



Piotr WYSZOMIRSKI*, Tadeusz SZYDŁAK**, Paweł PICHNIARCZYK***

Charakterystyka surowcowa wybranych kruszyw mineralnych NE Polski w aspekcie trwałości betonów

Streszczenie: Do produkcji betonów stosowane są kruszywa mineralne naturalne, zarówno żwirowo-piaskowe jak i łamane. Udział kruszyw mineralnych w betonach, stanowiących jeden z najważniejszych kierunków ich wykorzystania, niejednokrotnie przekracza 70% obj. W związku z tym charakterystyka składu petrograficznego kruszyw nabrała, zwłaszcza w ostatnich latach, szczególnego znaczenia. Odnosi się to przede wszystkim do kruszyw naturalnych, które stanowią mieszaninę materiału okruchowego o zróżnicowanym najczęściej charakterze petrograficznym. Z punktu widzenia trwałości betonów obecność w takich kruszywach faz węglanowych (kalcyt, dolomit) i minerałów grupy SiO_2 (zwłaszcza chalcedonu i opalu) jest niekorzystna, gdyż sprzyja reaktywności alkalicznej. W pierwszym przypadku wpływa na to m.in. zróżnicowanie strukturalne (zwłaszcza wielkość ziaren kalcytu, wzgl. dolomitu), w drugim zaś zaburzenie struktury faz krzemionkowych i niski stopień jej uporządkowania.

Przedmiotem przeprowadzonych badań były naturalne kruszywa żwirowo-piaskowe z wybranych złóż NE Polski zlokalizowanych w województwach podlaskim (Drahe III) i mazowieckim (Rostki-Borowce, Wręcza-Olszówka II, Zbieroża V i Rudno). Ilościowa analiza petrograficzna przeprowadzona na przykładzie reprezentatywnej frakcji 8–16 mm wykazała, że najczęściej występują w niej okruchy skał węglanowych (głównie wapieni) oraz skał krystalicznych (zarówno magmowych jak i metamorficznych). Udziały tych skał wynoszą odpowiednio $47,0 \pm 6,3\%$ mas. oraz $37,4 \pm 6,8\%$ mas. Skład ten uzupełniają okruchy piaskowców ($13,4 \pm 4,1\%$ mas.) i – występujące w podrzędnej ilości (średnio 2% mas.) – najbardziej szkodliwe z punktu widzenia trwałości betonu fragmenty skał krzemionkowych (głównie krzemieni).

Słowa kluczowe: kruszywa naturalne, kruszywa do betonów, kruszywa NE Polski

* Prof. dr hab. inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Tarnów; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;
e-mail: pwysz@agh.edu.pl

** Dr, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;
e-mail: szydlak@agh.edu.pl

*** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Szkla i Materiałów Budowlanych, Kraków.

Raw material characteristics of some mineral aggregates of NE Poland in the aspect of concrete durability

Abstract: Natural mineral aggregates, both sand&gravel as well as crushed, are used in the concrete production.

The content of mineral aggregates in concrete, being one of the most important way of use them, repeatedly is higher than 70 vol.%. In that respect, the characteristics of aggregates petrographic composition has become – especially recently – very significant. It especially concerns natural aggregates which are a mixture of clastic material of generally diverse petrographic character. From the concrete durability viewpoint the presence of carbonate phases (calcite, dolomite) and SiO₂ group minerals (generally chalcedony and opal) in such aggregates is unfavourable due to alkali reactivity. In the first case it is caused, among others, by the structural differentiation (mainly size of calcite and dolomite grains), in the second – by disorder of the structure of silica phases and low degree of its arrangement.

Natural gravel and sand aggregates from some deposits of NE Poland, localized in Podlasie (Drahe III) and Mazowsze (Rostki-Borowce, Wręcza-Olszówka III, Zbizoza and Rudno) Voivodeship, were the objects of the study. The quantitative petrographic analysis – performed on the representative 8-16 mm fraction – indicated that the presence of pieces of carbonate rocks (mainly limestones) and crystalline rocks (both igneous as well as metamorphic) is the most frequent. It equals to 47,0 ± 6,3 wt.% and 37,4 ± 6,8 wt.%, respectively. The composition is supplemented by sandstones fragments (13,4 ± 4,1 wt.%) and – in secondary quantity (in average 2 wt.%) – by siliceous rocks (mainly cherts). The latter are the most detrimental from the viewpoint of concrete durability.

Keywords: natural aggregates, concrete aggregates, aggregates of NE Poland

Wprowadzenie

Kruszywa mineralne są reprezentowane głównie przez kruszywa naturalne (żwirowo-piaskowe) oraz kruszywa naturalne łamane, pozyskiwane drogą urabiania i mechanicznej przeróbki kamieni budowlanych i drogowych. Jednym z ważnych kierunków ich wykorzystania jest produkcja betonu i rozmaitych wyrobów, które zaczęto wytwarzać na masową skalę w drugiej połowie XIX wieku. Beton, stanowiący kompozyt złożony z cementu portlandzkiego i kruszywa mineralnego został opatentowany w 1867 r. przez paryskiego ogrodnika Josepha Monier, który wykonał z niego donice o bardzo dużej trwałości. Aktualnie znaczenie tego tworzywa w różnych dziedzinach przemysłu i gospodarki jest ogromne. Świadczy o tym m.in. roczna wielkość produkcji betonu, przekraczająca obecnie w skali światowej objętość 7,5 km³, co odpowiada masie około 20 miliardów ton (Boekmans 2012). Udział kruszywa mineralnego w betonach jest zaś przeważający i niejednokrotnie większy od 70% obj. Wynika to m.in. stąd, że jego koszt jest zdecydowanie mniejszy w porównaniu z cementem. Stosowanie dużej ilości kruszywa w betonie jest zatem uzasadnione m.in. przesłankami ekonomicznymi. Początkowo składnik ten uważany był za materiał obojętny, nie wykazujący tendencji do wchodzenia w reakcję z zaczynem cementowym. Dopiero później, niejednokrotnie po upływie niejednokrotnie nawet wielu lat, zaczęto obserwować przejawy korozji konstrukcji wykonanych z betonu. Są one zróżnicowane m.in. w zależności od petrograficznego charakteru kruszywa. W związku z tym analiza jego składu nabrała, zwłaszcza w ostatnich latach, dużego znaczenia. Odnosi się to głównie do naturalnych kruszyw mineralnych żwirowo-piaskowych, stanowiących mieszaninę materiału okruszowego o zróżnicowanym najczęściej charakterze petrograficznym. Zagadnienie to znalazło też odzwierciedlenie w normach PN EN-932-3:1996 i PN EN-12372:2001 przewidujących wyko-

nywanie petrograficznych badań kruszyw i kamieni budowlanych, które nie były wymagane w świetle obowiązujących wcześniej krajowych norm PN.

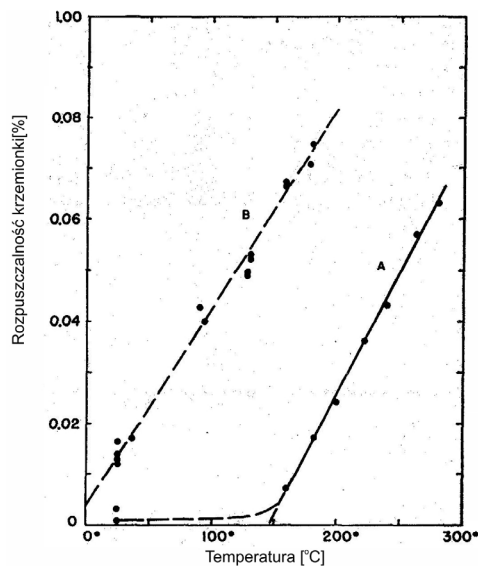
1. Wybrane cechy kruszywa mineralnego determinujące trwałość betonów

Trwałość betonów jest w dużym stopniu uzależniona od podatności kruszywa mineralnego do reagowania z alkaliami pochodzącymi z zaczynu cementowego. Jest to szczególnie istotne w przypadku kruszyw naturalnych, składających się najczęściej z okruchów różnych skał. Podwyższona reaktywność niektórych z nich może doprowadzić nawet do zniszczenia konstrukcji betonowych. Ocenia się, że udział szkodliwych składników w kruszywie w nieznaczej ilości (rzędu 0,5%) może już spowodować uszkodzenie betonu (Neville 2000). Na to niekorzystne zjawisko wpływa zarówno skład mineralny poszczególnych okruchów skalnych występujących w kruszywie jak też ich cechy strukturalno-teksturalne. Pierwszy z tych czynników ma duże znaczenie w kruszywach naturalnych żwirowo-piaskowych ze względu na ich najczęściej polimineralny charakter, gdyż występują w nich fragmenty różnych skał. Niektóre z nich (np. piaskowce, chalcedonity, krzemienie, a także wapienie i dolomity) są aktywne chemicznie w środowisku hydratyzującego cementu, a więc w obecności wody. W wyniku tego zachodzą reakcje prowadzące do powstania nowych faz mineralnych o odmiennych cechach fizykomechanicznych, m.in. o innej objętości właściwej. To zaś powoduje powstawanie naprężeń wewnętrznych w betonie, a nawet prowadzi do jego pęknięć. Te niekorzystne procesy najczęściej przebiegają bardzo powoli, a ich negatywne skutki mogą ujawniać się dopiero po wielu latach.

Reaktywność alkaliczna kruszywa mineralnego może zostać zintensyfikowana niekorzystną strukturą i teksturą okruchów mineralnych. Pierwsza z nich obejmuje zwłaszcza bardzo drobne ziarna mineralne, które wykazują większą tendencję do przereagowania w porównaniu z większymi ziarnami mineralnymi tej samej fazy. Z kolei niekorzystnym czynnikiem teksturalnym jest podwyższona porowatość (zwłaszcza otwarta) kruszywa mineralnego i jego nasiąkliwość.

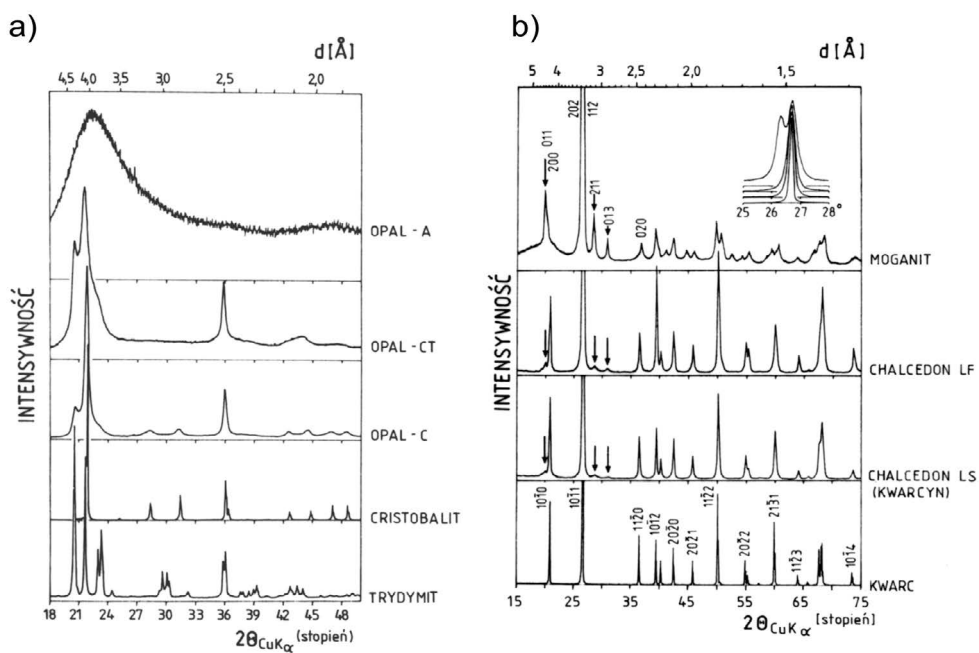
1.1. Reakcje między minerałami grupy SiO_2 i alkaliami

Podstawowym – a niekiedy niemal wyłącznym – składnikiem mineralnym kruszyw krzemionkowych są minerały grupy SiO_2 . Najbardziej rozpowszechnionym minerałem tej grupy jest niskotemperaturowa odmiana kwarcu (β -kwarc). Minerale ten często wykazuje zaburzenia struktury wewnętrznej, które widoczne są nawet w rutynowych obserwacjach mikroskopowych w postaci tzw. falistego ściemniania światła oraz mozaikowej budowy ziaren. Obok β -kwarcu w kruszywach krzemionkowych mogą występować fazy o niższym stopniu uporządkowania struktury, tj. skrytokrystaliczna odmiana kwarcu – chalcedon oraz bezpostaciowa modyfikacja SiO_2 – opal. Ta ostatnia substancja mineralna ma charakter żelu i zawiera w swej strukturze zmienne ilości H_2O . Spośród wymienionych odmian minerałów grupy SiO_2 najbardziej reaktywna z alkaliami z zaczynu cementowego, a nawet z wodą (rys. 1), jest krzemionka amorficzna, tj. opal (zwłaszcza jego odmiana opal-A) i – w mniejszym stopniu – chalcedon. Reakcja zaczyna się od agresywnego działania wodo-



Rys. 1. Rozpuszczalność kwarcu (A) i krzemionki amorficznej (B) w wodzie (Iler 1955)

Fig. 1. Solubility of quartz (A) and amorphous silica (B) in water (Iler 1955)



Rys. 2. Dyfraktogramy rentgenowskie minerałów grupy SiO₂ (Flörke i in. 1991)

a – odmiany opalu: cristobalit, trydymit; b – minerały rodziny kwarcu

Fig. 2. XRD patterns of SiO₂-group minerals (Flörke et al. 1991)

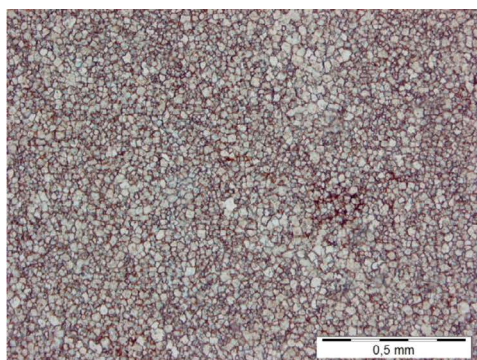
a – different opal varieties, cristobalite, tridymite; b – minerals of quartz type

rotlenków powstałych z alkaliów (Na_2O i K_2O) znajdujących się w cemencie na minerały krzemionkowe zawarte w kruszywie. W rezultacie powstaje żel alkaliczno-krzemianowy w porach kruszywa krzemionkowego oraz w spękaniach jego ziaren i na ich powierzchni. W tym ostatnim przypadku zachodzące zmiany mogą prowadzić do zniszczenia przyczepności między kruszywem i otaczającym go uwodnionym zaczynem cementowym (Neville 2000). W kruszywach naturalnych minerałem o podwyższonej reaktywności jest też kwarc o zaburzonej strukturze, a więc wykazujący obecność naprężeń wewnętrznych (Kurdowski i in. 2006).

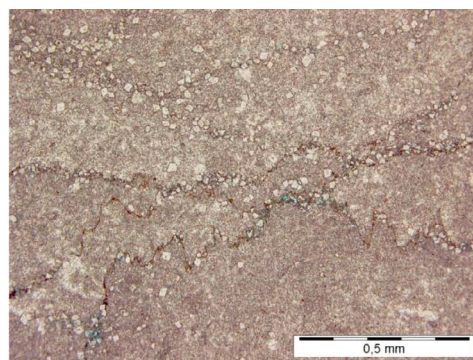
Na szybkość zachodzących reakcji wywiera wpływ nie tylko stopień uporządkowania struktury minerałów grupy SiO_2 , ale też wielkość ich cząstek. Tak więc obecność w kruszywie krzemionkowym bardzo małych ziaren wielkości 20–30 μm prowadzi do jego pęcznienia po upływie krótkiego już czasu (1–2 miesiące) zaś występowanie większych ziaren powoduje, że to niekorzystne zjawisko pojawia się dopiero po wielu latach (Neville 2000). Do standardowych badań kruszyw krzemionkowych i identyfikacji występujących w nich faz mineralnych najczęściej wykorzystywana jest metoda mikroskopii optycznej w świetle przechodzącym. Z bardziej zaawansowanych metod należy wymienić metodę mikroskopii elektronowej SEM/EDS oraz metodę rentgenograficzną. Ta ostatnia umożliwia bowiem, ze względu na zróżnicowany charakter dyfraktogramów (rys. 2), prześledzenie przejścia od amorficznej substancji krzemionkowej do fazy w pełni krystalicznej, tj. do β -kwarcu.

1.2. Reakcje między minerałami węglanowymi i alkaliami

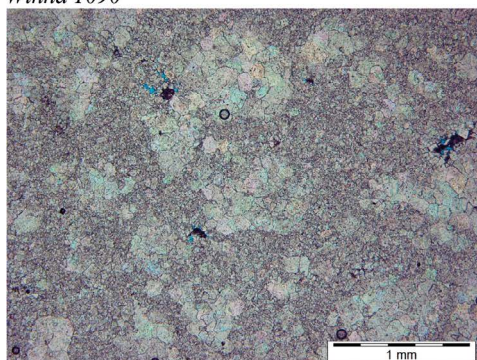
Na reaktywność alkaliczną podatne są w różnym stopniu takie kruszywa węglanowe jak dolomity, dolomity wapniste, wapienie dolomityczne i margliste, opoki i gezy oraz wapienie. W betonie, w wyniku reakcji alkaliów zawartych w cemencie z dolomitami zachodzi dedolomityzacja związana z powstaniem CaCO_3 i $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Objętość produktów tej reakcji jest jednak mniejsza aniżeli objętość substratów. Tak więc wytłumaczenia szkodliwości tej reakcji należy szukać w innych zjawiskach niż te, które występują w reakcji alkalia-krzemionka (Neville 2000). Podobny pogląd wyraził już znacznie wcześniej Kazimir (1977). Jedną z przyczyn tego zjawiska może być negatywna rola minerałów ilastych, które występują w kruszywach marglistych. Pęcznienie betonu może być w takim przypadku spowodowane sorpcją wody przez niektóre z tych minerałów, reprezentowanych zwłaszcza przez smektyty lub minerały mieszanopakietowe illit/smektyt. Zjawisko zróżnicowanej podatności betonów zawierających kruszywa węglanowe na pęcznienie jest przypuszczalnie spowodowane skomplikowanym składem mineralnym tych kruszyw, w których – obok podstawowych faz mineralnych, takich jak dolomit i kalcyt, występują w podrzędnej ilości różne minerały ilaste (m.in. kaolinit, illit, smektyty, chloryty oraz cała gama minerałów mieszanopakietowych), a także minerały grupy SiO_2 o zróżnicowanej strukturze i zmiennym stopniu jej uporządkowania. Tym należy m.in. tłumaczyć zróżnicowane zachowanie się kruszyw węglanowych (dolomitów, margli, gez i opok) z punktu widzenia reaktywności alkalicznej i pęcznienia betonów (Babińska 2012). Obok roli składu mineralnego należy też wziąć pod uwagę wpływ zróżnicowanej struktury i tekstury kruszyw węglanowych. Przykładowo, reprezentatywne dolomity krajowe wykazują bardzo dużą zmienność wielkości ziaren (tab. 1, fot. 1). W niektórych przypadkach kryształy dolomitu i kalcytu są bardzo małe, co zdaniem



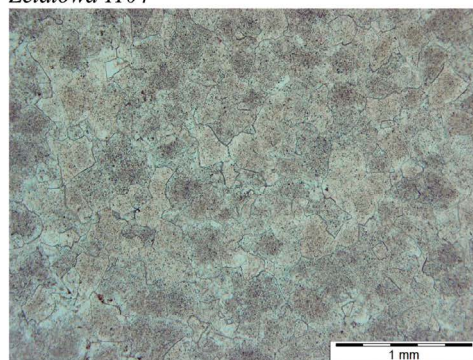
Winna 1090



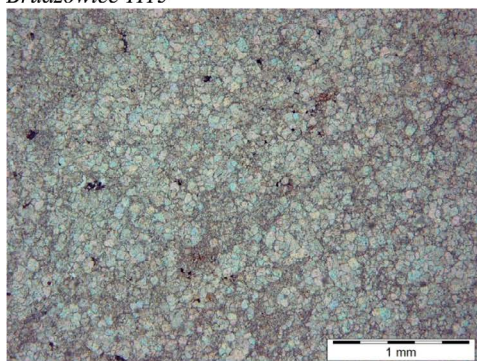
Żelazowa 1104



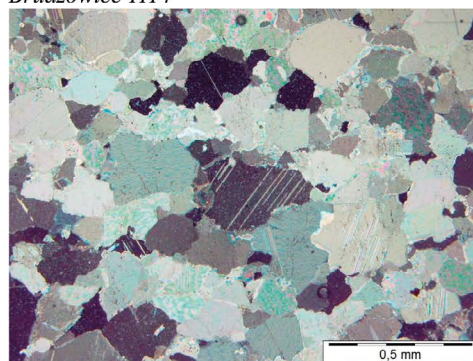
Brudzowice 1115



Brudzowice 1114



Ząbkowice Będzińskie 1120



Odrzychowice 1124

Fot. 1. Mikrofotografie reprezentatywnych, krajowych dolomitów, ujawniające zróżnicowaną wielkość ziaren. Polaryzatory skrzyżowane

Phot. 1. Photomicrographs of representative Polish dolostones showing diversified grains size. Crossed polars

TABELA 1. Niektóre cechy strukturalno-teksturalne reprezentatywnych dolomitów krajowych (Niesyt i in. 2012)

TABLE 1. Selected structural and textural features of the representative Polish dolostones (Niesyt et al. 2012)

Złoże/próbka	Wielkość kryształów	Tekstura
Brudzowice (trias)/1115	ziarna (0,5 do >1 mm) zbudowane z kryształów wielkości 0,1 mm spojone drobnym dolomitom (0,01–0,03 mm)	zbita, bezładna
Brudzowice (dewon)/1114	kryształy 0,1–0,6 mm (zwykle ok. 0,3 mm)	zbita, bezładna
Ząbkowice Będzińskie (trias)/1120	ziarna wielkości około 0,5 mm zbudowane z kryształów <0,1 mm; pomiędzy nimi występują drobne kryształy dolomitu	lekko porowata, bezładna
Żelatowa (trias)/1104	kryształy 0,03–0,07 mm	silnie porowata
Óldrzychowice (dolny paleozoik)/1124	kryształy 0,06–0,4 mm (zwykle ok. 0,2 mm)	zbita, słabo równoległa
Winna (dewon)/1090	kryształy 0,01–0,03 mm	lekko porowata, bezładna

Piasty i Piasty (1994) oraz Neville'a (2000), często ma miejsce w kruszywach pęczniejących.

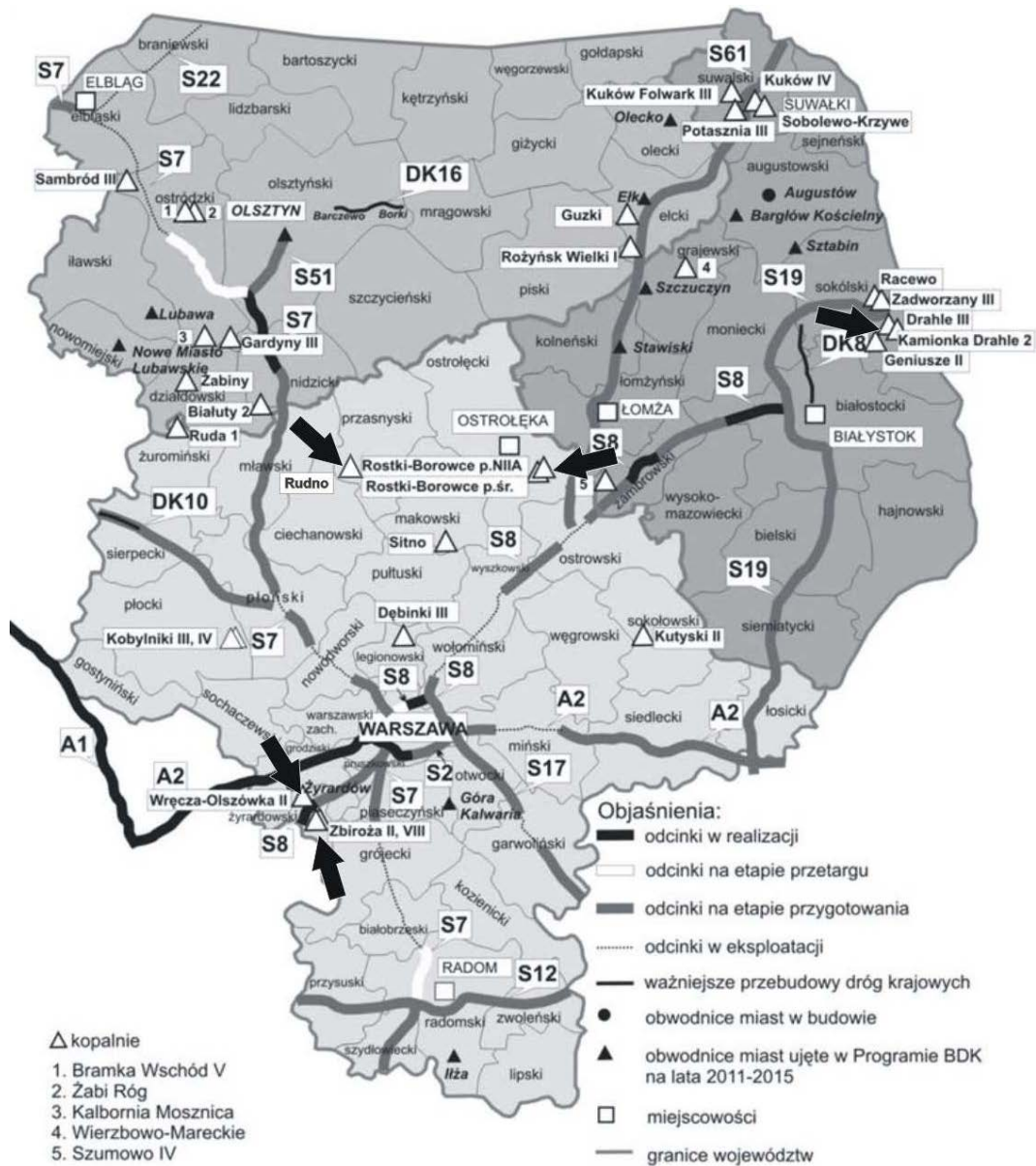
2. Materiał do badań

Przedmiotem badań było dwanaście próbek kruszyw żwirowo-piaskowych pochodzących z pięciu kopalń zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce (rys. 3):

- Drahle III (woj. podlaskie, powiat sokólski),
- Rostki-Borowce, pole N IIA (woj. mazowieckie, powiat ostrołęcki),
- Wręcza-Olszówka II (woj. mazowieckie, powiat żyrardowski),
- Zbiroża V (woj. mazowieckie, powiat żyrardowski),
- Rudno (woj. mazowieckie, powiat przasnyski).

Trzy pierwsze należą do kopalń o bardzo dużym wydobyciu, przekraczającym 1 mln t/r. (Smakowski i in. 2011; Guzik i Szlugaj 2013). Pozostałe reprezentują kopalnie o małym, względnie bardzo małym wydobyciu, odpowiednio 170 tys. t (Zbiroża V) i 42 tys. t (Rudno) (Bilans zasobów... 2015).

Z każdego z wymienionych złóż pobrano od jednej do trzech próbek kruszyw, reprezentujących frakcje: 16–8, 8–2 i <2 mm. Analizy ich składu petrograficznego wykonano na podstawie obserwacji makroskopowych (frakcja 16–8 mm) i mikroskopowych w świetle przechodzącym (frakcja 8–2 mm) oraz badań rentgenograficznych (frakcja <2 mm).



Rys. 3. Lokalizacja kopalń kruszywo-piaskowych w północno-wschodniej Polsce według stanu na 10.09.2012 r. (wg Guzik i Szlugaj 2012). Strzałki wskazują złoża będące przedmiotem badań

Fig. 3. Localization of sand and gravel mines in north-eastern Poland in relation to the state of 10.09.2012 (according to Guzik and Szlugaj 2012). Arrows indicate the studied deposits

3. Metody badań

Próbki poddano następującym badaniom składu fazowego:

- analiza mikroskopowa w świetle przechodzącym, na standardowych preparatach (grubość 0,02 mm), przy użyciu uniwersalnego mikroskopu polaryzacyjnego OLYMPUS BX 51 z kamerą BP12 do wykonywania mikrofotografii techniką cyfrową,
- analiza rentgenograficzna metodą DSH przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego RIGAKU SmartLab, stosując następujące parametry pomiaru: promieniowanie $\text{Cu}_{K\alpha}$, refleksyjny monochromator grafitowy, napięcie lampy 35 kV, prąd lampy 30 mA, rejestracja krokowa: krok = $0,05^\circ 2\Theta$, czas zliczania na jeden krok = 1 sek. Analizę rentgenograficzną próbek przeprowadzono w stanie powietrzno suchym.

4. Wyniki badań i dyskusja

Analiza ilościowego składu petrograficznego grubszych frakcji badanych kruszyw 16–8 i 8–2 mm (tab. 2) pozwala stwierdzić, że we wszystkich próbkach zdecydowanie przeważają ziarna skał węglanowych (głównie wapieni), stanowiące średnio 47,0% mas. i okruchy skał krystalicznych (przede wszystkim granitoidów i gnejsów) – średnio 37,4% mas. Obok nich w niewielkich ilościach występują okruchy piaskowców (średnio 13,4% mas.) i podrzędnie skał krzemionkowych, których udział wyjątkowo przekracza 5% mas. Tylko w niektórych złożach (Rostki-Borowce, Rudno – frakcja 16–8 mm oraz Zbiroża – frakcja 8–2 mm) zaznacza się niewielka przewaga okruchów skał krystalicznych nad skałami węglanowymi (tab. 2).

TABELA 2. Skład petrograficzny badanych próbek kruszyw [% mas.]

TABLE 2. Petrographical composition of studied aggregates samples [wt.%]

Skały	Drahle III		Rostki-Borowce pole N IIA	Rudno	Wręcza- Olszówka II		Zbiroża V		Średnio
	Fracja ziarnowa [mm]								
	16–8	8–2	16–8	16–8	16–8	8–2	16–8	8–2	16–8
Węglanowe (gł. wapienie)	55,8	52,7	41,5	40,9	46,1	61,1	50,9	39,7	47,0±6,3
Piaskowce	7,7	11,3	11,3	13,7	17,8	8,1	16,7	7,5	13,4±4,1
Krzemionkowe	5,8	1,6	1,0	2,9	0	1,2	1,1	0	2,2±2,2
Krystaliczne	30,7	34,4	46,2	42,5	36,1	29,6	31,3	52,8	37,4±6,8

Jakościowy skład petrograficzny wszystkich badanych kruszyw jest bardzo zbliżony. Wśród okruchów skał węglanowych zdecydowanie przeważają wapienie reprezentowane głównie przez jasnoszare, masywne wapienie organodetrytyczne z licznymi szczątkami or-

ganicznymi, rozproszonymi w mikrytowym tle (fot. 2a). Inne odmiany wapieni – mikrytowe i drobnosparytowe, spotykane są bardzo rzadko, podobnie jak dolomity, których udział nie przekracza 2% mas. Te ostatnie reprezentowane są wyłącznie przez odmiany drobnosparytowe (fot. 2b).

Wśród okruchów skał krystalicznych zdecydowanie przeważają ziarna granitów. Najczęściej są to skały barwy czerwonej, zbudowane głównie ze skaleni alkalicznych i kwarcu z niewielką ilością muskowitu i biotyту oraz plagioklazów (fot. 2c). Jasnoszare odmiany granitów, zawierające więcej plagioklazów, spotykane są znacznie rzadziej, podobnie jak ziarna gnejsów wyróżniające się mniej lub bardziej wyraźną laminacją (fot. 2d). Częściej od gnejsów spotyka się natomiast inne skały metamorficzne – kwarcyty. Skały te zbudowane są prawie wyłącznie z silnie zdefektowanych ziaren kwarcu, wykazujących faliste wygaszanie światła i często budowę mozaikową (fot. 2e). Znacznie rzadziej spotyka się natomiast okruchy innych skał metamorficznych, głównie amfibolitów (fot. 2f) i sporadycznie – marmurów. Także sporadycznie występują ziarna skał wulkanicznych. Są one reprezentowane przez czerwono zabarwione porfiry oraz czarne bazalty i diabazy.

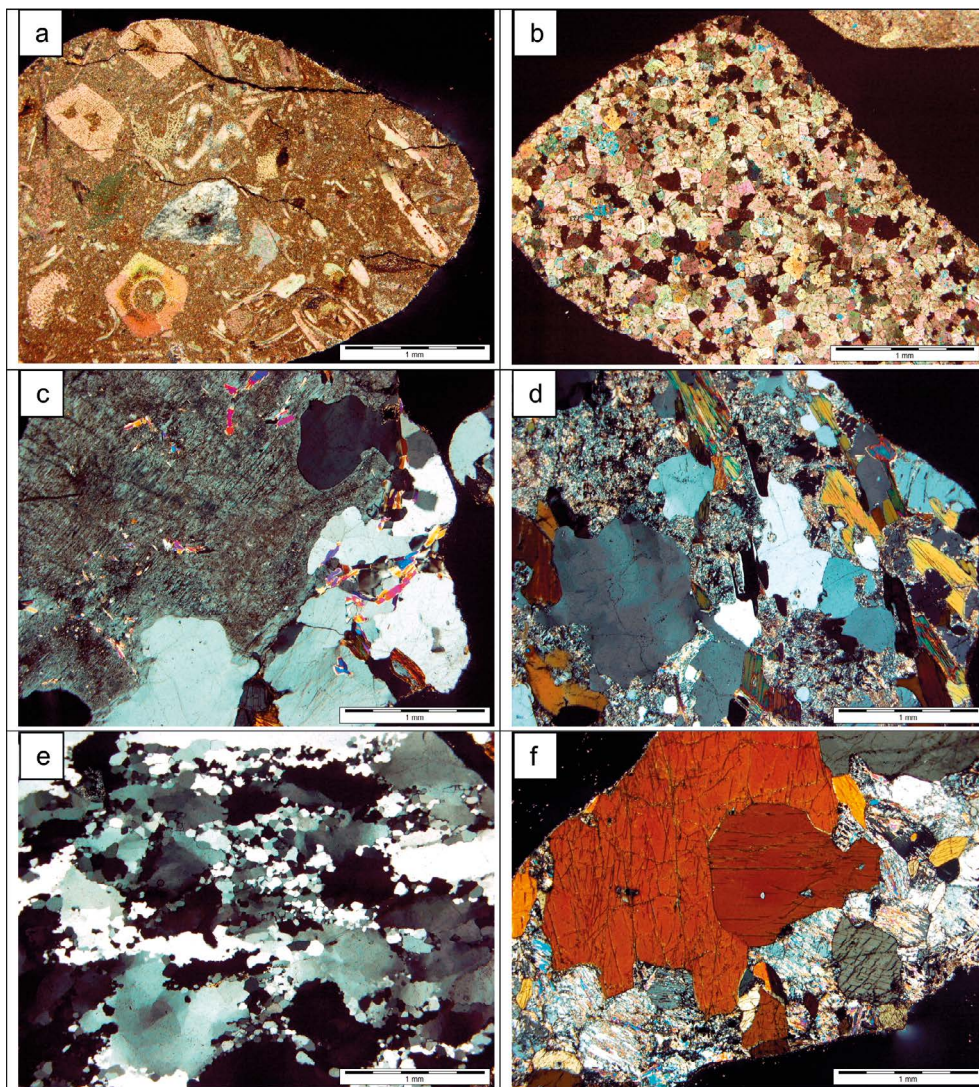
Znacząca rolę we wszystkich badanych próbkach odgrywają piaskowce stanowiące od kilku do kilkunastu procent masy kruszywa (tab. 2). Skały te występują w dwóch odmianach: (1) silnie scementowane, masywne piaskowce o spoiwie kwarcowym regeneracyjnym (fot. 3a) oraz (2) lekko porowate piaskowce kwarcowe o spoiwie węglanowym (fot. 3b).

Kolejnym, niezbyt licznie spotykanym składnikiem badanych kruszyw (maksymalnie około 5% mas.) są skały krzemionkowe reprezentowane przez krzemienie (fot. 3c) oraz węglanowo-krzemionkowe (wapienie z kongregacjami chalcedonowymi – fot. 3d) i krzemionkowo-węglanowo-okruchowe (gezy – fot. 3e). Skały te zbudowane są w znacznym stopniu z niskokrystalicznych bądź amorficznych odmian krzemionki: chalcedonu i opalu. Obecność tych faz powoduje niekorzystny wzrost reaktywności alkalicznej kruszywa w przypadku jego zastosowania do produkcji betonu.

Skład badanych kruszyw uzupełniają nieliczne zazwyczaj ziarna kwarcu i skaleni reprezentowanych przez ortoklaz, pertyt, mikroklin (fot. 3f) i plagioklasy. Składniki te gromadzą się w nieco większych ilościach (do 8% mas.) we frakcji 8–2 mm i są efektem dezintegracji większych ziaren granitów lub gnejsów.

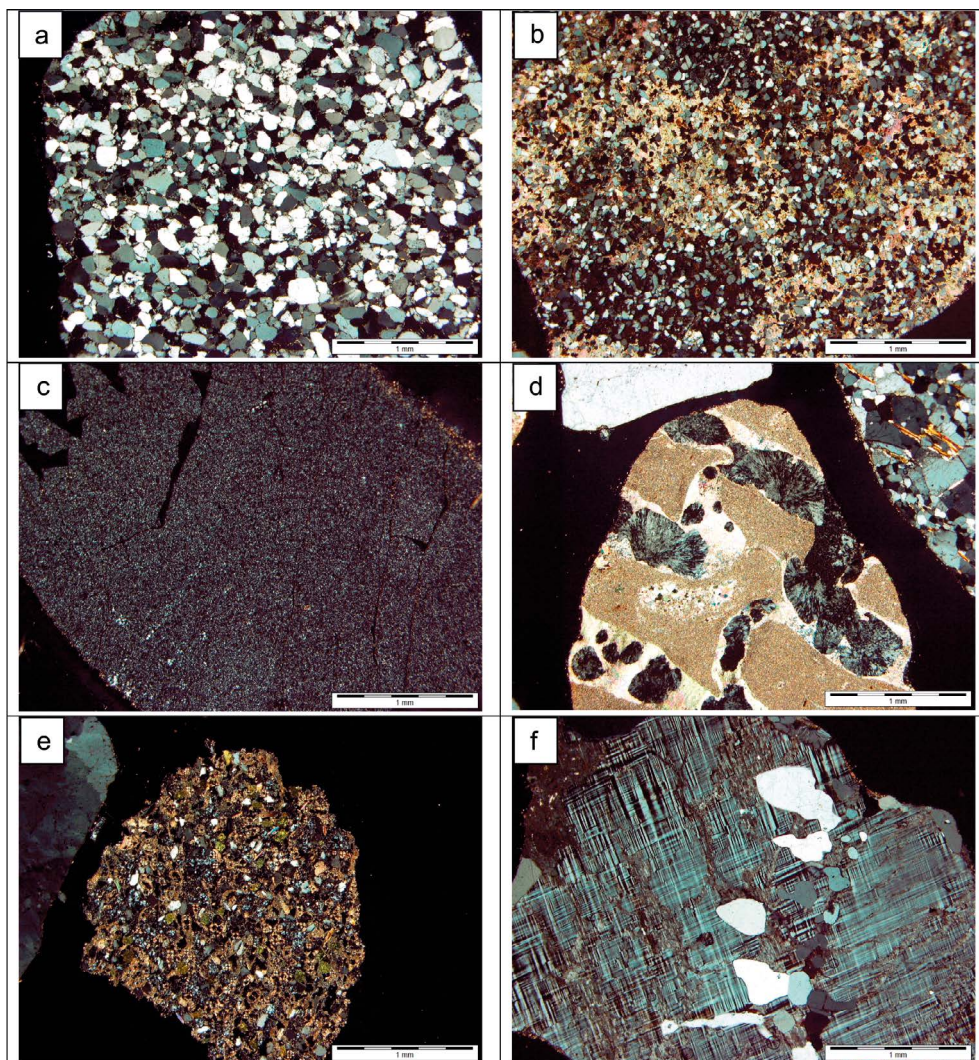
Analiza rentgenograficzna najdrobniejszych frakcji kruszyw (<2 mm) (rys. 4) wskazuje na ich mało zróżnicowany skład mineralny. Dominującym składnikiem jest kwarc, a pozostałe składniki (skalenie alkaliczne, plagioklasy oraz kalcyt i dolomit, sporadycznie – minerały z grupy mik) występują w ilościach nieprzekraczających kilku procent masy kruszywa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że skład petrograficzny opisywanych kruszyw jest złożony. Spowodowane jest to m.in. polodowcową genezą ich złóż. W kruszywach zaznacza się obecność dużej ilości okruchów węglanowych rzędu 50% mas. (tab. 2), które na podstawie badań mikroskopowych, zaklasyfikowano do wapieni. Analiza rentgenograficzna (rys. 4, a zwłaszcza rys. 5b) wskazuje też na obecność podwyższonej ilości dolomitu. Ten składnik mineralny można łatwo zidentyfikować w analizie rentgenograficznej, podczas gdy jest trudno rozpoznawalny w rutynowej analizie mikroskopowej. Struktura okruchów węglanowych jest na ogół sparytowo-mikrytowa bądź drobnosparytowa, a więc o wielkości ziaren mieszczących się najczęściej w zakresie od kilku do kilkuset mikrometrów. Taki typ



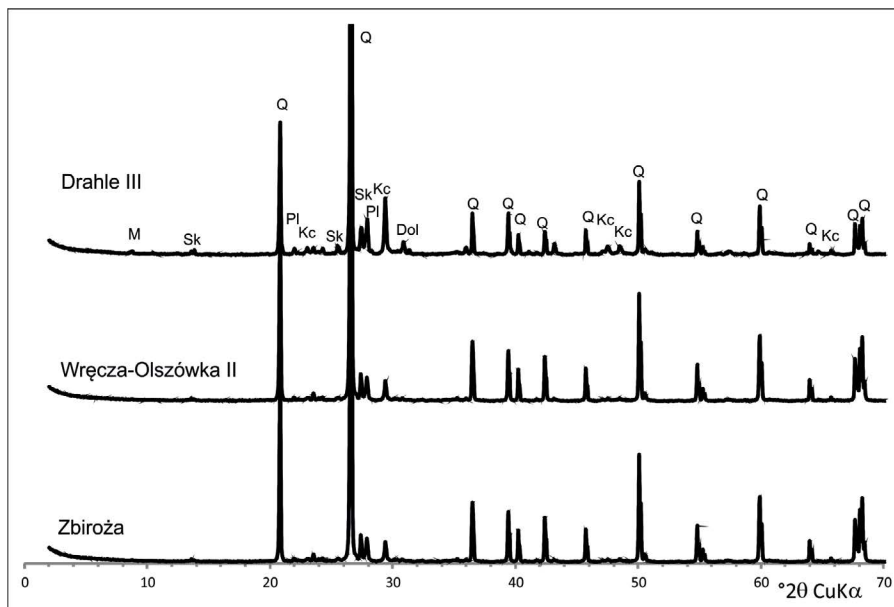
Fot. 2. Mikrofotografie ziaren kruszywa (frakcja 8–2 mm), polaryzatory skrzyżowane
 a – wapień organodetrytyczny z licznymi bioklastami (złoże Zbieroza V); b – dolomit drobnosparytowy
 (złoże Wręcza-Olszówka II); c – granit z drobnymi blaszkami muskowitu i biotyty (złoże Zbieroza V);
 d – gnejsy z wyraźną laminacją podkreślona równoległym ułożeniem blaszek biotyty
 (złoże Wręcza-Olszówka II); e – fragment ziarna kwarcytu zbudowanego z kwarcu o budowie
 mozaikowej (złoże Zbieroza V); f – amfibolit (złoże Drahle III)

Phot. 2. Photomicrographs of aggregates grains (8–2 mm fraction), crossed polars
 a – organodetrital limestone with numerous bioclasts (Zbieroza V deposit); b – dolomite
 (Wręcza-Olszówka II deposit); c – granite with fine muscovite and biotite plates (Zbieroza V deposit);
 d – laminated gneiss (Wręcza-Olszówka II deposit); e – fragment of quartzite grain with mosaic quartz
 (Zbieroza V deposit); f – amphibolite (Drahle III deposit)



Fot. 3. Mikrofotografie ziaren kruszywa, frakcja 8–2 mm, polaryzatory skrzyżowane
 a – drobnoziarnisty piaskowiec o spoiwie kwarcowym (złoże Zbiroża V); b – drobnoziarnisty piaskowiec o spoiwie węglanowym (złoże Wręcza-Olszówka II); c – fragment ziarna krzemienia zbudowany z chalcedonu i mikrokwarcu (złoże Rostki-Borowce); d – wapień z kongrecjami chalcedonowymi (złoże Zbiroża V); e – ziarno gezy wapiennej zawierające obok kwarcu, kalcytu i glaukonitu amorficzną krzemionkę (złoże Zbiroża V); f – ziarno mikroklinu z wrostkami kwarcu (złoże Wręcza-Olszówka II)

Phot. 3. Photomicrographs of aggregate grains (8–2 mm fraction), crossed polars
 a – fine-grained quartz sandstone with silica cement (Zbiroża V deposit); b – fine-grained quartz sandstone with carbonate cement (Wręcza-Olszówka II deposit); c – fragment of chert with chalcedony and microquartz (Rostki-Borowce deposit); d – limestone with chalcedony concretions (Zbiroża V deposit); e – cherty calcareous sandstone containing quartz, calcite, glauconite and amorphous silica (Zbiroża V deposit); f – microcline with quartz inclusions (Wręcza-Olszówka II deposit)



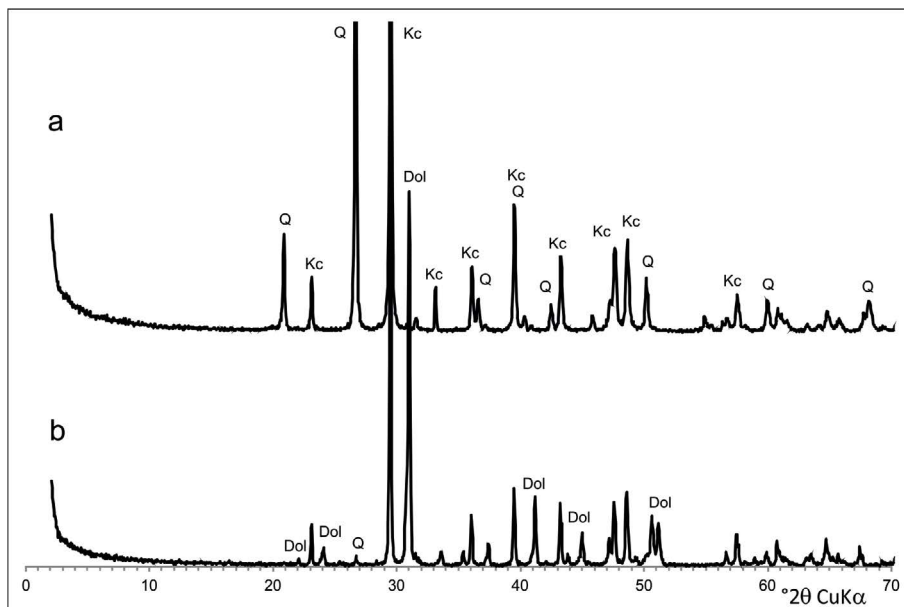
Rys. 4. Dyfraktogramy rentgenowskie frakcji <2 mm kruszyw ze złóż: Drahle III, Wręcza-Olszówka II i Zbiroża V
Stosowane skróty: Dol – dolomit, Kc – kalcyt, M – mika, Pl – plagioklaz, Q – kwarc, Sk – skałen alkaliczny

Fig. 4. XRD patterns of aggregates (<2 mm fraction) from Drahle III, Wręcza-Olszówka II and Zbiroża V deposits
Abbreviations: Dol – dolomite, Kc – calcite, M – mica, Pl – plagioclase, Q – quartz, Sk – feldspar

drobnoziarnistej struktury może sprzyjać podwyższonej reaktywności alkalicznej tych kruszyw w kontakcie z zaczynem cementowym. Z drugiej jednak strony omawiane okruschy węglanowe wykazują zbitą teksturę, co jest korzystne z punktu widzenia właściwości betonu.

Cechy strukturalno-teksturalne odgrywają także znaczącą rolę w przypadku piaskowców. Skały te cechują się przeważnie drobnym uziarnieniem (<0,2 mm) i często – zwłaszcza w odmianach o spoiwie węglanowym – porowatą teksturą.

Szczególną rolę w betonie odgrywają okruschy skał wybitnie zasobnych w krzemionkę, a zwłaszcza jej fazy amorficzne (opal) i – w mniejszym stopniu – niskokrystaliczne (chalcedon). Mogą one spowodować pęcznienie betonu, co zostało omówione w rozdziale 1.1. Fazy te występują głównie w skałach krzemionkowych *sensu stricte* ale mogą też występować w skałach węglanowych w formie kongrecji chalcedonowych (fot. 3d, rys. 5a), a nawet je impregnować. Rozwiązanie tego ostatniego zagadnienia wymaga jednak zastosowania zaawansowanych technik pomiarowych w przypadku występowania niskokrystalicznych, względnie amorficznych faz SiO_2 w podrzędnej ilości (np. rentgenograficzna metodyka według Muraty i Normana (1976)). Zagadnienie to wykracza jednak poza zakres tej pracy. Średni udział okruszków skał krzemionkowych w badanych kruszywach jest stosunkowo niewielki, rzędu 2% mas. (tab. 2).



Rys. 5. Dyfraktogramy rentgenowskie ziaren: a – wapienia z konkrecjami chalcedonowymi ze złoża Zbiroża V (frakcja 16–8 mm), b – wapienia dolomitycznego ze złoża Wręcza-Olszówka II (frakcja 16–8 mm). Stosowane skróty: Dol – dolomit, Kc – kalcyt, Q – kwarc

Fig. 5. XRD patterns of separated grains: a – limestone with chalcedony concretions of Zbiroża V deposit (fraction 16–8 mm), b – dolomitic limestone of Wręcza-Olszówka II deposit (fraction 16–8 mm). Abbreviations: Dol – dolomite, Kc – calcite, Q – quartz

Skały krystaliczne są reprezentowane głównie przez fragmenty granitów, gnejsów, amfibolitów i kwarcytów (fot. 2c–f). Średnia ich zawartość w badanych kruszywach dochodzi niemal do 40% mas. (tab. 2). Z uwagi na grubokrystaliczną strukturę stanowią one pożądaną składnik omawianych kruszyw. Wyjątkiem mogą tu być niektóre odmiany kwarcytów z uwagi na silnie zdefektowaną strukturę występującego w nich kwarcu (fot. 2e).

Podsumowanie

- Naturalne kruszywa zwirowo-piaskowe z NE Polski (złoża Drahle III, Rostki-Borowce, Wręcza-Olszówka II, Zbiroża V, Rudno) wykazują zróżnicowany skład petrograficzny z uwagi na polodowcową genezę omawianych utworów.
- W badanych kruszywach przeważają okruchy węglanowe (wapienie i dolomity) o drobnoziarnistej strukturze i zbitej teksturze, których średnia zawartość dochodzi niemal do 50% mas.
- Znaczący udział okruchów skał krystalicznych – wynoszący średnio prawie 40% mas. – jest korzystny, m.in. z uwagi na ich grube uziarnienie.
- Udział wybitnie szkodliwych z punktu widzenia jakości betonu okruchów skał krzemionkowych (głównie krzemieni) jest niewielki (rzędu 2% mas.), jednak wyjątkowo

dochodzi do 5% mas. (Drahle III). Występujące w nich niskokrystaliczne (chalcedon), a zwłaszcza amorficzne fazy SiO₂ (opal) mogą być przyczyną pęcznienia betonu. Zagadnienie to wymaga przeprowadzenia szczegółowych badań, np. zaawansowanymi technikami rentgenograficznymi.

Badania przeprowadzono w zakresie projektu badawczego realizowanego w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID „Rozwój Innowacji Drogowych” w obszarze zagadnienia, pt.: „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w latach 2015–2018.

Literatura

- Babińska, J. 2012. Wpływ reakcji dedolomityzacji na wybrane parametry fizykomechaniczne zapraw – badania porównawcze. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały* 134, nr 41, s. 3–13.
- Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce według stanu na 31.12.2014*. Warszawa: Wyd. PIG-PIB. 2015.
- Boekmans, M.A.T.M. 2012. Deleterious reactions of aggregate with alkalis in concrete. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 74, s. 279–364.
- Flörke i in. 1991 – Flörke, O.W., Graetsch, H., Martin, B., Röller, K. i Wirth, R. 1991. Nomenclature of micro- and non-crystalline silica minerals, based on structure and microstructure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen* 163, s. 19–42.
- Guzik, K. i Szlugaj, J. 2012. Kruszywa naturalne żwirowo-piaskowe w północno-wschodniej Polsce. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 83, s. 19–35.
- Guzik, K. i Szlugaj, J. 2013. Zmiany na rynku kruszyw naturalnych żwirowo-piaskowych w północno-wschodniej Polsce w latach 2005–2012. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 85, s. 105–120.
- Iler, R.K. 1955. *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Cornell University Press. Ithaca, New York.
- Kazimir, J., 1977 – Rozkład kruszywa dolomitowego a trwałość betonów. *Cement-Wapno-Gips* 31/44, nr 5, s. 114–119.
- Kurdowski i in. 2006 – Kurdowski, W., Garbacik, A. i Baran, T. 2006. O reaktywności różnych form krzemionki w zaprawach cementowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 22, z. spec. 3, s. 87–97.
- Murata, K.J. i Norman, M.B. 1976. An index of crystallinity for quartz. *American Journal of Science* 276, s. 1120–1130.
- Neville, A.M. 2000. *Właściwości betonu*. Rozdział 3 pt. *Właściwości kruszyw*. Kraków: Wyd. Polski Cement Sp. z o.o.
- Niesyt i in. 2012 – Niesyt, M., Szydłak, T., Wyszomirski, P. i Wodnicka, K. 2012. Charakterystyka strukturalno-teksturalna wybranych dolomitów krajowych w aspekcie procesu ich dekarbonatyzacji. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 83, s. 121–129.
- Piasta, J. i Piasta, W.G. 1994. *Beton zwykły*. Warszawa: Wyd. Arkady.
- PN EN-932-3: 1996. Badania podstawowych właściwości kruszyw. Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego.
- PN EN-12372: 2001. Metody badań kamienia naturalnego. Badania petrograficzne.
- Smakowski i in. 2011 – Smakowski, T., Galos, K., Guzik, K. i Szlugaj, J. 2011. Rynek kruszyw żwirowo-piaskowych w Polsce północno-wschodniej. *Górnictwo Odkrywkowe* 52, 6, s. 72–78.

