

prof. dr hab. inż. Zdzisław Owsiak¹⁾

ORCID: 0000-0002-9278-912X

mgr inż. Anna Leks^{1*)}

ORCID: 0009-0008-2007-779X

Assessment of concrete damage in structures caused by alkali-silica reaction

Ocena uszkodzeń betonu w konstrukcjach spowodowanych reakcją alkalia-krzemionka

DOI: 10.15199/33.2025.11.05

Abstract. The alkali-aggregate reaction leads to concrete degradation, affecting durability and safety of use of the structure. The article presents methods for damage assessment: visual field inspection, non-destructive testing and laboratory techniques. It also highlights modern approaches such as digital image analysis and machine learning algorithms. It emphasizes the importance of selecting the proper methods for diagnosis, repair planning and structures management.

Keywords: damage assessment; non-destructive techniques; cracking; alkali-silica reaction.

Streszczenie. Reakcja alkalia-kruszywo prowadzi do degradacji betonu, wpływając na trwałość i bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji. W artykule przedstawiono metody oceny uszkodzeń: wizualną inspekcję terenową, badania nieniszczące oraz techniki laboratoryjne. Zwrócono także uwagę na nowoczesne podejście, jak cyfrowa analiza obrazu i algorytmy uczenia maszynowego i podkreślono znaczenie właściwego doboru metod przy diagnozie, planowaniu napraw i zarządzaniu konstrukcjami. **Słowa kluczowe:** ocena uszkodzeń; techniki nieniszczące; pękanie; reakcja alkalia-krzemionka.

Alkali-silica reaction (ASR) is an example of internal corrosion of concrete. ASR occurs between concrete components in the presence of moisture, and its occurrence negatively affects the structures durability. Reactive silica contained in certain types of aggregates reacts with sodium and potassium hydroxides, leading to the formation of an expansive gel and resulting in internal stresses in the concrete, causing various forms of damage. The problem of reaction between alkalis and reactive aggregate was first described in the 1940s by Thomas Stanton in California (photo 1) [1].

An example of alkali-silica reaction is the road surface on the S8 section Wolbórz-Polichno route, executed in 2002 – 2003. In 2018, 10 cores were taken from the deteriorated road surfaces. Sample testing revealed numerous cracks and the presence of ASR products in the form of gel [3]. A detailed analysis showed that the reaction was caused by the aggregate used, which was considered non-reactive before use in accordance with PN-B-06714-46:1992. There is therefore a concern that this is not the only case of using an aggregate considered safe, and as we know, the effects of the reaction may be visible after years [4]. Research

reakcja alkalia-krzemionka (ang. *ASR, alkali-silica reaction*) jest przykładem wewnętrznej korozji betonu. ASR zachodzi pomiędzy składnikami betonu w obecności wilgoci, a jej wystąpienie niekorzystnie wpływa na trwałość konstrukcji. Reaktywna krzemionka zawarta w pewnych rodzajach kruszyw reaguje z wodorotlenkami sodu i potasu, co prowadzi do powstania ekspansywnego żelu i skutkuje powstaniem wewnętrznych naprężeń w betonie, powodując różne formy uszkodzeń. Po raz pierwszy problem reakcji pomiędzy alkaliem i reaktywnym kruszywem był opisany w latach czterdziestych XX w. przez Thomasa Stanton w stanie Kalifornia (fotografia 1) [1].

Przykładem wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka jest m.in. nawierzchnia drogowa na odcinku trasy S8 Wolbórz-Polichno wykonanej w latach 2002 – 2003. W 2018 r. pobrano 10 odwier-

tów ze zdegradowanej nawierzchni. Badania próbek wykazały liczne spękania oraz obecność produktów reakcji alkalia-krzemionka w postaci żelu [3]. Szczegółowa analiza wykazała, że przyczyną wystąpienia reakcji było użyte kruszywo, które uznano przed wykorzystaniem za niereaktywne zgodnie z normą PN-B-06714-46:1992. Istnieje zatem obawa, że to niejedyny przypadek zastosowania kruszywa uznanego za bezpieczne, a jak wiadomo skutki reakcji mogą być widoczne dopiero po latach [4]. Badania tego

problemu skupiają się przede wszystkim na klasyfikacji kruszyw (reaktywne, potencjalnie reaktywne czy niereaktywne) oraz na możliwościach stosowania dodatków i domieszek ogranicza-



Photo 1. Thomas Stanton in front of a bridge structure affected by alkali-silica reaction [2]

Fot. 1. Thomas Stanton na tle konstrukcji mostowej dotkniętej reakcją alkalia-krzemionka [2]

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Correspondence address: aleks@tu.kielce.pl

into this problem focuses primarily on the classification of aggregates (reactive, potentially reactive, or non-reactive) and on the possibilities of using additives and admixtures to limit the effects of the alkali-aggregate reaction. Both of these aspects concern solving the problem at the concrete mix design stage. To a minor extent, researchers focus on the application possibilities of field methods for assessing damage caused by alkali-silica reaction in existing structures and effective countermeasures to limit or repair the damage.

Symptoms of alkali-silica reaction in construction

Typical symptoms of ASR in structures include: cracking; local crushing; pop-outs; reduction or closure of joints; surface discoloration and gel exudations, as well as deformation and displacement as the destructive expansion progresses [5]. The first signs of alkali-silica reaction are cracking, efflorescence and gel exudation. It should be noted that these symptoms may be the result of other phenomena, such as sulfate corrosion or cyclic freezing and thawing of water in concrete pores.

The alkali-silica reaction results in the formation of a gel which swells and exerts pressure when exposed to sufficient moisture. Its expansion causes cracking even at pressures lower than 10 MPa [6]. One of the most characteristic indications of the reaction is a random, dense distribution of cracks in the form of a crack map (photo 2a). The pattern of cracks depends on the shape, exposure conditions, prestressed and reinforcement of concrete structural elements. In reinforced elements, cracks usually form parallel to the reinforcing bars, in unreinforced concrete elements in any direction, while in concrete pavements often parallel to the side edges and near free edges and joints with increased moisture content (photo 2b). It has also been shown that with a higher degree of reinforcement, the rate and level of expansion are lower [7, 8]. In structures with expansion joints, ASR expansion can lead to extrusion of joint sealant material and misalignment of adjacent sections. The occurrence of internal cracks in the aggregate and concrete matrix leads to a reduction in compressive strength and, even more so, in tensile strength of concrete [9]. In addition, its permeability increases, which poses an additional risk of other corrosion processes. Elements affected by the alkali-silica reaction may show discoloration. As the reaction progresses, gel may leak from cracks in the element. Efflorescence on the concrete surface is caused by the movement of moisture, which allows soluble compounds to leach out and, after carbonation and crystallization, form a white residue (photo 2c). Pop-out damage is a characteristic symptom of alkali-silica reaction. Reactive aggregate grains near the surface of the element crack and expand, causing small fragments of concrete to detach from the surface, creating pitted areas (photo 2d). This type of damage generally does not affect the durability and service safety.

jących skutki reakcji alkalia-kruszywo. Oba te aspekty dotyczą rozwiązania problemu na etapie projektowania mieszanki betonowej. W mniejszym stopniu badacze skupiają się na możliwościach aplikacyjnych terenowych metod oceny uszkodzeń, wywołanych reakcją alkalia-krzemionka, w istniejących konstrukcjach oraz skutecznych środków zaradczych pozwalających na ograniczenie lub naprawę powstałych uszkodzeń.

Objawy wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka w konstrukcji

Do typowych objawów wystąpienia reakcji alkalia-kruszywo w konstrukcjach zalicza się: pękanie; miejscowe kruszenie; odpryski „pop-out”; zmniejszenie lub zamknięcie szczelin dylatacyjnych; powierzchniowe przebarwienia i wysięki żelu, wraz z postępem destrukcyjnej ekspansji również deformacje i przemieszczenia [5]. Pierwszymi sygnałami świadczącymi o wystąpieniu reakcji alkalia-krzemionka są spękania oraz wykwyty i wycieki żelu. Należy pamiętać, że wspomniane objawy mogą być także skutkiem innych zjawisk, takich jak korozja siarczanowa lub cykliczne zamrażanie i rozmrażanie wody w porach betonu.

W wyniku reakcji alkalia-krzemionka dochodzi do utworzenia żelu, który przy odpowiedniej wilgotności pęcznieje i wywiera ciśnienie. Jego ekspansja powoduje pękanie nawet przy ciśnieniu mniejszym niż 10 MPa [6]. Jednym z bardziej charakterystycznych przejawów wystąpienia reakcji jest losowe, gęste rozmieszczenie rys w postaci mapy spękań (fotografia 2a). Układ pęknięć zależy od kształtu, warunków ekspozycji, sprzężenia i zbrojenia elementów konstrukcyjnych betonu. W elementach zbrojonych pęknięcia powstają zwykle równoległe do prętów zbrojeniowych, w niezbrojonych elementach betonowych w każdym kierunku, natomiast w przypadku nawierzchni betonowych często równoległe do krawędzi bocznych oraz w pobliżu wolnych krawędzi i spoin o zwiększonej wilgotności fotografia 2b). Wykazano także, że przy wyższym stopniu zbrojenia tempo i poziom ekspansji są mniejsze [7, 8]. W konstrukcjach z dylatacjami, ekspansja reakcji alkalia-kruszywo może prowadzić do uszkodzenia materiałów wypełniających i nieprawidłowego położenia sąsiednich sekcji. Wystąpienie wewnętrznych pęknięć w kruszywie i matrycy betonu prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie, a nawet bardziej na rozciąganie betonu [9]. Ponadto dochodzi do zwiększenia jego przepuszczalności, co stanowi dodatkowe ryzyko wystąpienia innych procesów korozyjnych. Elementy dotknięte reakcją alkalia-krzemionka mogą wykazywać przebarwienia. Przy zaawansowanym postępie reakcji może dojść do powstania wycieków żelu z pęknięć elementu. Wykwyty na powierzchni betonu powstają przez ruch wilgoci, umożliwiając wydostawanie się rozpuszczalnych związków, które po karbonatyzacji i krystalizacji tworzą białe osady (fotografia 2c). Charakterystycznymi objawami reakcji alkalia-krzemionka są uszkodzenia typu pop-out. Reaktywne ziarna kruszywa w pobliżu powierzchni elementu ulegają pękaniu i rozszerzaniu, powodując odpryskiwanie małych fragmentów betonu od powierzchni, tworząc obszary z wżerami (fotografia 2d). Tego typu uszkodzenia na ogół nie wpływają na trwałość i bezpieczeństwo użytkowania.

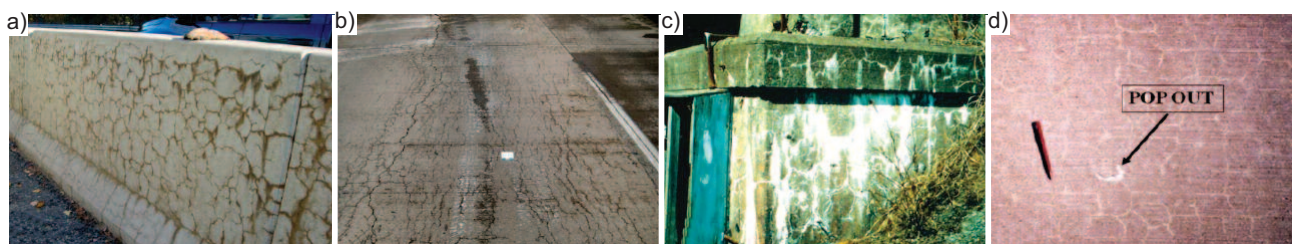


Photo 2. Concrete damage caused by alkali-silica reaction: a) crack map; b) surface cracks parallel to the edges; c) leaks and efflorescence on the surface; d) pop-out [2]

Fot. 2. Uszkodzenia betonu wywołane reakcją alkalia-krzemionka: a) mapa spękań; b) spękania nawierzchni, równoległe do krawędzi; c) wycieki i wykwity na powierzchni; d) pop-out [2]

Methods for assessing damage caused by the alkali-silica reaction

In order to correctly identify the causes of damage and assess its impact on the structure durability, a visual inspection and in-situ tests should be carried out, samples should be taken and laboratory tests performed, and the progress of the reaction and the risk of its further development should be assessed [8]. Diagnostic methods aim to determine whether the degradation of concrete was initiated by a reaction between alkalis and silica aggregate, to determine its extent and impact on the structure, and to estimate the possible service life of the structure. Proper procedures allow preventive measures to be taken to mitigate the symptoms of the reaction. The structure should be monitored regularly, as the correct identification of the causes of concrete degradation has a decisive influence on the choice of repair method.

In-Situ Investigations. Before carrying out a field inspection, all available materials concerning the history of problems and damage to the structure should be analyzed. A visual assessment provides information about the degree of degradation. Its disadvantages include subjectivity and time-consuming nature, and the reliability of such an assessment largely depends on the skills of the examiner. If the visual assessment of the concrete raises suspicions of alkali-silica reaction, the next steps should be to collect information about the structure and concrete components, sampling from various locations in the structure, and conduct laboratory tests. The collected documentation should also include all information about the construction, including the date of construction, plans with the location and type of reinforcement, concrete composition, origin of materials, reports from previous interventions, and the dates when the first signs of corrosion appeared [10, 11]. All observed symptoms in the form of cracks and their type, swell, discoloration, efflorescence, as well as measurements of crack width should be documented with photographs and written records [9]. Accurate determination of the reaction progress and a forecast of its further course requires the use of invasive methods.

One of the methods for assessing surface cracks is to measure the **Cracking Index (CI)**. This method involves measuring and summing the width of cracks along lines drawn perpendicular to the surface of the tested element. The measurement is expressed in mm/m as the width of the cracks over the total length of the measurement lines. The use of this method is helpful in quantitatively assessing the size of

Metody oceny uszkodzeń wywołanych reakcją alkalia-krzemionka

W celu poprawnej identyfikacji przyczyn powstałych uszkodzeń oraz oceny ich wpływu na trwałość konstrukcji należy przeprowadzić ocenę wizualną oraz badania in situ, pobrać próbki i wykonać badania laboratoryjne, ocenić postępowanie reakcji i ryzyko dalszego jej rozwoju [8]. Metody diagnostyczne mają na celu ustalenie czy degradacja betonu została zainicjowana przez reakcję alkaliów z kruszywem krzemionkowym, określenie jej zasięgu i wpływu na konstrukcję oraz oszacowanie możliwego czasu użytkowania konstrukcji. Właściwe procedury umożliwiają przyjęcie środków zapobiegawczych w celu złagodzenia objawów reakcji. Należy regularnie monitorować konstrukcję, gdyż prawidłowe stwierdzenie przyczyn degradacji betonu ma decydujący wpływ na wybór metody działań naprawczych.

Badania in situ. Przed przeprowadzaniem inspekcji terenowej należy przeanalizować wszystkie dostępne materiały dotyczące historii problemów i uszkodzenia konstrukcji. Wizualna ocena dostarcza informacji o stopniu jej degradacji. Do jej wad należą subiektywność i czasochłonność, a wiarygodność takiej oceny w dużej mierze jest uzależniona od umiejętności badającego. W przypadku, gdy ocena wizualna betonu wzbudzi podejrzenia dotyczące wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka, należy w kolejnych krokach zebrać informacje o konstrukcji i składnikach betonu, pobrać próbki z różnych miejsc konstrukcji i przeprowadzić badania laboratoryjne. Zebrana dokumentacja powinna zawierać także wszelkie informacje dotyczące budowy konstrukcji, w tym datę budowy, schematy z lokalizacją i rodzajem zbrojenia, skład betonu, pochodzenie materiałów, raporty z poprzednich interwencji oraz daty pojawienia się pierwszych oznak korozji [10, 11]. Wszystkie zaobserwowane objawy w postaci pęknięć i ich typu, wybrzuszeń, przebarwień, wykwitów, a także pomiar szerokości pęknięć powinny być udokumentowane fotografiami i pisemnym zapisem [9]. Dokładne określenie postępu reakcji oraz prognoza dalszego jej przebiegu wymaga zastosowania metod inwazyjnych.

Jednym ze sposobów oceny powstałych spękań powierzchniowych jest **pomiar stopnia pęknięć** (ang. *CI, Cracking Index*). Metoda ta polega na pomiarze i sumowaniu szerokości pęknięć wzdłuż narysowanych linii prostopadle do powierzchni badanego elementu. Pomiar jest wyrażony w mm/m jako szerokość pęknięć na całkowitą długość linii pomiarowych. Zastosowanie metody jest pomocne w ilościowej oce-

cracks, and can also be used to predict the course of the reaction when measurements are taken regularly at the same locations [2]. When the extent of the cracks is limited and mild symptoms of the reaction are visible in the concrete, there is no need to take immediate action. However, if the size of the cracks is considered significant, additional diagnostics are required and the progress of the alkali-silica reaction must be slowed down by applying lithium compounds to the structural elements [12]. The location of the reference grids should be selected to reflect the pattern of cracks on the surface of the element. The grid consists of four axes- two axes parallel and two axes perpendicular to the main reinforcement in the case of reinforced concrete elements. It is recommended to place reference points so that subsequent readings can be taken at the same location. The size of the grid depends on the size of the element. A statistically representative assessment can be made on the basis of two reference grids with a measurement line length of 50 cm in each direction [2].

Sampling. In order to fully assess the extent of damage to the structure, core samples should be taken from specific areas of the structure and tested in a laboratory. Particular focus should be placed on elements exposed to moisture. It is recommended to take core samples from these areas for testing. In addition, for comparison purposes, it is also recommended to take samples from an undamaged area [13]. The number of samples required, depends on the type and complexity of the structure. In practice, regardless of the structure, three different elements should be selected, e.g., a column, a slab, and a foundation. The most reliable diagnosis will be obtained by performing several types of tests on a large number of samples. The cores taken must be described, specifying their dimensions (length and diameter), type of aggregate and visual defects. The diameter of the drill cores should be between 75 and 100 mm, and their length should be twice the diameter. After sampling, the samples should be immediately secured in sealed containers to prevent moisture loss and carbonation [14].

Laboratory testing. The extracted drill cores can be prepared for petrographic examination in the form of polished thin sections. The characteristic features that can be observed under a microscope are: microcracks in the aggregate grains and cement paste; gel; reaction rims; loss of integrity between the paste and the aggregate. In the early stages of alkali-aggregate reaction, cracks will mainly appear in the aggregate and the aggregate-cement paste contact zone, and as the expansion progresses, they will cover larger areas and alkali-silica gel will appear in them [2]. One simple way to identify the presence of reaction products is to use luminescence methods. These methods exploit the cation exchange affinities of alkali and calcium silicate gel reaction products. One option is to apply a solution of uranyl acetate to polished sections or fresh fractures and then observe them under ultraviolet light. In this case, the uranyl ion replaces the alkali in the gel, giving it a characteristic yellow-green glow under UV light. Areas with gel appear brighter than the cement paste [15]. Due to the hazardous nature of the preparation,

nie rozmiaru pęknięć, a może również służyć do prognozowania przebiegu reakcji w przypadku, kiedy pomiary są wykonywane regularnie w tych samych miejscach [2]. W momencie, gdy zakres pęknięć jest ograniczony i w betonie widoczne są łagodne objawy reakcji, nie ma potrzeby podejmowania natychmiastowych działań. W przypadku, gdy rozmiar pęknięć zostanie uznany za znaczny, wymagana jest natomiast dodatkowa diagnostyka oraz spowolnienie postępu reakcji alkalia-krzemionka przez naniesienie związków litu na elementy konstrukcji [12]. Lokalizacja siatek odniesienia powinna zostać wybrana tak, aby odzwierciedlała wzór pęknięć na powierzchni elementu. Siatka składa się z czterech osi – dwie osie równoległe i dwie osie prostopadłe do głównego zbrojenia w przypadku elementów żelbetowych. Zaleca się zamieszczenie punktów odniesienia, aby kolejne odczyty mogły zostać wykonane w tym samym miejscu. Rozmiar siatki zależy od rozmiaru elementu. Statystycznie reprezentatywną ocenę można wykonać na podstawie dwóch siatek odniesienia o długości linii pomiarowych po 50 cm w każdym kierunku [2].

Pobranie próbek. W celu pełnej oceny stopnia zniszczenia konstrukcji należy pobrać próbki rdzeniowe z określonych obszarów konstrukcji i poddać je badaniom w laboratorium. Szczególną uwagę zaleca się poświęcić elementom narażonym na działanie wilgoci. Z tych obszarów najlepiej pobrać również odwierty do badań. Ponadto w celach porównawczych zaleca się pobranie próbek z nieuszkodzonego obszaru [13]. Liczba wymaganych próbek zależy od rodzaju i złożoności konstrukcji. Praktycznie, niezależnie od konstrukcji, należy wybrać trzy różne elementy, np. słup, płyta, fundament. Najbardziej rzetelną diagnozę uzyska się, wykonując kilka rodzajów badań na dużej liczbie próbek. Pobrane odwierty trzeba opisać, określić ich wymiary (długość i średnicę), rodzaj kruszywa i wizualne defekty. Średnica odwiertów powinna wynosić 75 – 100 mm, a ich długość była dwukrotnie większa od średnicy. Po pobraniu próbki należy niezwłocznie zabezpieczyć w szczelnych pojemnikach, aby nie doszło do utraty wilgoci i karbonatyzacji [14].

Badania laboratoryjne. Pobrane odwierty można przygotować do badań petrograficznych w postaci wypolerowanych cienkich szlifów. Cechami charakterystycznymi, które można zaobserwować pod mikroskopem, są: mikropeknięcia w ziarnach kruszywa i zaczynie cementowym; żel; obręcze reakcyjne; utrata spójności między zaczynem a kruszywem. W początkowych etapach postępu reakcji alkalia-kruszywo pęknięcia będą się pojawiać głównie w kruszywie i strefie kontaktowej kruszywo-zaczyn cementowy, a wraz z postępującą ekspansją obejmują większe obszary oraz pojawi się w nich żel alkaliczno-krzemionkowy [2]. Jednym z prostych sposobów zidentyfikowania obecności produktów reakcji jest zastosowanie metod luminescencyjnych. Jedną z możliwości to zaaplikowanie roztworu octanu uranylu na wypolerowane szlify lub świeże przełamy, a następnie obserwację w świetle ultrafioletowym. W tym przypadku jon uranilowy zastępuje alkalia w żelu, nadając charakterystyczną żółtozieloną poświatę w świetle UV. Obszary z żelem obserwuje się jako jaśniejsze w porównaniu z zaczynem cementowym [15]. Ze względu na niebezpieczny charakter preparatu należy zachować

special care must be taken when working with it. Instead of uranyl acetate, impregnation with a fluorescent epoxy dye can be used [16]. Using this method alone is not sufficient to confirm the occurrence of ASR. Additionally, observation under a scanning microscope with X-ray analysis should be performed. Analysis using SEM is one of the most reliable methods for confirming the presence of reaction products and the degree of its severity.

One of the more advanced techniques is the **Damage Rate Index (DRI)**, which involves counting, under a stereoscopic microscope at 16x magnification, the number of typical petrographic features of the reaction on a 1 cm² (10 x 10 mm) grid drawn on the surface of a polished section [17]. The value obtained should be multiplied by a coefficient corresponding to its significance in the overall process of structure deterioration. Recently, the coefficients have been updated to compensate for differences between petrographers [18]. The higher the Damage Rate Index (DRI) value, the greater the damage to the concrete. This method provides a quantitative assessment of the extent of internal damage to the structure. If measurements are taken regularly on cores taken from the same location, the test can be predictive. It has been found that the values of the index increase almost linearly with the increase in alkali-silica reaction expansion. No significant differences in the Damage Rate Index (DRI) values were observed between concretes made of fine and coarse reactive aggregates. For comparison purposes, the final DRI number is normalized to an area of 100 cm² [19]. Unfortunately, the test is time-consuming, and the results may vary between petrographers. In order to improve the entire process, Bezerra et al. proposed the use of machine learning techniques [20]. The neural network used predicts results close to those expected. The main advantages of this solution include: speeding up the process, eliminating differences between petrographers assessments, and enabling less experienced specialists to use the technique. In samples taken from the overpass foundations, the algorithm was able to determine the degree of damage. The results obtained differed by 8 – 14% compared to the petrographs assessment, which can be considered acceptable when assessing the degree of damage [21]. This is a very promising vision of an automated approach to the DRI Damage Rate Index.

Another method for assessing concrete structures affected by alkali-silica reaction is the **Stiffness Damage Test (SDT)**, which involves subjecting a set of cores to five cycles of uniaxial loading and unloading up to a maximum of 10 MPa [22]. The test is performed on cylindrical samples with a length-to-diameter ratio of 2. Immediately after removal from the structure, the specimens should be placed in sealed containers and then stored in the laboratory at room temperature for at least one week to allow moisture homogenization. Before testing, the ends of the samples should be polished to avoid interference during the test [22]. In order to reduce variability between sample series, re-wetting in a humid room for 48 h. should be executed. It has been shown that smaller variations in results are obtained

wać szczególną ostrożność podczas pracy. Zamiast octanu uranylu można zastosować impregnację fluorescencyjnym barwnikiem epoksydowym [16]. Wykorzystanie tylko tej metody nie jest wystarczające do potwierdzenia wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka. Dodatkowo należy przeprowadzić obserwację pod mikroskopem skaningowym i analizę rentgenowską. Analiza z wykorzystaniem SEM należy do najpewniejszych metod potwierdzających obecność produktów reakcji oraz stopnia jej zaawansowania.

Jedną z bardziej zaawansowanych technik obliczania **wskaźnika oceny uszkodzeń** (ang. DRI, *Damage Rate Index*), która polega na zliczeniu pod mikroskopem stereoskopowym, w powiększeniu 16x, liczby typowych cech petrograficznych reakcji na siatce 1 cm² (10 x 10 mm), narysowanej na powierzchni wypolerowanego szliflu [17]. Uzyskaną wartość należy pomnożyć przez współczynnik odpowiadający znaczeniu w ogólnym procesie pogarszania się stanu konstrukcji. W ostatnim czasie współczynniki uaktualniono w celu zniwelowania różnic między petrografami [18]. Im większa jest wartość wskaźnika oceny uszkodzeń (DRI), tym większe są uszkodzenia betonu. Metoda ta daje ilościową ocenę zakresu wewnętrznych uszkodzeń w konstrukcji. W przypadku, gdy pomiarów dokonuje się regularnie na pobranych rdzeniach z tego samego miejsca, badanie może mieć charakter prognostyczny. Stwierdzono, że wartości wskaźnika zwiększają się niemal liniowo wraz ze wzrostem ekspansji reakcji alkalia-kruszywo. Nie zaobserwowano istotnych różnic wartości wskaźnika oceny uszkodzeń (DRI) pomiędzy betonami wykonanymi z drobnych i grubych kruszyw reaktywnych. W celach porównawczych ostateczna liczba DRI jest normalizowana do powierzchni 100 cm² [19]. Przeprowadzenie badania jest niestety czasochłonne, a wyniki mogą różnić się między petrografami. W celu usprawnienia całego procesu, Bezerra i inni zaproponowali wykorzystanie technik uczenia maszynowego [20]. Wykorzystana sieć neuronowa przewiduje wyniki zbliżone do oczekiwanych. Do głównych zalet rozwiązania należą: przyspieszenie procesu, zniwelowanie różnic między oceną petrografów i umożliwienie mniej doświadczonym specjalistom korzystanie z techniki. W próbkach pobranych z fundamentów wiaduktu, algorytm był w stanie podać jego stopień uszkodzenia. Uzyskane wyniki różniły się o 8 – 14% w porównaniu z oceną petrografu, co można uznać za akceptowalne przy ocenie stopnia uszkodzenia [21]. Jest to bardzo obiecująca wizja zautomatyzowanego podejścia do oceny wskaźnika uszkodzeń DRI.

Kolejną z metod oceny konstrukcji betonowych dotkniętych reakcją alkalia-krzemionka jest **badanie współczynnika sprężystości** (ang. SDT, *Stiffness Damage Test*), które polega na poddaniu zestawu rdzeni pięciu cyklom jednoosiowego obciążania i odciążania do maksymalnie 10 MPa [22]. Badanie przeprowadza się na cylindrycznych próbkach o stosunku długości do średnicy równym 2. Próbkę, zaraz po pobraniu z konstrukcji, należy umieścić w szczelnych pojemnikach, a następnie w temperaturze pokojowej przez co najmniej tydzień przechowywać w laboratorium, co umożliwi homogenizację wilgotności. Przed przystąpieniem do badania należy wyszlifować końce próbek, aby uniknąć zakłóceń w trakcie badania [22]. W celu ograniczenia zmienności między seriami próbek należy wykonać ponowne zwilżanie w wil-

when the maximum load applied in loading/unloading cycles is 40% of the concrete design compressive strength than when originally performed at a fixed assumed load of 5.5 MPa or 10 MPa [23, 24]. The test requires the use of a testing machine with a loading rate of 0.1 MPa/s and an extensometer to determine the stress-strain curve and thus calculate the hysteresis loop, plastic strain, and elastic modulus of the concrete. STD can provide a quantitative assessment of concrete damage and determine the progress of expansion, as in the case of the Damage Rate Index (DRI) [2].

Samples taken from the structure can be tested to predict further reaction progress. The first method of assessing Residual Expansion (RE) involves storing samples at a temperature of 38°C in a 1 molar NaOH solution. The second variant is more recommended, which involves storing samples at a temperature of 38°C and relative humidity > 95% [12]. The disadvantage of this method is the lack of a confirmed correlation between the expansion progression in laboratory samples and the actual expansion in the structure [25]. The specified conditions allow us to determine the extent to which concrete can be degraded, but there is no reference to the rate at which the reaction will proceed in the field. Another disadvantage is the possibility of alkali leaching from small samples, as this may result in an underestimation of the expansion potential [26].

Interesting information regarding the assessment of further reaction progress may be provided by measuring the remaining alkali content in concrete obtained by hot water extraction or if possible, using pore solution extraction devices [12, 27]. Since the alkali content can vary significantly within a single concrete element or between different concrete elements of the same structure, tests should be performed on several samples taken from different elements at different depths and representing concrete with varying degrees of degradation and exposed to different conditions. Advanced laboratory techniques also include: X-ray diffraction (XRD), which allows the identification of crystalline phases of alkali-silica gel, differential calorimetry (DSC), which detects phase changes in the gel, and thermogravimetric analysis (TGA), which allows the measurement of mass changes associated with the decomposition of reaction products.

Monitoring the progress of damage in structure

After confirming the presence of alkali-silica reaction, a system for observing selected areas should be implemented in the structure, which should be periodically monitored for the development of cracks in the concrete, the progress of expansion, and the level of relative humidity [11]. Inspections are best carried out twice a year, in spring and autumn, avoiding extreme temperatures [28]. The results of the inspection will allow for the implementation of mitigation strategies, e.g., in the form of sealants and coatings. Various techniques can be used to monitor the

gotnym pomieszczeniu przez okres 48 h. Wykazano, że mniejsze rozrzuty wyników uzyskuje się, gdy maksymalne obciążenie, przyłożone w cyklach obciążania/odciążania, wynosiło 40% wartości wytrzymałości projektowej betonu na ściskanie niż jak to pierwotnie realizowano przy stałym założonym obciążeniu wynoszącym 5,5 MPa lub 10 MPa [23, 24]. Zrealizowanie badania wymaga użycia maszyny wytrzymałościowej o szybkości obciążenia 0,1 MPa/s oraz ekstensometru, aby określić krzywą naprężenia względem odkształcenia i w ten sposób obliczyć pole histerezy, odkształcenie plastyczne i moduł sprężystości betonu. STD może zapewnić ilościową ocenę uszkodzeń betonu oraz określić postępy ekspansji, tak jak w przypadku wskaźnika oceny uszkodzeń (DRI) [2].

Na próbkach pobranych z konstrukcji można przeprowadzić badania przewidujące dalszy postęp reakcji alkalia-kruszywo. Ocena pozostałej ekspansji (ang. *RE, Residual Expansion*) w pierwszym wariantcie polega na przechowywaniu próbek w temperaturze 38°C w jednomolowym roztworze NaOH. Bardziej zalecany jest drugi wariant, który polega na przechowywaniu próbek w temperaturze 38°C i wilgotności względnej > 95% [12]. Wadą tej metody jest brak potwierdzonej korelacji między przebiegiem ekspansji reakcji w przypadku próbek w laboratorium, a rzeczywistą ekspansją w konstrukcji [25]. Zadane warunki pozwalają na uzyskanie wiedzy, w jakim stopniu beton może zostać zdegradowany, natomiast nie ma odniesienia, w jakim tempie postępować będzie reakcja w terenie. Kolejną wadą jest możliwość wypłukiwania alkaliów z próbek o małych wymiarach, ponieważ może to spowodować niedoszacowanie potencjału ekspansji [26].

Interesujące informacje dotyczące oceny dalszego postępu reakcji mogą wynikać z pomiaru pozostałej zawartości alkaliów w betonie uzyskanej przez ekstrakcję gorącą wodą lub, jeśli to możliwe, przy użyciu urządzeń do ekstrakcji roztworu porowego [12, 27]. W związku z tym, że zawartość alkaliów może podlegać znacznym wahaniom w obrębie pojedynczego elementu betonowego lub pomiędzy różnymi elementami betonowymi tej samej konstrukcji, badania powinny być wykonane na kilku próbkach pobranych z różnych elementów na różnej głębokości i reprezentujących beton wykazujący różne nasilenie degradacji oraz poddany różnym warunkom ekspozycji. Do zaawansowanych technik laboratoryjnych należy także dyfrakcja rentgenowska (XRD); która pozwala na identyfikację faz krystalicznych żelu alkaliczno-krzemionkowego; różnicowa kalorymetria (DSC), wykrywająca zmiany fazowe żelu i analiza termogravimetryczna (TGA), która pozwoli na pomiary zmiany masy produktów reakcji związanych z rozkładem.

Monitorowanie postępu uszkodzeń w konstrukcji

Po potwierdzeniu wystąpienia reakcji alkaliów z krzemionką należy w danej konstrukcji wprowadzić system obserwacji wybranych miejsc, które powinny być okresowo monitorowane pod względem rozwoju pęknięć w betonie, postępu ekspansji i poziomu wilgotności względnej [11]. Kontrole najlepiej przeprowadzać dwa razy w roku, wiosną i jesienią, unikając skrajnej

structure, in particular continuous monitoring and non-destructive methods.

Monitoring systems. Devices and sensors for continuous monitoring of structures are deployed to monitor specific phenomena. The system includes data registers, databases, and software. Data is periodically collected, analyzed, and stored. Monitoring systems often have defined thresholds and criteria that are compared to the collected data. When the measurement exceeds the expected trends, the system generates a warning [29]. Determining the rate and changes in concrete deformation is one of the structural condition monitoring systems. Deformation measurements can be made using, among other things, metal reference points, strain gauges, optical systems, as well as fiber optic systems that measure deformation and automatically transmit the collected data. The use of strain gauges includes monitoring vertical deflections or horizontal displacement of structures. Measurement uncertainty can range from 0.02 to 0.5 mm, depending on the measurement length and environmental conditions [30]. The DEMEC system uses a strain gauge to measure changes in length between installed control points in the form of discs, screws, and rods. The extensometer has a measure that determines displacements with an accuracy of 0.001 mm for a length of 0.5 m. In fiber optic sensors, light is transmitted through an optical fiber and reflected along the length of the cable. The sensors detect shifts in the time or frequency of the passing light and can also measure parameters such as deformation, displacement, and temperature [29].

High relative humidity is one of the parameters required for the destructive alkali-silica reaction to occur. Verifying its level is very important when monitoring concrete structures affected by this reaction. It can be measured over time, at depth, or horizontally using appropriate instruments. Continuous measurements of its value can also be used to confirm the effectiveness of measures to inhibit the expansion progress [28]. One method of measuring the relative humidity of concrete is a concept that uses inexpensive equipment and simple procedures. A wooden element is placed inside the structure, relatively close to the surface where the humidity varies the most. The relative humidity value is obtained by measuring the electrical conductivity of the wood, which must be isolated from the atmospheric air in order to achieve equilibrium with the surrounding concrete [31]. Devices for measuring relative humidity are hygrometers, which use the condensation temperature (dew point) or changes in electrical resistance [29].

Non-destructive testing. From the point of view of the use of structures, non-destructive testing (NDT) is very important. It can be performed periodically on specific areas of the concrete surface to determine the progress of damage caused by alkali-silica reaction expansion. Non-destructive techniques use portable devices that enable the processing and analysis of data sets collected during measurement.

The Acoustic Emission Technique (AET) is one of the non-destructive methods. It eliminates the need to take samples for testing and is also not dependent on

temperatury [28]. Uzyskane wyniki inspekcji pozwolą na wdrożenie strategii łagodzących, np. w postaci uszczelnaczy powłok. Do monitorowania konstrukcji można stosować różne techniki, a w szczególności stały monitoring i metody nieniszczące.

Systemy monitoringu. Urządzenia i czujniki do stałego monitorowania są instalowane, aby monitorować pewne zjawiska. System obejmuje rejestratory danych, bazy danych i oprogramowanie. Dane są okresowo zbierane, analizowane i przechowywane. Często systemy monitoringu mają zdefiniowane wartości progowe i kryteria, które są przyrównywane do zebranych danych. W momencie, kiedy pomiary przekraczają oczekiwane trendy, system generuje ostrzeżenie [29]. Określenie szybkości i zmian w odkształcaniu betonu jest jednym z systemów monitorowania stanu konstrukcji. Pomiarów odkształcenia można dokonać za pomocą m.in. metalowych punktów odniesienia, tensometrów, układów optycznych, a także zastosować systemy światłowodowe, które wykonują pomiary odkształceń i automatycznie przesyłają zebrane dane. Zastosowanie tensometrów obejmuje monitorowanie pionowych ugięć lub przemieszczenia poziomego konstrukcji. Niepewność pomiaru może wahać się od 0,02 do 0,5 mm, w zależności od długości pomiarowej i warunków środowiska [30]. System DEMEC polega na użyciu tensometru do pomiaru zmiany długości pomiędzy zainstalowanymi punktami kontrolnymi, w postaci tarcz, dysków, śrub, prętów. Ekstensometr ma miernik określający przemieszczenia z dokładnością do 0,001 mm na długości 0,5 m. W czujnikach światłowodowych światło jest przesyłane przez włókno światłowodowe i odbijane wzdłuż długości przewodu. Czujniki wykrywają przesunięcia w czasie lub częstotliwość przechodzącego światła, a także mogą mierzyć parametry takie jak odkształcenia, przemieszczenia i temperaturę [29].

Duża wilgotność względna jest jednym z parametrów koniecznych do występowania destrukcyjnej ekspansji reakcji alkalia-krzemionka. Sprawdzanie jej wartości jest bardzo ważne przy monitorowaniu konstrukcji betonowej dotkniętej tą reakcją. Można ją mierzyć w czasie, na głębokości lub poziomo, stosując odpowiednie przyrządy. Stałe pomiary jej wartości mogą także służyć przy potwierdzaniu działania środków hamujących postęp ekspansji [28]. Jedną z metod pomiaru wilgotności względnej betonu jest koncepcja polegająca na wykorzystaniu niedrogiego sprzętu i prostych procedur. Drewniany element umieszcza się we wnętrzu konstrukcji, względnie blisko powierzchni, gdzie wilgotność zmienia się najbardziej. Wartość wilgotności względnej uzyskuje się przez pomiar przewodności elektrycznej drewna, które musi być odizolowane od powietrza atmosferycznego, aby osiągnąć równowagę z otaczającym betonem [31]. Urządzenia do pomiaru wilgotności względnej to higrometry, które wykorzystują temperaturę kondensacji (punkt rosy) lub zmiany rezystancji elektrycznej [29].

Badania nieniszczące. Z punktu widzenia użytkowania konstrukcji bardzo istotne są badania nieniszczące (ang. *NDT*, *Non-destructive testing*). Można je okresowo wykonywać na określonych obszarach powierzchni betonu w celu określenia postępu uszkodzeń, wywołanych ekspansją reakcji alkalia-krzemionka. Techniki nieniszczące wykorzystują urządzenia przenośne, które umożliwiają przetwarzanie i analizowanie zestawów danych, zebranych podczas pomiaru.

environmental conditions. The acoustic emission method is particularly useful for long-term assessment and monitoring of structures. It has been shown that microcracks resulting from alkali-silica reactions can be detected by acoustic emission [32, 33]. The method allows the recording of physical effects that occur spontaneously in the tested element. Elastic waves generated by the rapid release of energy are detected by sensors placed on the surface and then converted into electrical signals that are recorded and interpreted. In addition to detecting and locating existing damage, this method can also record damage developing during measurements [34]. The acoustic emission method detects microcrack activity in real time by capturing the emission of waves caused by the formation and propagation of cracks. The energy released during crack formation has been shown to correlate with the results of expansion tests and the Damage Rate Index [35]. In addition, the acoustic emission method can be used to evaluate the effectiveness of inhibitors of alkali reaction with reactive aggregate [36].

Another non-destructive method used to assess concrete damage is **Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)**. UPV measures the time taken for an ultrasonic wave pulse introduced into a concrete element to travel between the transmitter and receiver [12]. This method is suitable for elements of small thickness and requires access to both sides of the tested element. The accuracy of monitoring alkali-silica reaction symptoms depends on the relationship between the direction of expansion and the direction of measurement, as well as the frequency band obtained from the received wave [37]. The pulse velocity decreases when there are cracks in the concrete that are not filled with gel. This method has some significant disadvantages. Studies have shown that it is not suitable for assessing the progress of damage caused by alkali-silica reaction. Initially, the pulse velocity may decrease due to the formation of internal cracks, but when the voids are filled with gel formed as a result of the alkali-silica reaction, the recorded values increase [38].

Impact echo (IE) testing involves generating an impact using an impact hammer, and the resulting surface vibrations are detected using a transducer and recorded over time. After the impact, the waves reflect off the opposite surface and any internal damage, such as cracks or voids. The resulting cracks may manifest themselves in the test as a reduction in wave velocity or an increase in the apparent thickness of the element [39, 40]. Impact Echo testing is not complicated to perform, but it requires an experienced operator who can correctly interpret the results.

Ground Penetrating Radar (GPR) emits high-frequency electromagnetic waves, measuring the water content at a depth of one meter from the surface of the structure [41]. The use of Ground Penetrating Radar allows for quick results. A reduction in wave velocity and amplitude is associated with the presence of moisture and subsurface anomalies. However, one of the disadvantages of this technique is its limited usefulness in testing reinforced concrete elements, as the radar is sensitive to the presence

Metoda emisji akustycznej (ang. *AET, Acoustic Emission Technique*) jest jedną z metod nieniszczących. Eliminuje ona potrzebę pobierania próbek do badań, a ponadto jest niezależna od panujących warunków środowiska. Metoda emisji akustycznej jest szczególnie przydatna w przypadku długoterminowej oceny i monitorowania konstrukcji. Wykazano, że mikropęknięcia powstające w wyniku reakcji alkalia-krzemionka mogą zostać wykryte dzięki zjawisku emisji akustycznej [32, 33]. Metoda pozwala na rejestrowanie efektów fizycznych, które samostannie powstają w badanym elemencie. Fale sprężyste generowane przez szybkie uwalnianie energii są wykrywane przez czujniki umieszczone na powierzchni, a następnie przekształcane na sygnały elektryczne, które są rejestrowane i interpretowane. Metoda ta, poza wykrywaniem i lokalizowaniem uszkodzeń już istniejących, może także rejestrować uszkodzenia rozwijające się w trakcie pomiarów [34]. Metoda emisji akustycznej wykrywa aktywność mikropęknięć w czasie rzeczywistym przez przechwytywanie emisji fal spowodowanych tworzeniem się i propagacją pęknięć. Wykazano, że energia uwalniana podczas powstawania pęknięć koreluje z wynikami badań ekspansji i wskaźnikiem oceny uszkodzeń (DRI) [35]. Ponadto metoda emisji akustycznej może służyć do oceny skuteczności inhibitorów reakcji alkaliów z reaktywnym kruszywem [36].

Kolejną metodą nieniszczącą stosowaną do oceny uszkodzeń betonu jest **prędkość impulsu ultradźwiękowego** (ang. *UPV, Ultrasonic Pulse Velocity*). UPV mierzy czas drogi impulsu fali ultradźwiękowej wprowadzonej do elementu betonowego między nadajnikiem a odbiornikiem [12]. Jest to odpowiednia metoda w przypadku elementów o nieznacznej grubości i wymaga dostępu do obu stron badanego elementu. Dokładność monitorowania objawów reakcji alkalia-krzemionka zależy od relacji pomiędzy kierunkiem ekspansji i kierunkiem pomiaru oraz pasma częstotliwości uzyskanego z odebranej fali [37]. Prędkość impulsu zmniejsza się, gdy w betonie znajdują się pęknięcia niewypełnione żelem. Metoda ta ma pewne istotne wady. Przeprowadzone badania wykazały, że nie jest ona właściwa przy ocenie postępu uszkodzeń wywołanych reakcją alkalia-krzemionka. Początkowo prędkość impulsu może się zmniejszać z powodu powstawania wewnętrznych pęknięć, natomiast w momencie wypełnienia wolnych przestrzeni żelem powstałym w wyniku reakcji alkalia-krzemionka rejestrowane wartości ulegają zwiększeniu [38].

Badanie echa uderzeniowego (ang. *IE, Impact Echo*) polega na wygenerowaniu uderzenia za pomocą młotka uderzeniowego, a wywołane drgania powierzchni wykrywane są z wykorzystaniem przetwornika i rejestrowane w czasie. Fale po wykonaniu uderzenia odbijają się po napotkaniu przeciwległej powierzchni, a także wewnętrznych uszkodzeń, takich jak pęknięcia czy pustki. Powstałe pęknięcia mogą się objawiać w badaniu w postaci zmniejszenia prędkości fali lub zwiększonej pozornej grubości elementu [39, 40]. Badanie Impact Echo nie jest skomplikowane do przeprowadzenia, ale wymaga doświadczonego operatora, który prawidłowo zinterpretuje uzyskane wyniki.

Georadar (ang. *GPR, Ground Penetrating Radar*) emituje fale elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości, mierząc zawartość wody na głębokość metra od powierzchni konstrukcji [41]. Zastosowanie georadaru pozwala na uzyskanie szybkich rezultatów. Zmniejszenie prędkości i amplitudy fali jest związane

of reinforcing steel. The use of radar can be helpful in identifying potential areas of damage in a structure, which should be tested using laboratory techniques or other non-destructive methods [42].

Combined testing methods

Each of the presented methods has its application in the assessment of concrete damage caused by the alkali-silica reaction, but in order for the diagnosis to be as accurate and reliable as possible, it is recommended to combine different techniques. Currently, there is a lot of research being conducted on the multi-level assessment of concrete damage by combining well-known tools. It has been shown that the Stiffness Damage Test (SDT) and Damage Rate Index (DRI) techniques are reliable and are complementary to each other [17]. Chappex et al. demonstrated a good correlation of results when using the SDT technique and semi-quantitative damage analysis on micrographs under an optical microscope [43]. The results obtained with SDT are of great importance for validating microscopic observations. Visual inspection of the structure and a combination of the two techniques mentioned above ensure correct diagnosis and monitoring of structures affected by alkali-silica reaction. Weise et al. used a combination of techniques involving linear change measurements, acoustic emission and ultrasonic wave velocity, as well as three-dimensional micro-computed tomography (μ -3DCT) measurements [44]. The implemented techniques allow for continuous monitoring with visualization in time and space of internal damage processes caused by the reaction of alkalis with reactive silica. Olague's team used the already known method of concrete observation using uranyl acetate in combination with digital image analysis algorithms. This method can be effective in detecting the presence of gel and damage. However, as with any new method based on learning algorithms, a sufficient amount of data is required to create a reliable tool [45].

Summary

The occurrence of alkali-silica reaction is a major threat to the durability of concrete structures. The effects of the reaction cause worsening of the mechanical properties of concrete, the formation of cracks, discoloration and efflorescence, which ultimately leads to damage to the structure. Early detection of alkali-silica reaction symptoms is essential for implementing effective preventive measures, thereby extending the service life of the structure. Regular inspections and monitoring of the structure allow for assessment concrete structure condition and rapid intervention, ensuring the safety of the structure.

z obecnością wilgoci i anomaliami podpowierzchniowymi. Do wad tej techniki należy natomiast ograniczona użyteczność przy badaniu elementów żelbetonowych, ponieważ radar jest wrażliwy na obecność stali zbrojeniowej. Zastosowanie radaru może być pomocne przy wyznaczaniu potencjalnych stref uszkodzeń w konstrukcji, które powinny zostać przebadane za pomocą technik laboratoryjnych lub innych metod nieniszczących [42].

Połączone metody badań

Każda z przedstawionych metod ma zastosowanie w ocenie uszkodzeń betonu wywołanych reakcją alkalia-krzemionka, natomiast aby diagnostyka była jak najdokładniejsza i rzetelna, zaleca się łączenie różnych technik. Obecnie prowadzonych jest wiele badań nad wielopoziomową oceną uszkodzeń betonu przez sprzężenie już dobrze poznanych narzędzi. Wykazano, że techniki współczynnika sprężystości (SDT) i wskaźnika uszkodzeń (DRI) są niezawodne i uzupełniają się nawzajem [17]. Chappex i inni wykazali też dobrą korelację wyników w przypadku zastosowania techniki SDT i ilościowej analizy uszkodzeń na szlifach pod mikroskopem optycznym [43]. Uzyskane wyniki z SDT mają ogromne znaczenie do uwiarygodnienia obserwacji mikroskopowych. Przeprowadzanie wizualnej inspekcji konstrukcji oraz połączenie dwóch wspomnianych technik zapewnia prawidłową diagnozę i monitorowanie konstrukcji, dotkniętych reakcją alkalia-krzemionka. Weise i inni wykorzystali kombinację technik w postaci połączenia pomiarów zmian liniowych, emisji akustycznej i prędkości fali ultradźwiękowej, a także pomiarów trójwymiarowej rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (μ -3DCT) [44]. Zaimplementowane techniki pozwalają na ciągły monitoring z wizualizacją w czasie i przestrzeni wewnętrznych procesów uszkodzeń, wywołanych reakcją alkaliów z reaktywną krzemionką. Zespół Olague wykorzystał znaną już metodę obserwacji betonu z wykorzystaniem octanu uranylu w połączeniu z algorytmami analizy obrazów cyfrowych. Metoda ta może być skuteczna w wykrywaniu obecności żeluzi i uszkodzeń, natomiast jak w przypadku każdej nowej metody bazującej na algorytmach uczenia wymagana jest wystarczająca liczba danych, na podstawie których można stworzyć rzetelne narzędzie [45].

Podsumowanie

Wystąpienie reakcji alkalia-krzemionka stanowi duże zagrożenie w przypadku trwałości konstrukcji betonowych. Skutki reakcji powodują pogorszenie właściwości mechanicznych betonu, powstawanie pęknięć, przebarwień i wysięków, co ostatecznie prowadzi do uszkodzenia konstrukcji. Wczesne wykrycie objawów reakcji alkalia-krzemionka jest niezbędne do wdrożenia skutecznych środków zaradczych, wydłużając tym samym okres eksploatacji obiektu. Regularne inspekcje i monitorowanie konstrukcji pozwalają na ocenę stanu konstrukcji betonowej i szybką interwencję, zapewniając bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji. ►

Received: 28.07.2025
Revised: 01.09.2025
Published: 21.11.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 01.09.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Stanton TE. Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate. *Proc Am Soc Civil Eng.* 1941; 66 (10): 1781–1811.
- [2] Thomas MDA, Fournier B, Folliard KJ. Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book. Federal Highway Administration (FHWA), US Department of Transportation. FHWA-HIF-13-019; 2013.
- [3] Glinicki M, Antolik A, Dąbrowski M, Dziedzic K, Gibas K, Jóźwiak-Niedźwiedzka D, Sobczak M. Diagnostyka betonu w nawierzchni drogi S8 Wolbórz-Polichno na podstawie badań odwiertów. Warszawa; 2018.
- [4] Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete Microstructure. Properties and Materials, 3rd edition. Mc Graw-Hill Professional; 2006.
- [5] Thomas MDA, Fournier B, Folliard KJ, Resendez Y. Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook. Federal Highway Administration. US Department of Transportation. FHWA-HIF-12-022; 2011.
- [6] Hagelia P. Chemistry of ASR-gels and pore fluids in ultra-accelerated mortar bars: evidence for Si-control on gel expansion properties. 13th ICAAR. Norway; 2008.
- [7] Zahedi A, Trottier C, Sanchez LFM, Noël M. Microscopic assessment of ASR-affected concrete under confinement conditions. *Cem Con. Res.* 2021; DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106456.
- [8] Owsiak Z, Zapala-Sławeta J, Czapik P. Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. *Bull Pol Acad Sci Tech Sci.* 2015; DOI: 10.1515/bpasts-2015-0003.
- [9] Jensen V. Diagnosis of alkali silica reaction. 15th ICAAR. Brazil; 2016.
- [10] Sommer H, Nixon PJ, Sims I. RILEM TC 191-ARP: „Alkali-reactivity and prevention – Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity”, AAR-5: Rapid preliminary screening test for carbonate aggregates, Materials and Structures. 2005; 38: 787-792.
- [11] Figueira RB, Sousa R, Coelho L, Azenha M, Almeida JM, Jorge PAS, Silva CJR. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Constr Build Mater.* 2019; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230.
- [12] Fournier B, Bérubé M, Folliard KJ, Thomas MDA. Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures. FHWA-HIF-09-004; 2010.
- [13] Thomas MDA, Folliard KJ, Fournier B, Rivard P, Drimalas T, Garber S. Methods for Evaluating and Treating ASR-Affected Structures: Results of Field Application and Demonstration Projects – Volume II: Details of Field Applications and Analysis. FHWA-HIF-14-0002; 2013.
- [14] Farny JA, Kerkhoff B. Concrete Technology: Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. *Concrete Technology.* 2007; 1–23.
- [15] Igarashi G, Yamada K, Xu Y, Wong H, Hirono S, Ogawa S. Image analysis of alkali-aggregate gel in concrete prism test with alkali-wrapping. 15th ICAAR. Brazil; 2016.
- [16] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Bedoya MAB, Duchesne J. Use of Damage Rating Index to quantify alkali-silica reaction damage in concrete: Fine versus coarse aggregate. *ACI Mater J.* 2016; DOI: 10.14359/51688983.
- [17] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Mitchell D, Bastien J. Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cem Conc Res.* 2017; DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.12.001.
- [18] Villeneuve V, Fournier B, Duchesne J. Determination of the damage in concrete affected by asr-the damage rating index (DRI). 14th ICAAR. Texas; 2012.
- [19] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Duchesne J. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cem Conc Res.* 2014; DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.08.002.
- [20] Bezerra A, Andrade G, Sanchez LFM, Fraser ML. Automated assessment of AAR damage in concrete in progress. 16th ICAAR: Volume 1, Portugal; 2022.
- [21] Bezerra A, Trottier C, Sanchez LFM, Fournier B. The use of artificial intelligence for assessing an overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR). 11th IABMAS; 2022. pp. 354–361.
- [22] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Bastien J. Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. *Const Build Mater.* 2015; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.071.
- [23] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M. Critical parameters of the stiffness damage test for assessing concrete damage due to alkali-silica reaction. 14th ICAAR. Texas; 2012.
- [24] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Bastien J, Mitchell D. Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. *Const Build Mater.* 2016; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.101.
- [25] Fecteau PL, Fournier B. Residual expansion testing: new aspects on cores extracted from exposure blocks submitted to environmental conditions. 14th ICAAR. Texas; 2012.
- [26] Zubaida N, Zahedi A, Sanchez LFM, Rivard P. Evaluation of the potential of residual expansion in concrete affected by Alkali Aggregate Reaction. 16th ICAAR: Volume 1. Portugal; 2022.
- [27] Fournier B, Sanchez L, Duchesne J, Goyette S. Evaluation of the available alkali content in concrete through a modified hot-water extraction method. 15th ICAAR. Brazil; 2016.
- [28] Thomas MDA, Folliard KJ, Fournier B, Rivard P, Drimalas T. Methods for Evaluating and Treating ASR-Affected Structures: Results of Field Application and Demonstration Projects Volume I: Summary of Findings and Recommendations Final Report. FHWA-HIF-14-0002; 2013.
- [29] Souma VE. Diagnosis and Prognosis of AAR Affected Structures. RILEM State-of-the-Art Reports; 2021.
- [30] Abrishami H. Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments, Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations; 2015.
- [31] Jensen V. Elgeseter bridge in Trondheim damaged by alkali silica reaction: microscopy, expansion and relative humidity measurements, treatment with mono silanes and repair. 9th EMABM. Norway; 2003.
- [32] Abdelrahman M, ElBatanouny MK, Ziehl P, Fasl J, Larosche CJ, Fraczek J. Classification of alkali-silica reaction damage using acoustic emission. *AIP Conf. Proc.* 2015; DOI: 10.1063/1.4940610.
- [33] Lokajiček T, Příkryl R, Šachlová Š, Kuchařová A. Acoustic emission monitoring of crack formation during alkali silica reactivity accelerated mortar bar test. *Eng Geo.* 2017; DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.02.009.
- [34] Iliopoulos SN, Lamberti A, Schildermans K, Ben S, Hassine H. Monitoring of ASR affected samples using different NDT-technique. 16th ICAAR: Volume 1. Portugal; 2022.
- [35] Tayfur S, Yuksel C, Akar O, Alver N, Andic-Cakir O. Investigation of alkali silica reaction damage by acoustic emission and damage rating index methods. 16th ICAAR: Volume 1. Portugal; 2022.
- [36] Zapala-Sławeta J, Świt G. Monitoring of the Impact of Lithium Nitrate on the Alkali-aggregate Reaction Using Acoustic Emission Methods. *Materials.* 2019; DOI: 10.3390/ma12010020.
- [37] Nakagawa H, Taniguchi T, Matsushima M. An investigation of ultrasonic method to monitor expansion of concrete due to ASR. 16th ICCAR: Volume 1. Portugal; 2022.
- [38] Sargolzhai M, Kodjo SA, Rivard P, Rhazi J. Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali-silica reaction in concrete. *Const Build Mater.* 2010; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.018.
- [39] Pagnotta A, Trejo D, Gardoni P. Effects on impact-echo signals caused by adjacent steel reinforcing bars and voids in lap-splice regions: experimental study. 14th ICAAR. Texas; 2012.
- [40] Malone C, Sun H, Zhu J. Nonlinear Impact-Echo Test for Quantitative Evaluation of ASR Damage in Concrete, *J. Nondestruct Eval.* 2023; DOI: 21203/rs.3.rs-3039855/v1.
- [41] Laurens F, Balayssac JP, Rhazi J, Arliguie G. Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating radar (GPR) signal. *Mater Struct.* 2002; DOI: 10.1007/BF02533080.
- [42] Omikrine Metalssi O, Godart B, Toutlemonde F. Effectiveness of non-destructive methods for the Evaluation of structures affected by internal swelling reactions: a review of electric, seismic and acoustic methods based on laboratory and site experiences. *Exp Tech.* 2015; 39: 65–76.
- [43] Chappex T, Hammerschlag JG, Kronenberg P. Correlation of mechanical fatigue testing and semi-quantitative optical microscopy analysis for the robust diagnosis of field ASR damaged structures. 16th ICAAR: Volume 1. Portugal; 2022.
- [44] Weise F, Volland K, Pirskawetz S, Meinel D. Innovative measurement techniques for characterising internal damage processes in concrete due to ASR. 14th ICAAR. Texas; 2012.
- [45] Olague C, Olague G, Pérez JA, Clemente E, Wenglas G, Castaneda J. Digital image analysis of deteriorated concrete treated with uranyl acetate for detection of alkali aggregate reaction. 15th ICAAR. Brazil; 2016.