

# Cementy wieloskładnikowe według projektu nowej normy prPN-EN 197-5 – możliwości aplikacyjne w aspekcie zielonej transformacji sektora cementowego i betonowego na tle doświadczeń niemieckich

## Streszczenie

Ambitny plan nakreślony w Mapie Drogowej 2050 przez CEMBUREAU wymaga wprowadzenia nowych rodzajów cementów i betonów. Istotnym punktem na tej drodze jest publikacja normy PN-EN 197-5, która rozszerza rodzinę cementów powszechnego użytku z PN-EN 197-1 o cementy zawierające większą zawartość nieklinkierowych składników głównych: 36-50% i 51-65% odpowiednio dla CEM II/C-M i CEM VI. Powszechne stosowanie cementów wieloskładnikowych jest ważnym kierunkiem rozwoju sektora cementowego w Polsce i w Europie. Badania i doświadczenia niemieckie pokazują, że cementy CEM II/C-M (S-LL) mogą bez przeszkód być stosowane w budownictwie. Dlatego też w nowym niemieckim projekcie normy DIN 1045-2 (uzupełnienie normy EN 206) wśród cementów znalazł się CEM II/C-M (S-LL) i jest on dopuszczony do stosowania we wszystkich klasach ekspozycji poza XF2, XF3 i XF4. Jednak przeprowadzone przez CEMEX w Niemczech badania odporności na przenikanie chlorków i mrozoodporności betonu z CEM II/C-M (S-LL) przedstawiają, że wyniki dla tego betonu są na zbliżonym poziomie jak dla betonu referencyjnego wykonanego na CEM III/A. Uzyskane wyniki wskazują, że cementy wieloskładnikowe z powodzeniem mogą być stosowane we wszystkich klasach ekspozycji, dlatego tak ważne są kolejne badania i projekty prowadzone w naszym kraju, obejmujące różne kombinacje składu cementu, aby maksymalnie wykorzystać potencjał redukcji CO<sub>2</sub> w cemencie i betonie.

## Słowa kluczowe:

cement wieloskładnikowy, zielony cementy, redukcja CO<sub>2</sub>, dekarbonizacja, trwałość, zrównoważony rozwój, zielony ład

## Abstract

Ambitious plan presented in Road Map 2050 by CEMBUREAU requires the introduction of new types of cements and concretes to the market. An important point on this path is the publication of the PN-EN 197-5 standard, which extends the family of common cements covered by PN-EN 197-1 to cements containing a higher content of non-clinker main constituents: 36-50% and 51-65%, respectively for CEM II/C-M and CEM VI. The widespread use of multi-component cements is an important direction in the development of the cement sector in Poland and Europe. German research and experience show that cement CEM II/C-M (S-LL) can be successfully used in construction. Therefore, the current draft of the German standard DIN 1045-2 (supplement to EN 206) includes CEM II/C-M (S-LL), which can be used in all exposure classes except XF2, XF3 and XF4. However, the results of tests of chloride penetration resistance and freeze-thawing resistance of CEM II / C-M (S-LL) concrete carried out by CEMEX in Germany are similar to the reference concrete made with CEM III/A. The results show that composite cements can be successfully used in all exposure classes, that is why further research and projects in our country, including various combinations of cement composition, are so important – they can maximize the potential of CO<sub>2</sub> reduction in cement and concrete.

## Keywords:

composite cements, green cement, CO<sub>2</sub> reduction, decarbonization, durability, sustainability, green deal

## Wprowadzenie

Nowa norma prPN-EN 197-5 [1], legitymizująca wprowadzenie nowych, bardziej „zielonych” cementów, jest kolejnym krokiem europejskiej branży cementowej realizującej konsekwentnie ambitny plan nakreślony w Mapie Drogowej [2]. Plany wprowadzenia nowej normy cementowej w Polsce są bardzo ambitne. Według informacji zawartej na stronie Polskiego Komitetu Normalizacyjnego planowana data publikacji dokumentu prPN-EN 197-5P Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM [1] w wersji polskiej to 18.04.2022 [3]. To blyskawiczne działanie pozwalające na wprowadzenie bardzo szybko cementów kompozytowych o zredukowanej zawartości klinkieru i szerszym wykorzystaniu składników niskoemisyjnych może być milowym kamieniem na drodze do neutralności klimatycznej branży cementowo-betonowej w Polsce.

## Przemysł cementowy a Zielony Ład

Przemysł cementowy od lat aktywnie poszukuje rozwiązań oraz technologii pozwalających obniżyć

emisje CO<sub>2</sub>. Rozwój technologii produkcji cementu oraz stosowanie paliw alternatywnych jako nośników energii w procesie wypalania klinkieru wprowadziły zakłady cementowe na szybką ścieżkę podążającą w kierunku neutralności klimatycznej. Decyzja o ustanowieniu nowej, dodatkowej normy wprowadzającej do rodziny cementów kolejnych możliwości kompozycji surowcowych jest naturalną konsekwencją transformacji w kierunku dekarbonizacji całych procesów produkcyjnych wykorzystujących cement. Nowa norma to również dokument wzbudzający nowe pomysły i działania proekologiczne, które w pozytywny sposób mogą wpłynąć na możliwości modyfikacji łańcucha wartości 5C (clinker, cement, concrete, construction, carbonation) i to w praktycznie wszystkich punktach.

Według panujących i niestety bardzo chętnie rozpowszechnianych opinii, przemysł cementowy postrzegany jest jako jeden z głównych emitentów CO<sub>2</sub>, któremu przypisuje się nawet 10%-15% udział w całkowitej emisji CO<sub>2</sub> na świecie. Ta bardzo powierzchowna ocena i fałszywa teza stawia zakłady cementowe na równi z nieefektywnymi, małej sprawności elektrowniami na paliwa kopalne oraz energochłonnymi zakładami innych materiałów, gdzie energia do procesu produkcji jest dostarczana w wyniku spalania paliw kopalnych. Faktycznie produkcja cementu na świecie jest odpowiedzialna za około 5% globalnej emisji dwutlenku węgla [4], jednak, co warto podkreślić, w większości nie pochodzi z procesu spalania paliw kopalnych, ale z reakcji termicznego rozkładu węgla wapnia niezbędnego do wytworzenia klinkieru.

Klinkier to podstawowy składnik cementu, który nadaje wszystkim kompozytom z niego wytworzonym wytrzymałość i właściwości trwałościowe. Uzupelnieniem klinkieru w cementach mogą być „dodatki” mineralne stosowane w cementach jako składniki główne i drugorzędne, których zastosowanie modeluje dodatkowe właściwości wykonywanych na ich bazie kompozytów, zwiększając m.in. ich trwałość i odporność na agresywne oddziaływanie środowiskowe. Znaczną część pozaklinkierowych składników głównych stanowią surowce antropogeniczne (z greckiego – minerały wytworzone przez człowieka – *ánthrôpos* – człowiek, *génesis* – pochodzenie) powstałe w procesach spalania węgla (popioły lotne krzemionkowe – V i wapienne – W) lub w wyniku innych procesów produkcyjnych (granulowany żużel wielkopiecowy – S, łupek palony – T, pył krzemionkowy – D). Stosowanie tego typu składników do cementu ma podwójny aspekt środowiskowy: po pierwsze stosowanie surowców antropogenicznych wpisuje się w ideę gospodarki obiegu zamkniętego, a po drugie stwarza duże możliwości obniżenia emisji CO<sub>2</sub> na tonę cementu poprzez obniżenie zawartości klinkieru.

Niestety, przewidywane scenariusze dekarbonizacji procesów wytwarzania energii oraz stali niosą re-

alne zagrożenia dla dostępności tego typu surowców do produkcji cementu. W Europie spodziewane jest zamknięcie elektrowni węglowych do 2030 r., a w Polsce zapowiadana transformacja energetyczna może wydłużyć nieco ten proces do 2045. Jednakże już perspektywa wygaszania najstarszych bloków energetycznych pracujących w Polsce w średniookresowej perspektywie 10-letniej spowoduje drastyczny spadek dostępności popiołów lotnych typu V i W. Modernizacja procesu wytwarzania stali i zastosowania technologii wodorowych czy też coraz bardziej popularnych elektrycznych pieców łukowych ograniczy praktycznie do zera podaż granulowanego żużla wielkopieczowego S, w perspektywie średnioterminowej dla całej Europy.

Drugą grupę pozaklinkierowych składników cementu stanowią składniki pochodzenia naturalnego: kamień wapienny L i LL oraz pucolany naturalne – P i naturalne wypalane – Q. To właśnie te składniki w najbliższych latach będą definiowały powstające cementy i to właśnie na tych dodatkach oparto nowe kompozycje spoiw – zwiększając możliwość ich łączenia z surowcami antropogenicznymi.

#### Krótką charakterystyka „zielonych” zmian w nowej normie prPN-EN 197-5

Nowa norma prPN-EN 197-5 [1] wprowadza dwa nowe rodzaje cementów CEM II/C-M oraz CEM VI w czterech wariantach, jako uzupełnienie rodziny

Tablica 1. Skład cementów wg. PN-EN 197-1 i PN-EN 197-5 (na zielono)

Główne rodzaje	Nazwa wyrobów (rodzaje cementów)		Skład (w procentach masy <sup>a</sup> )										Składniki drugorzędne	
			Składniki główne											
			Klinkier	Żużel wielkopieczowy	Pył krzemionkowy	Pucolana		Popiół lotny		Łupek palony	Wapień			
						naturalna	naturalna wypalana	krzemionkowy	wapienny		T	L <sup>d</sup>		LL <sup>d</sup>
K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>d</sup>	LL <sup>d</sup>					
CEM I	Cement portlandzki	CEM I	95-100											0-5
CEM II	Cement portlandzki żużlowy	CEM II/A-S	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35										0-5
	Cement krzemionkowy	CEM II/A-D	90-94		6-10									0-5
	Cement portlandzki pucolanowy	CEM II/A-P	80-94			6-20								0-5
		CEM II/B-P	65-79			21-35								0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20							0-5
		CEM II/B-Q	65-79				21-35							0-5
	Cement portlandzki popiołowy	CEM II/A-V	80-94					6-20						0-5
		CEM II/B-V	65-79					21-35						0-5
		CEM II/A-W	80-94						6-20	-	-	-		0-5
		CEM II/B-W	65-79						21-35	-	-	-		0-5
	Cement portlandzki łupkowy	CEM II/A-T	80-94							6-20				0-5
		CEM II/B-T	65-79							21-35				0-5
	Cement portlandzki wapienny	CEM II/A-L	80-94									6-20		0-5
		CEM II/B-L	65-79									21-35		0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Cement portlandzki wieloskładnikowy <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	«..... 12-20 .....									0-5		
	CEM II/B-M	65-79	«..... 21-35 .....									0-5		
CEM II	<i>Cement portlandzki wieloskładnikowy</i>	<i>CEM II/C-M</i>	50-64	«..... 36-50 .....									0-5	
CEM III	Cement hutniczy	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cement pucolanowy <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	«..... 11-35 .....				-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	«..... 36-55 .....				-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cement wieloskładnikowy <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	«..... 18-30 .....		-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	«..... 31-49 .....		-	-	-	-	-	-	0-5
CEM VI	Cement wieloskładnikowy	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5

a Wartości w tablicy odnoszą się do sumy składników głównych i drugorzędnych.

b Udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 10% masy.

c W cementach portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A-M i CEM II/B-M, w cementach pucolanowych CEM IV/A i CEM IV/B i w cementach wieloskładnikowych CEM V/A i CEM V/B składniki główne inne niż klinkier należy deklorować poprzez oznaczenie cementu.

d W cementach portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M i w cementach wieloskładnikowych CEM VI (S-P), CEM VI (S-V), CEM VI (S-L), CEM VI (S-LL) udział wapienia (suma L, LL) jest ograniczony do 6-20% masy.

Tablica 2. Zawartość składników głównych dla dwóch skrajnych wariantów wybranych cementów

Rodzaj cementu	Wariant I: minimalna zawartość klinkieru			Wariant II: maksymalna zawartość klinkieru		
	K [%]	S / V / S+V [%]	LL [%]	K [%]	S / V / S+V [%]	LL [%]
CEM II/A-S / CEM II/A-V	80%	20%	-	94%	6%	-
CEM II/B-S / CEM II/B-V	65%	35%	-	79%	21%	-
CEM II/A-L / CEM II/A-LL	80%	-	20%	94%	-	6%
CEM II/B-L / CEM II/B-LL	65%	-	35%	79%	-	21%
CEM II/A-M	80%	14%	6%	88%	6%	6%
CEM II/B-M	65%	29%	6%	79%	6%	15%
CEM II/C-M	50%	44%	6%	64%	16%	20%
CEM III/A	35%	65%	-	64%	36%	-
CEM III/B	20%	80%	-	34%	66%	-
CEM III/C	5%	81%	-	19%	95%	-
CEM IV/A	65%	35%	-	89%	11%	-
CEM IV/B	45%	55%	-	64%	36%	-
CEM V/A	40%	60%	-	64%	36%	-
CEM V/B	20%	80%	-	38%	62%	-
CEM VI (S-V)	35%	65%	-	49%	51%	-
CEM VI (S-LL)	35%	59%	6%	49%	31%	20%

cementów powszechnego użytku w PN-EN 197-1 [5]. Cementy klasyfikowane według tych norm przedstawiono razem w poniższej tablicy 1.

Cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-M i CEM II/B-M, które poza klinkierem (odpowiednio 80-88% i 65-79%) zawierają co najmniej dwa składniki główne spośród: S, D, P, Q, V, W, T, L, LL odpowiednio w przedziałach 12-20% i 21-35%, zostały rozszerzone o kolejną grupę CEM II/C-M, w którym przedział zawartości składników nieklinkierowych wynosi 36-50% (udział wapienia – suma L, LL – jest ograniczony do 6-20% masy). CEM II/C-M wśród wszystkich cementów z rodzaju CEM II wyróżnia się najmniejszą zawartością klinkieru, czyli 50-64%. Cementy z rodzaju CEM VI zawierają 35-49% klinkieru, 31-59% żużla oraz 6-20% wybranego składnika spośród: P, V, L, lub LL.

Zastosowanie w cemencie innych naturalnych lub alternatywnych materiałów lub połączenia kilku różnych ma znaczący wpływ na zmniejszenie stosunku klinkieru do cementu, oznaczając jednocześnie niższą emisję i mniejsze zużycie energii na wytworzoną tonę cementu. Dotychczasowa norma cementowa PN-EN 197-1 pozwoliła na wykorzystanie poten-

cjału i możliwości różnych kompozycji cementów na obniżenie zawartości procentowej klinkieru w cemencie z 91% w roku 1995 do 75% w 2018 [4]. Natomiast norma prPN-EN 197-5 [1] stwarza kolejne możliwości pozwalające podążać drogą redukcji zawartości klinkieru w cemencie i obniżania emisji CO<sub>2</sub>.

W określeniu śladu węglowego cementu należy zwrócić uwagę nie tylko na kompozycję składników głównych, ale także na stosowane dodatki do cementu, regulatory czasu wiązania oraz, co bardzo ważne, także ich transport do zakładu i proces produkcji samego cementu. Jednak dla celów analizy i przybliżenia istotności zawartości poszczególnych składników głównych w cemencie postanowiono rozpatrywać cement jako kompozycję składników głównych. Na podstawie tablicy 1 ustalono dwa warianty dla cementu z każdego rodzaju:

- wariant I o minimalnej zawartości klinkieru i maksymalnej zawartości pozaklinkierowych składników głównych o najniższym śladzie węglowym,
- wariant II o maksymalnej zawartości klinkieru i minimalnej zawartości pozaklinkierowych składników głównych o najniższym śladzie węglowym.

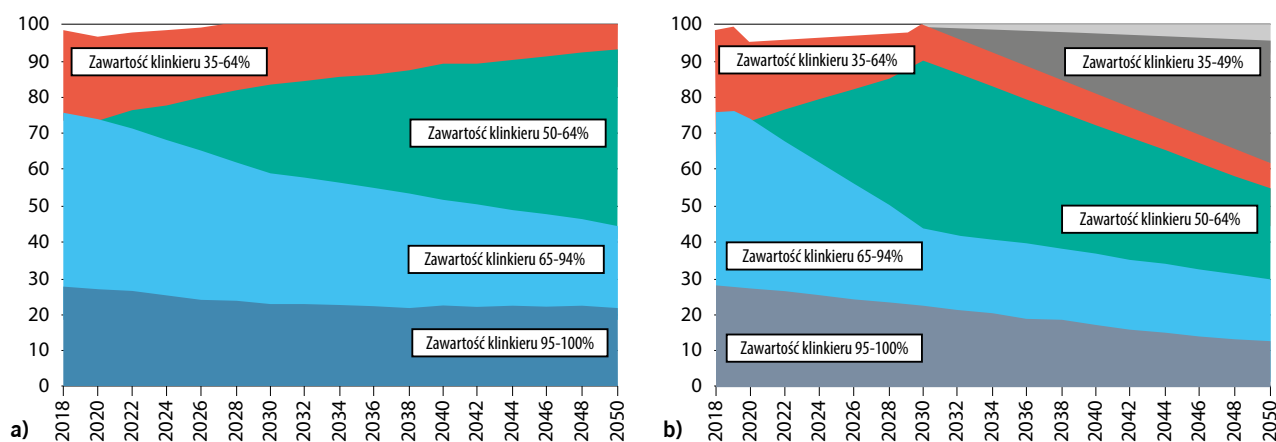
Pozaklinkierowe składniki wybrano z surowców dostępnych i najpowszechniej używanych w Polsce, czyli S, V, L / LL.

Zestawienie przedstawiające powyższe warianty dla wybranych rodzajów cementów przedstawiono w tablicy 2.

Biorąc pod uwagę emisyjność głównych składników cementu przyjętą na podstawie opracowań ITB [6,7] wykonanych dla wszystkich zakładów cementowych w Polsce, autorzy dokonali bardzo szacunkowej kalkulacji emisyjności poszczególnych rodzajów cementów w odniesieniu do cementu portlandzkiego czystego. Analizując możliwe składy cementów z grup CEM II/A i CEM II/B w porównaniu do cementu z grupy CEM I, przy właściwej kompozycji spoiw możliwa jest redukcja emisji CO<sub>2</sub> do 35%, a dla cementów z nowego rodzaju CEM II/C-M do 49%. Cementy z rodzaju CEM VI pozwalają na redukcję w przedziale 51-65%, czyli zbliżoną do redukcji CO<sub>2</sub> zarezerwowanej dotąd dla cementów hutniczych.

Powyższe, nieco uproszczone analizy pokazują jednak, jak istotnym krokiem w stronę realizacji Mapy Drogowej [2] są cementy CEM II/C-M i CEM VI o obniżonej zawartości klinkieru. Możliwość ich

Rysunek 1. Scenariusze zmian portfolio cementowego w Niemczech [8]  
a) ambitny scenariusz  
b) scenariusz – neutralność klimatyczna





# Produkty do betonu:

- Popiół lotny
- Kruszywo TAURONIT B

**Bioeko Grupa TAURON**  
bioeko.tauron.pl

✉ [UPW@tauron.pl](mailto:UPW@tauron.pl)

Tablica 3. Obszary zastosowań cementów CEM II-M z trzema składnikami głównymi do produkcji betonu w poszczególnych klasach ekspozycji – projekt DIN 1045-2 [11]

Klasy ekspozycji X – akceptowalny zakres stosowania O – brak możliwości stosowania			Brak zagrożenia korozją lub agresją	Korozja zbrojenia									Agresja wobec betonu										
				Korozja spowodowana karbonatyzacją					Korozja spowodowana chlorkami				Agresja spowodowana zamrażaniem-rozmrażaniem			Środowiska agresywne chemicznie			Agresja wywołana ścieraniem				
									Woda morska		Chlorki nie pochodzące z wody morskiej												
				X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2
CEM II	A	S-D; S-T; S-LL; D-T; D-LL; T-LL; S-V; V-T; V-LL <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
		S-P; D-P; D-V; P-V; P-T; P-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X	
	B	M	S-D; S-T; D-T; S-V; V-T <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
			S-P; D-P; D-V; P-T; P-V <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X
		C	M	S-LL <sup>1</sup> ; V-LL <sup>1</sup> ; T-LL <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X
				S-LL; D-LL; P-LL; V-LL; T-LL	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
			S-LL <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X		

produkcji zgodnie z obowiązującymi normami, a następnie ich stosowanie w betonie wpisuje się w ideę ograniczania emisji CO<sub>2</sub> i modyfikacji łańcucha wartości 5C.

#### Możliwości aplikacyjne nowych cementów na podstawie doświadczeń niemieckich

Jak już wspomniano wcześniej, planowana publikacja prPN-EN 197-5 [1] w Polsce przez Polski Komitet Normalizacyjny to kwiecień 2022 (wersja polska) [3]. Ze względu na podobną strefę klimatyczną i obecność bardzo podobnych warunków eksploatacyjnych dla betonów ciekawie w kontekście Polski wyglądają doświadczenia niemieckie.

Branża cementowa w Niemczech podąża w ściśle określonym i opisanym kierunku zielonej transformacji, bazując na opracowanym przez VDZ (Verein Deutscher Zementwerke) dokumencie: Dekarbonizacja. Cement i Beton – Ścieżki łagodzenia i strategii działania [8]. W niniejszym dokumencie znalazły się dwa scenariusze zmian w portfolio cementowym na rynku niemieckim – rysunek 1.

Co warto podkreślić, pola zaznaczone jako „zielone” o zawartości klinkieru 50-64% to obszar prezentujący między innymi cementy CEM II/C-M, które według przedstawionych scenariuszy będą miały istotne znaczenie w przyszłości.

W Niemczech publikacja normy DIN EN 197-5 [9] nastąpi w lipcu tego roku [10]. Natomiast cementy z rodzaju CEM II/C-M mogą być produkowane i stosowane przed publikacją tej normy, na podstawie Ogólnej Specyfikacji Technicznej. W tym celu wymagane jest uzyskanie Niemieckiego Znaku Kontrolnego (*German Inspection Mark*).

#### Badania cementów z rodzaju CEM II/C-M – podstawą do zmian w krajowym uzupełnieniu do normy EN 206 – DIN 1045-2 [11]

W Niemczech badania dla cementu CEM II/C-M (S-LL) trwają już od ponad 10 lat, w szczególności w Instytucie Badawczym Przemysłu Cementowego, będącym częścią VDZ (Verein Deutscher Zementwerke – Stowarzyszenie Niemieckich Producentów Cementu). Badania te pozwoliły na zdobycie doświadczenia w zakresie trwałości betonu z cementem CEM II/C-M (S-LL).

Badania, których wyniki przedstawiono w raporcie [12], pokazują, że betony z CEM II/C-M (S-LL) spełniają specyficzne wymagania dla właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu dla elementów wewnętrznych i zewnętrznych. Zakres badań dotyczył także cech trwałościowych betonu związanych z klasami ekspozycji: korozją spowodowaną karbonatyzacją (XC), korozją spowodowaną chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (XD) oraz agresji spowodowanej zamrażaniem/rozmrażaniem przy udziale środków odładzających lub bez ich udziału. W związku z tym aktualny projekt niemieckiej normy dotyczącej betonu DIN 1045-2 [11] przewiduje już stosowanie tego cementu w większości klas ekspozycji (tablica 3). Dlatego te nowe cementy mogą być wkrótce stosowane w wielu konstrukcjach betonowych w Niemczech i tym samym przyczynić się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> w konstrukcjach betonowych.

W projekcie DIN 1045-2 [11] jedynymi klasami ekspozycji, dla których nie można zastosować CEM II/C-M (S-LL), są klasy XF2 (umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odładzającymi) oraz XF3 i XF4 (silne nasycenie wodą bez środków odładzających i ze środkami odładzającymi lub wodą morską). W celu dopuszczenia do stosowania CEM II/C-M do stosowania także w tych klasach, zespół CEMEX z Niemiec wykonał oddzielne badania weryfikujące odporność na zamrażanie i rozmrażanie oraz odładzanie. Dlatego też CEMEX jest pierwszym producentem cementu w Niemczech, który w tym zakresie uzyskał Ogólną Aprobata Techniczną niemieckiego Instytutu Techniki Budowlanej (DIBt).

Podczas projektu prowadzonego w CEMEX w Niemczech mającego na celu opracowanie nowego cementu zbadano odporność na przenikanie chlorków i mrozoodporność betonów z CEM II/C-M (S-LL) 32,5 R z cementowni CEMEX Rüdersdorf. Badania przeprowadzono dla betonu o składzie typowym dla wybranego rodzaju betonu mostowego (tablica 4). Jako cement porównawczy wykorzystano CEM III/A 42,5 N (na). Wyniki dla mieszanki betonowej i wytrzymałości na ściskanie betonu zebrano w tablicy 5.

Ocenę odporności na działanie mrozu z równoczesnym działaniem środka odładzającego (3% roztwór

Tablica 4. Skład betonu wykorzystanego do porównań

Składnik		Ilość
Kruszywo	Piasek 0/2 mm	38%
	Żwir 2/8 mm	25%
	Żwir 8/16 mm	37%
Cement		350 kg/m <sup>3</sup>
Woda		161 kg/m <sup>3</sup>
w/c		0,46
Domieszka napowietrzająca	CEM III/A	0,20 % m.c.
	CEM II/C-M (S-LL)	0,40 % m.c.

NaCl) oparto na wymaganiach Niemieckiego Federalnego Instytutu Inżynierii Wodnej [13] na podstawie badań CDF [14]. Natomiast decydującym parametrem była masa złuszczonego materiału z badanej powierzchni próbki betonowej, która po 28 kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania nie powinna przekraczać 1500 g/m<sup>2</sup> [13]. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2. Oba betony wykazały porównywalną odporność na zamrażanie/rozmrażanie, a przywołane wymaganie zostało spełnione. W przypadku betonu referencyjnego średnia masa złuszczonego materiału to 1126 g/m<sup>2</sup>, natomiast dla betonu z CEM II/C-M (S-LL) to 1013 g/m<sup>2</sup>.

Dodatkowo zmierzono i oceniono wewnętrzne uszkodzenia betonu. W tym celu wyznaczono względny dynamiczny moduł sprężystości, który związany jest z czasem potrzebnym na przejście przez próbkę fali ultradźwiękowej. Czas ten mierzony jest dla próbki przed rozpoczęciem badania odporności na działanie mrozu i po jego zakończeniu. Rosnące uszkodzenia wewnętrzne betonu powodują skrócenie czasu przejścia fali dźwiękowej. Zgodnie z [13] beton uznaje się wystarczająco odporny, jeżeli względny dynamiczny moduł sprężystości po 28 cyklach zamrażania/rozmrażania nie spadnie poniżej 75% wartości początkowej, przed badaniem. Na rysunku 3 przedstawiono względny dynamiczny moduł sprężystości w odniesieniu do wartości początkowej w zależności od liczby cykli rozmrażania/zamrażania dla obu badanych betonów. Po 28 cyklach dla betonu referencyjnego uzyskano średni wynik 97%, natomiast dla betonu z cementem CEM II/C-M (S-LL) – 99%. Dlatego też można stwierdzić, że wymagania w tym zakresie dla obu betonów zostały spełnione.

Oceniono także odporność betonu na penetrację chlorków. Zgodnie z zaleceniami CEN/TC 104 [15], współczynnik migracji chlorków mierzono dla betonu po 35 i 98 dniach w odniesieniu do wymagań w Skandynawii [16]. Tak jak oczekiwano, dla betonu referencyjnego z CEM III/A 42,5 N (na) otrzymano bardzo wysoką odporność na przenikanie chlorków (rysunek 4) ze współczynnikiem migracji  $3,9 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s już po 35 dniach. Dla betonu z CEM II/C-M (S-LL) współczynnik ten był nieznacznie wyższy i wyniósł  $5,8 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, a po 98 dniach spadek do wartości  $3,2 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

### Podsumowanie

Cementy o składzie proponowanym w nowej normie prPN-EN 197-5 [1], czyli cementy CEM II/C-M i CEM VI, to kolejny krok w stronę ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w procesie produkcji cementu oraz oczywiście aplikacji w betonach dla różnych zastosowań. Pozytywne doświadczenia dla cementów z rodzaju CEM II/C-M potwierdzone wieloma ba-

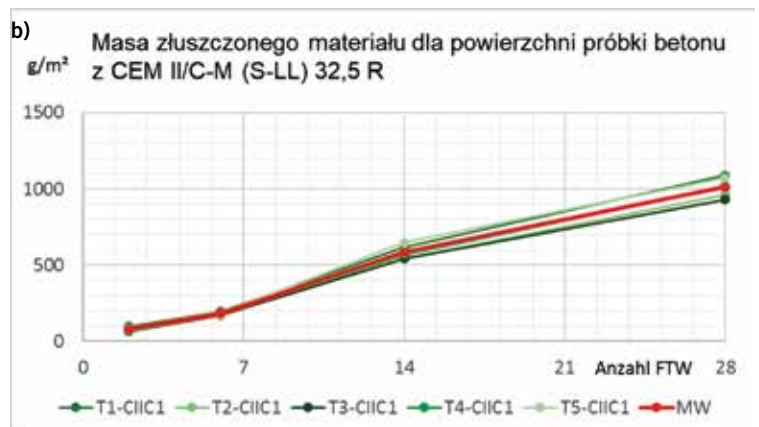
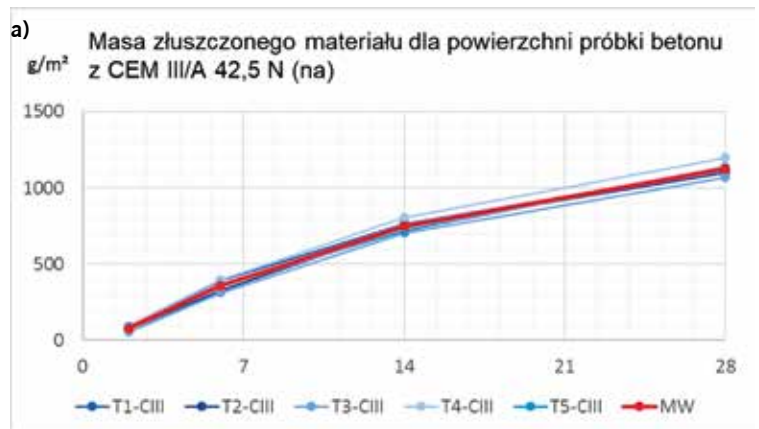
Tablica 5. Właściwości mieszanki betonowej i wytrzymałość na ściskanie betonu

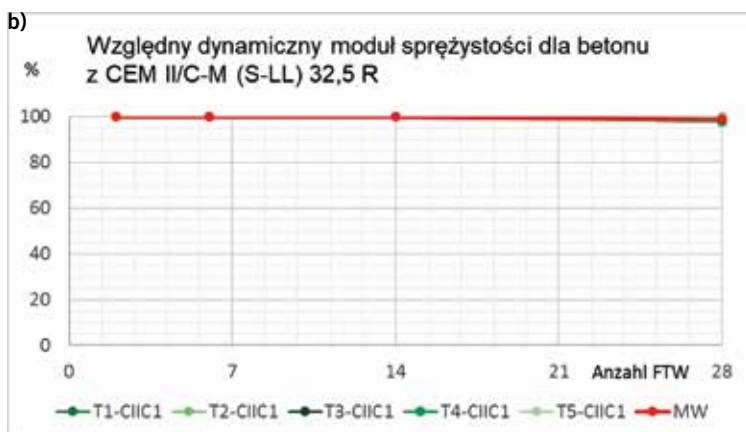
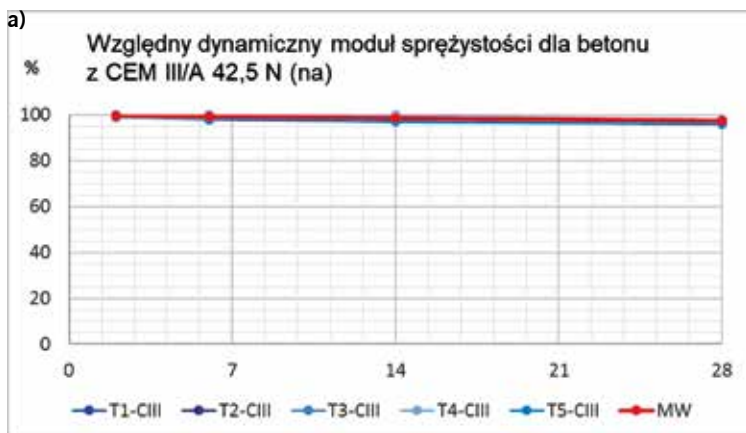
	CEM II/C-M (S-LL) 32,5 R	CEM III/A 42,5 N (na)
Zawartość powietrza (%)	5,9	6,2
Rozptyw a <sub>0</sub> (mm) wg EN 12350-5	400	410
Wytrzymałość na ściskanie f <sub>28d</sub> (MPa)	36,9	42,5
Wytrzymałość na ściskanie f <sub>56d</sub> (MPa)	41,6	46,8

daniami prowadzonymi przez naszych niemieckich sąsiadów wskazują, że ten kierunek rozwoju portfolio cementowego jest właściwy, a wprowadzenie nowych cementów powinno być poparte szeregiem badań trwałościowych, dzięki którym można rozszerzać możliwości aplikacji.

Cementy, w których część klinkieru zastąpiono składnikami naturalnymi lub antropogenicznymi, mogą zyskać szereg zalet, np. rozwój wytrzymałości w późniejszym okresie dojrzewania betonu, obniżone ciepło hydratacji, wydłużony czas wiązania, zwiększoną odporność na korozyjne oddziaływanie mediów agresywnych chemicznie, minimalizację ryzyka reaktywności alkalicznej kruszyw w betonie. Dodatkowo, a czasem unikalne właściwości betonów wykonanych na cementach niskoklinkierowych powinny być czynnikiem wzbudzającym większe zainteresowanie tego typu kompozycjami, tym bardziej że każdy z dodatkowych składników cementów kompozytowych pozwala modelować właściwości betonu w innym profilu cech, umożliwiając rozszerzenie obszaru zastosowań. Należy jednak zwrócić uwagę, że rozpowszechnienie stosowania cementów z rodzaju CEM II/C-M i CEM VI będzie

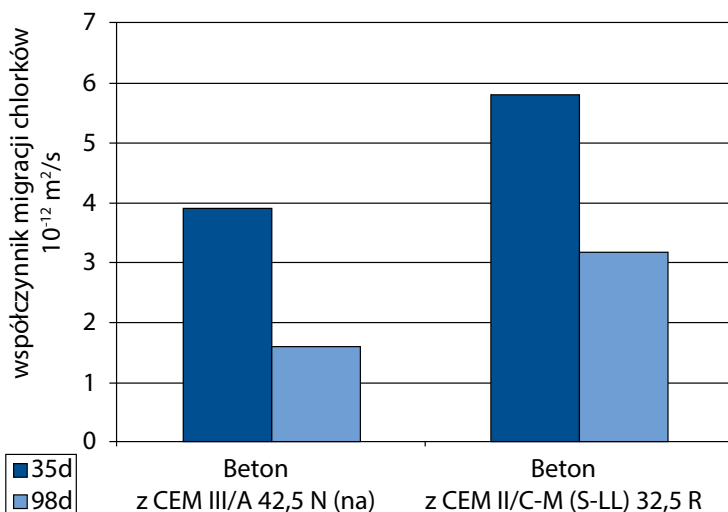
Rysunek 2. Wyniki badań odporności na zamrażanie/rozmrażanie przy udziale środków odladzających – badanie CDF, masa złuszczonego materiału na jednostkę powierzchni a) wyniki mrozoodporności powierzchniowej dla CEM III/A b) wyniki mrozoodporności powierzchniowej dla CEM II/C-M (S-LL)





Rysunek 3. Wyniki badań odporności na zamrażanie/rozmarzanie przy udziale środków odladzających – badanie CDF, względny dynamiczny moduł sprężystości  
a) względny dynamiczny moduł sprężystości dla CEM III/A  
b) względny dynamiczny moduł sprężystości dla CEM II/C-M (S-LL)

Rysunek 4. Wyniki badań odporności betonu na penetrację chlorków



w istotny sposób uzależnione od nowelizacji szeregu norm i dokumentów technicznych funkcjonujących na rynku polskim, począwszy od krajowego uzupełnienia do normy PN-EN 206 [17], poprzez grupę norm na mieszanki związane hydraulicznie PN-EN 14227 (nie zapominając o wciąż funkcjonującej normie PN-S 96012), na specyfikach technicznych dla obiektów drogowych i mostowych oraz innych wytycznych technicznych (np. TBW, posadzki, podkłady podłogowe itp.) kończąc.

Zmiany powinny następować bardzo dynamicznie, aby wykorzystać maksymalnie potencjał redukcji emisji CO<sub>2</sub> poprzez ograniczenie zawartości klinkieru, jakie podsuwa nam prPN-EN 197-5. Można skorzystać z części doświadczeń niemieckich, ale wprowadzić również mechanizm pozwalający wspólnie z renomowanymi jednostkami naukowymi

mi i badawczymi przeprowadzić projekty rozwojowe, uwzględniając unikalne dla rynku polskiego kombinacje składników mogące współistnieć w nowych cementach wieloskładnikowych.

**Piotr Górak, Marta Szklarzyńska**  
**CEMEX Polska Sp. z o.o.**  
**Peter Lyhs, Katrin Bollmann, Patrick Fontana**  
**CEMEX Deutschland AG**

Literatura:

1. prPN-EN 197-5P - Cement - Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI
2. SPC-CEMBUREAU-2050-Roadmap\_pl (<https://www.polskicement.pl/mapa-drogowa-2050>)
3. <https://pzn.pkn.pl/tc/#/work-program>
4. Środa B. – Nowa norma 197-5 krokiem w kierunku dekarbonizacji – Beton, Technologie, Architektura 2(94)/2021
5. PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
6. Piasecki M., Deklaracje środowiskowe wyrobów budowlanych, typ III (EPD) – norma PN-EN 15804. Zrównoważone budownictwo (<https://www.itb.pl/zrownowazone-budownictwo1.html>)
7. 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 Stowarzyszenie Producentów Cementu w Polsce – Właściciel Deklaracji Środowiskowej III Typu: Stowarzyszenie Producentów Cementu
8. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungsprofile und Handlungsstrategie, VDZ 2020 (<https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/dekarbonisierung-von-zement-und-beton-minderungsprofile-und-handlungsstrategien>)
9. <https://www.beuth.de/en/standard/din-en-197-5/330656072>
10. DIN EN 197-5:2021-07: Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche Fassung EN 197-5:2021
11. Concrete in accordance with DIN EN 206-1 and DIN 1045-2 with recycled aggregates in accordance with DIN EN 12620, February 2020 draft
12. C. Müller, S. Palm, W. Hermerschmidt: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen. Cement International (18) 05/2020, 52-62
13. Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012
14. DIN CEN/TS 12390-9 – 2017-05 Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost – und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016
15. DIN CEN/TR 16563:2014-04; DIN SPEC 18097:2014-04, DIN SPEC 18097:2014-04, Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit; Englische Fassung CEN/TR 16563:2013
16. NT Build 492 11.99. Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments
17. PN-B 06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12