

Analiza przyczyn uszkodzeń betonowej nawierzchni drogi ekspresowej w rejonie Polski centralnej

Analysis of causes of damage to concrete highway pavement in central Poland

Michał A.Glinicki, Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka, Aneta Antolik, Kinga Dziedzic, Mariusz Dąbrowski, Karolina Bogusz, Paweł Lisowski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Streszczenie

Po 15 latach eksploatacji odcinka drogi ekspresowej zaobserwowano przedwczesne uszkodzenia nawierzchni betonowej objawiające się widocznymi spękaniami, głównie wzdłuż spoin poprzecznych oraz w narożach płyt. Na próbkach-odwiertach przeprowadzono badania diagnostyczne, obejmujące analizę petrograficzną betonu i kruszyw mineralnych przy użyciu mikroskopii optycznej i skaningowej, ocenę właściwości sprężystych, stopnia spękania i charakterystyki porów, a również identyfikację produktów reakcji alkalia-krzemionka. Stwierdzono liczne pęknięcia w ziarnach kruszywa grubego kwarcytowego oraz w matrycy cementowej. W ziarnach kwarcytu zidentyfikowano znaczącą obecność kwarcu mikrokrystalicznego i kryptokrystalicznego. Jednoznacznie zidentyfikowano produkty reakcji alkalia-krzemionka o typowym składzie. Znaczne spękanie i zmniejszenie modułu sprężystości skorelowano z obecnością reaktywnego kwarcu w kruszywie kwarcytowym, uznając reakcję alkalia-krzemionka za główną przyczynę uszkodzeń. Przedyskutowano możliwą rolę dodatkowych czynników destrukcyjnych, takich jak wpływ ruchu pojazdów ciężkich oraz agresja mrozu.

Słowa kluczowe: beton, diagnostyka, kruszywo, kwarcyt, nawierzchnia drogowa, reakcja alkalia-krzemionka, spękania, trwałość

Objętość artykułu: 5050 słów (tekst + bibliografia) + 10 rysunków*250 = 7550 słów

1. Wprowadzenie

Betonowe nawierzchnie nowych dróg ekspresowych projektuje się zazwyczaj na 30-letni okres eksploatacji pod obciążeniem ruchem pojazdów o określonym, dopuszczalnym nacisku na oś pojazdu [1]. Faktyczna trwałość nawierzchni betonowych może być znacznie dłuższa [2, 3]. Przedwczesne wystąpienie uszkodzeń nawierzchni wymaga analizy różnych możliwych mechanizmów uszkodzeń i przewidywania dalszej możliwości eksploatacji [4]. Oprócz obciążenia ruchem pojazdów pod uwagę bierze się efekty oddziaływań środowiskowych, efekty zimowego utrzymania nawierzchni oraz możliwości wystąpienia degradacji warstw podłoża i podbudowy. Betonowe płyty nawierzchni na ogół pozostają stale zawilgocone, co sprzyja wystąpieniu uszkodzeń mrozowych. Jedną z przyczyn uszkodzeń nawilżonego betonu może być ekspansywna reakcja alkalia-krzemionka (ASR), występująca w szczególnym przypadku obecności reaktywnych składników kruszyw mineralnych i wysokiej zawartości jonów alkalicznych w cieczy porowej betonu [5-7]. Uszkodzenia betonowych nawierzchni drogowych i lotniskowych spowodowane reakcją ASR stwierdzono np. w krajach Europy i Ameryki, przy czym do typowych objawów należą: sieć gęstych spękań, zwłaszcza w pobliżu szczelin, wykuszanie się krawędzi szczelin, odpryski ziaren kruszywa lub wyciskanie materiału wypełniającego szczeliny [8-10]. Widoczne gołym okiem oznaki uszkodzeń, zwykle zaczynające się od przebarwień przy szczelinach poprzecznych i podłużnych, pojawiają się po 7-15 latach eksploatacji nawierzchni [11]. Rozwarcie spękań powierzchniowych na ogół mieści się w granicach od 0,05 mm do 10 mm w skrajnych przypadkach. Spękania niekiedy są wypełnione mlecznobiałym żelem, żel występuje też na obrzeżach reaktywnych ziaren kruszywa. Widoczne na powierzchni spękania wywołane ASR rzadko penetrują w głąb więcej niż od 25 do 50 mm, jedynie w rzadkich przypadkach dochodząc do głębokości >100 mm, gdzie przekształcają się w mikropęknięcia. Intensywny rozwój spękań spowodowanych postępem ASR może skutkować poważnym uszkodzeniem nawierzchni w otoczeniu szczelin dylatacyjnych i niebezpiecznymi odpryskami luźnych kawałków betonu, w konsekwencji uniemożliwiając bezpieczne użytkowanie nawierzchni.

Rozpoznanie przyczyn uszkodzenia w każdym przypadku nawierzchni opisanych w [8-12], było poparte petrograficzną analizą obecności produktów reakcji alkalia-krzemionka w ziarnach kruszywa, na granicy ziaren, w matrycy cementowej lub porach powietrznych. Reaktywne kruszywa wywołujące opisane efekty w betonie nawierzchniowym obejmowały

szkliste skały wulkaniczne, wysoce reaktywne wapienie krzemionkowe, a także naturalne żwiry oraz porfirowe skały wulkaniczne. Fishboeck i Harmuth [8] zaobserwowali uszkodzenia na austriackiej autostradzie A9 po 13 latach eksploatacji i wykazali, że przyczyną była reakcja alkalia-krzemionka w kruszywie kwarcytowym i gnejsowym. Frybort i in. [13] zidentyfikowali wiele innych kruszyw reaktywnych w betonie nawierzchniowym, stwierdzając, że rodzaj minerałów reaktywnych jest decydującym czynnikiem występowania przedwczesnych uszkodzeń nawierzchni w wyniku reakcji alkalia-krzemionka.

W Polsce nie odnotowano wcześniej poważniejszych objawów degradacji nawierzchni dróg ekspresowych w wyniku reakcji alkalia-krzemionka w betonie. Badania konstrukcji betonowych uszkodzonych w wyniku ASR [14] ujawniły przypadki wiaduktów drogowych i budynków, których to dotyczy. Przedmiotem niniejszej pracy jest przypadek uszkodzeń nawierzchni drogi ekspresowej w strefie klimatu umiarkowanego po 15 latach eksploatacji. Powodem podjętych badań diagnostycznych były spękania i wykruszenia nawierzchni ujawnione podczas oceny wizualnej, sugerujące, że możliwą ich przyczyną mogła być reakcja alkalia-krzemionka w betonie. Celem pracy jest rozpoznanie zasadniczych przyczyn zaobserwowanego uszkodzenia nawierzchni drogowej.

2. Badania doświadczalne

2.1. Obserwacje terenowe i próbki

Przeprowadzono oględziny odcinka nawierzchni betonowej dyblowanej i kotwionej, wybudowanej metodą ślizgową w latach 2002-2003. Konstrukcja drogi była zaprojektowana dla drogi ekspresowej o kategorii ruchu KR6 przy grubości warstwy betonu nawierzchniowego 27 cm i wykorzystaniu istniejącej nawierzchni asfaltowej jako podbudowy. Ocena wizualna wykazała uszkodzenia wielu płyt nawierzchni, widoczne na powierzchni na dwóch pasach ruchu i na pasie awaryjnym. Pęknięcia znajdowały się w sąsiedztwie naciętych szczelin, przede wszystkim wzdłuż szczelin poprzecznych lub w narożach płyt (Rys.1a). Ze względu na wykruszanie się betonu przy szczelinach poprzecznych, zaobserwowano również łaty naprawcze. Spękania występowały w formie siatki rys o maksymalnej rozwarości do 2 mm.

Wzdłuż szczelin poprzecznych zaobserwowano ciemniejsze przebarwienia betonu (Rys.1.b). Spękania widoczne na powierzchni jezdni były wypełnione mlecznobiałym żelem (Rys.2a).

Na powierzchni jezdni widoczna była siatka spękań (Rys.2b), które penetrowały w głąb betonu na głębokość kilku cm. Jak pokazano na Rys.2c, takie pęknięcia przechodziły przez duże ziarna kruszywa o jasnobieżowym/jasnoszarym kolorze, ale nie przez ciemniejsze szaro/zielonkawe kruszywo. Nie zauważono znaczących oznak łuszczenia się powierzchni.

Z wybranych płyt nawierzchni pobrane zostały próbki-odwierty o średnicy 100 mm przez całą grubość płyty betonowej, wynoszącą od 27 do 30 cm. Próbki-odwierty pobrano zarówno z płyt spękanych, jak i niespękanych, z pasa ruchu wolnego i z pasa awaryjnego, z jezdni w kierunku południowo-zachodnim i w kierunku północno-wschodnim. Niektóre z odwiertów, pobranych z miejsc wykazujących spękania na powierzchni jezdni, rozdzieliły się na dwie części, kiedy okazało się, że spękanie jest przez całą grubość.

Rys.1

Rys.2

Z raportu archiwalnego [15] wynika, że właściwości użytych materiałów były zgodne ze ówczesnymi specyfikacjami projektowymi. Właściwości betonu oznaczone na próbkach kontrolnych wykonanych w czasie budowy były następujące:

- 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie od 40,1 do 60,8 MPa (klasa betonu B40),
- 28-dniowa wytrzymałość na zginanie od 3,9 do 6,3 MPa (niektóre próbki nie osiągnęły wymaganej wytrzymałości na zginanie 5,5 MPa),
- nasiąkliwość masowa od 3,9 do 4,6%,
- stopień mrozoodporności F150 (spadek wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania w granicach od 4,0 do 13,1%).

Beton nawierzchniowy wykonano ze składników podanych w Tabl.1. Właściwości kruszyw wszystkich frakcji spełniały wszystkie wymagania specyfikacji projektowej [15], w tym wymagania w zakresie reaktywności alkalicznej, określonej przez „zerowy” stopień reaktywności alkalicznej zgodnie z normą [16].

Tablica 1. Skład mieszanki betonowej według danych archiwalnych [15]

Składnik	Zawartość [kg/m ³]
cement portlandzki CEM I 32,5 R *)	360
Woda	144
piasek naturalny 0/2mm	551
grys amfibolitowy 2/8 mm	228
grys amfibolitowy 8/16 mm	475
grys kwarcytowy 16/32 mm	645
domieszka napowietrzająca	0.576
domieszka uplastyczniająca	1.80

*) zawartość alkaliów nieudokumentowana

2.2. Metody badań

Za pomocą piły diamentowej z pobranych próbek-odwiertów wycięto próbki do petrograficznej analizy minerałów reaktywnych w kruszywie, do mikroskopowej analizy mikrostruktury betonu oraz do określenia właściwości fizycznych betonu. Najbardziej uszkodzone kawałki betonu rozpadły się podczas cięcia. Obserwacje mikroskopowe na Zgłady polerowane i cienkie szlify wykonano z pionowych przekrojów odwiertów z nawierzchni, wykorzystując aparaturę i metodykę przedstawioną w [17-18]. Zastosowano następujące metody badań.

1. Analiza cienkich szlifów metodą mikroskopii optycznej: rozpoznanie minerałów reaktywnych w ziarnach kruszywa, identyfikacja produktów reakcji ASR w betonie. Analizę wykonano na cienkich szlifach wyciętych w górnej warstwie 50 mm odwiertów rdzeniowych, zgodnie z procedurą PB/3/2018 [19], będącą częścią Wytycznych [20] opracowanych na podstawie przewodników RILEM i ASTM. Obserwacje mikroskopowe prowadzono w świetle przechodzącym z polaryzatorami równoległymi (PPL), polaryzatorami skrzyżowanymi (XPL), także z płytką gipsową (XPL_G) oraz w świetle ultrafioletowym (UV).

2. Analiza zgładów metodą mikroskopii skaningowej z mikroanalizą EDS: rozpoznanie produktów reakcji alkalia-krzemionka, identyfikacja składu w mikroobszarach zgodnie z [7], [19] na wypolerowanych próbkach 25x45 mm wyciętych z rdzeni.

3. Ocena spękań w przekrojach betonu za pomocą cyfrowej analizy obrazów na cienkich szlifach w świetle UV i polerowanych zglądach za pomocą metodą mikroskopii skaningowej metodą cyfrowej analizy zgodnie z [21]. Analizę przeprowadzono na przekrojach trzech odwiertów z pasa ruchu wolnego i trzech odwiertów z pasa awaryjnego nawierzchni; powierzchnia każdego przekroju wynosiła około 1000 mm².

4. Ocena właściwości sprężystych próbek betonu: pomiary rezonansowego modułu sprężystości próbek pryzmatycznych 30x25x240 mm, wyciętych z odwiertów rdzeniowych – zgodnie z [22].

5. Pomiary charakterystyki porów w przekrojach próbek betonu wyciętych z odwiertów rdzeniowych – zgodnie z PN-EN 480-11 [23].

6. Rozpoznanie potencjału dalszego występowania reakcji: pomiary ekspansji próbek betonu 30x25x240 mm wyciętych z odwiertów rdzeniowych, z zamocowanymi czopikami pomiarowymi, wystawionych na oddziaływanie roztworu 1M NaOH o temperaturze 80 °C - zgodnie z [24].

6. Ocena reaktywności kruszywa kwarcytowego z tego samego złoża, co kruszywo użyte do betonu: pomiary ekspansji próbek betonu w temperaturze 38 °C zgodnie z procedurą PB/2/2018 [25] oraz pomiary ekspansji próbek zaprawy w 80 °C zgodnie z procedurą PB/1/2018 [26]. Do wykonania próbek stosowano cement portlandzki CEM I 52,5 R o zawartości alkaliów 0,88% Na₂O_{eq}.

3. Wyniki badań

3.1. Wyniki analizy składników betonu

Analiza makroskopowa betonu wykazała jednorodny rozkład ziaren kruszywa grubego w przekrojach odwiertów, przy czym wyróżniono dwa rodzaje łamanego kruszywa grubego: ziarna jasnobieżowe oraz ziarna szare. Zaobserwowano wyraźnie widoczne pęknięcia w obrębie ziaren kruszywa jasnobieżowego w odróżnieniu od ziaren kruszywa szarego bez widocznych pęknięć. W spękanych ziarnach kruszyw oraz w pustkach powietrznych widoczna była biała substancja żelowa. Zawartość dużych pustek powietrznych (o średnicy powyżej 2 mm) wynosiła do 1,8% i 2,8%, odpowiednio w górnej i dolnej części płyty nawierzchni. Stwierdzono występowanie spękań w płaszczyźnie równoległej do powierzchni

jezdni, przechodzących zarówno przez matrycę cementową, jak i grube kruszywo. Pęknięcia w przekroju rdzeni betonowych były wyraźnie widoczne nawet w przypadku niewielkich pęknięć widocznych na powierzchni nawierzchni.

W wyniku analizy petrograficznej kruszywa w betonie stwierdzono:

- obecność ziaren łamanego kruszywa kwarcytowego (zbudowanego głównie z kwarcu) oraz kruszywa amfibolitowego (zbudowanego głównie z amfiboli i plagioklazu), tworzących kruszywo grube – Rys. 3;

- obecność piasku kwarcowego zawierającego także ziarna wapienia, tworzących kruszywo drobne;

- pojedyncze ziarna mułowca w grubym kruszywie.

W ziarnach kwarcytu stwierdzono występowanie kwarcu i śladowych ilości muskowitu. Ziarna kwarcu mają barwy przede wszystkim od białej do jasnoszarej, nawet do czarnej, w zależności od ich orientacji optycznej. Skała kwarcytowa charakteryzuje się typową mozaikową strukturą bez spoiwa, zbudowana jest z ziaren kwarcu o kształtach izometrycznych lub wydłużonych. Kwarcyt jest twardy, gęsty, czasami z małymi kawernami i szczelinami częściowo lub całkowicie wypełnionymi kryształami kwarcu.

Rys. 3

Mikroskopowa obserwacja cienkich przekrojów wykazała obecność substancji żelowej w pękniętych ziarnach kruszywa kwarcytowego oraz w otaczającym zaczynie cementowym (Rys.4); nie było spękań ani takich produktów w ziarnach kruszywa amfibolitowego ani w ziarnach piasku. Produkty reakcji ASR częściowo lub całkowicie wypełniły wiele porów powietrznych (Rys.5), zwłaszcza tych o średnicy do 200 μm . Stwierdzono, że niektóre pory powietrzne zostały częściowo wypełnione produktami hydratacji cementu (ettringit). Obfitą obecność substancji żelowej wypełniającej spękania w ziarnach kwarcytu zaobserwowano zarówno w próbkach pobranych z pasa ruchu powolnego, jak też z pasa awaryjnego.

Rys.4

Rys. 5

Analiza obrazu petrograficznego z wykorzystaniem cyfrowej analizy obrazów pozwoliła na określenie wielkości i zawartości kwarcu w kruszywie kwarcytowym. Równoważną średnicę rozdzielonych ziaren kwarcu na obrazach wyznaczono, aby umożliwić klasyfikację wielkości ziaren. Zgodnie z terminologią przyjętą w [27] kwarc jest identyfikowany jako mikrokrystaliczny, jeśli wielkość ziaren jest mniejsza niż 100 μm , jako kryptokrystaliczny, jeśli $< 10 \mu\text{m}$. Obserwowane różnice w wielkości ziaren kwarcu w kruszywie kwarcytowym ilustruje Rys. 6. Obecność kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego w ziarnach kruszywa kwarcytowego jest obfita.

Rys. 6

Wyniki oszacowania zawartości kwarcu mikrokrystalicznego i kryptokrystalicznego w ziarnach kwarcytu przedstawiono w Tablicy 2. Zawartość reaktywnych form kwarcu w kruszywie kwarcytowym była duża, stwierdzono korelację z występowaniem pęknięć w kruszywie. W spękanych ziarnach kwarcytu zawartość reaktywnych form kwarcu sięgała powyżej 10%, natomiast w ziarnach niespękanych ich zawartość wynosiła poniżej 7%.

Tablica 2. Zawartość kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego w kruszywie kwarcytowym w ziarnach spękanych i niespękanych (wartość średnia na 8 cienkich szlifach i zakres od-do)

Pas jezdni	Nr szlifu	Pole przekroju ziaren kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego w stosunku do całkowitego przekroju kruszywa kwarcytowego [%]	
		kruszywo niespękane	kruszywo spękane
Pas ruchu wolnego	5A	6.4 (4.6-7.8)	22.7 (19.9-26.2)
	8A	4.7 (3.0-6.8)	35.0 (27.9-40.0)
	10A	5.8 (3.7-8.3)	11.0 (8.2-13.7)
Pas awaryjny	3A	brak	14.7 (10.6-20.0)
	7A	7.4 (4.3-9.9)	9.5 (7.9-12.1)

Obserwacje w mikroskopie skaningowym potwierdziły obecność produktów żelowych w pęknięciach ziaren kruszywa kwarcytowego, produkty żelowe wychodziły też poza ziarno na obszar matrycy cementowej, Rys. 7. Mikroanaliza rentgenowska produktu reakcji w

mikroobszarach wykazała, że jest to potasowo-sodowy -krzemian wapnia ze znacznym stężeniem potasu (K), sodu (Na) i wapnia (Ca), Rys. 8. Wyznaczoną charakterystykę jego składu jakościowego w kruszywach kwarcytowych określają uśrednione wskaźniki: $(Na+K)/Si = 0.32 \pm 0.09$; $Ca/Si = 0.57 \pm 0.17$. Charakterystyka składu pierwiastkowego przedstawionego w Tablicy 3 odpowiada zakresowi składu produktów reakcji alkalia-krzemionka znanemu z literatury [1, 7, 13, 28, 29], m.in. $(Na + K)/Si$ w granicach 0,2-0,35.

Rys.7

Rys.8

Obserwowana zmienność składu produktu ASR związana jest z jego lokalizacją w ziarnie kwarcytu, w zaczynie cementowym lub w pustkach powietrznych. Na rys. 9 przedstawiono barwne mapy stężeń pierwiastków K, Ca i Na w obszarze spękanego ziarna kwarcytu oraz w otaczającym obszarze matrycy cementowej. Zmiana intensywności koloru obrazuje przenikanie danego jonu przez granicę ziarno-matryca cementowa. Stwierdzono, że stężenie Ca w żelu ASR wzrasta wraz ze wzrostem odległości od granicy ziarna kruszywa. Iloraz $(Na+K)/Si$ charakteryzujący skład produktów ASR w matrycy cementowej i w pustkach powietrznych wynosi odpowiednio $0,28 \pm 0,11$ i $0,20 \pm 0,16$. Zaobserwowane różnice stężenia pierwiastków w produktach ASR obecnych w próbkach z pasa ruchu wolnego i pasa awaryjnego nie są spójne i nie pozwalają na dalszą analizę.

Ryc.9

Tablica 3. Wyniki mikroanalizy składu produktów reakcji ASR w mikroobszarach wewnątrz spękań w ziarnach kruszywa kwarcytowego – iloraz zawartości sodu, potasu i wapnia do krzemu (wynik z co najmniej dwudziestu pięciu różnych mikroobszarów)

(na osobnej kartce)

3.2. Spękania betonu

Ogólna ocena rozwartości rys obserwowanych na cienkich szlifach z betonu nawierzchniowego wykazała, że rysy w ziarnach kruszywa kwarcytowego mają rozwartość około 40-80 μm (mniejsze pęknięcia) lub 250-350 μm (pęknięcia główne). Rysy w osnowie cementowej wypełnionej produktem żelowym miały rozwartość około 60 ÷ 120 μm .

Charakterystyka systemu rys w betonie na podstawie cyfrowej analizy obrazu w świetle UV [21] opiera się na następujących parametrach:

- całkowita długość rys [mm] - suma długości dendrytycznych wszystkich wykrytych pęknięć,

- całkowita powierzchnia rys [mm^2] - suma powierzchni rys,

- względna długość rys [mm^{-1}] – stosunek całkowitej długości rys do powierzchni obrazu,

- względna powierzchnia zarysowań [%] – stosunek całkowitej powierzchni rys do powierzchni obrazu.

Całkowita długość rys na jednostkę pola przekroju wynosiła odpowiednio $0,39 \pm 0,03 \text{ mm}^{-1}$ i $0,47 \pm 0,02 \text{ mm}^{-1}$ w próbkach pasa awaryjnego i pasa ruchu powolnego. Względna powierzchnia rys wynosi $2,2 \pm 0,2\%$ i $3,1 \pm 0,4\%$, odpowiednio w betonie pasa awaryjnego i pasa wolnego ruchu. Oba parametry wskazują na większy stopień spękania betonu pobranego z pasa ruchu powolnego, odpowiednio o około 20% i 42%.

Dzięki cyfrowej rekonstrukcji rozkładu kruszywa grubego i układu rys uzyskano charakterystykę rys w obrębie ziaren kruszywa grubego w betonie. Wyniki przedstawiono w Tablicy 4. Rysy w ziarnach kruszyw są zdecydowanie częściej obserwowane w kruszywie kwarcytowym niż w innym kruszywie, różnica jest rzędu wielkości.

Wyniki oceny układu mikropęknięć w ziarnach kruszywa przeprowadzonej na obrazach SEM również wykazały silne efekty lokalizacji rdzenia betonowego: łączna długość mikrorys była ponad 5-krotnie większa w próbkach z pasa wolnego ruchu powolnego niż w próbkach z pasa awaryjnego. W ziarnach kruszywa kwarcytowego pierwotnego (kruszywo z kamieniołomu, niewykorzystane do betonu) zaobserwowano bardzo niewiele mikrospeknięć – ich charakterystyka była dość podobna do mikropęknięć kruszyw w betonie pobranym z pasa

awaryjnego. Ponieważ pomiary spękań mikrospeknię na zglądach w SEM i spękań obserwowanych na cienkich szlifach prowadzono przy rozdzielczości zróżnicowanej o rząd wielkości, wyniki nie mogą być bezpośrednio porównywane.

Tablica 4. Charakterystyka rys w ziarnach kruszywa grubego w próbkach betonu z pasa awaryjnego i pasa ruchu powolnego

Pas jezdni	Ziarna kruszywa	Względna długość spękań *) [mm ⁻¹]		Względna powierzchnia spękań *) [%]	
Pas ruchu powolnego	kwarcyt	4.03	6.73	11.1	18.5
	inne	(wszystkie ziarna)	0.47	(wszystkie ziarna)	1.5
Pas awaryjny	kwarcyt	3.32	5.70	8.7	14.6
	inne	(wszystkie ziarna)	0.39	(wszystkie ziarna)	1.4
- (kruszywo z kopalni)	kwarcyt	0.50		1.0	

*) względem pola powierzchni przekroju ziaren kwarcytu widocznych na cienkich szlifach

3.3. Charakterystyka porów powietrznych i moduł sprężystości betonu

Charakterystykę porów powietrznych w próbkach-odwiertach z nawierzchni przedstawiono w Tablicy 5. Jedynie w jednym z trzech rdzeni całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie przekraczała 3%, w pozostałych rdzeniach była mniejsza. Tylko w jednym z trzech rdzeni zawartość mikropustek przekraczała 1,5%, a współczynnik rozmieszczenia porów nie przekraczał 0,20 mm. Jedynie w przypadku próbki rdzeniowej nr 10 charakterystykę porów powietrznych można uznać za odpowiednią pod względem wymaganej odporności na zamrażanie-rozmrażanie [1, 30]. Warto przypomnieć, że w okresie budowy nawierzchni specyfikacje na beton nie obejmowały określonej charakterystyki porów w betonie stwardniałym.

Tablica 5. Charakterystyka porów w betonie stwardniałym wg PN-EN 480-11 wyznaczona na polerowanych przekrojach odwiertów z pasa ruchu powolnego nawierzchni

Charakterystyka porów w betonie	Numer próbki rdzeniowej		
	5	8	10
Zawartość powietrza [%]	2.02	1.21	3.07
Powierzchnia właściwa porów [mm ⁻¹]	24.53	29.89	30.47
Wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.31	0.31	0.20
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ [%]	0.72	0.60	1.69

Właściwości sprężyste betonu w nawierzchni zostały określone na podstawie rezonansowej częstotliwości drgań przy zginaniu na próbkach wyciętych z odwiertów. Odwierty z pasa ruchu powolnego okazały się zbyt spękane, dlatego uzyskanie odpowiednich próbek okazało się niemożliwe. Rezonansowy moduł sprężystości betonu z pasa awaryjnego wynosił 17,5 ± 3,0 GPa, a zatem był mały i wykazał podwyższoną zmienność, co wskazuje na zróżnicowanie degradacji betonu. Prognozowany według wzoru z fib Model Code [31] moduł sprężystości betonu o wytrzymałości na ściskanie 40 MPa z kruszywem kwarcytowym wynosi 34 GPa. Przy założeniu stosunku modułu sprężystości dynamicznego do statycznego wynoszącego 1,2, uzyskuje się prognozowany rezonansowy moduł sprężystości 41 GPa betonu po 28 dniach dojrzewania. Nawet przy tak przybliżonym porównaniu, na co najmniej 50% można oszacować zmniejszenie modułu sprężystości betonu w badanym odcinku nawierzchni po 15 latach eksploatacji.

3.4. Potencjał dalszej ekspansji betonu

Pomiary wydłużenia próbek pryzmatycznych wyciętych z odwiertów i przechowywanych 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C wykazały stopniowy wzrost długości próbek z upływem czasu. Po 21 dniach ekspozycji próbek betonu ich wydłużenie wynosiło 0,07 ± 0,007%, natomiast po 28 dniach: 0,11 ± 0,009%. Obserwowany wzrost długości jest znaczący i wskazuje na występowanie w kruszywie znacznej zawartości i dostępność reaktywnych minerałów, które podtrzymują ekspansywne zachowanie betonu. Obserwacje powierzchni

próbek po wyjęciu z roztworu NaOH wykazały uwalnianie się półprzezroczystej, żelowej substancji na krawędziach pęknięć w ziarnach kruszywa kwarcytowego oraz pęcznienie ziaren kruszywa kwarcytowego, objawiające się odpryskami fragmentów ziaren z bocznych powierzchni próbek betonowych.

Po identyfikacji reaktywnej frakcji kruszywa zgromadzono kruszywo kwarcytowe łamane z tego samego kamieniołomu w postaci frakcji 2/8 i 8/16. Zgodnie z procedurami PB/1 [26] i PB/2 [25], odpowiednie próbki zaprawy i betonu z kruszywem kwarcytowym i cementem portlandzkim poddano działaniu normowych warunków środowiskowych. Liniowe wydłużenie próbek zaprawy w temperaturze 80°C i betonu w 38 °C pokazano na Rys.10. Zaobserwowano znaczący wzrost długości próbek w czasie. Po 300 dniach ekspozycji próbek betonu ich wydłużenie wynosiło $0,080 \pm 0,009\%$, natomiast wydłużenie próbek zaprawy po 14 dniach wynosiło $0,241 \pm 0,003\%$. Stosując odpowiednie standardowe kryteria oceny rozszerzalności liniowej (wydłużenie betonu 0,04-0,12% po 365 dniach, wydłużenie zaprawy 0,20-0,30% po 14 dniach), stwierdza się, że oba testy jednoznacznie wykazały umiarkowanie reaktywne zachowanie kruszywa kwarcytowego.

Rys.10

4. Dyskusja

Zaobserwowane występowanie charakterystycznych produktów ASR w spękaniach ziaren kruszywa kwarcytowego wyraźnie wskazuje na związek pęknięć w kruszywie i matrycy cementowej z ekspansywną reakcją alkalia-krzemionka. Skład zaobserwowanych produktów reakcji, określony ilorazami stężeń $(Na+K)/Si$ i Ca/Si , zgadza się z danymi literaturowymi, wskazującymi trendy zmian w z upływem czasu [32]. Jednoznaczny związek między składem produktów ASR a ciśnieniem pęcznienia nie jest znany, ale uważa się obecność wodorotlenku wapniowego w cieczy porowej betonu jest niezbędna, aby powstające produkty reakcji ASR miały charakter ekspansywny [33]. Znane z literatury zróżnicowanie zawartości Ca w funkcji odległości od granicy ziarno-matryca też zostało potwierdzone w obecnych badaniach.

Podatność kruszywa kwarcytowego na reakcję ASR została wcześniej zaobserwowana w [7, 8, 34], przy czym Šachlová i in [34] wykazali niespójną ocenę potencjału reaktywności kruszywa kwarcytowego na podstawie testu chemicznego w przeciwieństwie do badań ekspansji zapraw cementowych w warunkach przyspieszonych. Na podatność kwarcytu na ASR może wpływać kilka czynników, m.in. wielkość ziaren kwarcu oraz bliski rozstaw ziaren kwarcytu, skalenia i muskowitu [35]. Wielkość ziaren kwarcu ma wpływ na rozpuszczalność krzemionki, ponieważ większa powierzchnia jest bardziej dostępna dla roztworu cieczy porowej w betonie. Stwierdzona w obecnych badaniach dobra korelacja pomiędzy wielkością poszczególnych kryształów kwarcu a pękaniem wywołanym przez ekspansję produktów reakcji ASR, jest zgodna z korelacją deskryptorów wielkości ziarna kwarcu [36] z wynikami ekspansji próbek i uszkodzeniami obserwowanymi w konstrukcjach po 20-25 latach eksploatacji.

Zaobserwowany system spękań w betonie, związany z obecnością produktów ASR, wykazuje regularne zróżnicowanie między odwiertami pobranymi z pasa nawierzchni o dużym obciążeniu (pas ruchu powolnego) a odwiertami z pasa awaryjnego, użytkowanego okazjonalnie. Sugeruje to możliwy, dodatkowy wpływ obciążenia zmęczeniowego spowodowanego ruchem ciężkim, przy założeniu, że wpływ czynników technologicznych oraz zmian temperatury i wilgotności byłby podobny dla porównywanych pasów nawierzchni. Zgodnie z [12, 37, 38] spękania w nawierzchniach najczęściej inicjowane są na skutek naprężeń indukowanych termicznie (szczególnie w młodym wieku betonu), przypisywanych wysokiej temperaturze podczas betonowania, a być może również naprężeniom związanym z obciążeniem pojazdami. W pierwszych latach użytkowania nawierzchni reakcja alkalia-krzemionka odgrywa raczej podrzędną rolę. Jeśli wilgoć i alkaliczne roztwory odladzające przedostaną się w głąb nawierzchni przez istniejące spękania, można oczekiwać wyraźnej intensyfikacji ASR. Na ma na to dowodów konkretnych, niemniej przypuszcza się, że zmęczeniowe oddziaływanie ruchu pojazdów drogowych przyczyniło się do wzrostu spękań zaobserwowanych na pasie ruchu powolnego na drodze.

Analizowany odcinek drogi zlokalizowany jest w centralnej części Polski w strefie klimatu umiarkowanego- na tym obszarze sezon zimowy, definiowany jako okres ze średnią dobową temperaturą poniżej 0°C, trwa około 94 dni (średnia ustalona na podstawie danych IMGW w

okresie od 1981 do 2013). Ze względu na niedostateczne napowietrzanie betonu w niektórych miejscach, należy zatem wziąć pod uwagę możliwy udział uszkodzeń od agresji mrozu na beton. Chociaż uszkodzenia spowodowane zamarzaniem i rozmrażaniem występują w zimie, a reakcja alkalia-krzemionka rozwija się w ciepłych porach roku, oba mechanizmy mogą wzajemnie wzmacniać swoje skutki [39]. Obserwacje mikroskopowe podane w rozdziale poprzednim oraz symulacje komputerowe przebiegu tych procesów w betonie napowietrzonym pokazują, że produkty ASR w znacznym stopniu wypełniają pory powietrzne, wyłączając w ten sposób ich funkcję w zakresie mrozoodporności. Natomiast spękanie mrozowe zwiększają przepuszczalność betonu, promując wnikanie wody i roztworów środków odładzających z powierzchni w głąb betonu. Mechanizmy addytywnego oddziaływania powyższych mechanizmów zniszczenia są jednak nierozpoznane. W tak złożonym przypadku oddziaływań, racjonalne prognozowanie pozostałego czasu użytkowania nawierzchni jest utrudnione. Najnowsze postępy w metodyce badań i modelowania przebiegu reakcji alkalia-krzemionka [40, 41] dają nowe możliwości doświadczalnej oceny wpływu alkaliów zewnętrznych i prognozowania trwałości betonu w nawierzchniach narażonych na oddziaływanie klimatu wilgotnego i mroźnego. Warto je wykorzystywać przy projektowaniu składu betonu na nowe nawierzchnie.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania diagnostyczne betonu w nawierzchni drogi ekspresowej, o konstrukcji z płyt dyblowanych i kotwionych, po 15 latach eksploatacji pozwalają na sformułowanie następujących spostrzeżeń i wniosków.

1. Zaobserwowane uszkodzenia nawierzchni obejmowały liczne spękania płyt, zwłaszcza wzdłuż szczelin poprzecznych i podłużnych, przebarwienia i miejscowe odpryski betonu. Układ spękań był dość typowy dla uszkodzeń wskutek reakcji alkalia-kruszywo. W wyniku przeprowadzonych badań diagnostycznych betonu w odwiertach z nawierzchni drogi uzyskano spójny zestaw dowodów na wystąpienie ekspansywnej reakcji alkalia-krzemionka, związanej w obfitością reaktywnych form krzemionki w kruszywie kwarcytowym użytym do betonu.

2. Oszacowana zawartość reaktywnych form kwarcu w kruszywie kwarcytowym (kwarcu mikrokrystalicznego i kryptokrystalicznego) była większa w ziarnach spękanych (>10%) i mniejsza w ziarnach niespękanych (<7%). W spękaniach w kruszywie kwarcytowym, w

matrycy cementowej oraz w porach powietrznych występowały produkty reakcji ASR w formie żelu krzemianu potasowo-sodowo-wapniowego. Produkty reakcji wewnątrz spękań w kruszywie kwarcytowym charakteryzowały się średnim stosunkiem $(Na+K)/Si=0,31$ i $Ca/Si=0,48$. Skład był reprezentatywny dla produktów reakcji alkalia-krzemionka, a zaobserwowana zmienność składu w obrębie matrycy cementowej była skorelowana z odległością od granicy ziaren kwarcytu.

3. Odcinek nawierzchni drogi wykonano z materiałów zgodnych z ówczesnymi normami i specyfikacjami technicznymi. Zastosowanie kruszywa kwarcytowego oparto na wynikach badania reaktywności metodą szybką, która okazała się niewłaściwa.

4. Zaobserwowane miejscami niewłaściwe napowietrzenie betonu, ujawniające się zbyt dużym rozstawem porów powietrznych, wskazuje na możliwość miejscowego, addytywnego efektu uszkodzeń wskutek agresji mrozu. Specyfikacje na beton w okresie budowy nawierzchni nie obejmowały wymagań określonej charakterystyki porów w betonie stwardniałym, a jedynie wymaganie zawartości powietrza w mieszance betonowej. Możliwą rolę dodatkowego czynnika destrukcyjnego, takiego jak oddziaływanie ruchu pojazdów ciężkich, wskazuje wyższy o około 37-39% względny stopień spękania betonu na pasie ruchu powolnego w porównaniu z pasem awaryjnym.

Bibliografia

- [1] A.Szydło, P.Mackiewicz, R.Wardęga, B.Krawczyk : Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 16.06.2014
- [2] A.Amirkhanian, E. Skelton (eds.), Proceedings of the 12th Int. Conference on Concrete Pavements, Sept. 27-Oct. 1, 2021, Minneapolis, <https://doi.org/10.33593/i1c2cp>
- [3] J.Korentz, R.Jurczak, F.Szmatuła, T.Rudnicki, Właściwości nawierzchni betonowej autostrady A18 po 82 latach eksploatacji, Budownictwo-Technologie-Architektura, nr 4(96), 2021, 68-71
- [4] T. J. Van Dam, L. L. Sutter, K. D. Smith, M.J. Wade, K. R. Peterson, Guidelines for detection, analysis and treatment of materials-related distress in concrete pavements, Volume 1: final report, FHWA-RD-01-163, 2002
- [5] I. Sims, A.B. Poole (eds.), Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review, CRC Press, London 2017

- [6] Z. Owsiak, J. Zapła-Sławeta, P. Czapik, Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 63, 2015, 23-29
- [7] M.A. Glinicki, D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, A. Antolik, K. Dziedzic, K. Gibas, Susceptibility of selected aggregates from sedimentary rocks to alkali-aggregate reaction, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 18 (1), 2019, 5-24; doi: 10.7409/rabdim.019.001
- [8] E.K. Fishboeck, H. Harmuth, An Austrian experience with identification and assessment of alkali-reaction in motorways, in: *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, edited by M. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn, P. Moyo, Taylor and Francis Group, London, 2009
- [9] A. Allard, B. Fournier, J. Bastien, B. Bissonnette, L. Sanchez, J. Duchesne, Evaluation of the degree of damage caused by alkali-silica reaction in a highway pavement: a case study, *15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Sao Paulo, 2016
- [10] B. Fournier, M.-A. Bérubé, K.J. Folliard, M. Thomas Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures, FHWA, Washington, DC, 2010
- [11] O. Mielich, Alkali-silica reaction (ASR) on German motorways: an overview, *Otto-Graf-Journal* 18, 2019, 197-208
- [12] R. Breitenbücher, R. Prondziona, B. Meng, E. Krütt, F. Weise, Alkali-Silica-Reaction in concrete pavements considering traffic and de-icing agents, *13th International Symposium on Concrete Roads*, Berlin, June 2018
- [13] A. Frýbort, D. Všianský, J. Štulířová, J. Stryk, M. Gregerová, Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete, *Materials Characterization*, 137, 2018, 91–108
- [14] S. Góralczyk Occurrence and assesment of reactive aggregates in Poland, *Institute of Mechanized Construction and Rock Mining*, Warsaw 2003
- [15] Analiza wybranych właściwości mieszanki betonowej i betonu stosowanego do budowy betonowych nawierzchni drogowych wykonanych w kraju w latach 2001-2004. Badania i analiza trwałości betonu stosowanego do nawierzchni drogowych pod kątem oceny cech użytkowych i trwałościowych. Etap I. IBDiM, Warszawa, 2004
- [16] PN-B-06714-46: 1992 Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką
- [17] D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, K. Gibas, M.A. Glinicki, Petrographic identification of reactive minerals in domestic aggregates and their classification according to RILEM and ASTM recommendations, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 16,3, 2017, 223-239; doi: 10.7409/rabdim.017.015
- [18] M.A. Glinicki, Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment, *Cement Wapno Beton*, 19/81 (6), 2014, 359-369

- [19] Procedura badawcza GDDKiA PB/3/18 - Zalecenia dotyczące analizy petrograficznej kruszywa, GDDKiA Warszawa 2019; <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [20] A.Garbacik, M.A.Glinicki, D.Jóźwiak-Niedźwiedzka, G.Adamski, K.Gibas, Wytczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich, ICiMB i IPPT PAN, Kraków-Warszawa 2019; <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [21] M.A.Glinicki, A. Litorowicz, Crack system evaluation in concrete elements at mesoscale, Bulletin of the Polish Academy of Sciences -Technical Sciences, 54 (4), 2006, 371-379
- [22] ASTM C215-14 Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [23] PN-EN 480-11:2008 Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of air void characteristics in hardened concrete
- [24] T.Katayama, Chapter 6. Accelerated expansion test: Japan, in: V. Saouma (ed.), Diagnosis and Prognosis of Alkali Aggregate Reactions Affected Structures – State of the art report of the RILEM Technical Committee 259-ISR, Springer International Publishing, 2021, 133-162
- [25] Procedura badawcza GDDKiA PB/2/18 - Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3, GDDKiA Warszawa 2019; <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [26] Procedura badawcza GDDKiA PB/1/18 - Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C, GDDKiA Warszawa 2019; <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [27] I. Fernandes, M.A. Ribeiro, M.A.T.M. Broekmans, I. Sims (Eds.), Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis, RILEM 2016
- [28] E. Boehm-Courjault, S. Barbotin, A. Leemann, K. Scrivener, Microstructure, crystallinity and composition of alkali-silica reaction products in concrete determined by transmission electron microscopy, Cement and Concrete Research 130, 2020, 105988
- [29] Z. Owsiak, Microstructure of alkali- silica reaction products in conventional standard and accelerated testing, Ceramics- Silikaty, 47 (3) (2003), 108-115
- [30] M. Radlinski, J. Olek, M. Del Mar Arribas et al., Influence of air-void system parameters on freeze-thaw resistance of pavement concrete—lessons learned from field and laboratory observations, Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Pavements, San Francisco, 2008, 824–835
- [31] International Federation for Structural Concrete (fib—Fédération Internationale du Béton), fib Model Code for Concrete Structures, Ernst & Sohn, Berlin, 2010

- [32] A. Gholizadeh-Vayghan, F. Rajabipour, The influence of alkali–silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapour, *Cement and Concrete Research* 94, 2017, 49–583
- [33] A. B. Poole, Introduction, chemistry and mechanisms, in: I. Sims, A.B. Poole (eds.), *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*, CRC Press, London 2017, 1-31
- [34] Š. Šachlová, A. Kuchaová, Z. Pertold, R. Přikryl, Microscopic and chemical characterisation of ASR induced by quartz-rich aggregates, 15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, 16-19 June 2014, Delft, 1-10
- [35] Š. Šachlová, A. Kuchaová, R. Přikryl, Z. Pertold, Z. Nekvasilová, Factors affecting ASR potential of quartzite from a single quarry (Bohemian Massif, Czech Republic). Conference: 12th SGA Biennial Meeting, Upsala, 2013, 4, doi: 10.13140/2.1.4690.6561
- [36] N. Castro, B. J. Wigum, Assessment of the potential alkali-reactivity of aggregates for concrete by image analysis petrography, *Cement and Concrete Research* 42, 2012, 1635-1644
- [37] R. Breitenbücher, C. Sievering, Risse in Betonfahrbahndecken - Das Resultat aus Überlagerungen verschiedener, in: R. Nothnagel and H. Twelmeier (eds.), *Baustoff und Konstruktion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 177-188; doi: 10.1007/978-3-642-29573-7_19
- [38] C. Giebson, K. Volland, H.-M. Ludwig, B. Meng, Alkali-silica reaction performance testing of concrete considering external alkalis and preexisting microcracks, *Structural Concrete*, 2017, 1–11; doi: 10.1002/suco.201600173
- [39] F. Gong, Y. Takahashi, I. Segawa K. Maekawa, Mechanical properties of concrete with smeared cracking by alkali-silica reaction and freeze-thaw cycles, *Cement and Concrete Composites* 111, 2020, 103623; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103623>
- [40] I. Borchers, Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-12: determination of binder combinations for non-reactive mix design or the resistance to alkali-silica reaction of concrete mixes using concrete prisms – 60 °C test method with alkali supply, *Materials and Structures*, 54(6), 2021, 202
- [41] M. Böhm, E. Eickschen, W. Hermerschmidt, C. Müller, R. Pierkes, Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau*, Heft S162, 2021

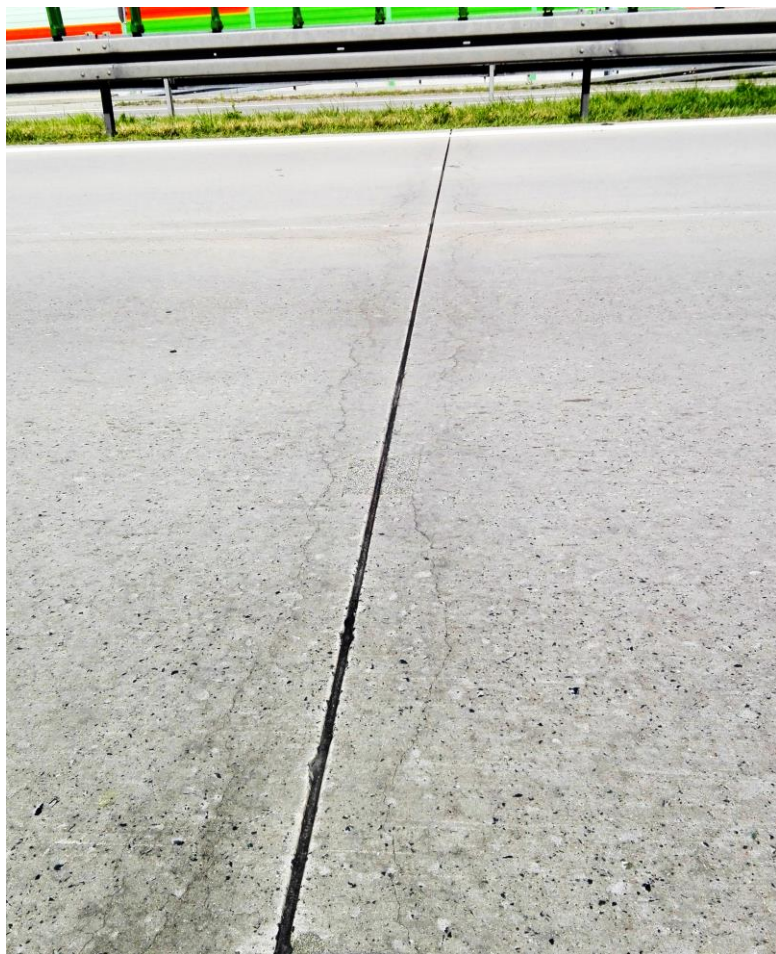
Tablica 3. Wyniki mikroanalizy składu produktów reakcji ASR w mikroobszarach wewnątrz spękań w ziarnach kruszywa kwarcytowego – iloraz zawartości sodu, potasu i wapnia do krzemu (wynik z co najmniej dwudziestu pięciu różnych mikoobszarów)

Wskaźniki składu	Oznaczenie próbki																	
	5B			6A			7A			8A			10A			10B		
	Średnia	Min	Max	Średnia	Min	Max	Średnia	Min	Max	Średnia	Min	Max	Średnia	Min	Max	Średnia	Min	Max
Na/Si	0.07	0.04	0.10	0.06	0.01	0.13	0.05	0.02	0.11	0.06	0.01	0.21	0.06	0.03	0.13	0.11	0.02	0.23
K/Si	0.32	0.21	0.40	0.23	0.09	0.32	0.18	0.05	0.42	0.18	0.03	0.45	0.29	0.14	0.46	0.34	0.07	0.44
(Na+K)/Si	0.39	0.29	0.46	0.28	0.11	0.42	0.23	0.07	0.44	0.24	0.04	0.57	0.35	0.17	0.51	0.40	0.09	0.52
Ca/Si	0.48	0.29	0.61	0.30	0.11	0.69	0.41	0.10	0.92	0.60	0.18	0.93	0.61	0.28	1.16	0.49	0.08	0.95

Rysunki



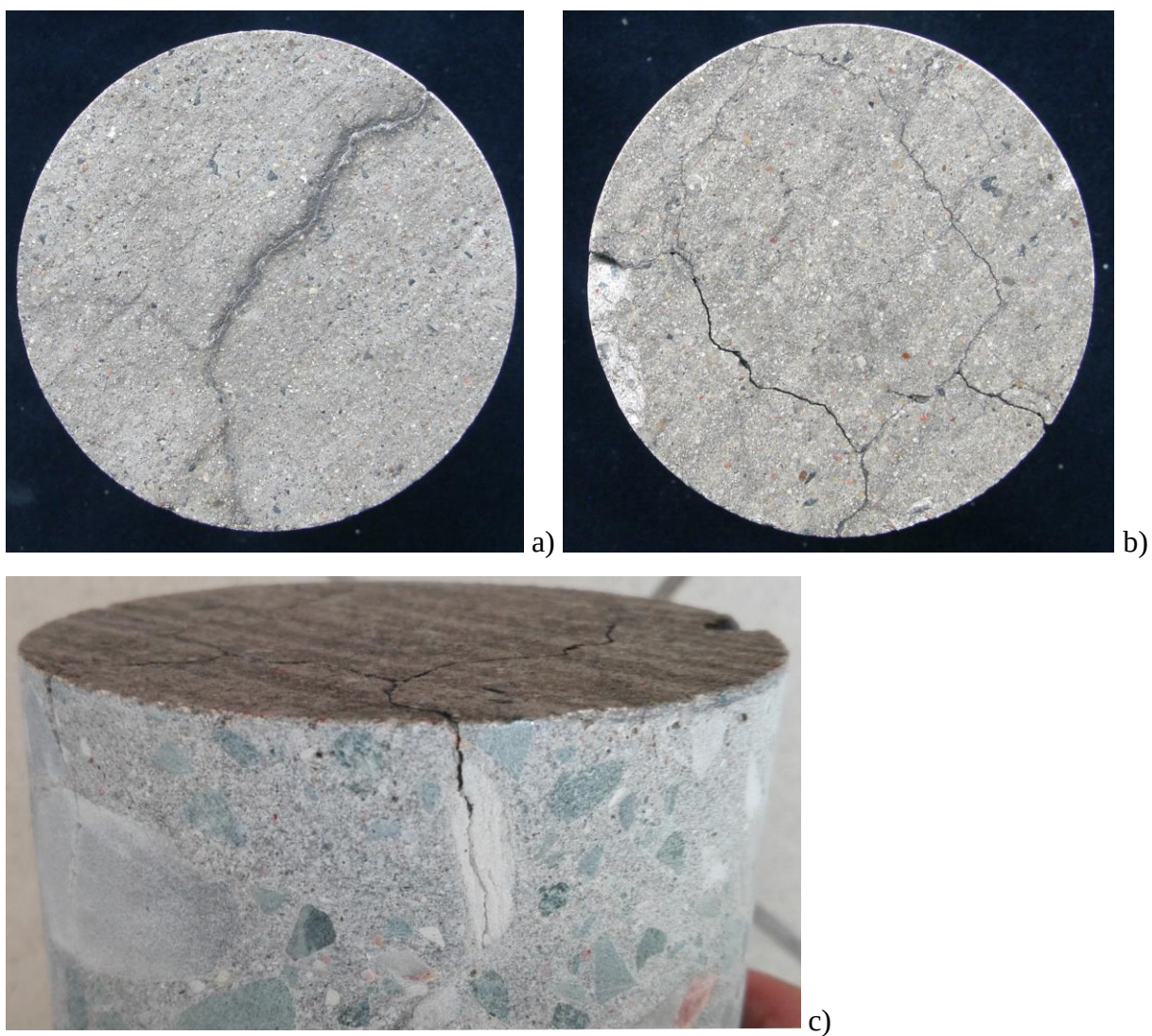
a)



b)

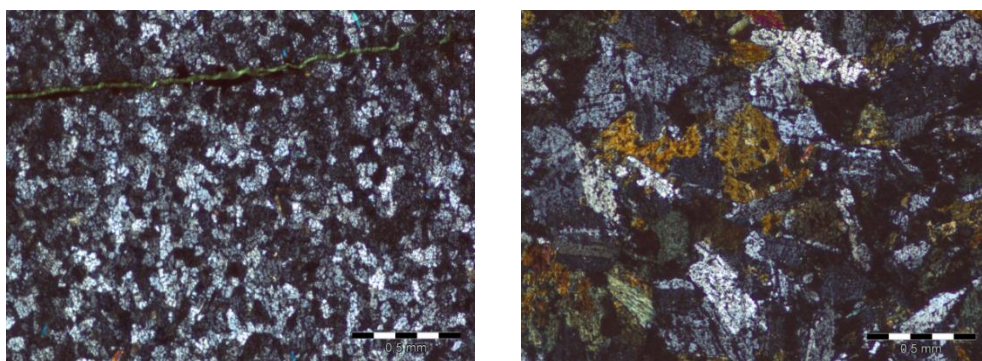
Rys. 1. Typowy układ spękań (a) i przebarwienie w nawierzchni betonowej przy szczelinach (b)

Fig.1. Typical crack patterns (a) and discoloration in concrete pavement near the joints (b)



Rys. 2. Widok spękań w pobranych odwiertach z nawierzchni: a) spękanie na powierzchni wypełnione mlecznobiałym żelem, b) mozaika spękań, c) spękania przechodzące w głąb betonu przez ziarna kruszywa kwarcytowego (średnica próbki-odwiertu 100 mm)

Fig. 2. View of cracks in core specimens taken from the pavement: a) surface cracks filled with a milky white gel, b) mosaic of cracks, c) cracks penetrating into the concrete through quartzite aggregate (core diameter 100 mm)

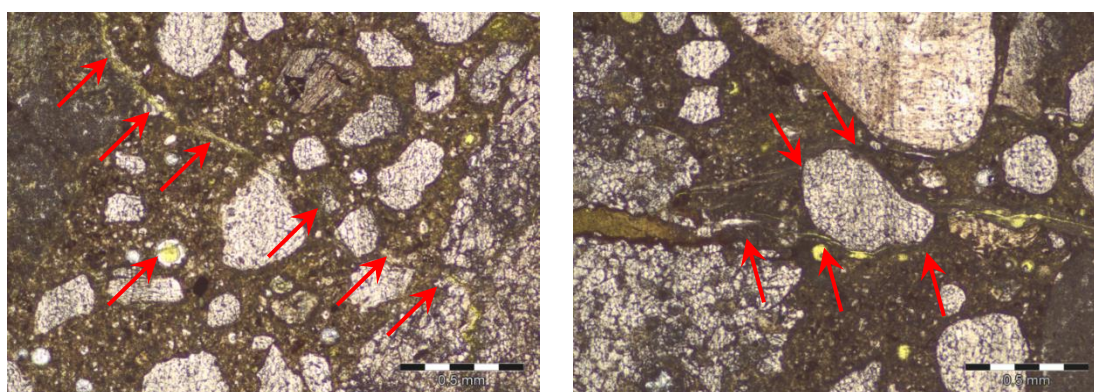


a)

b)

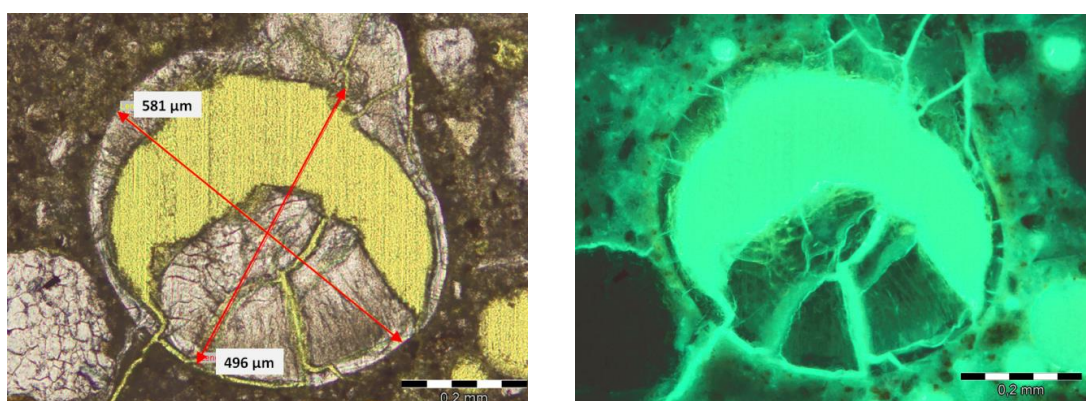
Rys. 3. Przekrój ziarna kruszywa grubego: a) kwarcyt, b) amfibolit (cienki szlif, XPL)

Fig.3. Thin section of coarse aggregate: a) quartzite, b) amphibolite (XPL)



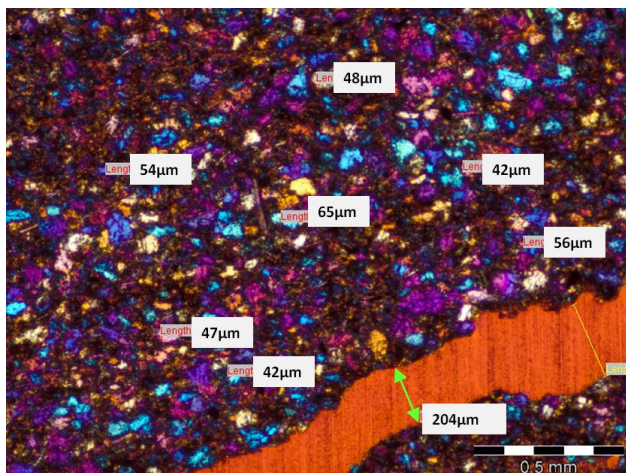
Rys. 4. Żel ASR widoczny w betonie w próbkach 3A, 5A, (cienkie szlify, PPL)

Fig. 4. ASR gel visible in concrete specimens 3A, 5A, (thin sections, PPL)

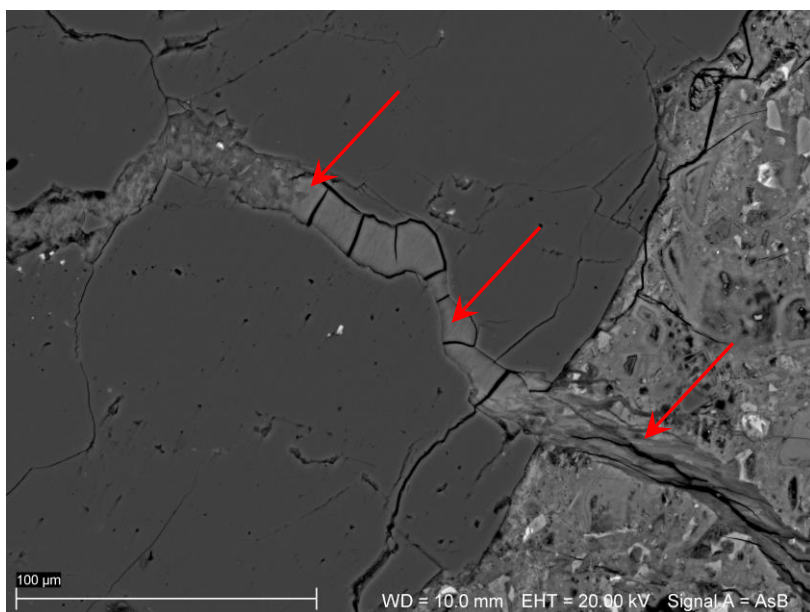


Rys.5. Produkty reakcji ASR częściowo wypełniające pustkę powietrzną (cienki szlif; XPL_G oraz UV)

Fig. 5. ASR reaction products partly infilling air void (thin section; XPL_G and UV)

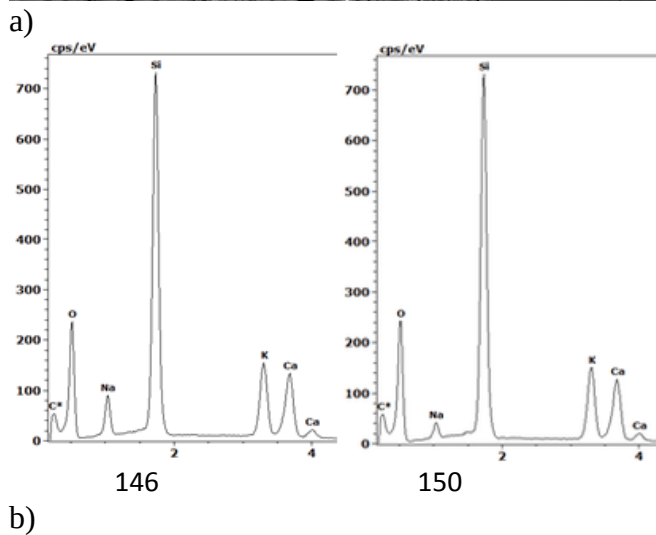
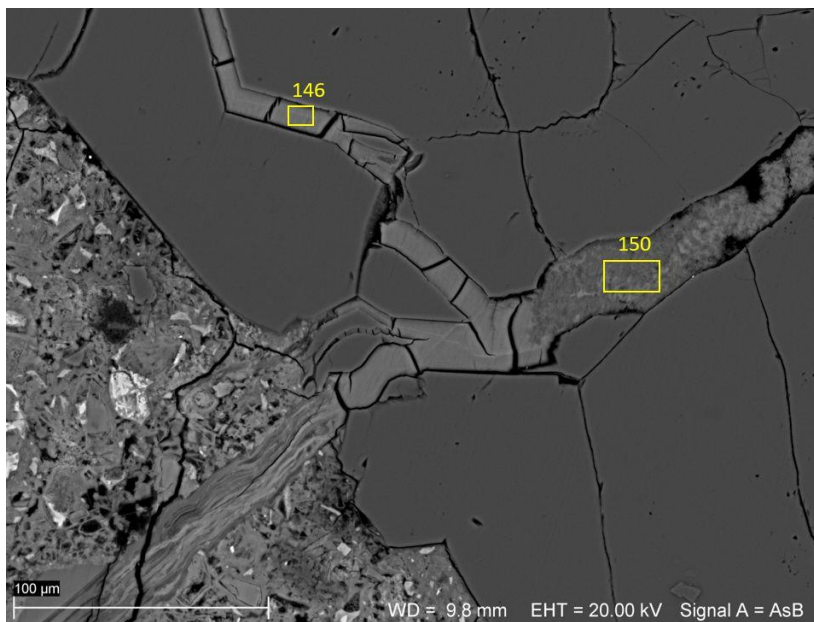


Rys. 6. Zróżnicowanie wielkości ziaren kwarcu w spękanym kruszywie kwarcytowym, XPL_G
 Fig.6. Differences of quartz grain size in cracked quartzite aggregate, XPL_G



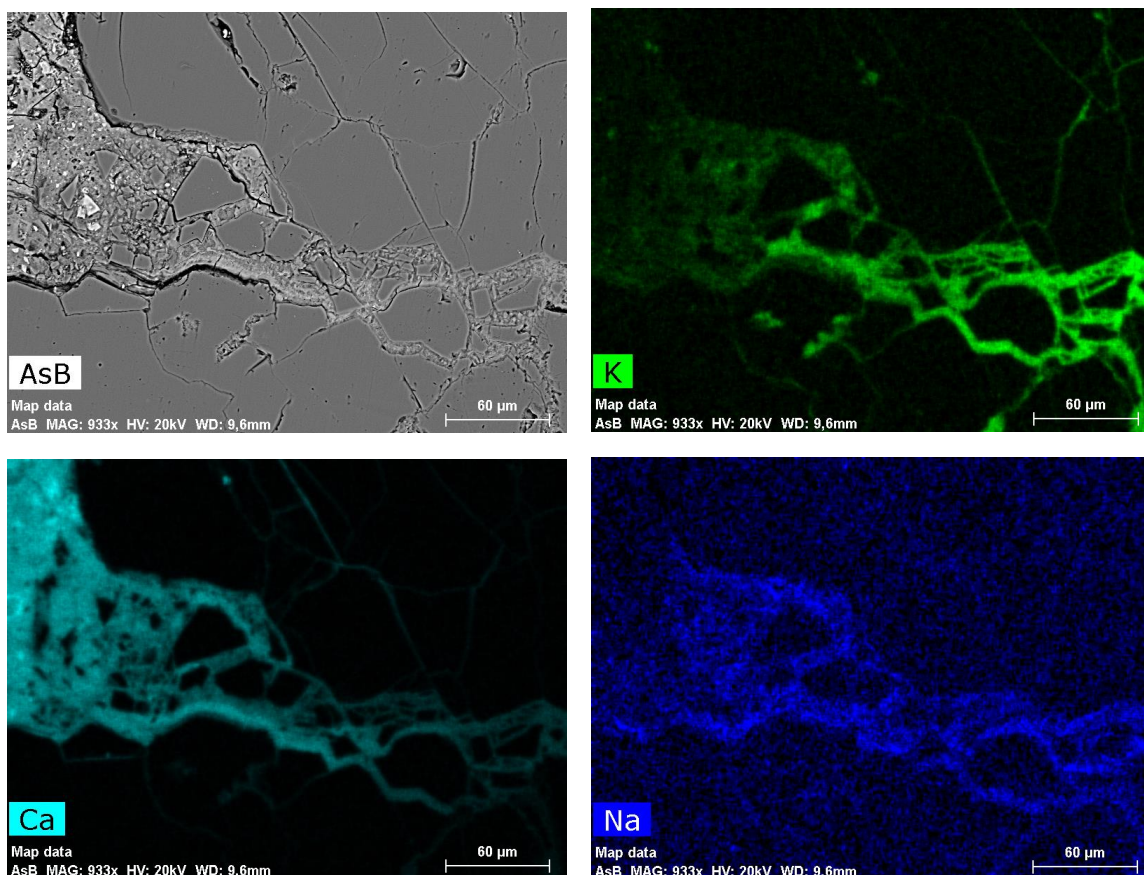
Rys.7. Produkty reakcji ASR rozciągające się od ziarna kwarcytu poza granicę ziarna do matrycy cementowej – mikrofotografia SEM

Fig.7. ASR products in quartzite aggregate and in cement paste, penetrating beyond the aggregate – SEM microphotograph



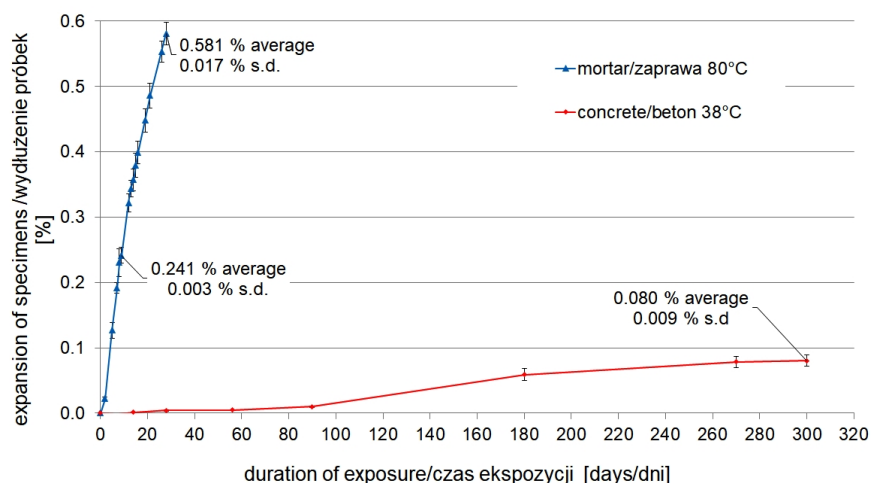
Rys.8. Skład produktów reakcji ASR w ziarnie kwarcytu – mikrofotografia SEM i spektrum EDS w wybranych mikroobszarach wskazanych numerami

Fig.8. ASR product composition in quartzite aggregate - SEM microphotograph and EDS analysis in selected microareas (designated by numbers)



Rys.9. Mikrofotografia żelu ASR i mapy koncentracji pierwiastków K, Ca i Na w obszarze pękniętego ziarna kwarcytu

Fig.9. Micophotograph of ASR gel and maps of the concentration of elements K, Ca and Na in the area of cracked quartzite grain



Ryc.10. Ekspansja próbek z kruszywem kwarcytowym – zaprawa w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C wg PB/1 [26] oraz beton w 38°C w wysokiej wilgotności powietrza wg PB/2 [25]

Fig.10. Expansion of specimens containing quartzite aggregate – mortar at 80°C in 1 M NaOH solution (PB/1 [26]) and concrete at 38°C in high air humidity (PB/2 [25])