

MICHAŁ A. GLINICKI¹⁾
 DARIA JÓZWIAK-NIEDŹWIEDZKA²⁾
 ANETA ANTOLIK³⁾
 KINGA DZIEDZIC⁴⁾
 MARIUSZ DĄBROWSKI⁵⁾
 KAROLINA BOGUSZ⁶⁾
 PAWEŁ LISOWSKI⁷⁾



ANALYSIS OF CAUSES OF DAMAGE TO SINGLE-LAYER CONCRETE HIGHWAY PAVEMENT

ANALIZA PRZYCZYŃ USZKODZEŃ JEDNOWARSTWOWEJ BETONOWEJ NAWIERZCHNI DROGI EKSPRESOWEJ

STRESZCZENIE. Po 15 latach eksploatacji odcinka drogi ekspresowej zaobserwowano przedwczesne uszkodzenia nawierzchni betonowej objawiające się widocznymi spękaniami, głównie wzdłuż szczelin 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 także 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 agresji mrozu.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, diagnostyka, kruszywo, kwarcyt, nawierzchnia drogowa, reakcja alkalia-krzemionka, spękania, trwałość.

ABSTRACT. Premature damage to the concrete pavement of a trunk road section after 15 years of its service life was noticed. The damage manifested itself in cracking along transverse joints and in the corners of slabs. Diagnostic investigations, covering a petrographic analysis of concrete and mineral aggregates by means of optical and scanning microscopy, an evaluation of the elastic properties, the degree of cracking and air-void parameters and an identification of the alkali-silica reaction products, were carried out on core samples. Multiple cracks in coarse quartzite aggregate particles and in cement matrix were found. A significant presence of microcrystalline and cryptocrystalline quartz in quartzite particles was detected. Typical alkali-silica reaction products were unambiguously identified. The considerable cracking and the substantial decrease in the modulus of elasticity were correlated with the presence of reactive quartz in the quartzite aggregate and the alkali-silica reaction was found to be the main cause of the damage. Additional damaging factors, such as heavy traffic loads and frost aggression, are discussed.

KEYWORDS: concrete, road pavement, pavement evaluation, aggregate, quartzite, alkali-silica reaction, cracks, service life.

DOI: 10.7409/rabdim.022.011

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; mglinic@ippt.pan.pl

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; djozwiak@ippt.pan.pl

³⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; aantolik@ippt.pan.pl

⁴⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; kdzic@ippt.pan.pl

⁵⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; mdabrow@ippt.pan.pl

⁶⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; kgibas@ippt.pan.pl

⁷⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa; plisowsk@ippt.pan.pl

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 zawilgoczone, co sprzyja wystąpieniu uszkodzeń mrozowych. Jedną z przyczyn uszkodzeń nawilżonego betonu może być ekspansyjna 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, wykruszanie 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, który 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 postępowaniem 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 uszko-

1. INTRODUCTION

The concrete pavements of new trunk roads are usually designed for a 30-year service life under vehicular traffic with a specified axle load limit [1]. The actual fatigue life of concrete road pavements can be considerably longer [2, 3]. If premature damage to a road pavement occurs, various possible damage mechanisms need to be considered and the further service life must be predicted [4]. Besides the vehicular traffic load, also the impact of environmental factors, the effects of winter pavement maintenance and the possible degradation of the subgrade and base course layers are taken into account. Generally, the pavement's concrete slabs remain permanently damp, which is conducive to frost damage. One of the causes of damage to moist concrete can be the expansive alkali-silica reaction (ASR) occurring in the special case when reactive mineral aggregate constituents are present and there is a high alkaline ions content in the pore solution [5-7]. Cases of damage to concrete road and airfield pavements caused by ASR have been reported in, e.g., the countries of Europe and America. The typical symptoms include: dense network cracking (especially near the joints), the spalling of the joints, aggregate pop-outs and the squeezing the filler out of the joints [8-10]. Damage symptoms visible under the naked eye, usually starting with colour changes near transverse and longitudinal joints, appear after 7-15 years of pavement service life [11]. Generally, the width of surface cracks ranges from 0.05 mm to 10 mm (in extreme cases). The cracks are sometimes filled with milky-white gel, which also occurs on the edges of reactive aggregate particles. The cracks caused by ASR, visible on the surface seldom penetrate deeper than 25-50 mm, only in rare cases reaching the depth > 100 mm, where they become microcracks. The intensive propagation of the cracks caused by ASR can result in serious damage to the pavement in the vicinity of cut joints and in the hazardous spalling of loose pieces of concrete, in consequence making the safe use of the pavement impossible.

In each of the cases of pavement damage described in [8-12], the diagnosis of the causes had been preceded by a petrographic analysis for the presence ASR products in the aggregate particles, on the boundaries of the latter, in the cement matrix and in air voids. The reactive aggregates producing the above effects in the pavement concrete comprised vitreous volcanic rocks, highly reactive siliceous limestones and also uncrushed gravels and porphyritic volcanic rocks. Fishboeck and Harmuth [8] examined damage on Austrian motorway A9 after 13 years of its service life and showed that the cause was the alkali-silica

dzenia 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 PRÓBKİ

Przeprowadzono oględziny odcinka jednowarstwowej 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. 1 a, b). 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. 1c). 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 (Rys. 2c). Nie zauważono znaczących oznak łuszczenia się powierzchni.

Z wybranych płyt nawierzchni pobrane zostały próbki-odwieroty o średnicy 100 mm przez całą grubość płyty betonowej, wynoszącą od 27 do 30 cm. Próbki-odwieroty pobrano zarówno

reaction in the quartzite and gneiss aggregate. Frybort et al. [13] identified many other reactive aggregates in pavement concrete and found the kind of reactive minerals to be the deciding factor for the occurrence of premature pavement damage due to ASR.

No serious symptoms of trunk road pavement degradation caused by the alkali-silica reaction have been noted before in Poland. There have been cases of damage to concrete structures, such as flyovers and buildings, caused by ASR [14]. The subject of this paper is damage to the pavement of a trunk road in the temperate climate zone after 15 year of service life. The diagnostic investigations were undertaken after pavement cracking and spalling, most likely caused by the alkali-silica reaction in the concrete, had been discovered during a visual condition evaluation. The aim of this research was to diagnose the principal causes of the damage to the road pavement.

2. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

2.1. ON-SITE INVESTIGATIONS AND SAMPLING

A visual examination of the single-layer jointed plain concrete pavement section built using the slip form method in the years 2002-2003 was carried out. The pavement structure had been designed for a traffic class KR6 trunk road with a 27 cm thick pavement concrete layer and the existing asphalt pavement to be used as the base. The visual examination showed damage to many pavement slabs, visible on the two traffic lanes and the emergency lane. There were cracks in the vicinity of saw-cut joints, mainly along the transverse joints or in the corners of the slabs (Fig. 1 a, b). Because of the spalling of the concrete near the transverse joints there were pavement patches there. Cracking occurred in the form of a network of up to 2 mm wide cracks.

Darker discolorations of the concrete along the transverse joints were observed (Fig. 1.c). The cracks visible on the pavement surface were filled with milky-white gel (Fig. 2a). A network of cracks was visible on the pavement surface (Fig. 2b); cracks penetrated into the concrete to a depth of a few centimetres (Fig. 2c). No significant signs of concrete surface scaling were noticed.

It appears from archival report [15] that the properties of the materials used had been consistent with the contemporary design specifications. The properties of the concrete determined using control samples taken during construction had been as follows:

- 28 day compressive strength from 40.1 to 60.8 MPa (concrete strength class B40),

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.

- 28 day flexural strength (MOR) from 3.9 to 6.3 MPa (some of the samples did not reach the required MOR of 5.5 MPa),
- absorption capacity by weight from 3.9 to 4.6%,
- freeze-thaw durability F150 (the decrease in compressive strength after 150 freeze-thaw cycles ranging from 4.0 to 13.1%).

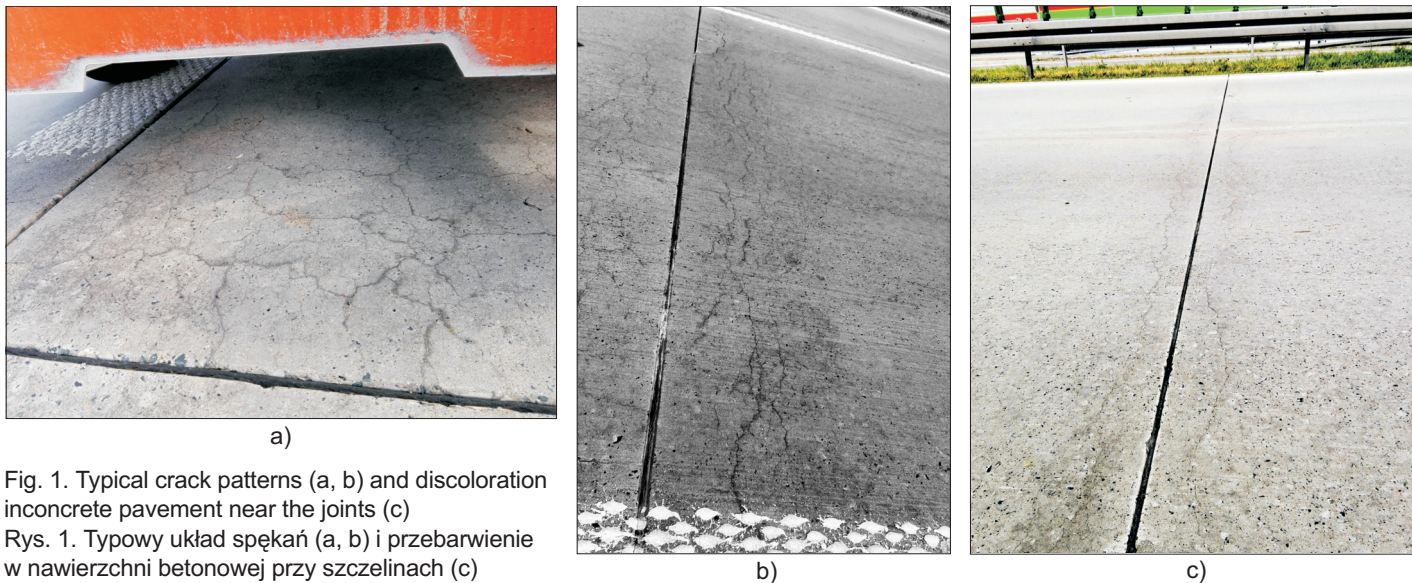


Fig. 1. Typical crack patterns (a, b) and discoloration in concrete pavement near the joints (c)

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

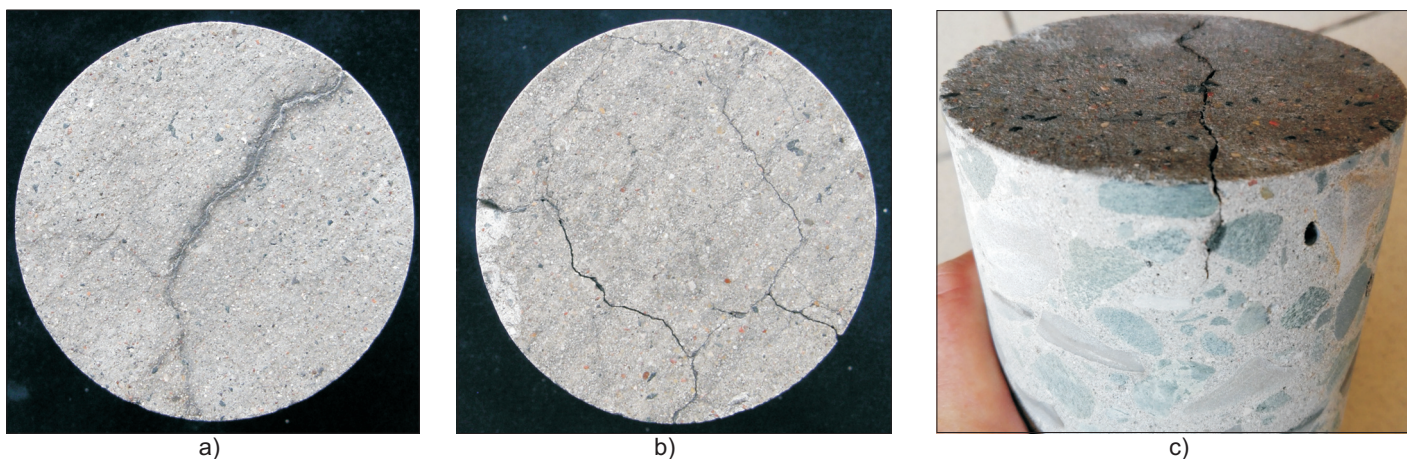


Fig. 2. View of cracks in core specimens taken from the pavement: a) surface cracks filled with a milky white gel, b) mosaic of cracks, c) cracks penetrating into the pavement layer (core diameter 100 mm)

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

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:

The pavement concrete had been made from the components specified in Table 1. The properties of the aggregate of all the particle size fractions had met all the requirements of design specification [15], including the ones

- 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].

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. Podczas cięcia najbardziej uszkodzone fragmenty próbek uległy rozpadowi. 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) 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 25 × 45 × 8 mm wyciętych z rdzeni.
3. Ocena spękań w przekrojach betonu za pomocą cyfrowej analizy obrazów na cienkich szlifach w świetle UV i polerowanych zgładach 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.

concerning alkali reactivity, specified as the “zero” degree of alkali reactivity in accordance with standard [16].

Table 1. Concrete mix components according to archival data [15]

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

Component / Składnik	Content / Zawartość [kg/m ³]
Portland cement CEM I 32.5 R ^{*)} Cement portlandzki CEM I 32,5 R ^{*)}	360
Water / Woda	144
Natural sand / Piasek naturalny 0/2 mm	551
Amphibolite chippings 2/8 mm Grys amfibolitowy 2/8 mm	228
Amphibolite chippings 8/16 mm Grys amfibolitowy 8/16 mm	475
Quartzite chippings 16/32 mm Grys kwarcytowy 16/32 mm	645
Air-entraining admixture Domieszka napowietrzająca	0.576
Plasticizer / Domieszka uplastyczniająca	1.80
^{*)} alkali content undocumented zawartość alkaliów nieudokumentowana	

2.2. TEST METHODS

Specimens for a petrographic analysis of the reactive minerals in the aggregate, for microscopic examinations of the concrete microstructure and for determining the physical properties of the concrete were cut out from the core samples by means of a diamond saw. During cutting the most damaged parts of the samples would disintegrate. From the vertical cross sections of the pavement cores polished sections and thin sections were produced using the equipment and methodology presented in [17-18]. The following investigation methods were used:

1. The examination of the thin sections by means of light microscopy to identify reactive minerals in the aggregate particles and ASR products in the concrete. Thin sections cut out from the 50 mm upper layer of the cores in accordance with procedure PB/3/2018 [19], being part of Guidelines [20] developed on the basis of the RILEM and ASTM guides, were examined. The microscopic examinations were conducted in transmitted parallel polarized light (PPL), cross polarized light (XPL) (also using a full wave plate (XPL_G)) and in ultraviolet light (UV).
2. The examination of polished sections by means of scanning electron microscopy with EDS microanalysis to identify ASR products and their composition in microareas in accordance with [7], [19], using 25 × 45 × 8 mm polished specimens cut out from the cores.

4. Ocena właściwości sprężystych próbek betonu: pomiary rezonansowego modułu sprężystości próbek pryzmatycznych $30 \times 25 \times 240$ 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 $30 \times 25 \times 240$ mm wyciętych z odwiertów rdzeniowych, z zamocowanymi czopikami pomiarowymi, wystawionych na oddziaływanie roztworu 1M NaOH o temperaturze 80°C – zgodnie z [24].

7. 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 $0,88\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.

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 jasnobeżowe oraz ziarna szare. Zaobserwowano wyraźnie widoczne pęknięcia w obrębie ziaren kruszywa jasnobeżowego 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 plagioklastu), tworzących kruszywo grube (Rys. 3),
- obecność piasku kwarcowego zawierającego także ziarna wapienia, tworzących kruszywo drobne,
- pojedyncze ziarna mułowca w grubym kruszywie.

3. The assessment of cracking in concrete cross sections by means of digital image processing, using thin sections in UV light and polished sections under SEM in accordance with [21]. The assessment was carried out for the cross sections of three cores taken from the slow traffic lane and three cores taken from the emergency lane of the pavement; the surface area of each of the cross section amounted to about 1000 mm^2 .

4. The evaluation of the elastic properties of concrete samples through measurements of the resonant frequency-based elastic modulus of $30 \times 25 \times 240$ mm prismatic specimens cut out from the cores, in accordance with [22].

5. The measurement of the air void system parameters in the cross sections of the concrete specimens cut out from the cores, in accordance with PN-EN 480-11 [23].

6. The investigation of the potential for the further occurrence of ASR through measurements of the expansion of $30 \times 25 \times 240$ mm concrete specimens cut out from the cores, with fixed plug gauges, exposed to 1M NaOH solution with a temperature of 80°C , in accordance with [24].

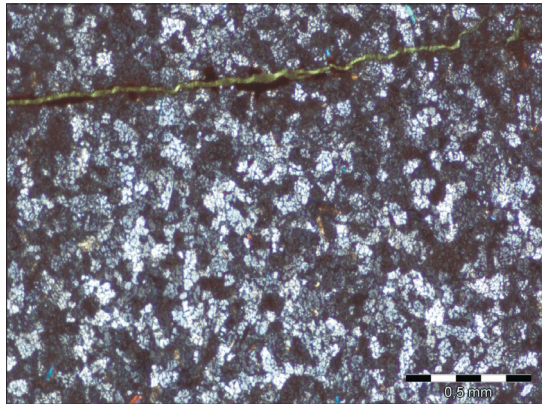
7. The evaluation of the reactivity of quartzite aggregate coming from the same deposit as the aggregate used to make the concrete through: measurements of the expansion of concrete samples at the temperature of 38°C in accordance with procedure PB/2/2018 [25] and measurements of the expansion of mortar samples at 80°C in accordance with procedure PB/1/2018 [26]. Portland cement CEM I 52.5 R with an alkali content of $0.88\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ was used to make the samples.

3. TEST RESULTS

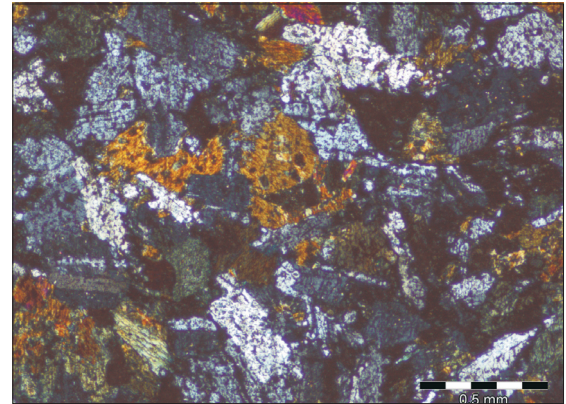
3.1. RESULTS OF ANALYSIS OF CONCRETE COMPONENTS

A macroscopic analysis of the concrete showed the distribution of coarse aggregate particles in the cross sections of the cores to be uniform. Two kinds of crushed coarse aggregate: light beige particles and grey particles were distinguished. Clearly visible cracks could be seen within the light beige aggregate particles, whereas no cracks were visible within the grey aggregate particles. A white gel-like substance was visible in the cracked aggregate particles and in air voids. The large air voids (more than 2 mm in diameter) content amounted to 1.8% and 2.8% in respectively the upper part and the lower part of the pavement slab. Cracks, propagating through both the cement matrix and the coarse aggregate, were found to occur in a plane parallel to the pavement surface. The cracks in the cross section of the concrete cores were clearly visible even when on the pavement surface the cracks looked small.

ziarnach kwarcytu stwierdzono występowanie kwarcu i śladowych ilości muskowitu. Ziarna kwarcu mają barwę 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.



a)



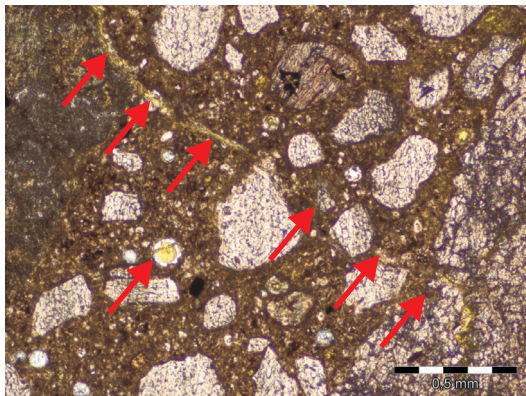
b)

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

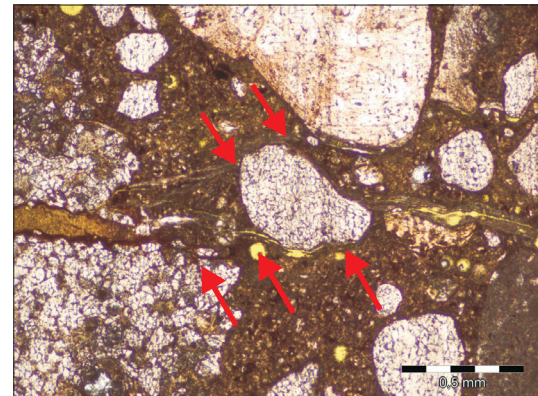
Rys. 3. Przekrój ziarna kruszywa grubego: a) kwarcyt, b) amfibolit (cienki szlif, XPL)

Mikroskopowa obserwacja cienkich szlifów 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.

Quartz and trace amounts of muscovite were found to be present in the quartzite particles. Depending on the optical orientation, the colour of the quartz grains ranges from mainly white to light grey and even to black. The quartzite rock, characterized by a typical mosaic structure without any binder, consists of isometric or elongated quartz grains. The quartzite is hard, dense, sometimes with small cavities or fissures partially or completely filled with quartz crystals.



a)



b)

Fig. 4. ASR gel visible in concrete specimens: a) 3A, b) 5A, (thin section, PPL)

Rys. 4. Żel ASR widoczny w betonie w próbkach: a) 3A, b) 5A, (cienki szlif, PPL)

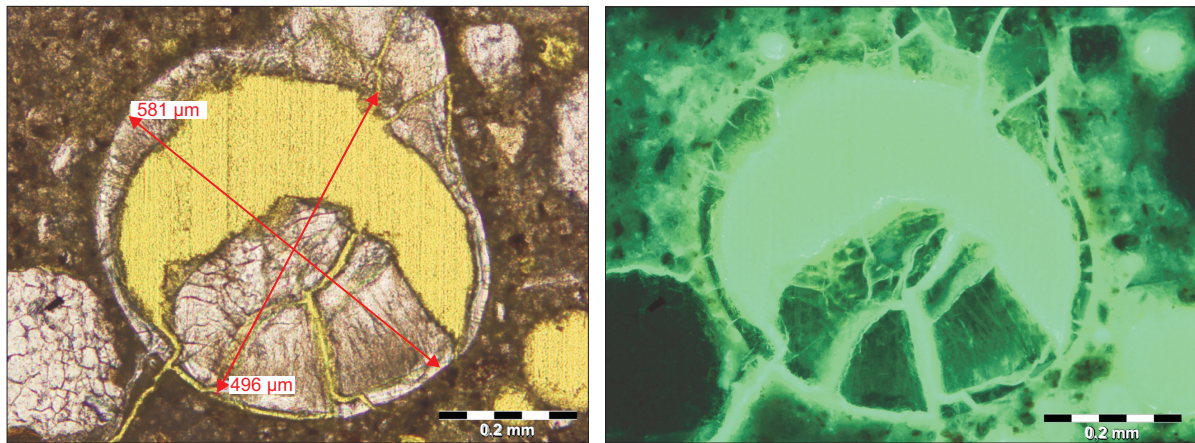


Fig. 5. ASR reaction products partly infilling air void (thin section; XPL_G and UV)

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

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 μm . Obserwowane różnice w wielkości ziaren kwarcu w kruszywie kwarcytowym ilustruje Rys. 6. Obecność kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego w ziarnach kruszywa kwarcytowego jest obfita.

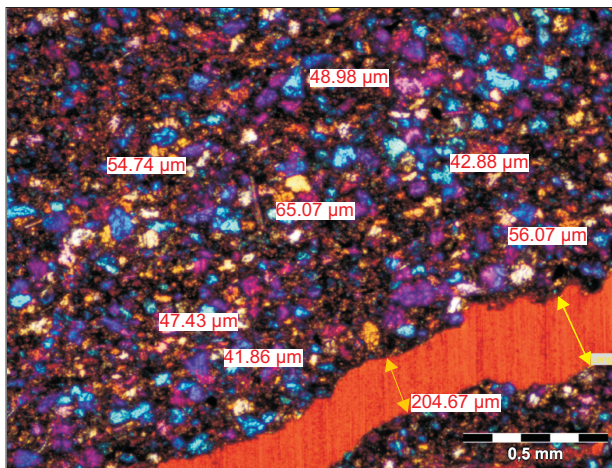


Fig. 6. Differences of quartz grain size in cracked quartzite aggregate, XPL_G

Rys. 6. Zróżnicowanie wielkości ziaren kwarcu w spękanym kruszywie kwarcytowym, XPL_G

Wyniki oszacowania zawartości kwarcu mikrokrystalicznego i kryptokrystalicznego w ziarnach kwarcytu przedstawiono w Tabl. 2. Zawartość reaktywnych form kwarcu w kruszywie kwarcytowym była duża, stwierdzono korelację z występowaniem pęknięć w kruszywie. W spękanym kruszywie kwarcytu

The microscopic examination of the thin sections showed a gel-like substance to be present in the cracked quartzite aggregate particles and in the surrounding cement matrix (Fig. 4); no cracks and such products were found in either the amphibolite aggregate particles or the sand grains. ASR products partially or completely filled many air voids (Fig. 5), particularly the ones up to 200 μm in diameter. Some of the air voids were found to be partially filled with cement hydration products (ettringite). The abundance of the gel-like substance filling the cracks in the quartzite particles was found in the samples taken from both the slow traffic lane and the emergency lane.

The quartz grain size and content in the quartzite aggregate were determined through a petrographic image analysis carried out using digital image processing. The equivalent diameter of separated quartz grains in the images was determined in order to make grain size classification possible. According to the terminology adopted in [27], quartz is identified as microcrystalline if the grain size is smaller than 100 μm and as cryptocrystalline if the grain size < 10 μm . The observed differences in quartz grain size in the quartzite aggregate are illustrated in Fig. 6. The presence of microcrystalline and cryptocrystalline quartz in the particles of the quartzite aggregate is abundant.

The estimated microcrystalline and cryptocrystalline quartz content in the quartzite particles is presented in Table 2. The quartz reactive forms content in the quartzite aggregate was high and it was found to be correlated with the occurrence of cracks in the aggregate. In the cracked quartzite particles the quartz reactive forms content was above 10%, whereas in the uncracked particles this content was below 7%.

zawartość reaktywnych form kwarcu sięgała powyżej 10%, natomiast w ziarnach niespękanych ich zawartości wynosiła poniżej 7%.

Table 2. Microcrystalline and cryptocrystalline quartz content in quartzite aggregate in cracked and uncracked particles (average value for 8 thin sections and range from-to)
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)

Pavement lane Pas jezdni	Section no. Nr szlifu	Cross-sectional area of microcrystalline and cryptocrystalline quartz grains relative to total cross-sectional area of quartzite aggregate [%] Pole przekroju ziaren kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego w stosunku do całkowitego przekroju kruszywa kwarcytowego	
		uncracked aggregate kruszywo niespękane	cracked aggregate kruszywo spękane
Slow traffic lane 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)
Emergency lane Pas awaryjny	3A	absent / 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 Tabl. 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.

SEM examinations confirmed that gel products were present in the cracks in the quartzite aggregate particles and they would extend beyond the particles onto the cement matrix (Fig. 7). An electron probe microanalysis of the reaction product in microareas showed the product to be potassium-sodium-calcium silicate with a considerable concentration of potassium (K), sodium (Na) and calcium (Ca), (Fig. 8). The determined characteristic of its qualitative composition in the quartzite aggregates is expressed by the averaged ratios: $(Na+K)/Si = 0.32 \pm 0.09$ and $Ca/Si = 0.57 \pm 0.17$.

The characterization of the elemental composition presented in Table 3 corresponds the ASR products composition range known from the literature [1, 7, 13, 28, 29], i.e. $(Na + K)/Si$ amounting to 0.2-0.35.

Table 3. Results of the microanalysis of the composition of ASR reaction products in the microareas inside cracks in quartzite aggregate grains – the quotient of the content of sodium, potassium and calcium to silicon (the result from at least twenty-five different microareas)
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)

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

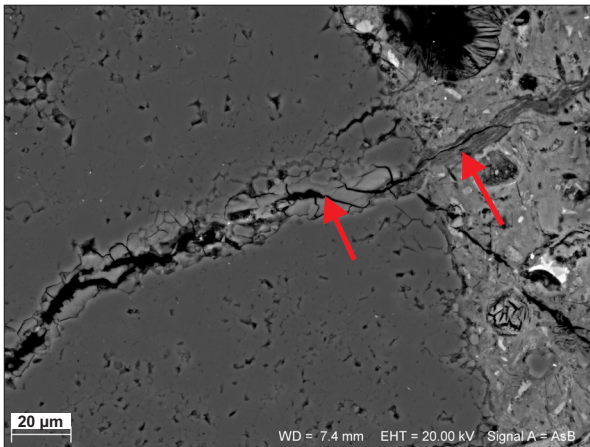
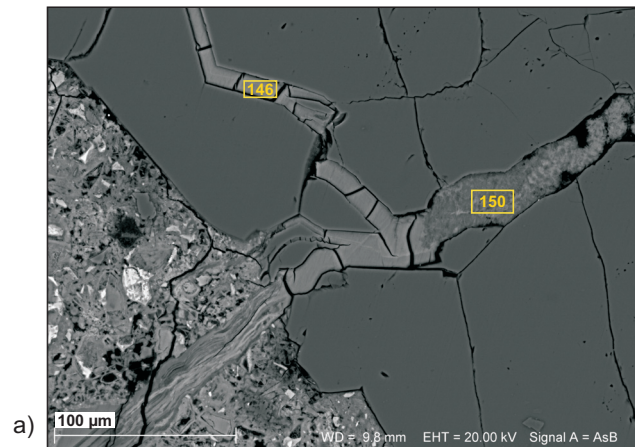


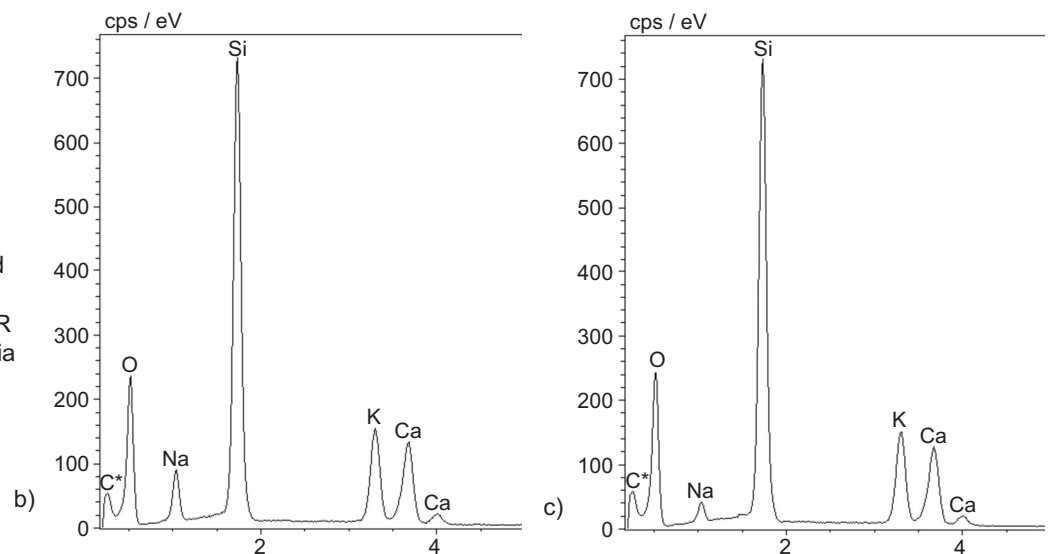
Fig. 7. ASR products in quartzite aggregate and in cement paste, penetrating beyond the aggregate – SEM microphotograph

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



a)

Fig. 8. ASR product composition in quartzite aggregate: a) SEM microphotograph and EDS analysis in selected microareas – designated by numbers of: b) 146 and c) 150
Rys. 8. Skład produktów reakcji ASR w ziarnie kwarcytu: a) mikrofotografia SEM i spektrum EDS w wybranych mikroobszarach – wskazanych numerami: b) 146 i c) 150



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 stężeń pierwiastków w produktach ASR obecnych w próbkach z pasa ruchu wolnego i pasa awaryjnego nie są spójne i nie pozwalają na dalszą analizę.

The observed variation in the composition of the ASR product is linked with the latter's location in quartzite particles, in the cement matrix or in air voids. Fig. 9 shows

colour-coded maps of K, Ca and Na concentrations within a cracked quartzite particle and in the surrounding cement matrix area. Changes in colour intensity illustrate the penetration of a given ion through the particle-cement matrix boundary. The concentration of Ca in the ASR gel was found to increase with the distance from the aggregate particle boundary. Ratio $(Na+K)/Si$ characterizing the composition of ASR products in the cement matrix amounts to respectively 0.28 ± 0.11 and 0.20 ± 0.16 . The observed differences in the concentrations of the elements in the ASR products between the samples taken from the slow traffic lane and the ones taken from the emergency lane are not consistent and so do not lend themselves to further analysis.

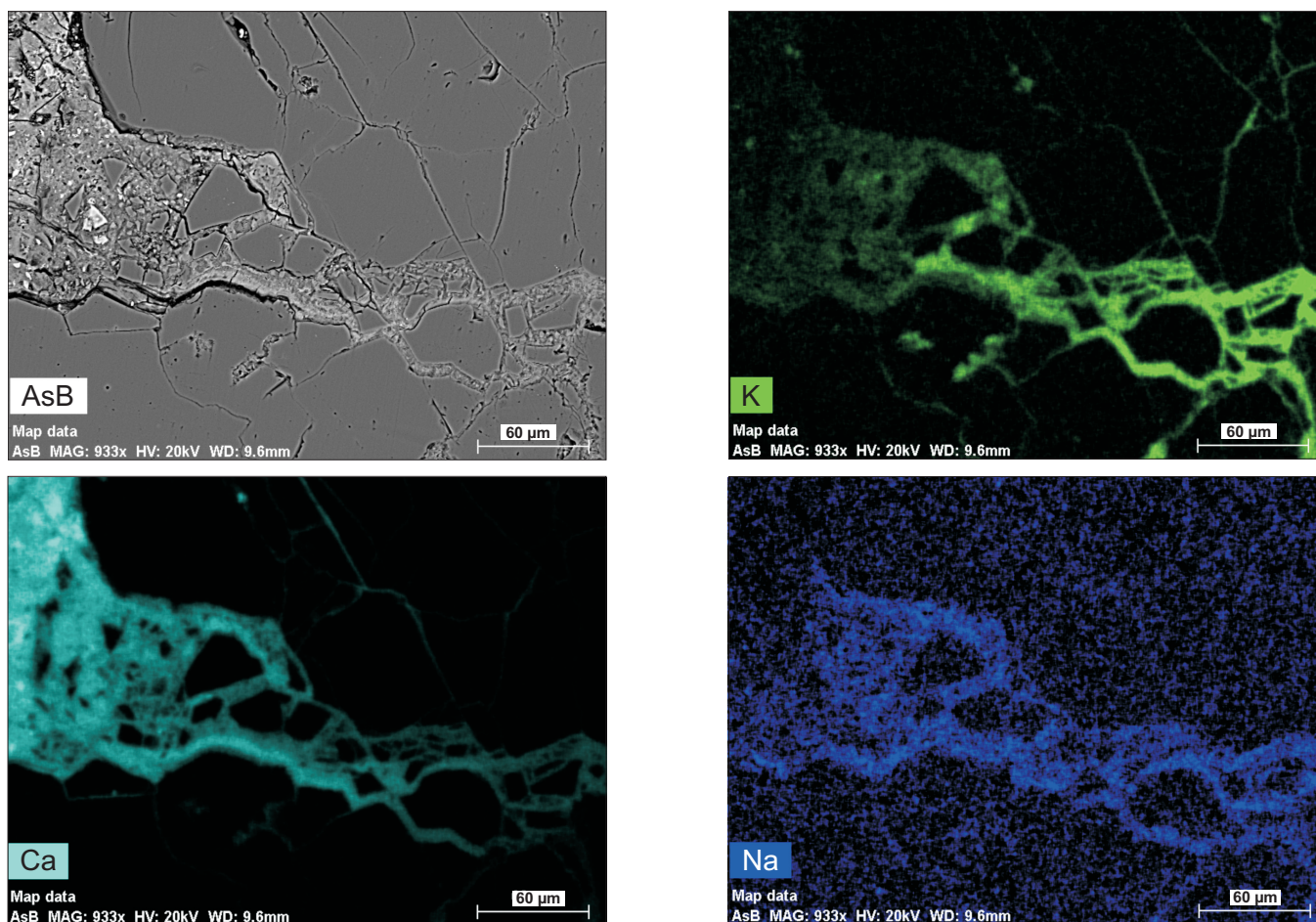


Fig. 9. Microphotograph of ASR gel and maps of the concentration of elements K, Ca and Na in the area of cracked quartzite grain
 Rys. 9. Mikrofotografia żelu ASR i mapy koncentracji pierwiastków K, Ca i Na w obszarze pękniętego ziarna kwarcytu

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.

3.2. CRACKS IN CONCRETE

An overall assessment of the width of the cracks observed in the case of the thin sections of the pavement concrete showed that the cracks in the quartzite aggregate particles were approximately 40-80 μm wide (the smaller cracks) or 250-350 μm wide (the principal cracks). The cracks in the cement matrix filled with the gel product were approximately 60-120 μm wide. The characterization of a system of cracks in concrete by means of the digital processing of UV images [21] is based on the following parameters:

- the overall length of cracks [mm] – the sum of the dendritic lengths of all the detected cracks,
- the total surface area of the cracks [mm^2] – the sum of the surface areas of the cracks,
- the relative length of the cracks [mm^{-1}] – a ratio of the overall length of the cracks to the surface area of the image,

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%.

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

Table 4. Characteristics of cracks in coarse aggregate particles in concrete samples taken from emergency lane and slow traffic lane

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

Pavement lane Pas jezdni	Aggregate particles Ziarna kruszywa	Relative length of cracks ^{*)} Względna długość spękań ^{*)} [mm^{-1}]		Relative surface area of cracks ^{*)} Względna powierzchnia spękań ^{*)} [%]	
Slow traffic lane Pas ruchu powolnego	quartzite / kwarcyt	4.03 (all particles (wszystkie ziarna)	6.73	11.1 (all particles (wszystkie ziarna)	18.5
	other / inne		0.47		1.5
Emergency lane Pas awaryjny	quartzite / kwarcyt	3.32 (all particles (wszystkie ziarna)	5.70	8.7 (all particles (wszystkie ziarna)	14.6
	other / inne		0.39		1.4
None ^{**) / brak ^{**) /}}	quartzite / kwarcyt	0.50		1.0	

^{*)} relative to the cross-sectional area of the quartzite particles visible in the thin sections / względem pola powierzchni przekroju ziaren kwarcytu widocznych na cienkich szlifach
^{**) aggregate coming directly from quarry / kruszywo z kopalni}

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 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 mikrospeknięć na zglądach w SEM i speknięć obserwowanych na cienkich szlifach prowadzono przez rozdzielczości zróżnicowanej o rząd wielkości, wyniki nie mogą być bezpośrednio porównywane.

- the relative surface area of the cracks [%] – a ratio of the total surface area of the cracks to the surface area of the image.

The overall length of the cracks per unit cross-sectional area amounted to $0.39 \pm 0.03 \text{ mm}^{-1}$ and $0.47 \pm 0.02 \text{ mm}^{-1}$ in the emergency lane samples and the slow traffic lane samples, respectively. The relative surface area of the cracks amounted to $2.2 \pm 0.2\%$ and $3.1 \pm 0.4\%$ in the concrete of respectively the emergency lane and the slow traffic lane. Both the parameters indicate a higher degree of cracking of the concrete taken from the slow traffic lane, by respectively about 20% and 42%.

Thanks to the digital reconstruction of the coarse aggregate distribution and the system of cracks the characteristics of the cracks within the coarse aggregate particles in the concrete were determined. They are presented in Table 4. Cracks in aggregate particles much more often occur in the quartzite aggregate than in the other aggregates, the difference amounting to an order of magnitude.

The assessment of the system of microcracks in the aggregate particles made on the basis of SEM images also showed strong effects of the concrete core location: the overall length of the microcracks was over five times greater in the slow traffic lane samples than in the emergency lane samples. In the particles of the original quartzite aggregate (the aggregate coming directly from the quarry, not used to make the concrete) very few microcracks were observed and their characteristics were quite similar to those of the aggregate microcracks in the concrete taken from the emergency lane. Since the microcracks in the polished sections examined under SEM and the cracks in the thin sections were measured at resolutions differing by an order of magnitude, the respective results cannot be directly compared.

3.3. CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH I MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI BETONU

Charakterystykę porów powietrznych w próbkach-odwiertach z nawierzchni przedstawiono w Tabl. 5. Jedyne 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 mikroporów przekraczała 1,5%, a współczynnik rozmieszczenia porów nie przekraczał 0,20 mm. Jedyne w przypadku próbki rdzeniowej nr 10 charakterystykę porów powietrznych można uznać za odpowiednią pod względem wymaganej odporności na zamrażanie-rozmrażanie [1, 30, 31]. Warto przypomnieć, że w okresie budowy nawierzchni specyfikacje na beton nie obejmowały określonej charakterystyki porów w betonie stwardniałym.

Table 5. Characteristics of air voids in hardened concrete (acc. to PN-EN 480-11), determined on polished sections of cores taken from pavement slow traffic lane

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

Characteristics of air voids in concrete Charakterystyka porów w betonie	Core sample number / Numer próbki rdzeniowej		
	5	8	10
Air content / Zawartość powietrza [%]	2.02	1.21	3.07
Air void specific surface area / Powierzchnia właściwa porów [mm^{-1}]	24.53	29.89	30.47
Spacing factor / Wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.31	0.31	0.20
Micro air-void content / 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 $17,5 \pm 3,0$ GPa, a zatem był mały i wykazał podwyższoną zmienność, co wskazuje na zróżnicowanie degradacji betonu. Prognozowany według wzoru z fib Model Code [32] 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.

3.3. CHARACTERISTICS OF AIR VOIDS AND MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE

The characteristics of the air voids in the core samples taken from the pavement are presented in Table 5. Only in one of the three cores the total air content in the hardened concrete exceeded 3%, being lower in the other cores. Only in one of the three cores the microvoids content exceeded 1,5%, while the air void spacing factor did not exceed 0.20 mm. Only in the case of core sample no. 10, the characteristics of the air voids can be deemed proper as regards the required resistance to freezing and thawing [1, 30, 31]. One should bear in mind that at the time when the pavement was constructed no characteristics of air voids in hardened concrete were part of the specifications for concrete.

The elastic properties of the concrete in the pavement were determined on the basis of the resonant vibration frequency under bending, using the samples cut out of the cores. The cores taken from the slow traffic lane were found to be too cracked, whereby no proper samples could be obtained. The elastic modulus of the emergency lane concrete, determined from the resonant frequency amounted to 17.5 ± 3.0 GPa and so it was too low. Moreover, it showed elevated variability, which was indicative of varied degradation of the concrete. The modulus of elasticity of quartzite aggregate concrete with the compressive strength of 40 MPa, predicted using the formula found in the fib Model Code [32], amounts to 34 GPa. Assuming the ratio of the dynamic elastic modulus to the static elastic modulus amounting to 1.2, one gets the predicted resonant frequency-based elastic modulus of 41 GPa for the concrete after 28 days of curing. Even at this approximate comparison, the decrease in the modulus of elasticity of the concrete in the investigated section of the pavement after 15 years of service life is estimated at no less than 50%.

3.4. POTENCJAŁ DALSZEJ EKSPANSJI BETONU

Pomiary wydłużenia próbek pryzmatycznych wyciętych z odwiertów i przechowywanych w 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 $0,07 \pm 0,007\%$, natomiast po 28 dniach: $0,11 \pm 0,009\%$. 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 52 tygodniach ekspozycji próbek betonu ich wydłużenie wynosiło $0,084 \pm 0,008\%$, natomiast wydłużenie próbek zaprawy po 14 dniach wynosiło $0,357 \pm 0,017\%$. Stosując odpowiednie standardowe kryteria oceny ekspansji liniowej (wydłużenie betonu 0,04-0,12% po 52 tygodniach, wydłużenie zaprawy 0,30-0,45% po 14 dniach), stwierdza się, że oba testy wykazały umiarkowanie reaktywne zachowanie kruszywa kwarcytowego.

3.4. POTENTIAL FOR FURTHER CONCRETE EXPANSION

Measurements of the elongation of the prismatic specimens cut out from the cores and stored in 1 M NaOH solution at the temperature of 80°C showed a gradual increment in their length over time. After 21 days of the exposure of the concrete specimens their elongation amounted to $0.07 \pm 0.007\%$ and after 28 days to $0.11 \pm 0.009\%$. The noted increase in length is significant and indicative of a considerable content and availability of reactive minerals in the aggregate, sustaining the expansive behaviour of the concrete. Examinations of the specimens after they had been taken out of the NaOH solution revealed a semi-transparent gel-like substance exuding on the edges of the cracks in the quartzite aggregate particles and the swelling of the latter, manifesting itself in the spalling of particles from the side surfaces of the concrete specimens.

After the aggregate's reactive fraction had been identified, crushed quartzite aggregate (coming from the same quarry), in the form of fractions 2/8 and 8/16, was collected. In accordance with the PB/1 [26] and PB/2 procedures [25], proper mortar samples and samples of concrete with quartzite aggregate and Portland cement were exposed to the standard environmental conditions. The linear elongation of the mortar samples at the temperature of 80°C and the concrete samples at 38°C is shown in Fig. 10. A significant increase in the length of the samples over time was noted. After 52 weeks of the exposure of the concrete samples their elongation amounted to $0.084 \pm 0.008\%$, while the elongation of the mortar samples after 14 days amounted to $0.357 \pm 0.017\%$. When the relevant standard linear expansion evaluation criteria (the concrete elongation of 0.04-0.12% after 52 weeks, the mortar elongation of 0.30-0.45% after 14 days) were applied, it appeared that the tests showed the behaviour of the quartzite aggregate to be moderately reactive.

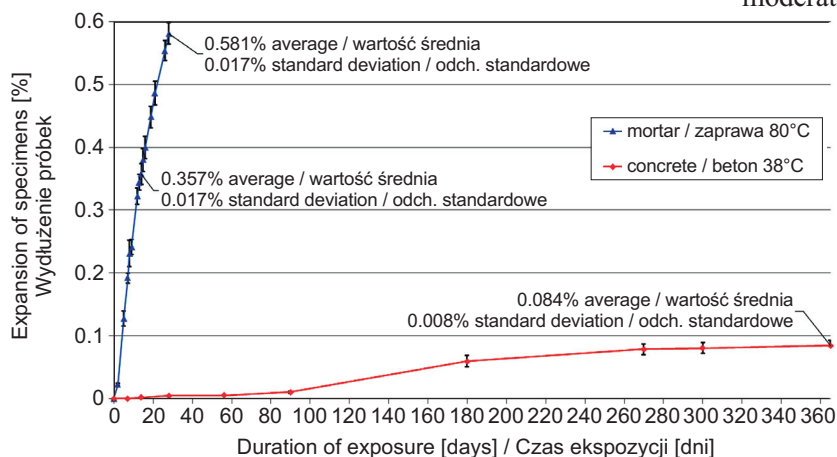


Fig. 10. Expansion of specimens containing quartzite aggregate – mortar at 80°C in 1 M NaOH solution (PB/1 [26]) and concrete at 38°C in high air humidity (PB/2 [25])

Rys. 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]

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 [33]. Jednoznaczny związek między składem produktów ASR a ich 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 [34]. 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, 35], przy czym Šachlová i in [35] 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 [36]. 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 [37] 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, 38, 39] spękania w nawierzchniach najczęściej inicjowane są na skutek naprężeń indukowanych termicznie (szczególnie w młodym wieku betonu), przypisywanych wysokiej temperaturze podczas betonowania, a niekiedy również ograniczeniu swobodnej deformacji płyt przez niezamierzone skrepowanie ruchu szczelin. W pierwszych latach użytkowania nawierzchni reakcja alkalia-krzemionka odgrywa raczej

4. DISCUSSION

The observed occurrence of the characteristic ASR products in the cracks in the quartzite aggregate particles clearly indicates a link between the cracks in the aggregate and in the cement matrix and the expansive alkali-silica reaction. The composition of the observed reaction products, expressed by the ratios of the concentrations: $(Na+K)/Si$ and Ca/Si , is consistent with the data reported in the literature, indicating trends in the changes over time [33]. No conclusive dependence between the composition of ASR products and the latter's swelling pressure is known, but it is thought that the presence of calcium hydroxide in the concrete's pore solution is indispensable for the forming ASR products to have an expansive character [34]. Also the variation in Ca content as a function of the distance from the particle-matrix boundary, reported in the literature, was corroborated in the present study.

The susceptibility of quartzite aggregate to ASR has been noted previously [7, 8, 35]. However, Šachlová et al. [35] demonstrated that unlike accelerated cement mortar expansion tests, the chemical test would yield inconsistent evaluations of the reactivity potential of quartzite aggregate. Several factors, e.g. the size of quartz grains and the close spacing of quartzite, feldspar and muscovite particles, can have a bearing on the susceptibility of quartzite to ASR [36]. The size of quartz grains affects the solubility of silica as a larger surface is more accessible to the pore solution in concrete. The good correlation between the size of particular quartz grains and cracking caused by the expansion of ASR products, established in the present study, is consistent with the correlation between the quartz grain descriptors [37] and the sample expansion results and the damage observed in structures after 20-25 years of their service life.

The system of cracks in the concrete, linked to the presence of ASR products, shows regular differences between the cores taken from the pavement lane carrying a heavy traffic load (the slow traffic lane) and the ones taken from the emergency lane (used occasionally). This suggests a possible effect of the fatigue load stemming from heavy traffic, assuming that the impact of technological factors and changes in temperature and moisture is similar for the compared pavement lanes. According to [12, 38, 39], cracking in road pavements is most often initiated by thermally induced stresses (especially at a young age of the concrete) ascribed to a high temperature during concreting and sometimes also to limiting the deformation of the slabs by unintentionally constraining the movement of the

podrzedną rolę. Jeśli wilgoć i alkaliczne roztwory odladzające przedostaną się w głąb nawierzchni przez istniejące spękania, można oczekiwać wyraźnej intensyfikacji ASR. Przypuszcza się, że zmęczeniowe oddziaływanie ruchu pojazdów drogowych przyczyniło się do wzrostu spękań zaobserwowanych na pasie ruchu powolnego na drodze i w konsekwencji zwiększenia intensywności przebiegu reakcji alkalia-krzemionka.

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 zamrażaniem i rozmrażaniem występują w zimie, a reakcja alkalia-krzemionka rozwija się w ciepłych porach roku, oba mechanizmy mogą wzajemnie wzmacniać swoje skutki [40]. 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 spękania mrozowe zwiększają przepuszczalność betonu, promując wnikanie wody i roztworów środków odladzających z powierzchni w głąb betonu. Mechanizmy interakcji powyższych procesów zniszczenia nie są jednak szczegółowo rozpoznane i opisane. W tak złożonym przypadku oddziaływań, racjonalne prognozowanie pozostałego czasu użytkowania nawierzchni jest utrudnione. Najnowsze postępy w metodyce badań doświadczalnych i modelowania przebiegu reakcji alkalia-krzemionka [41, 42] dają nowe możliwości oceny wpływu alkaliów zewnętrznych oraz polepszonego prognozowania trwałości betonu w nawierzchniach narażonych na oddziaływanie klimatu wilgotnego i mroźnego. Warto je wykorzystywać przy projektowaniu składu betonu na nowe nawierzchnie dróg, zwłaszcza dróg o dużym znaczeniu gospodarczym i społecznym.

5. WNIOSKI

Badania diagnostyczne betonu w nawierzchni drogi ekspresowej, o konstrukcji z płyt jednowarstwowych dyblowanych i kotwionych, przeprowadzone 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 przeprowa-

jointów. In the first years of the service life of a pavement the alkali-silica reaction plays rather a minor role. If moisture and alkaline de-icing solutions penetrate through cracks into the pavement, one can expect ASR to markedly intensify. Probably the fatigue impact of vehicular traffic contributed to the higher degree of cracking in the slow traffic lane and consequently, to a higher rate of the alkali-silica reaction.

The investigated road section is located in central Poland in the temperate climate zone. In this area the winter season, defined as a period with an average daily temperature below 0°C, lasts about 94 days (the average based on IMGW (Institute of Meteorology and Water Management) data for the period of 1981-2013). Because of the inadequate concrete air entrainment in some places, one should consider the possibility that frost contributed to the damage. Even though freeze-thaw damage occurs in winter while the alkali-silica reaction develops in the warm seasons of the year, the two mechanisms can mutually reinforce their effects [40]. The results of microscopic examinations presented in the previous section and computer simulations of the considered processes in air-entrained concrete show that ASR products fill air voids to a considerable degree, whereby they deactivate the function the air voids perform regarding freeze-thaw resistance. Freeze-thaw cracks increase the permeability of the concrete, promoting the penetration of water and de-icer solutions into the concrete. However, the mechanisms of the interactions between the above processes have not been fully explored and described. In such a complex case of impacts, it is difficult to rationally predict the remaining service life of the pavement. The latest advances in the experimental investigation and modelling of the alkali-silica reaction [41, 42] open up new possibilities for assessing of the effect of external alkalis and for the improved forecasting of the service life of the concrete in road pavements exposed to a humid and frosty climate. It is worth making use of these advances when designing the composition of concrete for new road pavements, especially for roads of high economic and social importance.

5. CONCLUSIONS

The following observations and conclusions emerge from the diagnostic investigations of concrete in the trunk road pavement made of dowelled and tied single-layer slabs, carried out after 15 years of its service life:

1. The damage to the pavement comprised numerous cracks in the slabs, particularly along the transverse and longitudinal joints and discolorations and local spalls

dzonych 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. Skład produktów reakcji obecnych wewnątrz spękań w kruszywie kwarcytowym charakteryzował 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, adytywnego 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 / REFERENCES

- [1] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.*: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 16.06.2014
- [2] *Amirkhonian A., Skelton E.* (eds.): Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Pavements, 27.09.2021 – 01.10.2021, Minneapolis, DOI.: 10.33593/i1c2cp
- [3] *Korentz J., Jurczak R., Szmatuła F., Rudnicki T.*: Właściwości nawierzchni betonowej autostrady A18 po 82 latach eksploatacji. Budownictwo, Technologie, Architektura, **96**, 4, 2021, 68-71
- [4] *Van Dam T.J., Sutter L.L., Smith K.D., Wade M.J., Peterson K.R.*: Guidelines for detection, analysis and treatment of materials-related distress in concrete pavements. Final report, volume 1, FHWA-RD-01-163, 2002
- [5] *Sims I., Poole A.B.* (eds.): Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review. CRC Press, London 2017

of the concrete. The system of cracks was quite typical of damage caused by the alkali-aggregate reaction. The diagnostic investigations of the concrete in cores taken from the road pavement yielded a consistent set of evidence for the occurrence of the expansive alkali-silica reaction linked to the abundance of reactive forms of silica in the quartzite aggregate used to make the concrete.

2. Higher content of the reactive forms of quartz (microcrystalline quartz and cryptocrystalline quartz) in the quartzite aggregate was found in the cracked particles (> 10%) than in the uncracked particles (< 7%). ASR products in the form of potassium-sodium-calcium silicate gel occurred in cracks in the quartzite aggregate, in the cement matrix and in air voids. The composition of the reaction products present inside cracks in the quartzite aggregate was characterized by the averaged ratios: $(Na+K)/Si = 0.31$ and $Ca/Si = 0.48$. The composition was representative of the alkali-silica reaction products and the noted variation in this composition was correlated with the distance from the boundary of the quartzite particles.
3. The investigated road pavement section had been made of materials conforming to the standards and technical specifications established 20 years ago – the use of aggregate had been based on the results of the quick reactivity check. This testing method turned out to be improper to reveal the reactivity of quartzite aggregate.
4. The inadequate concrete air entrainment noted in some places, manifesting itself in a too large spacing of air voids, is indicative of a possible local additive effect of frost damage. At the time when the pavement was constructed the specifications for concrete included no requirements for air void system in hardened concrete, but only requirements for the air content in the concrete mix. The higher (by about 37-39%) relative degree of cracking of the concrete in the slow traffic lane in comparison with the emergency lane indicates a possible role of an additional damaging factor, such as the impact of heavy traffic loads.

- [6] Owsiak Z., Zapala-Slaweta J., Czapiak P.: Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, **63**, 1, 2015, 23-29
- [7] Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Gibas K.: 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] Fishboeck E.K., Harmuth H.: 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] Allard A., Fournier B., Bastien J., Bissonnette B., Sanchez L., Duchesne J.: 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] Fournier B., Bérubé M.A., Folliard K.J., Thomas M.: Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures. FHWA, Washington, DC, 2010
- [11] Mielich O.: Alkali-silica reaction (ASR) on German motorways: an overview. Otto-Graf-Journal, **18**, 2019, 197-208
- [12] Breitenbücher R., Przondziono R., Meng B., Krütt E., Weise F.: Alkali-Silica-Reaction in concrete pavements considering traffic and de-icing agents. 13th International Symposium on Concrete Roads, Berlin, June 2018
- [13] Frybort A., Všianský D., Štulířová J., Stryk J., Gregerová M.: Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete. Materials Characterization, **137**, 2018, 91-108
- [14] Góralczyk S.: Occurrence and assessment of reactive aggregates in Poland. Institute of Mechanized Construction and Rock Mining, Warsaw, 2003
- [15] Bełtacz D., Kamiński P., Młynarczyk Z.: 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] Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A.: 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] Glinicki M.A.: 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] Garbacik A., Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Adamski G., Gibas K.: Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich. ICiMB i IPPT PAN, Kraków-Warszawa 2019, <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [21] Glinicki M.A., Litorowicz A.: 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] Katayama T.: 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 przyśpieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C. GDDKiA Warszawa 2019, <https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>
- [27] Fernandes I., Ribeiro M.A., Broekmans M.A.T.M., Sims I. (Eds.): Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis. RILEM 2016
- [28] Boehm-Courjault E., Barbotin S., Leemann A., Scrivener K.: Microstructure, crystallinity and composition of alkali-silica reaction products in concrete determined by transmission electron microscopy. Cement and Concrete Research, **130**, 2020, 105988
- [29] Owsiak Z.: Microstructure of alkali-silica reaction products in conventional standard and accelerated testing. Ceramics - Silikaty, **47**, 3, 2003, 108-115
- [30] Radlinski M., Olek J., Del Mar Arribas M. 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] Marks M., Józwiak-Niedźwiedzka D., Glinicki M.A., Olek J., Marks M.: Assessment of scaling durability of concrete with CFBC ash by automatic classification rules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**, 7, 2012, 860-867
- [32] International Federation for Structural Concrete (fib-Fédération Internationale du Béton), fib Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn, Berlin, 2010
- [33] Gholizadeh-Vayghan A., Rajabipour F.: 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, DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.01.006
- [34] Poole A.B.: 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
- [35] Šachlová Š., Kuchaová A., Pertold Z., Přikryl R.: 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
- [36] Šachlová Š., Kuchaová A., Přikryl R., Pertold Z., Nekvasilová Z.: Factors affecting ASR potential of quartzite from a single quarry (Bohemian Massif, Czech Republic). Conference: 12th SGA Biennial Meeting, 12-15 August 2013, Uppsala, Sweden, Proceedings "Mineral deposit research for a high-tech world", vol. 4, 1833-1836, DOI: 10.13140/2.1.4690.6561
- [37] Castro N., Wigum B.J.: Assessment of the potential alkali-reactivity of aggregates for concrete by image analysis petrography. *Cement and Concrete Research*, **42**, 2012, 1635-1644
- [38] Breitenbücher R., Sievering C.: 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
- [39] Giebson C., Voland K., Ludwig H.M., Meng B.: Alkali-silica reaction performance testing of concrete considering external alkalis and pre-existing microcracks. *Structural Concrete*, **18**, 4, 2017, 1-11, DOI: 10.1002/suco.201600173
- [40] Gong F., Takahashi Y., Segawa I., Maekawa K.: Mechanical properties of concrete with smeared cracking by alkali-silica reaction and freeze-thaw cycles. *Cement and Concrete Composites*, **111**, 2020, 103623, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103623
- [41] Borchers I.: 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, article no. 202
- [42] Böhm M., Eickschen E., Hermerschmidt W., Müller C., Pierkes R.: 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