



WACŁAW MICHALSKI
Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
wmichalski@gddkia.gov.pl

Szkodliwe reakcje zachodzące w betonie

Reaktywność alkalia-kruszywa (AAR) może przybierać dwie formy – w postaci reakcji alkalia-krzemionka (ASR) oraz w postaci reakcji alkalia-węglany (ACR). Reaktywność ASR jest częstszym problemem niż ACR, ponieważ częstsze jest występowanie kruszyw zawierających reaktywne minerały krzemowe [4].

W ostatnim okresie na kilku autostradach w Niemczech wykonanych pod koniec lat 90-tych ubiegłego stulecia wystąpiły uszkodzenia, których jedną z głównych przyczyn są reakcje alkaliów z bezpostaciową krzemionką albo z węglanami, zachodzące w betonie. W szczególności dotyczy to odcinków autostrad zlokalizowanych na terenie kraju związkowego Saksonia-Anhalt. Skala uszkodzeń jest na tyle duża, że w większości przypadków konieczna jest całkowita rozbiorka nawierzchni. Powoduje to bardzo duże utrudnienia w ruchu w całych środkowych Niemczech, a ponadto według wyliczeń specjalistów cały proces naprawczy potrwa minimum 10 lat i będzie bardzo kosztowny. Ze względu na wagę zagadnienia oraz fakt, że w naszym kraju planowana jest, w najbliższym czasie, budowa kilkuset kilometrów dróg betonowych, autor w większości na podstawie opracowania [5] przybliży PT Czytelnikom zagadnienia, które leżą u podstaw powstawania szkodliwych reakcji substancji alkalicznych z kwasem krzemowym (ASR) w nawierzchniach z betonu cementowego.

Uszkodzenia nawierzchni, budowli i elementów betonowych w formie spękań siatkowych, złuszczeń, jak i w innej postaci np. wykwitów żelu, zostały rozpoznane po raz pierwszy przez badacza amerykańskiego T. Stanton'a w 1940 r. i zdiagnozowane jako wynik reakcji chemicznych pomiędzy substancjami alkalicznymi zawartymi w cemencie i kruszywami zawierającymi rozpuszczalne kwasy krzemowe [1]. Znany szeroko w świecie i pierwszy udokumentowany przypadek dotyczył uszkodzeń zbiornika elektrowni wodnej nad rzeką *New River* w amerykańskim stanie Wirginia. W przypadku tego obiektu w 1922 r., tj. po 10 latach od daty zakończenia budowy elektrowni, stwierdzono poważne uszkodzenia betonu. Uszkodzenia obiektów betonowych, spowodowane reakcjami alkaliów z kwasem krzemowym, występujące coraz powszechniej w różnych częściach Stanów Zjednoczonych spowodowały rozpoczęcie już w latach 40-tych ubiegłego stulecia szeroko zakrojonych programów badawczych, mających na celu opracowanie metod badań tych zjawisk, jak również podjęto wówczas próby zapobiegania szkodliwym reakcjom zachodzącym w betonie. Przykład uszkodzeń reakcji ASR na elementach zbiornika wodnego zaprezentowano na fotografii nr 1.

W 1947 r. reakcje AAR zostały opisane przez R.H. Bogue'a w podręczniku „Chemia cementów portlandzkich” (*The Chemistry of Portland Cement*). W krajach niemieckojęzycznych problematyka szkodliwych reakcji została przedstawiona



Fot. 1. Uszkodzenia spowodowane reakcjami ASR na elementach zbiornika wodnego [5]

w 1952 r. w trzeciej części podręcznika „Chemia cementu” (*Zement-Chemie*), w której zawarto całą ówczesną wiedzę, uzyskaną głównie na podstawie studiów literatury amerykańskiej. W kolejnych latach uszkodzenia betonu, których przyczyn upatrywano w reakcjach AAR, stwierdzono również na obiektach zlokalizowanych na terenie wielu krajów, m.in. w Kanadzie, Danii, Islandii, Republice Południowej Afryki. W przypadku Niemiec do 1965 r. rozpowszechniony był pogląd, że z uwagi na określoną sytuację geologiczną w tym kraju nie powinno dojść do wystąpienia poważniejszych uszkodzeń w wyniku oddziaływań reakcji ASR. Przypadek obiektu mostowego w Lubece, zbudowanego w 1964 r., na którym już po czterech latach eksploatacji wystąpiły uszkodzenia charakterystyczne w przypadku reakcji AAR, w skali zagrażającej stabilności obiektu, spowodował zmianę dotychczasowych poglądów. Na obszarze byłej Niemieckiej Republiki Demokratycznej po raz pierwszy uszkodzenia spowodowane reakcjami AAR zaobserwowano w 1974 r. – w formie wykwitów żelu oraz uszkodzeń prefabrykowanych elementów betonowych, stosowanych w budownictwie mieszkaniowym w rejonie Rostoku.

Okres minionych 75 lat, od kiedy po raz pierwszy przedstawione zostały wyniki badań dotyczących szkodliwych zjawisk zachodzących w betonie, reakcje ASR w dalszym ciągu stanowią problem, który dotyczy wielu krajów. Zakres uszkodzeń spowodowanych w ostatnich latach tego typu reakcjami, pomimo prowadzonych intensywnych prac badawczych, opracowania w tej dziedzinie norm oraz wytycznych, jest nawet większy, niż miało to miejsce dotychczas. Przykłady zaobserwowane w ostatnich latach zaprezentowano na fotografiach 2-4.



Fot. 2. Typowy obraz szkodliwego działania reakcji pomiędzy alkaliami a aktywną krzemionką kruszywa [6]

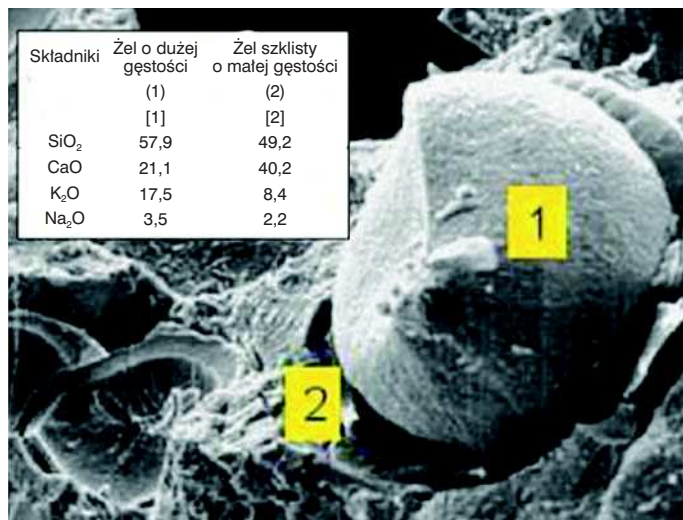


Fot. 3. Uszkodzenia elementów tunelu wskutek reakcji ASR [5]



Fot. 4. Uszkodzenia spowodowane reakcjami ASR na odcinku autostrady BAB A 9 po 14 latach eksploatacji [5]

Przyczyny tych zjawisk są zróżnicowane i ich wyjaśnienie jest skomplikowane. Dotyczy to m.in. znacznego zróżnicowania składów żeli będących efektem omawianych reakcji (fot. 5), zmienności składów mineralogicznych kruszyw oraz innych czynników, np. stosowanie nowej generacji środków przeciwko oblodzeniu w zimowym utrzymaniu dróg. Środki te wytwarzane na bazie substancji organicznych, zawierają również związki alkaliczne. Istotną rolę w całości zagadnienia odgrywają także zagadnienia czysto ekonomiczne.



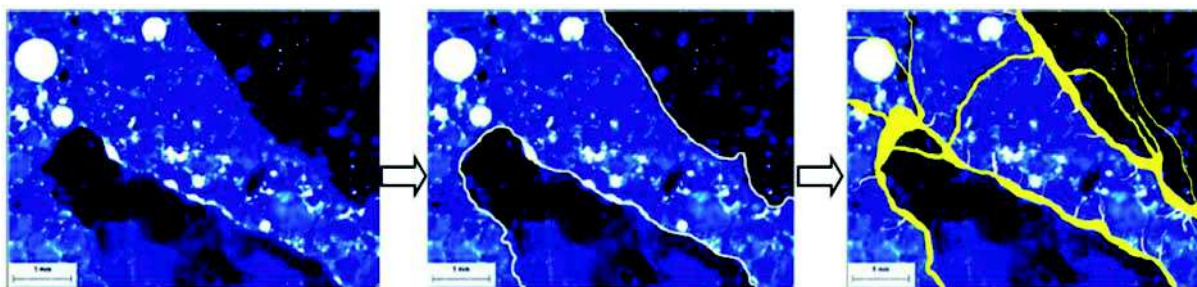
Fot. 5. Skład żelu występującego w porach w różnych miejscach [5]

Ogólny schemat mechanizmu niszczenia betonu na skutek reakcji AAR przedstawiono na rysunku 1. Niektóre rodzaje krzemionki koloidalnej (reaktywna krzemionka) reagują z alkaliowymi zawartymi w cemencie i tworzą żel wokół ziaren kruszywa. Żel ten pęcznieje pod wpływem wilgoci, co prowadzi do powstawania naprężeń powodujących zarysowania betonu. Wiele rys spowodowanych przez reakcję w betonie przechodzi przez pojedyncze ziarna kruszywa, ale też przez otaczający je zhydratyzowany zaczyn cementowy. Zjawisku często towarzyszy pojawianie się wykwitów i nacieków na powierzchni betonu [4].

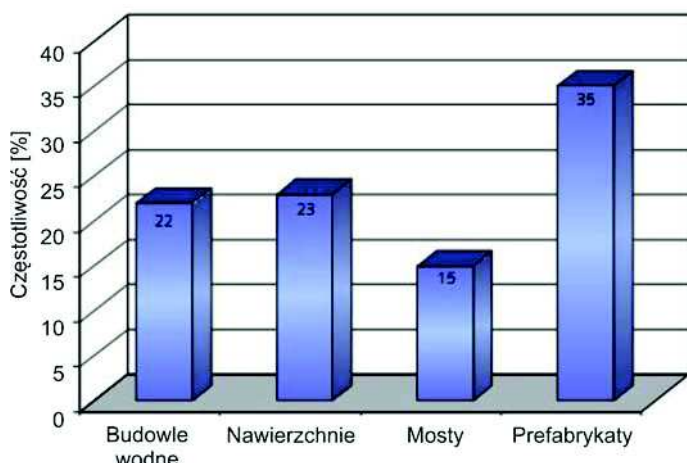
W przypadku Niemiec, a dotyczy to głównie budownictwa drogowego, podobnie jak w latach ubiegłych istnieje konieczność wprowadzenia ukierunkowanych sposobów zapobiegania szkodliwym reakcjom zachodzącym w betonie. Ważny krok w tym zakresie został rozpoczęty w wyniku opracowania i rozpowszechnienia przez Federalne Ministerstwo Komunikacji, Budownictwa i Rozwoju Miast dwóch Okólników: nr 15/2005 oraz 12/2006. Kolejny krok stanowiło opublikowanie w 2007 r. znowelizowanych „Wytycznych w sprawie środków zapobiegających wystąpieniu reakcji alkalicznych w betonie” (tzw. Alkali-Richtlinie – wytyczne w sprawie alkaliów), opracowanych przez Niemiecką Komisję ds. Żelbetu DAfStb. Wymienione uregulowania nie są jednak w pełni wystarczające.

Wykonane w okresie ostatnich lat w Instytucie Badań Materiałów Uniwersytetu w Weimarze badania dotyczące niemal 100 przypadków uszkodzeń wywołanych omawianymi reakcjami (rys.2) wykazały, że zarówno w przypadku uszkodzeń, które wystąpiły na danym obiekcie po długim okresie eksploatacji (20-30 lat), jak również w czasie znacznie krótszego okresu użytkowania, wynoszącego 6-10 lat, spowodowane zostały wskutek zastosowania kruszyw mineralnych reagujących z alkaliowymi powoli i w dłuższym czasie.

W ramach oceny przyczyn powstałych uszkodzeń, w wyniku reakcji ASR, na pierwszej pozycji (77%) wymieniano luźne skały klastyczne (piaski, żwiry) o zmiennym składzie petrograficznym, które obok zawartości ryolitu, szarogłazu, łupka krzemionkowego i wapienia krzemionkowego, najczęściej w swoim składzie zawierały zwiędziały kwarc.



Rys. 1. Ogólny schemat mechanizmu niszczenia betonu na skutek reakcji alkalicznej kruszywa [4]



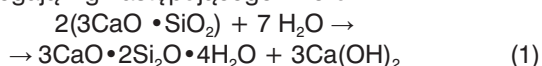
Rys. 2. Przypadki uszkodzeń obiektów w wyniku występowania reakcji ASR

Uszkodzenia wywołane reakcjami ASR, przy zastosowaniu do betonu kruszyw łamanych ze skał, w ok. 17% ocenianych przypadków zostały wywołane użyciem takich kruszyw jak: ryolity, granity, kruszywa ze skał przeobrażonych (9%), jak również z przeróbki szarogłazu (6%).

Nie wszystkie jednak z wymienionych rodzajów skał wykorzystywanych do produkcji kruszyw, mogą być ogólnie zaliczone do reaktywnych alkalicznie. Tym samym oznacza to, że musi być stosowane dokładne różnicowanie przy realizacji inwestycji drogowych, tak aby możliwe było uzyskanie wysokiego współczynnika bezpieczeństwa w zakresie zapobiegania szkodliwym reakcjom ASR. Związane jest to również z kwestią oszczędnego wykorzystywania zasobów kruszyw naturalnych oraz zapewnieniem możliwie jak najdłuższego okresu przydatności eksploatacyjnej obiektów budowlanych.

Mechanizm reakcji ASR

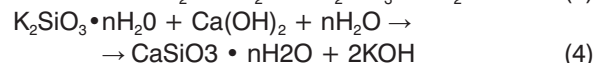
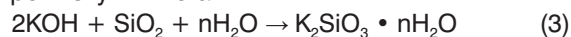
Reakcje zachodzące w cemencie z wodą obejmują reakcje głównych faz klinkierowych, np. alitu obejmującego fazy uwodnionych krzemianów wapnia C-S-H oraz portlandytu, które przebiegają wg następującego wzoru:



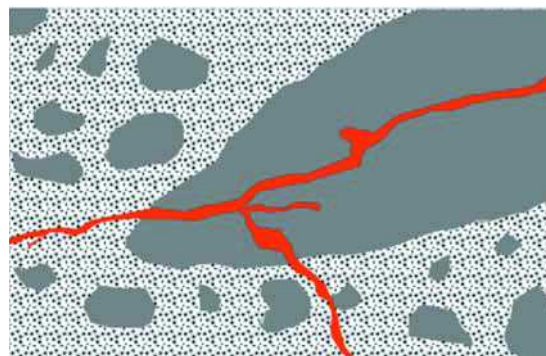
Równocześnie siarczany alkaliczne przechodzą w stan roztworu i reagują z powstałym portlandytem, np. wg wzoru:



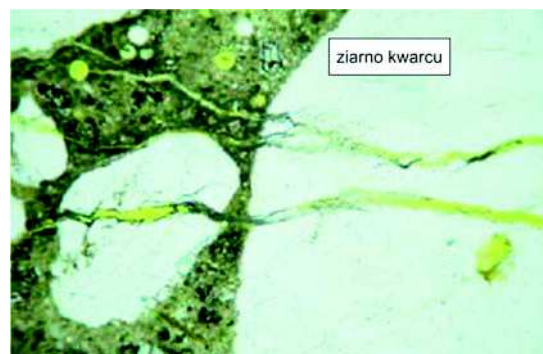
Wskutek powstawania wodorotlenków zasadowych (KOH, NaOH), zwiększa się koncentracja jonów OH⁻ w roztworze porowym do poziomu 800-1000 mmol/l (wskaźnik pH = 13,9-14,0). Wodorotlenki zasadowe reagują z reaktywną krzemionką SiO₂, w wyniku których to reakcji tworzy się żel alkaliczno-krzemionkowy o małej lepkości. Z powodu dalszego przyjmowania wapnia oraz wody żel, wskutek pęcznienia, może wywoływać ciśnienie uszkadzające beton. Przebiega to zgodnie z poniższymi wzorami:



W rezultacie powstania żelu (zawierającego wapń Ca oraz wodorotlenki sodu i potasu Na/K – typu hydrat-krzemianowy), w reaktywnym kruszywie dochodzi do powstania mikrospełkań, względnie do powiększania się istniejących już uprzednio mikrospełkań, które rozchodzą się w otaczającym stwardniałym betonie (rys. 3-4). Postępujące zjawisko prowadzi do zniszczenia betonu.



Rys. 3. Spękania w kruszywie i otaczającej zaprawie (schemat) [5]



Rys. 4. Spękania występujące w kruszywie i otaczającej zaprawie spowodowane reakcjami ASR (grafika szlif) [5]

Przebieg szkodliwych zjawisk w betonie wywołanych reakcjami alkaliów z kwasem krzemowym w sposób schematyczny przedstawiono na rysunku 5. W pierwszej fazie roztwór znajdujący się w porach wnika w poszczególne ziarna. Kruszywa wrażliwe na alkalia wchodzą w reakcje z przedostającym się do wnętrza, rozpuszczonym wodorotlenkiem alkalicznym, w wyniku czego tworzy się bezpostaciowy żel o bardzo małej lepkości. Żel niezawierający w swoim składzie wapnia nie wykazuje jeszcze tendencji do pęcznienia. W przypadku większości reaktywnych kruszyw istnienie żelu przejawia się powierzchniowymi otoczkami reakcyjnymi wokół ziaren kruszyw (rys. 5b).

Różnice koncentracji występujące pomiędzy żelem a roztworem zawartym w wolnych przestrzeniach (porach) betonu związanego prowadzą do wytworzenia się wysokiego ciśnienia osmotycznego. Według najczęściej przytaczanej hipotezy, reakcje zachodzące w obrębie otoczek powierzchni ziaren kruszywa powodują powstawanie produktów (reakcji chemicznych) o dużej gęstości, zawierających wapń. W wyniku tego powstają warunki do półprzepuszczalności, ponieważ rozpuszczone wodorotlenki alkaliczne mogą przez takie otoczki wnikać, natomiast powstały w kruszywie żel ASR przeciwdziała przedostawaniu się na zewnątrz. Wskutek zwiększających się różnic w koncentracji, ciśnienie osmotyczne po pewnym czasie jest większe od wytrzymałości na rozciąganie kruszywa, w efekcie tego dochodzi do pęknięcia ziaren kruszywa (rys. 5c).

Przebieg i rozmiar zachodzących reakcji zależny jest w szczególności od rodzaju i ilości składników komponentów krzemionki SiO_2 , ich wielkości i rozkładu, zawartości wodorotlenku alkalicznego w roztworze porowym, jak również istniejących warunków w zakresie wilgotności oraz temperatury w stwardniałym betonie. W przypadku betonu suchego reakcje alkaliczne ASR nie zachodzą. Wskutek dostarczania alkaliów z zewnątrz, dochodzi do zintensyfikowania przebiegów reakcji alkaliów z kwasem krzemowym.

Główne założenia, które są konieczne, aby wystąpiły reakcje ASR to:

- kruszywo zawiera cząstki kwarcu, względnie również jego odmiany (modyfikacje),
- cement zawiera alkalia lub są one dostarczane z zewnątrz,
- woda (niezbędna do zainicjowania reakcji alkalicznej).

Krzemionka SiO_2 rozpuszcza się w mocnych roztworach wodorotlenków, przy czym prędkość tego procesu zależna jest głównie od:

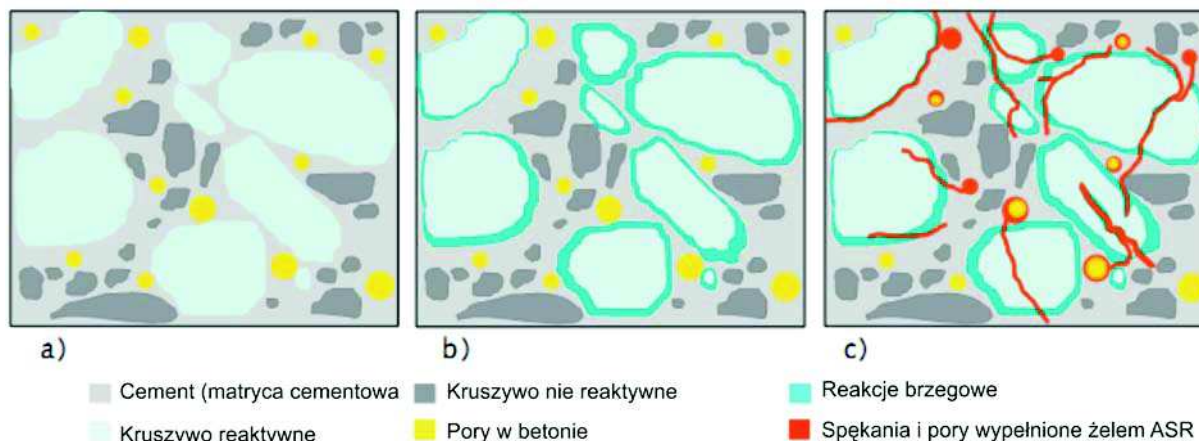
- zmian postaci krystalicznej SiO_2 ,
- wielkości ziaren,
- wartości pH,
- temperatury.

Właściwie wykrystalizowane ziarna krzemu, bez uszkodzonej siatki krystalicznej, tak jak ma to miejsce w kryształach górskim, są trudno rozpuszczalne. W przypadku idealnej siatki krystalicznej, jony znajdują się w jednoznacznie zdefiniowanych miejscach tej siatki. Takie usytuowanie odpowiada najwyższej możliwej symetrii oraz jest jak najbardziej korzystne pod względem energetycznym, tzn. najmniejszej energii kruszywa budowlanego w każdym systemie krystalicznym. W przeciwieństwie do tego realna struktura danego kryształu wykazuje różnego rodzaju zakłócenia siatki, które zmniejszają stopień uporządkowania idealnego kryształu i odpowiadają mniej stabilnym stosunkom energii.

Rozpatrując ogólnie omawiane zagadnienie, kruszywa charakteryzują się realnymi strukturami. Odpowiednio do tego modyfikacje krzemionki (SiO_2) różnią się pomiędzy sobą istotnie rozpuszczalnością w zależności od stopnia krystalizacji, względnie od stopnia zakłóceń sieci krystalicznej. Kwarc grubokrystaliczny jest tylko w niewielkim stopniu wrażliwy na roztwór wodorotlenku (wartość $\text{pH} > 12$), przez co dzięki odpowiedniej mikrostrukturze powierzchni ziaren kwarcu jest zapewnione dobre powiązanie z matrycą (zhydratyzowaną zaprawą).

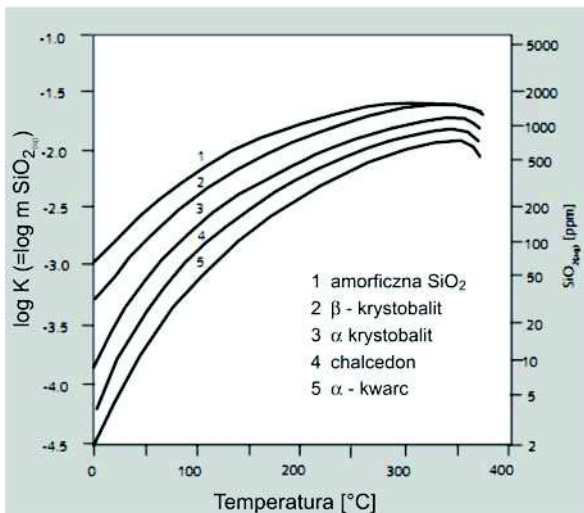
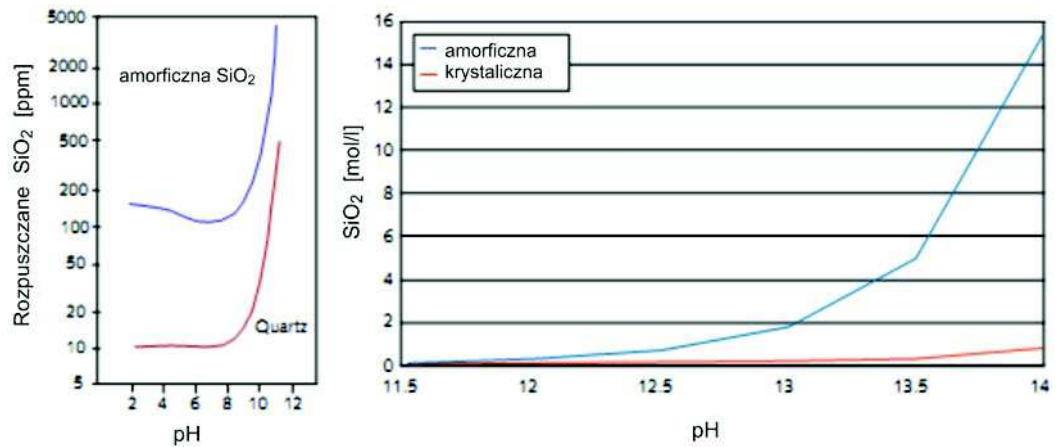
Wszystkie kruszywa zawierające krzemionkę SiO_2 w betonie reagują z jonami alkaliów z roztworu porowego, ale jedynie przy odpowiednich ilościach reaktywnej krzemionki SiO_2 , zawartej w kruszywie i przy wysokich wartościach pH, tzn. przy wysokiej koncentracji alkaliów w roztworze porowym, jest reakcją szkodliwą dla betonu. W tej samej temperaturze kryształ górski, jako dobrze wykrystalizowana krzemionka, wykazuje najmniejszą rozpuszczalność, podczas gdy krzemionka bezpostaciowa SiO_2 wykazuje najwyższą rozpuszczalność (rys. 6-7).

Reakcje ASR mogące doprowadzić do uszkodzeń betonu, zachodzą w sytuacji, w której występuje kruszywo zawierające reaktywną krzemionkę oraz odpowiednią wilgotność, kolejnym warunkiem koniecznym jest przekroczenie określonej

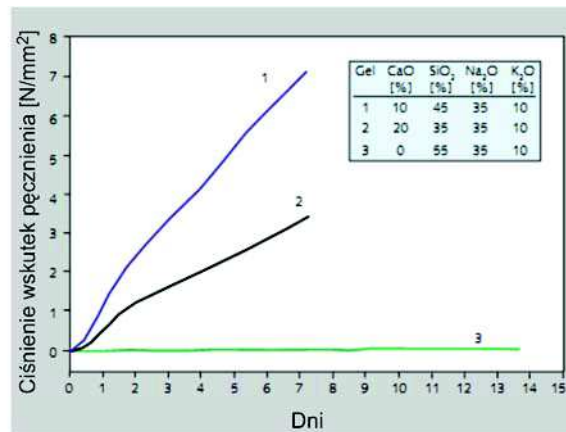


Rys. 5. Schemat przedstawiający przebieg reakcji alkaliów z kwasem krzemowym ASR [5]

Rys. 6. Rozpuszczalność krzemionki bezpostaciowej (amorficznej), względnie krzemionki krystalicznej SiO₂ [5]



Rys. 7a. Rozpuszczalność poszczególnych modyfikacji SiO₂ w zależności od temperatury [5]



Rys. 7b. Pomierzone ciśnienie pęcznienia w przypadku różnych syntetycznych żeli ASR [5]

łączonej zawartości alkaliów w betonie. Alkalia występujące w spoiwie cementowym pochodzą głównie ze składników ilastych materiałów, których użyto do produkcji cementu. W Europie Środkowej usytuowanie miejsc poboru materiałów, jak i lokalizacja kamieniołomów jest taka, że stwierdzane są wyższe zawartości wapnia w porównaniu do zawartości sodu. Zawartość związków sodu i potasu Na₂O i K₂O składa się na sumaryczną zawartość alkaliów, która jest wyrażana jako Na₂O- ekwiwalent alkaliów.

Zgodnie z [4], ekwiwalent alkaliów – łączna zawartość alkaliów w cemencie liczona jest w procentach masy, a wyrażona jako suma tlenku sodu (Na₂O) i potasu (K₂O). Uwzględnia się przy tym, że waga molekularna Na₂O jest o 0,658 mniejsza niż waga K₂O i że obydwie substancje wykazują podobną reaktywność.

$$\text{Na}_2\text{O- ekwiwalent alkaliów} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} [\text{m/m, \%}] \quad [5]$$

Szeroko zakrojone badania laboratoryjne, jak również badania wykonanych obiektów, wykazały, że przy wartości Na₂O- ekwiwalentu alkaliów w zastosowanym cemencie wynoszącej ≤ 0,60 (% m/m), z reguły nie są stwierdzane reakcje alkaliów z kwasem krzemowym. Podana granica obowiązuje jedynie w przypadku, kiedy nie ma miejsca sytuacja wprowadzania alkaliów z zewnątrz, tak jak np. przy stosowaniu

środków zapobiegających oblodzeniu, które mogą wnikać w beton. W przypadku wartości Na₂- ekwiwalentnego wynoszącego 0,60 (% m/m), koncentracja jonów OH⁻ w zaprawie cementowej (przy w/c = 0,5) wynosi około 500 mmol/l (wartość pH=13,7).

Metody badań dotyczące reakcji ASR

Na świecie opracowano szereg metod badań służących do oceny wrażliwości kruszyw na oddziaływanie alkaliów. Wyróżnić tu należy metody polegające na ocenie rozpuszczalności, badania dotyczące składu mineralogicznego i petrograficznego, tzw. szybki test wykonywany na zaprawie oraz badania betonu. Najnowsze badanie eksploatacyjne, tzw. badania zachowania się w czasie (AKR-Performance-Prüfverfahren), stanowi badanie, którego celem jest ocena opracowanych specyficznych składów mieszanek betonowych odnośnie występowania szkodliwego potencjału w odniesieniu do reakcji alkaliów z kwasem krzemowym ASR.

Metody obejmujące zjawisko rozpuszczalności, wykonywane np. według normy amerykańskiej ASTM C289, wg przedmiotowej metody określa się głównie zawartość w kruszywie rozpuszczalnego kwasu krzemowego, który jest roz-

puszczalny w roztworach wodorotlenków alkalicznych. Jednak ilość rozpuszczalnego kwasu krzemowego samodzielnie nie stanowi kryterium do określenia reaktywności danego kruszywa, z tego powodu takie metody mają ograniczoną siłę wypowiedzi.

Badania dotyczące składu petrograficznego i mineralogicznego służą do identyfikacji rodzaju występujących kruszyw oraz ich budowy mineralogicznej. Rodzaj, udział i właściwości SiO_2 zawartej w kruszywie umożliwiają ocenę wrażliwości na alkalia, natomiast określenie ilościowe jest możliwe tylko w ograniczonym zakresie i wymaga dużego doświadczenia. Z podanych względów badania petrograficzne i mineralogiczne nie mogą być uznane za wystarczające, aby na ich podstawie udzielić jednoznacznej oceny zachowania się kruszywa w betonie pod kątem możliwych reakcji alkaliów z kwasem krzemowym.

Kolejna metoda określana jest jako „szybki test zaprawy”. Test ten polega na badaniu zaprawy wykonanej z użyciem drobnej frakcji kruszywa i jest metodą referencyjną, względnie alternatywną według wytycznych w sprawie alkaliów (Część 3) oraz według norm ASTM C1260, CSA A 23.2-25A, względnie RILEM AAR-2. Metoda ta jest często stosowana i służy do dokonania krótkoterminowej oceny reaktywności alkalicznej kruszywa na podstawie pomiarów pęcznienia próbek uformowanych z zaprawy. Ranga tego badania jest uznawana za wysoką, jednak w dalszym ciągu występują różnice w odniesieniu do wyników badań betonu, względnie w stosunku do doświadczeń uzyskanych w praktyce.

Metody badań próbek betonowych uważane są za najbardziej niezawodne przy dokonywaniu ocen wrażliwości kruszyw na alkalia, jednak spośród wszystkich rodzajów metod badawczych czas ich realizacji jest najdłuższy. Chodzi przy tym o badania wykonywane według standardowych recept, takich jak zalecane są wg wytycznych w sprawie alkaliów (Część 3), norma ASTM C1293, CSA A 23.2-14A, lub RILEM AAR-3/4.

Najnowsze badania reakcji betonu (AKR Performance Prüfung), tzn. zachowania się w czasie oddziaływania reakcji alkaliów z kwasem krzemowym, które umożliwia bezpośrednią ocenę szkodliwego potencjału zaprojektowanego betonu na możliwe reakcje ASR. Specjalną pozycję zajmuje wieloletnie przechowywanie betonu w warunkach poza laboratorium, tj. w warunkach rzeczywistych. Umożliwia to porównywanie oraz weryfikowanie wyników poszczególnych metod badań, w przypadku których jednak nie są uwzględnione wpływy wywoływane obciążeniem pojazdami samochodowymi, jak również zewnętrzne wprowadzanie alkaliów.

W znowelizowanych w 2007 r. „Wytycznych w sprawie środków zapobiegających wystąpieniu reakcji alkalicznych w betonie” oprócz badań kruszyw wg Części 2 oraz badania betonu w komorze klimatycznej w $+40^\circ\text{C}$, według Części 3 tych wytycznych, zawarte zostały po raz pierwszy tzw. dwa szybkie testy do oceny wrażliwości na alkalia poszczególnych frakcji kruszywa ($> 2\text{mm}$). Ponadto opisane zostało badanie betonu wykonywane w temperaturze $+60^\circ\text{C}$ – przy próbkach usytuowanych ponad zwierciadłem wody.

Badanie betonu z przechowywaniem w komorze mgłowej w temperaturze $+40^\circ\text{C}$ zbliżone jest do znanego na świecie badania na próbkach o nazwie *concrete prism test* (badanie na próbkach prostopadłościennych) (wg. RILEM AAR-3,

ASTM C1293, CSA A23.2-14A). Umożliwia ono ocenę wrażliwości na alkalia dwóch, względnie trzech frakcji kruszywa z danego miejsca poboru (złoża). Podaną metodą nie można jednak oceniać frakcji poniżej 2 mm ani także poszczególnych frakcji kruszywa. Jest wiadomym, co również potwierdzone zostało na podstawie doświadczeń własnych, że w szczególności w przypadku kruszyw miejscowych – luźnych skał klastycznych, częstym przypadkiem jest zróżnicowana wrażliwość na alkalia dla dostarczanej frakcji z danego złoża. Badanie betonu z przechowywaniem w komorze mgłowej w temperaturze $+40^\circ\text{C}$ wymaga okresu 9 miesięcy i stanowi tzw. „czyste” badanie kruszywa, natomiast nie jest ono przydatne do oceny szkodliwego potencjału reakcji AKR betonów o specyficznym składzie, a także tylko warunkowo przydatne do oceny kruszyw określanych jako wolno i późnoreagujące (ang. termin określający te kruszywa *slow-late*). Potwierdzony został ponadto fakt, że przy stosowaniu zróżnicowanych ilości specjalnych cementów do badań (Na_2O -ekwiwalent alkaliów wynoszący $1,3 \pm 0,1$ (% m/m)), może to mieć wpływ na uzyskane wyniki badań.

Jednym z zazwyczaj nieuwzględnianych mankamentów przy badaniu w komorze mgłowej jest wylugowanie alkaliów z betonu i wpływ tego zjawiska na końcowy wynik badania. Według badań wykonanych na Uniwersytecie Technicznym w Monachium, w przypadku próbek z użyciem cementu CEM I, po 9 miesięcznym okresie przechowywania w komorze mgłowej dochodzi do wylugowania nawet 30% alkaliów. Wskutek tego obniża się również koncentracja jonów OH^- w roztworze zawartym w porach.

Wszystkie tzw. szybkie testy próbek zaprawy, takie jak opisane w normach: RILEM AAR-2, ASTM C1260, SCA A23.2-25A oraz dwa szybkie testy zawarte w niemieckich wytycznych w sprawie alkaliów, opierają się zasadniczo na teście opracowanym już w 1986 r. przez Obernholstera. Zaleta tych metod polega na krótkim terminie potrzebnym do oceny kruszyw przed rozpoczęciem danej budowy, ocenie nowych odkrywek i możliwości stałego nadzorowania złoża, a ponadto na stosunkowo prostym wykonaniu badania w laboratorium. Obok zalet podane metody mają również cały szereg mankamentów. Efekt „szybkiego wykonania” jest możliwy tylko poprzez wyraźne podwyższenie stopnia oddziaływania, tzn. zwiększoną zawartość alkaliów, podwyższoną temperaturę oraz wysoką wilgotność. Wskutek tak wytworzonych warunków może dojść do „zbyt ostrej” oceny wstępnej, co oznacza, że kruszywa przydatne lub warunkowo przydatne do betonu nie przejdą pomyślnie takiego testu. W międzyczasie w Niemczech wystąpiła niewielka wprawdzie liczba przypadków, znanych także na świecie już od dłuższego czasu, kiedy odporność na alkalia niektórych kruszyw oceniona podaną metodą okazała się niewystarczająca (zbyt niska). Tego rodzaju przypadki oraz ich skutki należy traktować krytycznie, tzn. uznać wynik jako zbyt ostrą ocenę wstępną.

W przypadku większości szybkich testów istnieje tylko jedna wartość graniczna, która umożliwia podział na kruszywa przydatne oraz kruszywa nieprzydatne. W przypadku szybkiego testu zaprawy (metoda alternatywna wg wytycznych w sprawie alkaliów; Część 3), przy uzyskaniu wartości pęcznienia $\leq 1,5$ mm/m po 28 dniach, względnie przy metodzie szybkiej (metoda referencyjna wg wytycznych w sprawie alkaliów, Część 3) pęcznienie $\leq 1,0$ mm/m – określone po

13 dniach, oceniane kruszywa można zakwalifikować do odpowiedniej klasy wrażliwości na alkalia. W przeciwnym razie do chwili obecnej nie jest możliwe odpowiednie zaszeregowanie według w/w wytycznych. W przypadku kruszyw ocenionych na podstawie szybkiego testu zaprawy jako reaktywne, względnie jako potencjalnie reaktywne, w badaniach prowadzonych na Uniwersytecie w Weimarze wprowadza się kolejne badanie, tzw. zachowania w czasie dla ustalonego składu betonu, do którego stosuje się dane frakcje kruszywa. Według wytycznych w sprawie alkaliów możliwe jest połączenie w/w badania betonu z przechowywaniem próbek w komorze mgłowej.

W ostatnim czasie stwierdzono zarówno w ośrodkach badawczych działających w różnych częściach świata, jak i w Niemczech, że w szczególności w przypadku ustalonych składów betonów do budowy nawierzchni drogowych, jak i do powierzchni manewrowych na lotniskach, na istotne dla praktyki pytania nie można odpowiedzieć w sposób całkowicie niezawodny, tzn. na podstawie badań betonu prowadzonych zgodnie z zapisami wytycznych w sprawie alkaliów; Część 3 (Badanie kruszywa), ani również wykonanych przy użyciu szybkiego testu. Pytania w tym zakresie są następujące:

- Czy jest możliwe w sposób całkowicie pewny wyeliminowanie reakcji ASR uszkadzających beton w danym przypadku – przy ustalonym składzie betonu?
- Jaki jest wpływ wprowadzania związków alkalicznych z zewnątrz wskutek stosowania środków odładzających w zimowym utrzymaniu dróg?

W konsekwencji uznawana jest obecnie potrzeba wykonywania badania eksploatacyjnego (AKR-Performance-Prüfung) i mogłoby być ono wykorzystywane przy różnych podejściach do zagadnienia ASR. Praktycznie do chwili obecnej występują istotne różnice dotyczące zarówno przebiegu wykonania, jak i celu tego badania. Niektórzy próbują ustalić, na podstawie badań kruszyw, ostre wartości graniczne dotyczące badania zachowania się stwardniałego betonu w zakresie odporności na reakcję alkaliczno-krzemionkową.

Dalsze próby prowadzone w skali międzynarodowej, względnie zastosowane podejścia dotyczące ocen specyficznych składów mieszanek betonowych, odpowiadają francuskiej normie AFNOR NF P 18-454 [20], wg której zapisów próbki betonu przechowywane są w temperaturze +60°C – przechowywane ponad zwierciadłem wody. Tego rodzaju podejścia mogą być przydatne np. w przypadku budowl, względnie elementów, które w trakcie użytkowania nie będą poddawane oddziaływaniu alkaliów dostarczanych z zewnątrz.

Obok podanego już niebezpieczeństwa wylugowania alkaliów, w przypadku niezabezpieczonych próbek betonowych, dochodzi znany m.in. z badań etringitu aspekt chemiczny dotyczący cementu. Wraz ze zwiększaniem się temperatury zmienia się stosunek $\text{OH}^-/\text{SO}_4^{2-}$ – zawsze w kierunku zwiększania się zawartości jonów SO_4^{2-} . Oznacza to, że roztwór w porach zawiera więcej jonów SO_4^{2-} , a tym samym mniej jonów OH^- . Z jednej strony, z uwagi na wzrost temperatury podwyższa się rozpuszczalność i prędkość reakcji SiO_2 . Z drugiej strony, obniżenie wskaźnika pH także obniża rozpuszczalność SiO_2 . Obniżenie koncentracji jonów OH^- według przeprowadzonych badań może wynieść nawet do 40%, co może prowadzić do nieprawidłowej interpretacji wyniku.

Doświadczenia uzyskane w trakcie badań prowadzonych przez Instytut Badań Materiałów Uniwersytetu w Weimarze, w przypadku najnowszego badania zachowania poszczególnych składów betonów, mogą zostać nieuwzględnione specyficzne warunki użytkowania. Takie ustalenie dotyczy np. komory o zmiennych warunkach przechowywania próbek. Badanie zachowania wykonywane na Instytucie Budownictwa, uwzględniając zapisy zawarte w normie francuskiej dotyczącej tego badania, w przypadku betonu nawierzchniowego uwzględnia warunki dotyczące dostarczania alkaliów z zewnątrz, jak również zmiany wilgotności.

Prace nad unifikacją metod badań, kryteriów oceny i zapobiegania występowaniu reakcji alkalicznych w betonach podjęto w 2000 roku w ramach projektu badawczego PARTNER *European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates* (Europejskie normowe badania zapobiegania reakcjom alkalicznym w kruszywach „PARTNER” kontrakt nr. G6RD-CT-2001-00624) i równolegle w Komitecie technicznym ARP (*Alkali Reactivity and Prevention, Assessment, Specification and Diagnosis*) Międzynarodowego Komitetu RILEM TC 191 (reakcje alkaliczne, zapobieganie, ocena, wymagania i diagnozowanie), a następnie w nowej strukturze tego komitetu RILEM TC 219 ACS *Alkali-Aggregate Reactions in Concrete Structures* (Reakcje alkalia-kruszywa w strukturach betonu). Prace te trwają do chwili obecnej [3].

Krajowe metody badań i oceny reaktywności alkalicznej [3]

Według PN-EN 12620 „Kruszywa do betonu” zał. G (informacyjny): „...Badania i oceny reaktywności alkalicznej kruszyw należy przeprowadzać zgodnie ze specyfikacjami krajowymi...”.

Podstawowe normy dot. oznaczania reaktywności alkalicznej to:

- PN-86/B-06712 „Kruszywa mineralne do betonu” – poprawka A1 – Kryteria
- PN-92/B-06714/46 „Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką”
- PN-88/B-06714/47 „Kruszywa mineralne. Oznaczenie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym”
- PN-79/B-06714/34 „Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie reaktywności alkalicznej” (metoda beleczkowa)
- PN-87/B-06714/11 „Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie składu petrograficznego”

Pomimo że UE narzuca państwom członkowskim konieczność badania reaktywności w 2012 roku, decyzją PKN wycofano następujące normy:

PN-91/B-06714.34 dot. oznaczania reaktywności (metoda beleczkowa) oraz PN-92/B-0614.46 (metoda szybka).

Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego (IMBiGS) zgłosił do MG konieczność nowelizacji przynajmniej jednej z powyższych norm, lecz propozycja ta ze względów finansowych została odrzucona.

W zaistniałej sytuacji IMBiGS podjął się nowelizacji normy PN-92/B-0614.46 (metoda szybka) z własnych środków, utrzymując w ten sposób obowiązek stosowania tej normy do chwili jej nowelizacji.

Podsumowanie

Szkodliwe dla nawierzchni betonowych reakcje alkaliów z kwasem krzemowym (ASR) obejmują złożone reakcje chemiczne zachodzące w stwardniałym betonie m.in. w czasie eksploatacji nawierzchni drogowej.

W przypadku kruszyw określanych jako wolno i późno reagujące, ilość oraz stan krzemu odgrywają decydującą rolę. Tworzący się żel alkaliczno-krzemianowy jest żelem pęczniejącym, ale jedynie w określonym zakresie zawartości tlenu wapnia (CaO). Z tego powodu korzystnymi są jedynie tylko te dodatki wprowadzane do cementu, które w trakcie przebiegających procesów hydratacji obejmującej związki C_3S oraz C_2S wiążą powstający wodorotlenek wapnia $Ca(OH)_2$ oraz są w stanie zapobiegać szkodliwym reakcjom (ASR) alkaliów z kwasem krzemowym. Konsekwentne stosowanie odpowiednich metod badawczych, w szczególności badania długotrwałego zachowania się w czasie betonu, stwarza możliwość zapobiegania wystąpienia, w czasie eksploatacji obiektów, szkodliwych dla betonu reakcji chemicznych.

W niniejszym artykule opisano mechanizmy reakcji alkaliów z kwasem krzemowym, jak również zalety i wady metod badawczych. W przypadku potrzeby zapoznania się PT Czytelników z założeniami metod badawczych oraz szczegółami

badań wraz analizą wyników zachęcam do zapoznania z materiałami źródłowymi.

Bibliografia

- [1] M.A. Glinicki, *Reakcje alkalia – kruszywa w betonie i zapobieganie*, (Materiały szkoleniowe dla Zespołów Betonów i Kruszyw WT-LD GDDKiA), Marzec 2015
- [2] S. Góralczyk, *Reaktywność alkaliczna kruszyw. Nowa europejska metodyka badań i oceny* (Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej), 2011
- [3] S. Góralczyk, *Reaktywność alkaliczna zasobów kruszyw w Polsce* (Materiały szkoleniowe dla Zespołów Betonów i Kruszyw WT-LD GDDKiA), Marzec 2015
- [4] M. Konopska-Piechurska, W. Jackiewicz-Rek, *Reaktywność alkaliczna kruszyw jako czynnik zagrażający trwałości konstrukcji betonowych w Polsce* (Referat na konferencji naukowo-technicznej Awarie Budowlane), 2013
- [5] J. Stark, E. Freyburg, K. Seyfarth, C. Gibson, D. Erfurt, *70 years of ASR with no end in sight?*, ZKG INTERNATIONAL nr 4/2010 (Zement Kalk Gips)
- [6] A. Titze, *Szkody wywołane przez alkalia w betonie. Ryzyko, którego można uniknąć*, INFRASTRUKTURA TRANSPORTU 2/2011
- [7] Normy przytoczone w tekście (wybrane): ASTM C 289 - Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalia-krzemionka dla kruszyw (metoda chemiczna); ASTM C 1260 (AASHTO T 303) - Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw (metoda badania beleczek z zaprawy); ASTM C 1293 - Normowa metoda badania kruszyw do betonu poprzez określenie zmian długości (ekspansji) betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



JUBILEUSZ 70-LECIA
WYDZIAŁU INŻYNIERII LĄDOWEJ

JUBILEUSZ 70-lecia Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

Rok 2015 dla Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej to rok obchodów 70-lecia jego działalności. Początki Wydziału sięgają roku 1945, kiedy powołano Wydział Inżynierii, jako jeden z trzech Wydziałów Politechnicznych przy Akademii Górniczej w Krakowie. Od tego czasu zaszło wiele zmian. Wydział zmieniał nazwę i strukturę organizacyjną, dynamicznie rozwijał się, wykształcił kadrę naukową i kilkanaście tysięcy absolwentów.

W ramach trwających już kilka miesięcy obchodów odbywa się wiele interesujących wydarzeń, które mają na celu promocję Wydziału oraz przedstawienie planów na przyszłość w zakresie edukacji, badań naukowych i szeroko rozumianego rozwoju. Główne uroczystości zaplanowane są w dniu 17 czerwca br. Odbędzie się wówczas uroczyste posiedzenie Rady Wydziału Inżynierii Lądowej z udziałem przedstawicieli władz samorządowych, świata nauki i oto-

czenia gospodarczego. Podczas uroczystej Rady Wydziału zaprezentowane zostaną możliwości, jakimi dysponuje Wydział w zakresie potencjału naukowo-badawczego i stale unowocześnianej infrastruktury laboratoryjnej, w celu zainteresowania i zachęcenia przedsiębiorców do realizacji projektów naukowo-badawczych w partnerstwie z Jubilattem, z wykorzystaniem m.in. środków unijnych jakie stwarza nowa perspektywa finansowa na lata 2014-2020, nastawionych na transfer nowych technologii i upowszechnianie wdrażania innowacji w biznesie.

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej to jeden z największych wydziałów tej Uczelni, cieszący się od 70 lat niesłabnącą popularnością kandydatów na studia. O jego pozycji świadczy wysoko kwalifikowana kadra, prawa do nadawania stopni i występowania o tytuł naukowy, liczne akredytacje.