

Ocena wpływu zastosowanego kruszywa na właściwości konstrukcyjnych betonów mostowych

1. Wprowadzenie

Budownictwo drogowo-mostowe było w ostatnich czasach jednym z prężniej rozwijających się sektorów, pchało do przodu całą gospodarkę, a gwałtownie wzrastająca w ostatnich latach ilość inwestycji w zakresie infrastruktury komunikacyjnej spowodowała w pewnym momencie problemy z dostępnością i regularnością dostaw kruszyw łamanych używanych w betonach mostowych i nawierzchniowych. Co prawda obecnie widać wyraźne wyhamowanie w realizacji tych inwestycji, lecz w aspekcie nowej perspektywy finansowej i nowego budżetu UE należy liczyć się, w ciągu następnych lat, z kolejną falą wzrostu ilości inwestycji drogowych.

W tym miejscu nie sposób nie wspomnieć o pracach, jakie są prowadzone pod auspicjami Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, nad uaktualnieniem szczegółowych specyfikacji technicznych dla konstrukcyjnych betonów mostowych i przystosowaniem ich do aktualnego stanu wiedzy techniczno-technologicznej. Być może uwzględniona zostanie w nich też potrzeba szerszego niż dotychczas spojrzenia na konieczność zrównoważonego rozwoju także w kontekście używanych materiałów.

Wiadomo, że jakość kruszywa grubego, które w betonie stanowi około 50-60% objętości całego składu, determinuje właściwości kompozytu betonowego. Wiadomo również, że prawidłowe zaprojektowanie i wykonanie betonu zgodnie z normą PN-EN 206-1 z uwzględnieniem pożądanych cech trwałościowych pozwala na wykorzystanie potencjału zasobów szerokiego spektrum kruszyw. Celem podjętego projektu badawczego było sprawdzenie właściwości trwałościowych betonów mostowych wykonanych na różnych rodzajach kruszywa, których parametry fizykochemiczne nie zawsze są zgodne z zapisami obecnie funkcjonujących specyfikacji technicznych, a główną ideą przyświecającą programowi było porównanie cech stwardniałego betonu wykonanego na alternatywnych, wyselekcjonowanych kruszywach z betonami wzorcowymi, wykonanymi na grysach bazaltowych i granitowych. Nasz kraj posiada duże udokumentowane i eksploatowane złoża dobrej jakości kruszywa, jednakże archaiczne zapisy specyfikacji mostowych w praktyce uniemożliwiają, lub wręcz wykluczają, zastosowanie kruszyw niebędących bazaltami lub granitami. Owszem, pojawiają się zapisy, że można stosować kruszywo grube pochodzące z innych niż powyżej wymienione skały, ale są to zapisy martwe, ponieważ każda nowość i propozycja nowego podejścia mate-

riałowego do konstrukcyjnego betonu mostowego jest z reguły odrzucana ze względu na silne przyzwyczajenia inwestorów lub projektantów do „jedynie słusznych” rozwiązań pochodzących z przeszłości.

W wyniku przeprowadzonego rozpoznania wytypowano do dalszych badań i zastosowań kilka rodzajów kruszyw o przyzwoitych parametrach fizykochemicznych pochodzących z różnych regionów Polski.

2. Dobór materiałów do badań

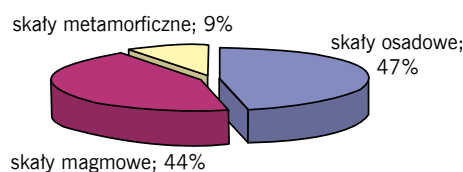
2.1 Analiza potencjału przemysłu kruszywowego

Na podstawie bilansu opracowanego przez Państwowy Instytut Geologiczny grupa kopalin skalnych obejmuje 33 odmiany litologiczne skał różniących się parametrami fizycznymi i chemicznymi, które determinują ich zastosowanie w gospodarce. Udokumentowane zasoby geologiczne Polski z podziałem na pochodzenie obrazuje rysunek 1 [1].

Złoża skał magmowych i metamorficznych koncentrują się głównie w południowej części Polski – na terenie województwa dolnośląskiego oraz małopolskiego. Znacznie powszechniejsze jest występowanie skał osadowych, których złoża udokumentowano w południowo-centralnym oraz południowo-wschodnim rejonie Polski. I właśnie szerszy obszar występowania skał osadowych, z których produkować można kruszywa o dobrych parametrach fizykochemicznych, wymaga głębszej refleksji na temat możliwości ich zastosowania w betonach mostowych lub nawierzchniowych w aspekcie technicznym, ekonomicznym i ekologicznym.

Jednakże w chwili obecnej w inżynierskiej praktyce budownictwa betonowego w Polsce odczuwalny jest ogólny brak zaufania do kruszyw łamanych pochodzenia magmowego lub metamorficznego innych niż bazaltowe i granitowe. Swego rodzaju lęk do stosowania innych materiałów wynika głównie z dotychczasowych praktyk i uwarunkowań, gdyż eksploatacja złóż tych kruszyw (granit/bazalt) zaspokajała potrzeby w minionych latach, a zakres przeprowadzonych badań, zarówno na poziomie laboratoryjnym jak i stosowanym, pozwalał sugerować ich stosowanie w specyfikacjach i projektach. Drugą grupą kruszyw o odczuwalnym braku zaufania są kruszywa węglanowe. Wynika to między innymi z ogólnie znanej małej twardości i dużej ścieralności skał węglanowych oraz wysokiej nasiąkliwości, a także dużej zmienności właściwości fizycznych pomiędzy poszczególnymi złożami. Powszechnie są także opinie, spotykane bardzo często na budowach, że kruszywa węglanowe będą się „lăsować lub skręcać w betonie”. Należy jednak podkreślić, że w wielu złożach występują skały węglanowe o porowatości mniejszej niż 2-3% a ich właściwości wytrzymałościowe i parametry trwałościowe są porównywalne lub nawet przewyższające skały magmowe. Niestety nadal znaczna część kruszyw innych niż bazalty i granity z różnych względów jest niedoceniona, a nawet wręcz dyskryminowana w przypad-

Rys. 1. Podział zasobów kruszyw w Polsce ze względu na pochodzenie skał



ku propozycji zastosowania ich w odpowiedzialnych betonach konstrukcyjnych.

Do chwili obecnej pojawiło się już wiele opracowań na temat kruszyw i ich roli w betonie, a zwłaszcza kruszyw węglanowych [2,3,4]. Opracowania te jednoznacznie wskazywały na możliwość stosowania tego typu kruszyw w bardzo specjalistycznych i zaawansowanych technologicznie rozwiązaniach recepturowych. Także inne rodzaje skał były poddawane testom i stosowano je w pilotażowych lub eksperymentalnych rozwiązaniach z pozytywnymi efektami. Autorzy niniejszego opracowania skupili się na możliwości zastosowania różnych kruszyw do najbardziej obecnie popularnej klasy wytrzymałości betonu mostowego, czyli C35/45 i porównaniu ich z najczęściej akceptowanymi kruszywami. Punktem wyjścia przeprowadzonego programu badawczego było osiągnięcie zakładanych parametrów stwardniałego betonu kształtowanego za pomocą odpowiedniego doboru kruszyw, o właściwościach nie zawsze jednak zgodnych z wymaganiami STWiORB i Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [6].

2.2 Dobór kruszyw

Głównym kryterium doboru kruszyw były przede wszystkim cechy fizyczne oraz właściwości skały/materiału, a także lokalizacja złoża w świetle jak najbardziej ekonomicznego łańcucha dostaw dla jak największego obszaru naszego kraju.

Do badań fizykochemicznych kruszyw wytypowano więc materiały pochodzące z różnych terenów Polski, na których istnieją kamieniołomy lub kopalnie eksploatujące materiał o odpowiednich parametrach. W przypadku gdy producent nie dysponował frakcjami typowo betonowymi, czyli 2/8 mm i 8/16 mm, uzyskiwano je poprzez mieszanie w stosunku

1 do 1 produkowanych podstawowych frakcji drogowych, czyli 2/5 i 5/8 mm oraz 8/11 i 11/16 mm. Pierwszym etapem prac nad projektem było porównanie właściwości kruszyw pod kątem ich zgodności z obecnie obowiązującymi regulacjami prawnymi stosowanymi dla konstrukcji mostowych [tabela 1]. Każdą z dostępnych frakcji poddano badaniom pod kątem określenia jej cech definiowanych na bazie poniżej wymienionych norm, z których większość jest ciągle powoływana w specyfikacjach pomimo ich wycofania:

- zawartość pyłów mineralnych wg PN-EN 933-1:2002
- zawartość ziaren nieforemnych wg PN-78/B-06714/16
- wskaźnik rozkruszenia dla grysów wg PN-78/B-06714/40
- nasiąkliwość wg PN-77/B-06714/18
- mrozoodporność wg metody bezpośredniej wg PN-78/B-06714/19
- reaktywność alkaliczna z cementem określona wg PN-91/B-06714/34
- zawartość związków siarki wg PN-78/B-06714/28
- zawartość zanieczyszczeń obcych wg PN-76/B-06714/12
- zawartość zanieczyszczeń organicznych niedająca barwy ciemniejszej od wzorcowej wg PN-78/B-06714/26

Dodatkowo wykonano podstawowe badania trwałościowe i fizyczne istotnych z punktu widzenia właściwości betonu cech wybranych do analiz kruszyw, a uzyskane wartości zestawiono w tabeli 2. Badania te przeprowadzono zgodnie z procedurami zawartymi w aktualnych normach badawczych kruszyw, z wyjątkiem badania wytrzymałości na miazdzenie. Jak widać, nie wszystkie wytypowane i przebadane kruszywa spełniały wymagania zapisane w większości

Tabela 1. Porównanie właściwości kruszyw z wymaganiami zawartymi w mostowych specyfikacjach technicznych

Wymagania dla kruszyw według RMTi GM Dz.U Nr 63 pozycja 735 oraz zapisów mostowych specyfikacji technicznych 13.01.00	Wartości graniczne	Rodzaj i frakcje kruszywa												
		Z-01	Z-02	Z-03	Z-04	Z-05	Z-06	Z-07	Z-08	Z-09	Z-10	Z-11	Z-12	Z-13
		Grys bazaltowy 2/8 i 8/16	Grys granitowy 2/8 i 8/16	Grys gąbrowy 2/8 i 8/16	Grys granitognejsowy 2/8 i 8/16	Grys sjenitowy 2/8 i 8/16	Grys kwarcytowy 2/8 i 8/16	Grys melafirowy 2/8 i 8/16	Grys porfirowy 2/8 i 8/16	Grys dolomitowy (dewon) 2/16	Grys dolomitowy (trias) 2/16	Grys wapienny zdolnityzowany 2/8 i 8/16	Grys wapienny (Jura) 4/16	Zwir 2/8 i 8/16
Zawartość pyłów mineralnych	≤1%	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
Wskaźnik rozkruszenia granitowe/bazaltowe i inne	≤16% / ≤8%	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-
Nasiąkliwość	≤1,2%	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+
Mrozoodporność wg metody bezpośredniej	≤2%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Zawartość podziarna	≤5%	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
Zawartość nadziarna	≤10%	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+
Zawartość ziaren nieforemnych	≤20%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Reaktywność alkaliczna z cementem	≤0,1% wydłużenie	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zawartość związków siarki	≤0,1%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zawartość zanieczyszczeń obcych	≤0,25%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zawartość zanieczyszczeń organicznych	nie ciemniejsza od wzorcowej	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zawartość lekkich zanieczyszczeń organicznych	≤0,05%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Nie dopuszcza się zanieczyszczeń gliną		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabela 2. Wybrane parametry fizyczne kruszyw według aktualnych norm

Materiał			Wybrane parametry fizyczne				
			Nasiąkliwość [%]	Kategoria zawartości pyłów	Mrozoodporność	Odporność na rozdrabnianie Los Angeles	Wytrzymałość na miazdzenie – wskaźniki rozkruszenia [%]
rodzaj	Oznaczenie mieszanki	frakcje	PN - EN 1097-6	PN-EN 933	PN-EN 1367-1	PN - EN 1097-2	PN-78/B-06714.40
grys bazaltowy	Z-01	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA20	2,5
grys granitowy	Z-02	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA35	15,8
grys gąbro	Z-03	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA15	4,8
grys granitognejsowy	Z-04	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA25	6,2
grys sjenitowy	Z-05	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA25	10,0
grys kwarcytowy	Z-06	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA25	4,0
grys melafirowy	Z-07	2/8 i 8/16	WA24 2	f1,5	F1	LA15	2,4
grys porfirowy	Z-08	2/8 i 8/16	WA24 2	f1,5	F1	LA20	8,7
grys dolomitowy dewon	Z-09	2/16	WA24 1	f3,0	F1	LA15	5,4
grys dolomitowy trias	Z-10	2/16	WA24 2	f4,0	F2	LA25	9,0
grys wapienny zdolomityzowany	Z-11	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA25	7,8
grys wapienny jura	Z-12	2/16	WA24 4	f4,0	F2	LA25	11,6
żwir	Z-13	2/8 i 8/16	WA24 1	f1,5	F1	LA25	9,9

specyfikacji technicznych dla konstrukcyjnych betonów mostowych (przy założeniu przeniesienia uzyskanych wyników według procedur starych i nowych norm w proporcji 1:1). Głównymi parametrami, których wartości nie spełniały wymaganych specyfikacjami kryteriów, były:

- zawartość pyłów mineralnych poniżej 1%
- nasiąkliwość poniżej 1.2%
- wskaźnik rozkruszenia (dla grysów innych niż granitowe powinien być niższy niż 8%)
- zawartość nadziarna poniżej 10% i podziarna poniżej 5%

Tym bardziej istotne z punktu widzenia kolejnych badań było określenie i zbadanie wpływu przekroczenia i niespełnienia tych wartości granicznych na parametry stwardniałego betonu.

2.3 Cement i domieszki

Wszystkie betony w tym projekcie zostały wykonane przy użyciu cementu CEM I 52,5 N HSR/NA, a więc cementu wymaganego przez większość specyfikacji mostowych dla tej klasy wytrzymałości. Dla przypomnienia, większość SST wyraźnie stwierdza w ślad za zapisami RMTiGM Dz.U Nr 63 pozycja 735, że:

„Do wykonania betonu konstrukcyjnego powinien być stosowany cement portlandzki czysty, tj. bez dodatków mineralnych CEM I niskoalkaliczny (NA) o wysokiej odporności na siarczany:

- do betonu klasy B 30, B 35 – klasy 42,5 NA
- dla betonu klasy B 45 i większej – klasy 52,5 NA.”

Użyty do badań cement charakteryzował się składem fazowym spełniającym poniższe wymagania:

- zawartość określona ułamkiem masowym krzemianu trójwapieniowego (alitu) C3S – nie większa niż 60%,
- zawartość określona ułamkiem masowym glinianu trójwapieniowego C3A – nie większa niż 3%,
- zawartość określona ułamkiem masowym (C4AF + 2*C3A) – nie większa niż 20%

Do wykonania mieszanek betonowych użyto domieszek chemicznych:

- superplastifikatora PCE
- napowietrzacza LP

posiadających Aprobaty lub Rekomendacje Instytutu Badawczego Dróg i Mostów do stosowania w budownictwie komunikacyjnym.

3. Założenia recepturowe

Recepturę mieszanki zaprojektowano tak, aby zgodnie z normą PN-EN 206-1 wraz z polskim uzupełnieniem PN-B 06265 spełniała wymagania dla klas ekspozycji XC4, XF4, XA3 oraz XD3 i XS3, a także czyniła zadość wymaganiom mostowych specyfikacji technicznych w zakresie cech betonu stwardniałego, czyli parametrom mrozoodporności stopnia F150, wodoszczelności W8 oraz nasiąkliwości poniżej 5%. Wszystkie receptury charakteryzowały się stałym wskaźnikiem w/c, a stos okruszowy zaprojektowany został dla każdej z nich w ten sam sposób, przyjmując udziały procentowe poszczególnych frakcji na tym samym poziomie. Ogólny skład receptury oraz założenia reologiczne dla mieszanki zawiera tabela 3. Punktem wyjściowym doboru ilości domieszek chemicznych, tj. superplastifikatora i napowietrzacza była zakładana konsystencja (140 mm +/- 30 mm) i napowietrzenie mieszanki (6.5% +/- 1%). Oczywiście ilość stosowanych domieszek była zmienna, ze względu na różnice w wodoządnosci stosów okruszowych oraz zmienne wartości zapylenia kruszywa. Jak można zauważyć, zarówno wartość konsystencji jak i maksymalna zawartość powietrza w mieszance betonowej są inne niż w większości funkcjonujących specyfikacji technicznych dla konstrukcyjnych betonów mostowych 13.01.00, które swoimi sztywnymi zapisami bardzo często uniemożliwiają prawidłowe wbudowanie mieszanki betonowej w bardzo gęsto zbrojony, a ponadto nie biorą pod uwagę możliwości większego niż zakła-

Tabela 3. Roboczy skład receptury i założone parametry mieszanki

Składnik receptury	ilość kg/m ³
CEM I 52,5 N HSR/NA CEM [kg]	380
Piasek [kg]	66-690*
Kruszywo grube [kg]	1063 - 1290*
w/c	0,41
Superplastifikator	0.60-0.65% m.c
Napowietrzacz	0.14-0.20% m.c.
Zakładane parametry świeżej mieszanki;	
konsystencja wg stożka Abrams'a [cm]	14 ± 3
zawartość powietrza wg metody ciśnieniowej [%]	6.5 ± 1

dane odpowietrzenia mieszanki betonowej w trakcie jej zabudowy, co w konsekwencji powoduje, nawet przy dobrej strukturze napowietrzenia, niedostateczną ilość „dobrego powietrza” w betonie konstrukcji.

4. Wyniki badań i analiza

Łącznie zostało sprawdzonych 13 receptur mieszanek wykonanych na różnych kruszywach. Numerację serii badań powiązaną z zastosowanymi w recepturach kruszywami i wynikami badań mieszanek przedstawia tabela 4. Dodatkowo, w celu potwierdzenia jakości i skuteczności napowietrzenia, wykonano na losowo wybranych betonach badanie struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie zgodnie z procedurą normy PN-EN 480-11, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Na podstawie badań struktury napowietrzenia w wybranych betonach można wnioskować, że:

- charakterystyka porów powietrznych spełniała wytyczne i wskazania norm odniesienia w zakresie wskaźnika rozmieszczenia porów $SF < 0.200$ mm oraz
- zawartość „dobrego powietrza” o wymiarach pęcherzyków poniżej $300 \mu\text{m}$ przekraczała wskazywaną wartość minimalną wynoszącą 1,5%
- zawartość powietrza zbadana w stwardniałym betonie kształtowała się średnio na poziomie około 75% zawartości powietrza określonej metodą ciśnieniową w świeżej mieszance betonowej.

Badania te były niezbędne, aby wykluczyć wpływ niewłaściwego napowietrzenia na uzyskane wyniki badań trwałościowych.

Próbki do badań wytrzymałościowych i trwałościowych zostały pobrane zgodnie z normą PN-EN 12350-1 i pielęgnowane zgodnie z normą PN-EN 12390-2, przy czym próbki do badania nasiąkliwości i mrozoodporności przez cały czas pielęgnacji przechowywane były w zamkniętych wannach nad wodą (wilgotność minimum 90%).

Dla wszystkich badanych serii betonów określono przyrost wytrzymałości na ściskanie w czasie, co przedstawiono zbiorczo na rysunku 2.

Otrzymane wyniki wyraźnie wskazują na fakt, iż pomimo dość wysokiego napowietrzenia dla wszystkich użytych do badań kruszyw została osiągnięta, nawet ze znacznym zapasem, zakładana klasa wytrzymałości. Wyraźnie jednak odstają od średniej dwa wyniki uzyskane dla betonów na kruszywie żwirowym – poniżej 60 MPa, oraz na grysie porfirowym powyżej 70 MPa. Natomiast w tablicy 6 zestawiono wyniki badań o charakterze trwałościowym, czyli wymaganą przez mostowe specyfikacje techniczne ocenę mrozoodporności metodą klasyczną edług normy PN-88/B-06250 po 150 cyklach zamrażania w powietrzu i odmrażania w wodzie w automatycznej komorze w zakresie temp. $-18 \pm 2^\circ\text{C} / + 18 \pm 2^\circ\text{C}$ po 28 dniach pielęgnacji nasyconych wodą sześciennych próbek betonowych o boku 100 mm oraz ocenę nasiąkliwości próbek sześciennych o boku również 100 mm po 28 dniach i dodatkowo po 90 dniach dojrzewania. Uzyskane wyniki badań wskazują, że przy właściwym poziomie i jakości napowietrzenia niezależnie od rodzaju użytego kruszywa, nawet o kategorii mrozoodporności F2, wszystkie betony wykazują zachowanie mrozoodporności w deklarowanym stopniu i to na bardzo dobrym poziomie. Co do nasiąkliwości betonu, to widać zdecydowanie jej zależność od nasiąkliwości użytego kruszywa. Dodatkowo zgodnie z obecnym stanem wiedzy i coraz bardziej powszechną tezą, stwierdzającą, że beton

Tabela 4. Oznaczenie serii badanych betonów i parametry świeżej mieszanki

Oznaczenie mieszanki	Użyte frakcje [mm]	Rodzaj zastosowanego kruszywa	Parametry świeżej mieszanki	
			konsystencja – opad stożka [cm]	zawartość powietrza badana metodą ciśnieniową [%]
Z-01	2/8 i 8/16	grys bazaltowy	14	7,2
Z-02	2/8 i 8/16	grys granitowy	12	7,3
Z-03	2/8 i 8/16	grys gablo	17	7,6
Z-04	2/8 i 8/16	grys granitognejsowy	14	7,3
Z-05	2/8 i 8/16	grys sjenitowy	14	7,5
Z-06	2/8 i 8/16	grys kwarcytowy	12	7,4
Z-07	2/8 i 8/16	grys melafirowy	17	7,5
Z-08	2/8 i 8/16	grys porfirowy	14	7,5
Z-09	2/16	grys dolomitowy dewon	16	7,5
Z-10	2/16	grys dolomitowy trias/dewon	12	7,5
Z-11	2/8 i 8/16	grys wapień zdolomityzowany	15	7,3
Z-12	4/16	grys wapienny jura	11	6,5
Z-13	2/8 i 8/16	żwir	17	7,5

Tabela 5. Struktura napowietrzenia w stwardniałym betonie

Oznaczenie mieszanki	Zawartość powietrza badana metodą ciśnieniową AP [%]	Struktura napowietrzenia w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11				A / AP [%]
		Całkowita zawartość powietrza A [%]	Wskaźnik rozmieszczenia SF [mm]	Zawartość mikroporów A300 [%]	Zawartość mikroporów A300 / Całkowita zawartość powietrza A	
Z-01	7,2	5,6	0,05	2,21	39%	78%
Z-04	7,3	4,7	0,05	1,96	42%	64%
Z-06	7,4	6,6	0,04	3,43	52%	89%
Z-07	7,5	3,8	0,05	1,95	51%	51%
Z-11	7,3	7,0	0,06	2,25	32%	96%

wykonany z cementu specjalnego HSR/NA po 28 dniach twardnienia nie jest betonem jeszcze w pełni dojrzałym, przeprowadzono dodatkowo badania nasiąkliwości po 90 dniach dojrzewania. Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują, że wydłużenie terminu badania do momentu uzyskania większej szczelności mikrostruktury matrycy pozwala na obniżenie wyników o około 0,5% do 1,0% wartości bezwzględnej w porównaniu do wyników po 28 dniach pielęgnacji. Należy jednak nadmienić, że próbki do badania nasiąkliwości przechowywane były przez cały czas dojrzewania w wannach nad wodą. Pielęgnacja próbek do takich badań w wodzie daje znacznie wyższe wartości nasiąkliwości, lecz pielęgnacja taka znacząco odbiega od rze-

Rys. 2. Graficzne zestawienie wyników badań wytrzymałościowych

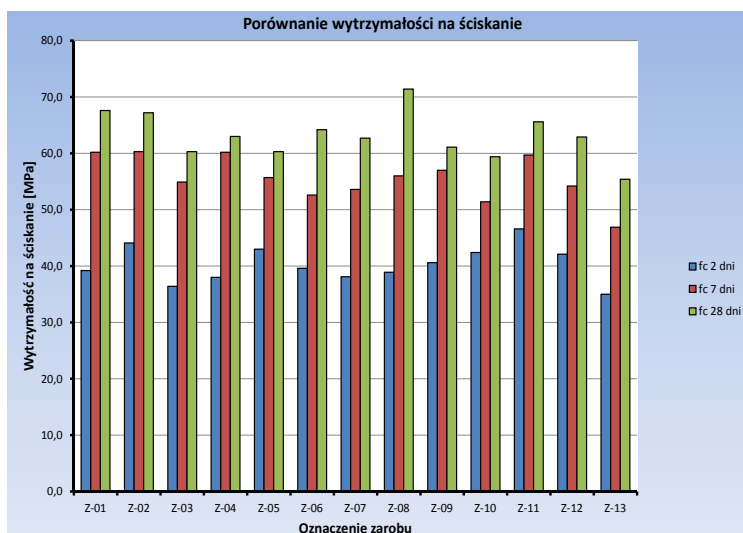


Tabela 6. Wyniki podstawowych badań trwałościowych

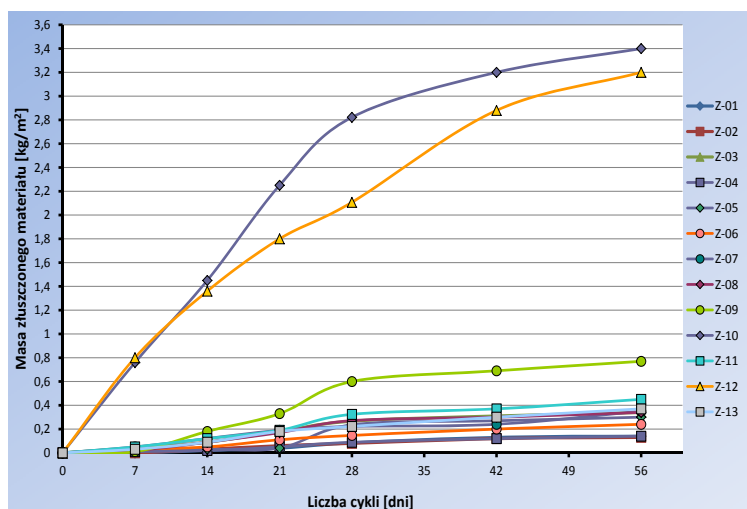
Oznaczenie mieszaniki	Nasiąkliwość betonu po 28 dniach pielęgnacji w [%]	Nasiąkliwość betonu po 90 dniach pielęgnacji w [%]	Badanie mrozoodporności betonów F150 metodą zwykłą wg PN-B-06250:1988					
			Wytrzymałość betonu [MPa]		Średnia masa próbek [g]		Strata wytrzymałości [%]	Ubytek masy [%]
			Próbki świeżaki	próbki po ostatnim cyklu zamrażania-odmrażania	po namoczeniu	po ostatnim cyklu zamrażania-odmrażania		
Z-01	4,7	3,9	73,0	72,9	2416,8	2414,6	0,08	0,09
Z-02	4,8	3,9	74,9	72,4	2312,6	2310,0	3,42	0,11
Z-03	4,5	3,8	62,2	61,4	2402,0	2397,6	1,35	0,18
Z-04	4,8	4,0	72,9	65,9	2318,6	2318,8	9,60	-0,01
Z-05	4,0	3,5	60,9	59,4	2349,2	2353,0	2,46	-0,16
Z-06	4,8	3,9	73,2	69,3	2290,4	2288,4	5,27	0,09
Z-07	5,2	4,2	71,9	68,0	2302,4	2298,0	5,53	0,19
Z-08	5,2	4,4	74,5	76,2	2266,8	2264,0	-2,20	0,12
Z-09	4,5	4,1	67,2	66,7	2352,0	2349,6	0,77	0,10
Z-10	4,9	4,3	67,9	64,4	2350,8	2357,2	5,15	-0,27
Z-11	4,6	4,0	68,1	62,7	2356,6	2357,4	7,87	-0,03
Z-12	5,6	4,7	70,9	65,7	2291,0	2302,0	7,31	-0,48
Z-13	4,7	4,1	61,2	53,1	2252,2	2255,4	13,24	-0,14

czywistych warunków dojrzewania betonu większości konstrukcji.

Analizując wyniki badania mrozoodporności wykonanej metodą klasyczną po 150 cyklach zamrażania-odmrażania w odniesieniu do parametru nasiąkliwości, nie udało się znaleźć ich powiązania. Jak stwierdziło już kilku autorów wcześniejszych prac badawczych i analiz tych parametrów, można jednoznacznie stwierdzić, że nasiąkliwość betonu nie jest i nigdy nie powinna być uznawana za wyznacznik trwałości betonu, a wręcz przeciwnie – niepełne doszczelnienie struktury betonu i obniżenie jego nasiąkliwości bardzo często skutkuje znacznym zniszczeniem mrozowym betonu. Brak wpływu zwiększonej ponad dopuszczalną wartość nasiąkliwości betonu na jego odporność mrozową potwierdzają uzyskane wyniki badań dla zarobów Z07, Z08 czy Z12 wykonanych na kruszywach melafirowych, porfirowych i wapiennych, dla których podwyższona nasiąkliwość nie doprowadziła do pogorszenia parametru mrozoodporności.

Dlatego autorzy z ulgą przyjmują obecne dyskusje i coraz głośniejsze postulaty, aby w tworzonej obecnie nowych wytycznych i OST zrezygnować z tego parametru jako jednego z podstawowych wyznaczników jakości betonu w konstrukcji.

Rys. 3. Wpływ cyklicznego zamrażania i odmrażania w obecności 3% NaCl na beton wykonany na różnych kruszywach



Rysunek 3 z kolei graficznie przedstawia wyniki badania odporności betonu na powierzchniowe zruszczenie wskutek cyklicznego zamrażania i odmrażania w obecności środków odładzających, przeprowadzonego według referencyjnej metody „slab test” podanej w normie PKN-CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete – Part 9 Freeze-thaw resistance-Scaling.

Miarą odporności betonu poddanego takiemu oddziaływaniu jest przeważnie ilość zruszczonego materiału po 56 cyklach przypadająca na jednostkę powierzchni, a w zależności od zastosowanej metody oceny można określić kategorię mrozoodporności FT według PN-EN 13877-2 lub rodzaj odporności na podstawie kryteriów metody Boras według SS 1372 44.

Zestawienie dwóch metod oceny obrazuje tabela 7. Według danych zawartych w tabeli 7 można stwierdzić, że znacząca większość wykonanych betonów charakteryzuje się dobrą odpornością na zamrażanie i odmrażanie w obecności soli odładzających i zaliczyć je można do kategorii mrozoodporności FT2 lub według szwedzkiej metody Boras ich odporność przyjąć jako dobrą. Wyjątek stanowią tu betony na dolomitach triasowych i wapieniu jurajskim, dla których stwierdzono dość duże zruszczenie i sklasyfikowano ich odporność jako niedostateczną i kategorię FT0. Beton na grysie dolomitowym dewońskim zaliczony został do kategorii FT1 z odpornością dostateczną.

5. Podsumowanie i wnioski

W aktualnej normie betonowej trwałość jest opisana w różnych kontekstach, ale można traktować ją jako zapewnienie właściwego stanu konstrukcji w przewidywanym okresie użytkowania [8]. Zgodnie z załącznikiem J normy PN-EN 206-1 wymagana użyteczność betonu pod względem trwałości zależy od deklarowanego okresu użytkowania i warunków, w jakich będzie on pracował. W praktyce osiągany poziom trwałości jest spełniony, jeżeli beton spełnia wymagania dotyczące wartości granicznych, a z kolei podkreślone jest także, że projektowane właściwości betonu zostaną uzyskane, jeśli zostaną spełnione określone procedury wykonawcze dotyczące mieszanek betonowych w miejscu jej wbudowania.

Natomiast w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30.05.2000 [6] czytamy: „Obiekty inżynierskie powinny być zaprojektowane i wykonane, aby w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania była zapewniona ich trwałość, rozumiana jako zdolność użytkowania obiektu przy zachowaniu cech wytrzymałościowych i eksploatacyjnych”.

Zapisy te, pomimo sporej różnicy czasowej, są zaskakująco spójne i trafiają w meritum trwałości. Skoro tak jest, to dlaczego dwa dokumenty wskazują dwie zdecydowanie inne drogi do uzyskania i sprawdzania trwałości elementu?

Dlatego mając na uwadze możliwe zmiany w archaicznych, jak na obecny stan wiedzy, przepisach dotyczących wymagań dla konstrukcji mostowych, autorzy pragną włączyć się do prowadzonej w tym zakresie dyskusji. Prawidłowe zdefiniowanie wymaganych właściwości betonu, wynikające z koncepcji użyteczności i okresu użytkowania, powinno być podstawą do określenia jego składu na podstawie normy PN-EN 206-1, krajowego uzupełnienia PN-B-06265 oraz doświadczenia i wiedzy inżynierskiej. Narzucanie wymagań dotyczących możliwych do użycia materiałów, a złasz-

cza kruszyw, jest działaniem stojącym w sprzeczności z obecnym stanem wiedzy oraz deklaracjami dążenia do zrównoważonego rozwoju. Przywiązanie do tradycji wyklucza stosowanie materiałów lokalnych, co jest także istotne z punktu widzenia ekonomii.

Przeprowadzony program badawczy, który potwierdza bardzo nieliczne przemysłowe aplikacje alternatywnych rozwiązań, pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- nie ma problemu z uzyskaniem klasy wytrzymałości na ścislenie oraz podstawowej odporności na tradycyjne zamrażanie i odmrażanie w betonach, w których zastosowano kruszywa różnego pochodzenia i o różnym składzie petrograficznym, pod warunkiem właściwego zaprojektowania i wykonania betonu
- zastosowanie skał osadowych i żwirów naturalnych w konstrukcjach mostowych, tam gdzie nie jest wymagana odporność na zamrażanie i odmrażanie w obecności środków odładzających, np. w masywnych fundamentach, jest jak najbardziej uzasadnione. W takiej sytuacji należałoby jednak dokładniej pochylić się nad określeniem klas ekspozycji, w jakich będzie pracował element konstrukcji, ponieważ w większości przypadków beton w takim elemencie nie jest narażony na cykliczne zamrażanie i odmrażanie, więc wymaganie stopnia mrozoodporności rzędu F150 jest wymaganiem przesadzonym i stanowi w przypadku masywnych bloków fundamentowych większe zagrożenie niż korzyść – generowanie rys termicznych, zaburzenie jednorodności struktury betonu, a przez to osłabienie betonu i wprowadzenie możliwości łatwej penetracji szkodliwych gazów i cieczy w głąb betonu
- nasiąkliwość jest parametrem, który bardzo często stwarza problemy podczas realizacji inwestycji mostowych, zwłaszcza gdy definiuje się ten parametr na poziomie poniżej 4%, a jak pokazują różne badania, nie ma on żadnego powiązania z trwałością betonu określoną parametrem mrozoodporności. Wymaganie tak niskiej wartości tego parametru niejednokrotnie wywołuje kuriozalne sytuacje, kiedy to celowo obniża się zawartość powietrza w mieszance betonowej, aby osiągnąć żądaną przez zamawiającego wartość nasiąkliwości, zmniejszając w ten sposób pośrednio mrozoodporność
- obecne zapisy specyfikacji technicznych w kwestii maksymalnych wartości napowietrzenia są także archaiczne i powinny zostać zmienione. Sprawdzone w projekcie betony charakteryzowały się napowietrzeniem w okolicach 7,0-7,5%, więc z założenia nie były zgodne z wymaganiami większości mostowych ST, gdzie przedział zawartości powietrza w zależności od elementu to 3,5 do 6,5%, i taka mieszanka nie została by dopuszczona do wbudowania. Przyjmując, że zbadana zawartość powietrza w stwardniałym betonie stanowi nawet około 80% wartości powietrza uzyskanej z pomiaru metodą ciśnieniową w świeżej mieszance, a „dobre powietrze” powinno stanowić około 50% całkowitej zawartości powietrza, to łatwo wyliczyć, że aby ilość powietrza tzw. dobrego, czyli zamkniętego w pęcherzykach o średnicy poniżej 300 μm , odpowiadającego za mrozoodporność wynosiła 1,5%, zbadana zawartość powietrza w mieszance betonowej powinna wynosić minimum 4%, czyli tak jak podaje PN-EN 206-1 dla klas ekspozycji XF. Podajac

Tabela 7. Klasyfikacja odporności na zamrażanie i odmrażanie betonów w zależności od kryteriów oceny

Oznaczenie betonu	Kryteria oceny odporności betonu na powierzchniowe złuszczenie w warunkach cyklicznego zamrażania i odmrażania w obecności soli odładzających	
	według PN-EN 13877-2	według SS 137244
Z-01	FT2	dobra
Z-02	FT2	dobra
Z-03	FT2	dobra
Z-04	FT2	dobra
Z-05	FT2	dobra
Z-06	FT2	dobra
Z-07	FT2	dobra
Z-08	FT2	dobra
Z-09	FT1	dostateczna
Z-10	FT0	niedostateczna
Z-11	FT2	dobra
Z-12	FT0	niedostateczna
Z-13	FT2	dobra

w dokumentacji technicznej ograniczenie górne, w sposób świadomy pozbywamy się możliwość uzyskania większej ilości powietrza „dobrego”. Na zakończenie warto przypomnieć słowa profesora Czarneckiego dotyczące zasady zrównoważonego rozwoju „[...] powinniśmy się kierować ideą użyteczności, określając cechy minimalne zapewniające wypełnienie funkcji, [...]” - czyli bardzo ważne jest prawidłowe określenie wymaganej właściwości kompozytu, ponieważ nadmiar właściwości kosztuje.

mgr inż. Piotr Górak
dr inż. Zbigniew Kołacz
CEMEX Polska Sp. z o.o.

Literatura

- 1 Kamienie tamane i bloczne, Opracowanie Państwowego Instytutu Geologicznego/Państwowego Instytutu Badawczego na temat bilansu z roku 2010
- 2 J. Bobińska, Trwałość kruszyw dolomitowych w aspekcie ich zastosowania do betonu, Materiały konferencji Dni Betonu 2010
- 3 Z. Kołacz, Właściwości betonów specjalistycznych wykonywanych z zastosowaniem grysów dolomitowych, „BTA” 3/2011
- 4 J. Matolepszy, R. Gajewski, Rola kruszyw węglanowych w kształtowaniu wybranych właściwości betonu, Materiały konferencji Dni Betonu 2008
- 5 Ogólne Specyfikacje Techniczne, M 13.00.00 Beton
- 6 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich użytkowanie (Dz. U. nr 63 z dnia 30.05.2000 poz. 735)
- 7 Beton według normy PN-EN 206-1 – Komentarz - Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. Lecha Czarneckiego, „Polski Cement” 2004
- 8 PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 9 PN-EN 480-11:2006 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczyny – Metody badań – Część 11. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- 10 PN-88/B-06250 Beton zwykły
- 11 PKN-CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete - Part 9 Freeze-thaw resistance-Scaling
- 12 PN-EN 13877-2:2007 Nawierzchnie betonowe. Część 2. Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych
- 13 D. Beblacz, P. Kamiński, Metodyka badania oraz kryteria oceny odporności betonów nawierzchniowych na działanie soli odładzających, Materiały konferencji Dni Betonu 2004
- 14 P. Górak, Z. Kołacz, T. Jarzębowski, Alternatywne kruszywa do konstrukcyjnych betonów mostowych, Materiały konferencji Dni Betonu 2012