

mgr inż. Piotr Górak^{1*)}
 ORCID: 0000-0003-3479-7647
 mgr inż. Jarosław Gaudy¹⁾
 mgr inż. Andrzej Wójcik¹⁾

„Zielony” beton mostowy

„Green” bridge concrete

DOI: 10.15199/33.2021.09.07

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki prac nad „zielonymi” betonami mostowymi w aspekcie możliwości redukcji ich śladu węglowego pochodzącego od/z cementu. Cementy z dodatkami mineralnymi są doskonałym przykładem świadomego „zielonego” rozwoju technologii betonu w kierunku zmniejszenia emisyjności procesu wykonywania konstrukcji betonowych. Niestety tego typu cementy w budownictwie mostowym i drogowym wciąż pozostają zakładnikami archaicznych przyzwyczajęń i opinii, stając się spoiwami drugiego wyboru w porównaniu z cementami portlandzkimi „czystymi”. W artykule przedstawiono różne podejścia do rozwiązań materiałowych z betonu w przypadku typowej konstrukcji mostowej, biorąc pod uwagę właściwości betonu jako warunek konieczny do akceptacji rozwiązania oraz obliczając potencjał zmniejszenia śladu węglowego typowych rozwiązań materiałowych.

Słowa kluczowe: beton mostowy; ślad węglowy; dekarbonizacja; trwałość; zrównoważony rozwój.

Abstract. In this article presented research results about „green” bridge concretes in aspect of possibilities of CO₂ reduction. Composite cements with mineral additives are perfect example of „green” development of concrete technology towards decreasing emissions of construction process. Unfortunately composite cements in bridge and road construction in Poland still remain prisoner archaic habits and bad opinions and still remain as a cements second choice. In this article presented different approaches to materials solution for concrete used in typical bridge construction. Necessary condition for this type of solution were good properties of new „green” bridge concrete and scientifically potential decrease of carbon footprint.

Keywords: bridge concrete; carbon footprint; decarbonization; durability; sustainability.

Przemysł cementowy od lat aktywnie poszukuje rozwiązań oraz technologii pozwalających zmniejszyć emisję CO₂.

Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Cementowego CEMBUREAU opracowało mapę drogową zakładającą osiągnięcie neutralności klimatycznej w całym łańcuchu aplikacji cementu pod nazwą 5C → clinker, cement, concrete, construction, carbonation [14]. Z założenia działania będą polegały na poprawie efektywności energetycznej, stosowaniu paliw alternatywnych, rozwoju cementów z dodatkami mineralnymi, optymalizacji w procesie projektowania mieszanek betonowych oraz rozwoju technologii wychwytywania i magazynowania lub wykorzystania CO₂. Kamieniem milowym i swoistym punktem kontrolnym skuteczności założeń w branży cementowo-betonowej jest osiągnięcie do 2030 r. redukcji emisji CO₂ o 40%. W ramach tych działań aktywnie uczestniczy Stowarzyszenie Producentów Cementu, które koordynuje proces zielonej transformacji w obrębie polskiego przemysłu cementowego pod hasłem „Spaja-

my europejski zielony ład”. **Do szybkich i efektywnych działań pozwalających na istotne zmniejszenie emisji CO₂, można zaliczyć powszechne stosowanie cementów niskoklinkierowych (niskoemisyjnych) oraz optymalizację procesu wykonywania konstrukcji przez zastosowanie betonów zaprojektowanych za pomocą „zielonego” podejścia.** Dodatkowo wydłużenie okresu eksploatacji konstrukcji przez zwiększenie trwałości umożliwia wydłużenie procesu rekarbonatyzacji, czyli zjawiska pochłaniania przez beton części CO₂ wyemitowanego podczas produkcji klinkieru. Każdy dodatkowy proces konieczny do wydłużenia czasu eksploatacji konstrukcji betonowej wiąże się z dodatkową emisją i zużyciem materiałów i energii.

Właściwie zaprojektowana i wykonana konstrukcja betonowa, eksploatowana przez wiele lat i podlegająca destrukcyjnym zjawiskom jest tym trwalsza, im właściwsza będzie kompozycja zastosowanych w niej materiałów. Odpowiednie uwzględnienie wszystkich możliwych wpływów środowiskowych pozwala na zastosowanie się do wytycznych granicznych składów betonów [10, 11] także w aspekcie rodzaju użytego cemen-

tu czy kompozycji spoiwa, co z kolei pozwala zminimalizować emisję dwutlenku węgla w każdym m³ wbudowywanego betonu bez skomplikowanych procesów i specjalnych technologii.

W ramach Nowego Programu Budowy Dróg Krajowych do 2030 r., z perspektywą do 2033 r., na inwestycje w infrastrukturę drogową ma zostać przeznaczony 291 mld zł. Zastosowanie cementów niskoemisyjnych na tych inwestycjach pozwoli zaoszczędzić tysiące ton CO₂ i sprawi, że powstałe drogi wytoczą nowy, zielony ślad na polskiej mapie drogowej.

Zdefiniowane wcześniejszymi wymaganiami rozwiązania materiałowe konstrukcyjnych betonów mostowych praktycznie wykluczały możliwość stosowania cementów innych niż czysto klinkierowe [12]. Ponadto zapisy wymuszające stosowanie cementów o odpowiednim składzie fazowym klinkieru ograniczały możliwość optymalnego projektowania receptur. Przełomowy był 2014 r., kiedy pojawiły się Ogólne Specyfikacje Techniczne [6, 7], których naturalnym następstwem była zmiana Rozporządzenia [13], jaka nastąpiła w 2019 r. W wymaganiach materiałowych ujętych w nowych dokumentach dotyczących betonu konstrukcyjnego

¹⁾ CEMEX Polska Sp. z o.o.;

^{*)} Adres do korespondencji: piotr.gorak@cemex.com

w drogowych obiektach inżynierskich pojawiły się zapisy umożliwiające stosowanie cementów spoza grupy cementów portlandzkich CEM I. Wyraźna zmiana w podejściu do projektowanych rozwiązań materiałowych inspirowana była założeniem osiągnięcia odpowiednich właściwości betonu przewidzianego do eksploatacji w określonych warunkach środowiskowych na podstawie zapisów PN-EN 206 oraz PN-B-06265.

Badania i analiza wyników

W ramach projektu badawczego wykorzystano zapisy punktu 2.3.1 specyfikacji [6] pozwalające na wykonanie betonu mostowego na bazie następujących cementów:

- CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w przypadku betonu C30/37 XC4, XA1, XD1, XF1, XF2;
- CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w przypadku betonu C35/45 XC4, XA3, XD1, XF1, XF2;
- CEM II/A-V 52,5 R-NA w przypadku betonu C40/50 XC4, XD3, XF3, XA1;
- CEM II/A-V 52,5 R-NA w przypadku betonu C50/60 XC4, XD3, XF3, XA1.

Założono, że beton konstrukcyjny powinien wykazywać odporność na działanie mrozu oznaczoną stopniem mrozoodporności wg PN-B-06265 F150 w klasach ekspozycji XF2 i XF3 oraz odporność na penetrację wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 mierzoną maksymalną głębokością penetracji nie większą niż:

- 60 mm w klasie ekspozycji XA1 w przypadku receptury C03/37;
- 40 mm w klasach ekspozycji XA3, XS3, XD3 w przypadku receptur C35/45, C40/50 i C50/60.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry cementów użytych w badaniach. Betony w zakładanych, prognozowanych miejscach aplikacji, zdefiniowanych klasami ekspozycji wykonane zostały na cementach CEM I 42,5 N-SR3/NA, czyli wymaganiem poprzednimi zapisami rozporządzenia [12]. Ze względu na wyraźną różnicę parametrów wytrzymałościowych cementów, w przypadku receptur C40/50 i C50/60 zmniejszono o 15 kg/m³ zawartość cementu CEM II/A-V 52,5 R-NA w stosunku do referencyjnego. Jako stałe parametry umożliwiające porównanie rozwiązań przyjęto parametry mieszanki betonowej stwardniałego betonu (tabela 2).

Tabela 1. Parametry cementów użytych w badaniach
Table 1. Parameters of cements used in tests

Właściwości	CEM I 42,5 N-SR3/NA	VERTUA Ultra® CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	VERTUA Plus® CEM II/A-V 52,5 R-NA
Początek wiązania [min]	240	200	120
Koniec wiązania [min]	270	240	190
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	3 964	5 050	4 723
Wodozadržność [%]	27,0	31,4	31,0
Zawartość SO ₃ [%]	3,0	2,2	2,8
Zawartość Cl ⁻ [%]	0,04	0,03	0,05
Zawartość Na ₂ O _{eq} [%]	0,56	0,57	0,76
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	22,7	14,1	35,0
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	55,1	56,8	64,3

Tabela 2. Kryteria akceptacji wyników badań mieszanki betonowej i betonu
Table 2. Acceptance criteria for tests results of concrete mixture and concrete

Właściwości mieszanki betonowej – badania po 60 min	
Konsystencja (opad stożka) wg PN-EN 12350-2	150 +/-20 mm
Zawartość powietrza wg PN-EN 12350-7	6,0 +/- 1,0%
Właściwości betonu – badania po 28 dniach dojrzewania	
Wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 12390-3	f _{ck} + 6 MPa
Stopień mrozoodporności wg PN-B 06250 Załącznik N	F150
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8	< 40 mm
Charakterystyka porów powietrznych wg PN-EN 480-11	A ₃₀₀ ≥ 1,5% L ≤ 0,200 mm

Badania konsystencji mieszanek betonowych i zawartości w nich powietrza wykonano po 5 i 60 min od zadozowania wody zarobowej. Wyniki badań uzyskane po 60 min spełniły zakładane kryteria oceny (rysunek 1).

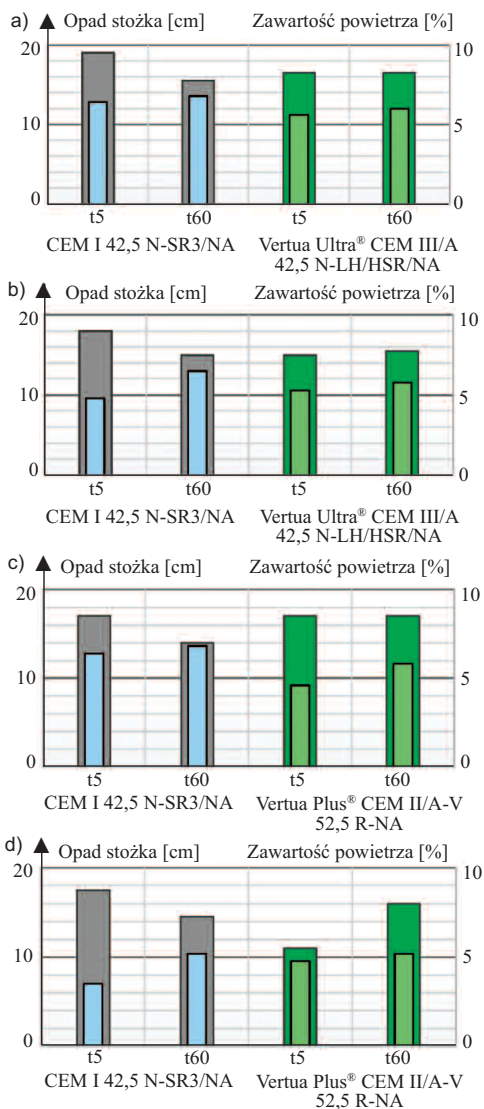
Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 2, 7 i 28 dniach dojrzewania próbek w warunkach normowych. Z punktu widzenia wykonawcy konstrukcji bardzo ważnym parametrem jest informacja na temat dynamiki narastania wytrzymałości (tabela 3). Określono więc zależność wytrzymałości 2-dniowej do wytrzymałości 28-dniowej [10].

Porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia betonów wykonanych na różnych cementach pokazuje, że dzięki zamianie, w obrębie tej samej klasy wytrzymałości cementu CEM I 42,5 N na cementy niskoklinkierowe CEM III/A 42,5 N (receptura C30/37 i C35/45) oraz CEM II/A-V 52,5 R-NA (receptura C40/50 i C50/60) uzyskano wzrost wytrzymałości końcowej o 8 ÷ 11%. W przypadku poszukiwania dalszego ograniczenia emisyjności istnieje możliwość ograniczenia ilości cementu w projektowanych recepturach z zastosowaniem cementów niskoemisyjnych.

Jednym z kluczowych parametrów mających wpływ na trwałość jest **szczelność betonu** oznaczana badaniem głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8. Wszystkie porównywane betony uzyskały wymaganą odporność na penetrację wody (rysunek 2). Wyniki wskazują, że betony z cementami zawierającymi popiół lotny oraz żużel wykazują nieco lepszą szczelność.

Charakterystyka porów powietrznych w betonie (tabela 4) pośrednio może wskazywać na odporność betonu pracującego w warunkach cyklicznego zamrażania/odmrażania. Właściwe napowietrzenie betonu wyrażone zawartością tzw. dobrego powietrza A₃₀₀ i wskaźnikiem rozmieszczenia porów powietrznych jest umownym wyznacznikiem potencjalnej mrozoodporności wewnętrznej i powierzchniowej betonu.

Wyniki badań mrozoodporności betonów (tabela 5) wykonanych na różnych cementach potwierdzają, że cementy z dodatkami mineralnymi są doskonałym przykładem świadomego „zielonego” rozwoju technologii betonu, a właściwie zaprojektowane na nich betony konstrukcyjne mają mrozoodporność minimum F150, czyli można je stosować w środowisku o klasach ekspozycji od XF1 do XF3. Co prawda dokument [7] zaleca, aby w przypadku betonów wykonanych z cementów o normalnym przyroście wytrzymałości N (CEM I 42,5 N-SR3/NA) stoso-



Rys. 1. Wyniki badań konsystencji i zawartości powietrza mieszanek betonowych:
 a) receptura C30/37; b) receptura C35/45; c) receptura C40/50; d) receptura C50/60

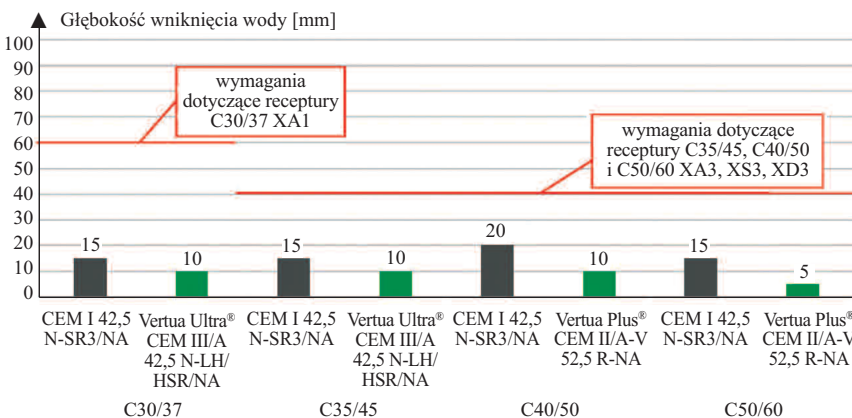
Tabela 3. Wyniki badań i ocena wytrzymałości na ściskanie
 Table 3. Compressive strength results with their assessment

Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie [MPa]			Kryterium $f_{ck} + 6 \text{ MPa}$	Rozwój wytrzymałości f_{c2}/f_{c28}	
		f_{c2}	f_{c7}	f_{c28}			
CEM I 42,5 SR3/NA	C30/37	20,1	36,4	46,7	spełnione	0,43	umiarkowany
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®		12,8	26,2	52,0	spełnione	0,25	wolny
CEM I 42,5 SR3/NA		20	41,3	51,3	spełnione	0,39	umiarkowany
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®	C35/45	13,6	29,6	55,6	spełnione	0,24	wolny
CEM I 42,5 SR3/NA	C40/50	25,2	47,2	56,9	spełnione	0,44	umiarkowany
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®		38,3	52,8	64,0	spełnione	0,60	szybki
CEM I 42,5 SR3/NA	C50/60	29,7	57,3	67,9	spełnione	0,44	umiarkowany
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®		42,6	63,3	75,5	spełnione	0,56	szybki

wać równoważny czas badania wszystkich cech po **56 dniach** dojrzewania, a CEM III/A 42,5 po **90 dniach** dojrzewania, to zastosowano zastrzone kryteria oceny, badając wszystkie najważniejsze cechy stwardniałego betonu już po **28 dniach** dojrzewania.

Reakcja alkaliczna a ochrona materiałowo-strukturalna

Ochrona materiałowo-strukturalna betonu przeznaczony do konstrukcji w budownictwie infrastrukturalnym, zwłaszcza w aspekcie ryzyka reakcji alkalia-kruszywo



Rys. 2. Odporność betonów na penetrację wody pod ciśnieniem
 Fig. 2. Concrete resistance for water penetration under pressure

Tabela 4. Wyniki oceny struktury napowietrzenia
 Table 4. Results of assessment air microstructure

Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Charakterystyka porów powietrznych wg PN-EN 480-11			
		zawartość mikroporów A_{300}		wskaźnik rozmieszczenia porów L	
		kryterium akceptacji	wynik oznaczenia	kryterium akceptacji	wynik oznaczenia
CEM I 42,5 SR3/NA	C30/37	$A_{300} \geq 1,5\%$	3,61%	$L \leq 0,200 \text{ mm}$	0,102 mm
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®			3,53%		0,111 mm
CEM I 42,5 SR3/NA			3,96%		0,102 mm
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®	C35/45	$A_{300} \geq 1,5\%$	3,97%	$L \leq 0,200 \text{ mm}$	0,111 mm
CEM I 42,5 SR3/NA	C40/50		3,83%		0,125 mm
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®			3,39%		0,129 mm
CEM I 42,5 SR3/NA	C50/60	$A_{300} \geq 1,5\%$	3,93%	$L \leq 0,200 \text{ mm}$	0,108 mm
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®			3,47%		0,135 mm

AAR (z ang. *Alkali-Aggregate Reaction*) została omówiona we wzorcowych ogólnych specyfikacjach technicznych [6 ÷ 8].

W przypadku tego typu obiektów, wpływ oddziaływań środowiskowych na reakcję alkalia-kruszywo jest jednym z kilku czynników zagrażających trwałości konstrukcji z betonu. Interakcje pomiędzy oddziaływaniami mechanicznymi, fizycznymi i chemicznymi, na jakie narażony jest beton w konstrukcji, mogą intensyfikować reakcję AAR, a w efekcie doprowadzić do destrukcji elementu lub całej konstrukcji betonowej. Przeciwdziałaniu ryzyku powstania reakcji alkalicznej poświęcono [15], różniąc

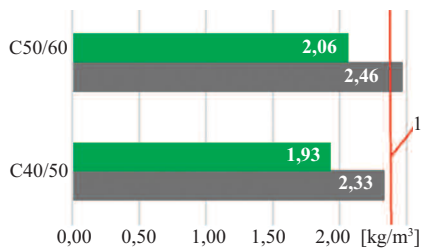
Tabela 5. Wyniki badań i oceny odporności na działanie mrozu

Table 5. Frost resistance results with their assessment

Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Mrozoodporność wewnętrzna F150 wg PN-B 06250:2018-10 – Załącznik N			
		ubytek masy		obniżenie wytrzymałości	
		kryterium akceptacji	wynik oznaczenia	kryterium akceptacji	wynik oznaczenia
CEM I 42,5 SR3/NA	C30/37	nie więcej niż 5%	0,4%	nie więcej niż 20%	7,5%
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®			-0,1%		5,6%
CEM I 42,5 SR3/NA	C35/45		0,3%		4,8%
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Vertua Ultra®			-0,1%		8,4%
CEM I 42,5 SR3/NA	C40/50		0,2%		7,0%
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®			0,0%		7,9%
CEM I 42,5 SR3/NA	C50/60	0,3%	6,4%		
CEM II/A-V 52,5 R-NA Vertua Plus®		0,1%	7,1%		

poziom klasyfikacji zagrożeń w zależności od projektowanego czasu użytkowania i oczekiwanego poziomu niezawodności (klasa obiektu S1 ÷ S4) oraz klasyfikacji środowiska w odniesieniu do możliwości wystąpienia w betonie zagrożenia destrukcyjną reakcją alkalia-kruszywa (kategoria E1 ÷ E3). W przypadku większości elementów konstrukcji mostowych najwyższe wymagania przyjmuje się dla klasy obiektu S4, a dla kategorii oddziaływań środowiskowych agresywności środowiska poziom E3. Wymusza to przy projektowaniu betonu kontrolę zawartości alkaliów pochodzących od składników tworzonego kompozytu, przy założeniu zastosowania kruszywa niereaktywnego kategorii R0 i nieprzekroczeniu poziomu alkaliów $2,4 \text{ kg/m}^3$ wyrażonych zawartością $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w 1 m^3 betonu. Wyeliminowanie możliwości zaistnienia reakcji alkalia-kruszywo wymaga ograniczenia zawartości alkaliów w betonie przez zastosowanie cementów niskoalkalicznych lub dodatków mineralnych [16]. Cementy niskoklinkierowe łączą w sobie te dwie cechy i pomagają jeszcze bardziej zminimalizować ryzyko AAR oraz wpisać się w wymagane maksymalne, dopuszczalne wartości $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie.

W przypadku betonów wyższych klas wytrzymałości (co najmniej C50/60), nawet przy zastosowaniu cementów z grupy CEM I o ograniczonej ilości alkaliów (poniżej 0,6%), uzyskanie zakładanej klasy wytrzymałości i osiągnięcie poziomu alkaliów w betonie poniżej $2,4 \text{ kg/m}^3$ może okazać się trudne (rysunek 3) ze względu na ilość tego spoiwa w 1 m^3 .



Rys. 3. Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonach klas C40/50 oraz C50/60

Fig. 3. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ content in mixes C40/50 and C50/60

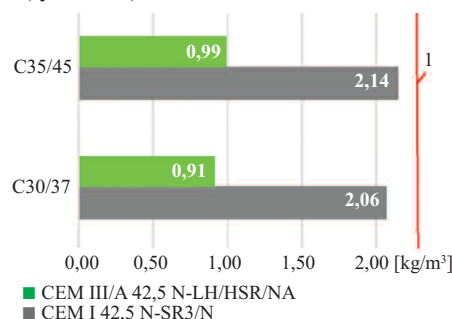
Wyniki analizy potwierdzają sformułowanie w dokumencie [15]:

Z ograniczeń recepturowych na skład betonu wynika, że przy maksymalnej, dopuszczalnej zawartości cementu w mieszance betonowej 450 kg/m^3 oraz typowym współczynniku zmienności ekwiwalentu tlenku sodu w cemencie $V_c = 0,06$, wymaganą zawartość alkaliów można uzyskać:

- poniżej $3,0 \text{ kg/m}^3$ betonu – przez zastosowanie cementu portlandzkiego niskoalkalicznego NA wg PN-B-19707 o zawartości alkaliów $< 0,6\% \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$;
- poniżej $2,4 \text{ kg/m}^3$ betonu – przez zastosowanie cementu portlandzkiego niskoalkalicznego NA wg PN-B-19707 o zawartości alkaliów $< 0,5\% \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$;
- poniżej $1,8 \text{ kg/m}^3$ betonu – przez zastosowanie cementu portlandzkiego niskoalkalicznego NA wg PN-B-19707 o zawartości alkaliów $\leq 0,35\% \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.

Zgodnie z [15] zastosowanie wieloskładnikowych niskoalkalicznych NA cementów specjalnych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego i/lub

mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego o małej zawartości alkaliów całkowitych gwarantuje utrzymanie odpowiedniego poziomu $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie (rysunek 4).



1 – klasa obiektu S4; kategoria oddziaływania środowiskowego E3

Rys. 4. Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonach klas C30/37 oraz C35/45

Fig. 4. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ content in mixes C30/37 and C35/45

W przypadku betonu niższych klas wytrzymałości wartością dodaną zastosowania cementów niskoklinkierowych jest obniżenie poziomu alkaliów w betonie nawet do wartości mniejszej niż $1,0 \text{ kg/m}^3$, co z kolei może otwierać możliwość zastosowania kruszyw kategorii R1 po uprzednim sprawdzeniu kompozycji spoiwa wg metod określonych w [16].

Emisyjność rozwiązań – czy „zielony” beton mostowy jest możliwy?

Narzędziem umożliwiającym weryfikację oddziaływań wyrobów budowlanych na podstawie analizy cyklu ich życia są **deklaracje środowiskowe** (EPD – ang. *Environmental Product Declaration*) **typu III**, opracowane zgodnie z PN-EN 15804 [4, 9]. Dzięki EPD jest możliwe porównanie efektywności środowiskowej wyrobów budowlanych przez wykorzystanie zawartych w nich informacji oraz dokonanie analizy cyklu życia i jego wpływu na konstrukcję. Na zlecenie Stowarzyszenia Producentów Cementu – cementów CEM I ÷ CEM V. Z uwagi na zróżnicowanie procesów technologicznych w poszczególnych zakładach cementowych pojawiły się deklaracje EPD typu III dotyczące konkretnych cementów z poszczególnych zakładów cementowych.

Porównanie wartości śladów węglowych wybranych cementów, w przypadku których zostały opracowane indywidualne EPD typu III, przedstawiono w tabeli 6 [1 ÷ 3].

Informacja o emisyjności cementów pozwala na świadome modelowania emisyjności betonów. Na rysunku 5 porównano wielkość emisji dwutlenku węgla w betonie C30/37 i C35/45 na bazie dwóch cementów CEM I 42,5 N oraz CEM III/A 42,5 N. Emisyjność betonów na bazie cementów niskoklinierowych (niskoemisyjnych) można zredukować o 42 ÷ 47%. Na rysunku 6 porównano wielkość emisji dwutlenku węgla w betonie C40/50 i C50/60

na bazie cementów CEM I 42,5 N oraz CEM II/A 52,5 R-NA. W tym przypadku redukcja CO₂ wynosi 15 ÷ 17%.

Podsumowanie

Zgodnie z raportem Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) z 2015 r. sektor budowlany pochłania ponad 30% światowej produkcji energii, a masa przetwarzanych w nim materiałów to blisko 50% masy wszystkich wykorzystywanych w innych sektorach [5]. Jeżeli dodatkowo weźmiemy pod uwagę, że beton to najpopularniejszy na świecie materiał budowlany wytwarzany przez człowieka, a produkcja cementu w 2019 r. wyniosła aż 4,1 mld t, to zastąpienie ce-

MENT II/A-V 52,5 R-NA, to emisja CO₂ wynikająca tylko z zamiany cementów z obecnie używanych CEM I zostałyby ograniczona o prawie 200 000 t.

Literatura

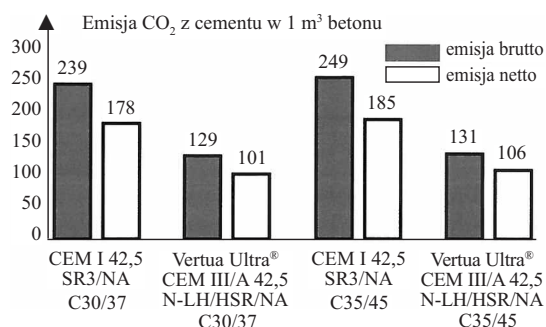
- [1] Deklaracje środowiskowe III typu – Grupa cementów CEM I 42,5 w klasie wytrzymałości 42,5 produkowane w Cemex Polska.
- [2] Deklaracje środowiskowe III typu – VERTUA Plus® CEM II/A-V 52,5 R-NA.
- [3] Deklaracje środowiskowe III typu – VERTUA Ultra® CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA.
- [4] Deklaracje środowiskowe III typu – EPD cementy CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce opracowane przez Instytut Techniki Budowlanej ITB (Piasecki M.) opracowane na zlecenie Stowarzyszenia Producentów Cementu w Polsce – Właściciel Deklaracji Środowiskowej III Typu: Stowarzyszenie Producentów Cementu.
- [5] Energy Efficiency market report 2015, International Energy Agency, Paris 2015.
- [6] GDDKiA Ogólne Specyfikacje Techniczne: Rozdział VIII: Obiekty inżynierskie, Dział 01: Główne elementy konstrukcyjne, 01.01: Beton konstrukcyjny 18.07.2014.
- [7] GDDKiA Ogólna Specyfikacja Techniczna – projekt OST 13.01.00 Beton konstrukcyjny w drogowym obiekcie inżynierskim – Warszawa 2018.
- [8] Ogólna Specyfikacja Techniczna 05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego. 2018, źródło: https://www.gddkia.gov.pl/frontend/web/userfiles/articles/d/dokumenty-techniczne_8162/D-05.03.04.pdf.
- [9] Piasecki Michał. Deklaracje środowiskowe wyrobów budowlanych, typ III (EPD) – PN-EN 15804. Zrównoważone budownictwo (<https://www.itb.pl/zrownowazone-budownictwo1.html>).
- [10] PN-EN 206+A1:2016-16 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [11] PN-B 06265:2018-10. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
- [12] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.
- [13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 1 sierpnia 2019 zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.
- [14] SPC-CEMBUREAU-2050-Roadmap_pl, źródło: <https://www.polskicement.pl/mapa-drogowa-2050>.
- [15] Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach drog i drogowych obiektach inżynierskich, czerwiec 2019, źródło: <https://www.gov.pl/web/gddkia/reaktywnosc-kruszyw>.
- [16] Załącznik 4 – Procedura Badawcza GDDKiA PB/4/18, Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny cementu, dodatków mineralnych i kruszywu według zmodyfikowanej metody ASTM C1567, czerwiec 2019, źródło: <https://www.gov.pl/web/gddkia/reaktywnosc-kruszyw>.

Tabela 6. Wybrane wyniki oceny środowiskowej cementów użytych w badaniach

Table 6. Selected results environmental assessment of cements used in tests

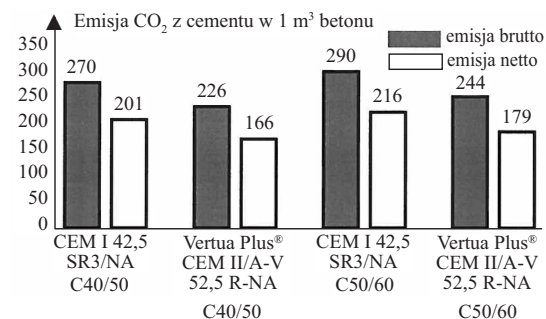
Oddziaływanie środowiskowe	Rodzaj cementu		
	CEM I 42,5 N-SR3/NA	VERTUA Ultra® CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	VERTUA Plus® CEM II/A-V 52,5 R-NA
Wpływ na globalne ocieplenie* [emisja kg CO ₂ /tonę cementu]	694	364	604
Wpływ na globalne ocieplenie** [emisja kg CO ₂ /tonę cementu]	516	295	444

* wartość brutto obejmuje emisję CO₂ pochodzącą ze spalania paliw alternatywnych (odpadowych) z wyłączeniem frakcji biomasy; ** wartość netto nie uwzględnia emisji CO₂ pochodzącej ze spalania paliw alternatywnych (odpadowych)



Rys. 5. Porównanie emisyjności betonów C30/37 i C35/45

Fig. 5. Comparison emission of mixes C30/37 and C35/45



Rys. 6. Porównanie emisyjności betonów C45/50 i C50/60

Fig. 6. Comparison emission of mixes C50/60 and C50/60

mentu CEM I cementem niskoemisyjnym pozwala w aplikacjach betonowych zaoszczędzić ogromną ilość dwutlenku węgla.

Świadomy wybór cementu do betonu innego niż stosowany dotychczas nie musi odbywać się kosztem obniżenia jakości betonu czy trwałości obiektu. Natomiast niejednokrotnie pozwala na uzyskanie rozwiązania bezpieczniejszego i bardziej trwałego oraz bardziej przystosowanego do warunków wykonania i eksploatacji.

Wracając do rządowego projektu 100 obwodnic i przyjmując, że na jedną obwodnicę będzie potrzeba ok. 20 tys. m³ konstrukcyjnego betonu mostowego przy założeniu, że w przypadku klas wytrzymałości do C35/45 stanowiących 70% całkowitej ilości betonu zastosowany zostałby cement CEM III/A 42,5 N, a betonu klasy powyżej C35/45 cement