limestone aggregate; alkaline reactivity; petrography.

Dzięki korzystnym właściwościom fizykomechanicznym i trwałości kruszywa węglanowe (w tym wapienne) są wykorzystywane do produkcji betonów, których właściwości użytkowe nie ustępują betonom wytwarzanym z innych kruszyw [1]. Ze względu na potencjalne zanieczyszczenie kruszywa minerałami ilastymi, różnymi formami krzemionki oraz pewien stopień zdolomityzowania są one narażone na niekorzystne reakcje alkalia-krzemionka (ASR) i alkalia-węglany (ACR) [1]. Procesy te, nazywane procesami reaktywności alkalicznej kruszyw (AAR), zachodzą między potencjalnie reaktywnymi minerałami (m.in. chalcedon, opal, trydymit, mikrokrystaliczny kwarc, kwarc w stanie naprężeń „highly-strained quartz”) a alkali-ami za-

wartymi w zaczynie cementowym. Są niebezpieczne m.in. ze względu na powolną i długotrwałą destrukcję konstrukcji betonowych [2, 3]. Przeprowadzono badania reaktywności alkalicznej pod kątem wystąpienia potencjalnej reakcji alkalia-węglany (ACR), natomiast w badaniach petrograficznych analizowano możliwość wystąpienia obu typów reakcji: alkalia-węglany (ACR) i alkalia-krzemionka (ASR).

### Metody badań reaktywności alkalicznej kruszyw

Obecnie w diagnostyce zjawiska reaktywności alkalicznej kruszyw stosuje się w Polsce przede wszystkim metody opracowane na podstawie norm ASTM oraz wytycznych RILEM, które są zawarte w Procedurach Badawczych GDDKiA:

- nr PB/1/18 [4] „Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C”. Metoda polega na wykonaniu trzech beleczek betonowych

o wymiarach 25 x 25 x 250 mm i przechowywaniu ich w roztworze NaOH o stężeniu 1 mol, w temperaturze 80°C przez 14 dni. Następnie oblicza się średni przyrost długości próbek i klasyfikuje kruszywo do odpowiedniej kategorii R0 ÷ R3. Metoda dotyczy wyłącznie reakcji alkalia-krzemionka;

- nr PB/2/18 [5] „Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C wg ASTM C1293/RILEM AAR-3”. Metoda polega na wykonaniu trzech beleczek betonowych o wymiarach 75 x 75 x 250 mm i przechowywaniu ich w komorze o temperaturze 38 ± 2°C przez 365 dni. Ocenę reaktywności kruszywa przeprowadza się na podstawie średniej zmiany długości próbek i przypisuje im kategorię R0 ÷ R3. Procedura ta została zmodyfikowana w stosunku do pierwotnej metody wg ASTM C 1293-20a [6] i dopuszcza badanie podatności kruszyw węglanowych na reakcję alkalia-węglany. Instrukcja PB/2/18 podaje, że o podatności kruszy-

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Filia Wrocław

<sup>2)</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych

\*) Adres do korespondencji: w.jasinski@ibdim.edu.pl

wa węglanowego na reakcję alkalia-węglany świadczy zmiana długości próbki o co najmniej 0,03%.

Diagnostyka podatności kruszywa na reaktywność alkaliczną obejmuje również opis petrograficzny (makroskopowy i mikroskopowy), w skład którego wchodzi m.in. identyfikacja skał i składników potencjalnie reaktywnych oraz rozpoznanie produktów reakcji alkalia-krzemionka lub alkalia-węglany. Obecnie w Polsce do analizy petrograficznej kruszywa stosowana jest metoda wg PN-EN 932-3 [7]. Dodatkowo GDDKiA wprowadziła procedurę badawczą zawartą w „Zaleceniach dotyczących analizy petrograficznej kruszywa wg Procedury Badawczej GDDKiA PB/3/18 [8]”, która ma na celu m.in. określenie możliwości wystąpienia potencjalnej reaktywności alkalicznej alkalia-węglany (ACR) [3].

## Przedmiot, zakres i cel badań

Przedmiotem badań była analiza petrograficzna kruszywa wapiennych, która stanowi pierwszy etap rozpoznania ich przydatności do stosowania w budownictwie komunikacyjnym. Oceniano podatność kruszywa wapiennych na reakcję z alkalią zwartymi w betonie (ACR).

Zakres prac obejmował:

- wytypowanie kruszywa wapiennych do analizy petrograficznej;
- makroskopowe badanie petrograficzne kruszywa wapiennych;
- mikroskopowe badanie petrograficzne szlifów cienkich kruszywa wapiennych;
- oznaczenie składu fazowego kruszywa wapiennych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD);
- wykonanie analizy termicznej kruszywa wapiennych;
- oznaczenie składu chemicznego kruszywa wapiennych;
- opis petrograficzny pod kątem wystąpienia reaktywności alkalicznej (AAR – ACR) na podstawie szlifów cienkich pochodzących z beleczek betonowych.

Do badań wg Procedury Badawczej GDDKiA nr PB/2/18 [5] i PB/3/18 [8] wytypowano trzy rodzaje kruszywa wapiennych pochodzących z różnych źródeł w Polsce, które są stosowane do produkcji betonów i oznaczono je symbolami A, B, C.

## Metodyka badań petrograficznych

Wszystkie badane próbki kruszywa wapiennego poddane zostały analizie makroskopowej wg PN-EN 932-3:2022 [7]. Na jej podstawie wytypowano reprezentatywne próbki do dalszych badań mikroskopowych, analizy w dyfraktometrze rentgenowskim, analizy termicznej oraz oznaczenia składu chemicznego. Wykonano również badania mikroskopowe szlifów cienkich w świetle przechodzącym z beleczek po badaniach reaktywności alkalicznej wg Procedury Badawczej GDDKiA nr PB/2/18 [5].

W przypadku wybranej reprezentatywnej próbki kruszywa wapiennego wykonano **preparaty mikroskopowe** – szlify cienkie do światła przechodzącego, w szlifierni Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego. Badania przeprowadzono za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego Leica DM 750 P.

W celu uzyskania dokładnej charakterystyki składu fazowego badanego kruszywa wapiennego wykonano oznaczenie metodą proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) za pomocą dyfraktometru Bruker D8 Advanced, pracującego w układzie Bragg–Brentano, w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego.

W celu określenia charakterystyki składu mineralnego kruszywa wapiennych wykonano analizę termiczną za pomocą analizatora termicznego Perkin Elmer STA 6000, w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego. Oznaczenie składu chemicznego kruszywa węglanowych przeprowadzono wg metody analitycznej wykorzystującej fluorescencję rentgenowską (XRF) w Pracowni Gruntoznawczej Zakładu Geografii Fizycznej Uniwersytetu Wrocławskiego.

Szlify cienkie do badań mikroskopowych w świetle przechodzącym wykonano z wytypowanych próbek z beleczek betonowych po badaniach reaktywności alkalicznej wg Procedury Badawczej GDDKiA nr PB/2/18 [5]. Badania szlifów cienkich w świetle przechodzącym przeprowadzono przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Leica DM 750 P. Wykonano również analizę opisu petrograficznego pod kątem wystąpienia potencjalnej reaktywności alkalicznej (AAR – ACR).

## Wyniki badań

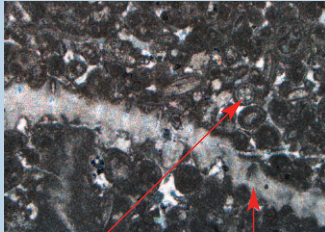
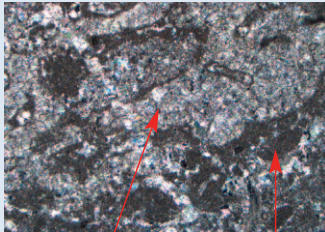
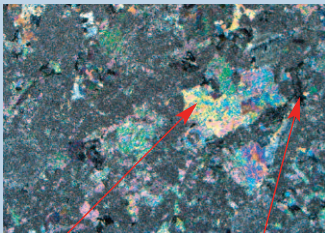
**Wyniki mikroskopowego opisu petrograficznego** na szlifach cienkich do światła przechodzącego wg ASTM C295/RILEM AAR-1.1 [9, 10] przedstawiono w tabeli 1. **Na podstawie oznaczenia składu fazowego (XRD)** w próbkach A, B, C stwierdzono występowanie refleksów jednej fazy mineralnej: kalcytu ( $\text{CaCO}_3$ ), którego wartości  $2\theta$  mieściły się w granicach  $0,105 \div 0,149$ . Przykładowy wykres fazy mineralnej oznaczonej za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) próbki A przedstawiono na rysunku 1.

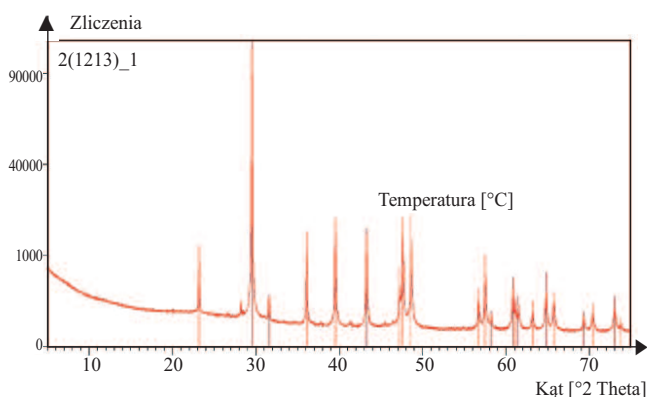
W wyniku **analizy termicznej** obliczona ilość  $\text{CaCO}_3$  na podstawie utraty masy próbki A, spowodowanej dysocjacją termiczną węglanów romboedrycznych, wynosi ok. 97% wag., próbki B – 98% wag., a próbki C – 98,5% wag. Termogram przedstawiający krzywe analizy termicznej próbki A przedstawiono na rysunku 2.

**Wyniki oznaczenia składu procentowego związków chemicznych** w próbkach A, B, C poddanych analizie geochemicznej zamieszczono w tabeli 2. Na podstawie analizy makroskopowej, analizy mikroskopowej szlifów cienkich w mikroskopie polaryzacyjnym, oznaczenia składu fazowego za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), analizy termicznej kruszywa węglanowych oznaczonych jako A, B, C uznano, że jest to skała osadowa węglanowa, której struktura, tekstura, barwa i skład petrograficzny mogą wskazywać na wapień.

W literaturze oraz dostępnych wytycznych i normach, wapień jest klasyfikowany jako skała, która może w swoim składzie zawierać minerały potencjalnie reaktywne w takiej ilości, która mogłaby wpłynąć na powstawanie procesu AAR [3, 11]. Zgodnie z Procedurą Badawczą GDDKiA PB/3/18 [8], jeżeli w wapieniu o zawartości  $\text{CaCO}_3 > 95\%$  nie stwierdza się występowania składników potencjalnie reaktywnych, tj. reaktywnych form krzemionki i minerałów ilastych lub specyficznej tekstury oraz gdy zawartość:  $\text{SiO}_2 < 3,0\%$ ,  $\text{MgO} < 1,0\%$  ( $< 5\%$  dolomitu) i  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,2\%$ , to kruszywo nie jest podatne na reakcję ACR. Analiza mikroskopowa wykonana na szlifach cienkich kruszywa wapiennego A wykazała obecność ziaren minerałów krzemionkowych (prawdopodobnie chalcedon, mikrokrystaliczny

**Tabela 1. Mikroskopowy opis petrograficzny wg ASTM C295/RILEM AAR-1.1 [9, 10]**  
*Table 1. Microscopic petrographic description based on ASTM C295/RILEM AAR-1.1 [9, 10]*

Próbka	Opis mikroskopowy	Obraz pod mikroskopem, światło przechodzące z analizatorem
A	<p>zaobserwowano ksenomorficzne, rzadko hipautomorficzne kryształy sparytu, wielkości do 0,8 mm o kształcie zatokowym i ameboidalnym oraz występujące pomiędzy nimi ziarna węglanów lekko zmętniałe o jasnobrązowym odcieniu, niewykazujące dobrej łupliwości czy zbliżniczeń tworzące mikryt. Część kryształów sparytu charakteryzuje romboedryczna łupliwość i polisyntetyczne zbliżniczenia. Widoczne są:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– struktury okrągłe, prawdopodobnie pelloidy lub ooidy;</li> <li>– struktury biogeniczne powstałe z substancji organicznych;</li> <li>– struktury żyłowe, o niewielkiej miąższości, wypełnione mikrokrystalicznymi węglanami, przecinające sparyt i mikryt;</li> <li>– ksenomorficzne ziarna minerałów krzemionkowych (prawdopodobnie chalcedon, mikrokrystaliczny kwarc), wielkości do 0,3 mm oraz hipautomorficzne ziarna muskowitu. Ziarna minerałów krzemionkowych i muskowitu występują jako wrostki w kształcie sparytu lub pomiędzy nimi;</li> <li>– minerały nieprzezroczyste, wielkości do 0,1 mm, tworzące wrostki w minerałach głównych lub występujące w interstycjach pomiędzy nimi;</li> <li>– stylolity (rdzawozłotawe żyłki) powstałe w wyniku rozpuszczania minerałów ilastych i minerałów zawierających związki żelaza. Przebiegają one przez ziarna, jak i kryształy węglanowe, wypełniając mikropęknięcia i interstycje</li> </ul>	 <p>pelloidy/ooidy oraz struktury biologiczne</p> <p>struktura żyłowa wypełniona mikrokrystalicznym sparytem</p>
B	<p>widoczne są ksenomorficzne, rzadko hipautomorficzne kryształy sparytu o kontakcie prostym, poszarpanym, zatokowym i ameboidalnym, wielkości do 0,3 mm oraz występujące pomiędzy nimi ziarna węglanów tworzące mikryt, wyraźnie zmętniałe, o lekkim jasnobrązowym odcieniu, niewykazujące dobrej łupliwości czy zbliżniczeń polisyntetycznych. Sporadycznie w kryształach sparytu stwierdzono polisyntetyczne zbliżniczenia. Zaobserwowano też:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– struktury okrągłe, prawdopodobnie pelloidy lub ooidy, oraz struktury biogeniczne powstałe z substancji organicznych;</li> <li>– struktury żyłowe, przecinające sparyt i mikryt o niewielkiej miąższości, wypełnione mikrokrystalicznymi węglanami</li> </ul>	 <p>sparyt węglanowy</p> <p>mikryt węglanowy</p>
C	<p>widoczne są duże spękania skały, ksenomorficzne, sporadycznie hipautomorficzne kryształy sparytu, wielkości do 0,6 mm wtopione w ziarna węglanów tworzące mikryt, o lekkim jasnobrązowym, jasnoszarym odcieniu, niewykazujące łupliwości czy zbliżniczeń polisyntetycznych. Zaobserwowano też:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– struktury biogeniczne powstałe z substancji organicznych;</li> <li>– struktury żyłowe o niewielkiej miąższości, wypełnione mikrokrystalicznymi węglanami i sparytem;</li> <li>– minerały nieprzezroczyste wielkości do 0,1 mm, tworzące wrostki w minerałach głównych lub występujące w interstycjach pomiędzy nimi. Niektóre minerały nieprzezroczyste wykazują oznaki wietrzenia</li> </ul>	 <p>sparyt węglanowy</p> <p>minerały nieprzezroczyste</p>



**Rys. 1. Wykres fazy mineralnej próbki o symbolu A**  
*Fig. 1. Mineral phase diagram of the sample with symbol A*

kwarc) należących do minerałów możliwie potencjalnie reaktywnych (wg AAR-1, tabela A. 1.3 [11] i tabela Z3.2. [3]), ale z powodu tak małej ilości nie stwierdzono refleksów tych faz w dyfraktometrze rentgenowskim (XRD). Szkodliwej reakcji ACR sprzyja także charakterystyczna tekstura kruszywa:

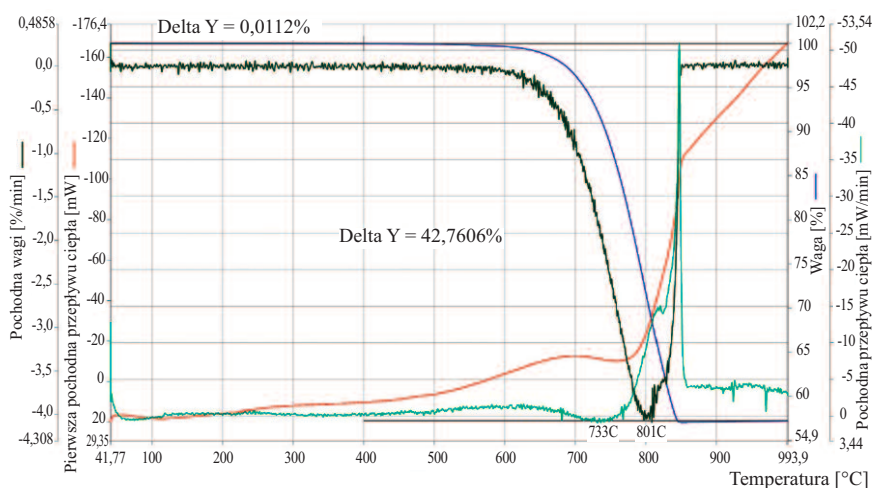
minerałów ilastych. W badanej próbce kruszywa B i C nie stwierdzono składników potencjalnie reaktywnych, tj. form krzemionki i minerałów ilastych, a zawartość podstawowych tlenków nie została przekroczona. Wyniki analizy opisu petrograficznego pod kątem AAR zestawiono w tabeli 3.

występowanie romboicznych kryształów dolo-  
 mitu wielkości 20 ÷ 50 µm  
 w drobnoziarnistej ma-  
 trycy zbudowanej z kal-  
 cytu mikrokrystaliczne-  
 go i minerałów ilastych.  
 Obecność stylolitów po-  
 wstałych prawdopodobnie  
 w wyniku rozpuszcza-  
 nia się minerałów ilas-  
 tych i minerałów zawie-  
 rających związki żelaza  
 może świadczyć o zawar-  
 tości pewnej ilości

W związku z otrzymanymi wynika-  
 mi badań opisu petrograficznego  
 pod kątem AAR przeprowadzono bada-  
 nia zmian liniowych beleczek beto-  
 nowych wg PB/2/18 [5] oraz badania  
 mikroskopowe na szlifach cienkich  
 w świetle przechodzącym wycinków  
 beleczek po badaniach reaktywności al-  
 kalicznej w celu określenia podatności  
 badanych próbek kruszyw wapiennych  
 na reakcję ACR. Na podstawie uzyska-  
 nych wyników badań reaktywności  
 alkalicznej wg Procedury Badawczej  
 GDDKiA nr PB/2/18 [5] stwierdzono,  
 że żadne z wytypowanych kruszyw wa-  
 piennych nie jest reaktywne, ponieważ  
 zmiany liniowe nie przekraczają do-  
 puszczalnych 0,03% (rysunek 3).

W obrazie mikroskopowym wykonanym  
 na szlifie cienkim w świetle przechodzą-  
 cym nie zaobserwowano niepokojących  
 zjawisk mogących sugerować zachodzące  
 procesy ACR, m.in. otoczek wokół ziaren





Rys. 2. Krzywe analizy termicznej (termogram) próbki A  
Fig. 2. Thermal analysis curves (thermogram) of sample with symbol A

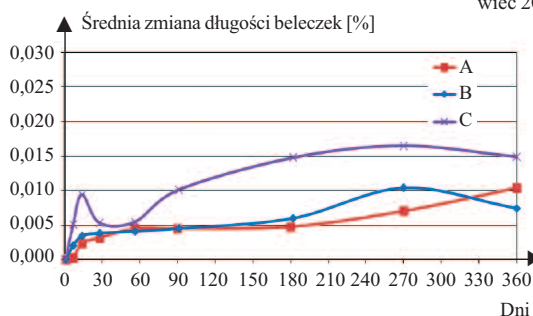
Tabela 2. Zawartość tlenków  
Table 2. Oxide contents

Oznaczenie	próbka A	Udział [%]	próbka B	próbka C
SiO <sub>2</sub>	0,496		0,275	<0,1
CaO	54,880		55,120	55,234
MgO	0,551		0,394	0,404
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,063		0,069	0,082
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,127		0,175	0,042
K <sub>2</sub> O	0,014		0,012	<0,01
TiO <sub>2</sub>	0,006		0,009	0,003
Na <sub>2</sub> O	<0,01		<0,01	<0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,009		0,026	0,016
SO <sub>3</sub>	0,035		0,042	0,038
MnO <sub>2</sub>	0,011		0,017	0,010
Suma pozostałych:	43,770		43,850	44,150

wypełnionych substancją żelową czy mikropęknięć wypełnionych substancją żelową w przypadku żadnej z badanych próbek.

**Wnioski**

Badania petrograficzne próbki kruszywa wapiennego A wykazały obecność składników i innych cech mogących wpłynąć na proces ACR w betonie. W próbkach B i C nie wykryto tych składników. Badania zmian liniowych



Rys. 3. Zestawienie średnich zmian liniowych badanych beleczek z kruszywami wapiennymi  
Fig. 3. Summary of average linear changes in the tested beams with limestone aggregates

beleczek betonowych potwierdziły brak wystąpienia reakcji ACR w przypadku wszystkich badanych próbek, ponieważ średnia zmiana długości beleczek nie przekracza 0,03% oraz nie odnotowano zmian w wyglądzie powierzchni zewnętrznej. W obrazie mikroskopowym wykonanym na szlifie cienkim w świetle przechodzącym również nie zaobserwowano zjawisk mogących sugerować zachodzące procesy ACR. Przeprowadzone badania oraz analizy nie wykazały podatności badanych próbek kruszyw wapiennych na procesy zachodzące po-

Tabela 3. Wyniki analizy opisu petrograficznego pod kątem AAR  
Table 3. Results of the analysis of the petrographic description in terms of AAR

Badana próbka	Zawartość związków chemicznych/innych cech mogących wpłynąć na proces AAR w badanych próbkach					potencjalnie reaktywnych	inna cecha: budowa wewnętrzna
	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
A	> 95%	0,496	0,551	0,127		prawdopodobnie: – chalcedon, – mikrokryształiczny kwarc	– występowanie rombów krysztalów dolomitu o wielkości w zakresie 20 ÷ 50 μm – występowanie minerałów ilastych i stylolitów
B	> 95%	0,275	0,394	0,175		brak	brak
C	> 95%	< 0,1	0,404	0,042		brak	brak

między węglanami a alkaliami zawartymi w betonie (ACR) i potwierdziły możliwość ich stosowania do betonów.

**Literatura**

[1] Łagosz A, Ulanowska D. Trwałość wybranych kruszyw wapiennych stosowanych do produkcji betonów w warunkach oddziaływania środowiska alkalicznego. Dni Betonu 2021, str. 1069 – 1085.  
 [2] Jasiński W, Duszyński A, Jórdeczka Ł, Pryga-Szulc A. Ocena kruszyw granitowych stosowanych do betonu pod względem wystąpienia potencjalnej reaktywności alkalicznej. Przegląd Geologiczny. 2020; 68 (10): 759 – 763.  
 [3] Garbacik A, Glinicki MA, Józwiak-Niedźwiedzka D, Adamski G, Gibas K. Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich wraz z załącznikami, czerwiec 2019; Garbacik A., Glinicki M. A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Adamski G., Bukowski L. aktualizacja kwiecień 2021.  
 [4] Procedura Badawcza GDDKiA nr PB/1/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C. Załącznik nr 1. Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich.  
 [5] Procedura Badawcza GDDKiA nr PB/2/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C wg ASTM C1293/RILEM AAR-3. Załącznik nr 2. Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich.  
 [6] ASTM C 1293 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction (Standardowa metoda badawcza do określania zmiany długości beleczek betonowych w wyniku reakcji alkalia-krzemionka).  
 [7] PN-EN 932-3:1999+A1:2004 Badania podstawowych właściwości kruszyw. Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego.  
 [8] Procedura Badawcza GDDKiA nr PB/3/18 Analiza petrograficzna kruszyw. Załącznik nr 3. Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich.  
 [9] ASTM C 295-03 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete (Przewodnik do badań petrograficznych kruszyw do betonu).  
 [10] RILEM AAR-1.1 Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method (Wykrywanie potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw – metoda petrograficzna).  
 [11] RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates- Petrographic method, RILEM TC 191-ARP, Materials and Structures, Vol. 36, August-September 2003, pp 480-496.

Przyjęto do druku: 21.11.2023 r.