

dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRz¹⁾

ORCID: 0000-0001-5312-8866

dr inż. Piotr Górak^{2)*}

ORCID: 0000-0003-3479-7647

dr hab. inż. Artur Łagosz, prof. AGH³⁾

ORCID: 0000-0002-4401-5760

Praktyczne zastosowanie koncepcji równoważnych właściwości użytkowych betonu

Practical application of the concept of equivalent concrete performance

DOI: 10.15199/33.2024.06.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób oceny równoważnych właściwości użytkowych betonów przeznaczonych do stosowania w klasach ekspozycji XC2 lub XC4, wykonanych na bazie nowo wprowadzonego na rynek cementu CEM II/C-M (W-LL) 32,5R. Do oceny wykorzystano wytyczne wskazane w raporcie technicznym CEN/TR 16639. W obecnej sytuacji prawnej użycie cementu CEM II/C m.in. do betonów klasy ekspozycji XC4 jest możliwe w świetle normy PN-B-06265:2022-08 jedynie po potwierdzeniu przydatności w drodze analizy równoważnych właściwości użytkowych wynikających z charakteru warunków eksploatacyjnych. Istota weryfikacji za pomocą równoważnych właściwości użytkowych betonu polega na porównaniu właściwości betonu referencyjnego rekomendowanego do zastosowania w danej klasie ekspozycji z właściwościami betonu testowego, zawierającego oceniany cement. Jako referencyjne przyjęto betony wykonane na cemencie CEM II/B-V 32,5R spełniające minimalne kryteria składu w przypadku klas ekspozycji XC2 lub XC4, a analizowane były betony wykonane na cemencie CEM II/C-M (W-LL) 32,5R.

Słowa kluczowe: beton; cement; równoważne właściwości użytkowe betonu; niskoklinkierowe cementy portlandzkie CEM II/C; trwałość betonu.

Abstract. The paper presents a method of assessing the equivalent performance properties of concretes intended for use in exposure classes XC2 or XC4, made based on the relatively newly introduced CEM II/C-M (W-LL) 32.5R cement. The guidelines indicated in the technical report CEN/TR 16639 were used for the assessment of equivalent properties of both concretes. In the current legal situation, the use of CEM II/C cement, among others, for concrete of exposure class XC4, is possible of the PN-B-06265:2022-08 standard only after confirming its suitability by analyzing equivalent performance properties resulting from nature of the operating conditions. The essence of verification using equivalent performance properties of concrete is based on the comparison of the properties of reference concrete based on the solution recommended for use in a given exposure class to the properties of test concrete based on a new cement solution in terms of the assumed characteristics appropriate for the designed applications. The project included reference concretes made using CEM II/B-V 32.5R cement meeting the minimum composition criteria for exposure classes XC2 or XC4, and the tested concretes were concretes made using CEM II/C-M (W-LL) 32.5R cement.

Keywords: concrete; cement; equivalent concrete performance; low-clinker Portland composite CEM II/C; durability of concrete.

Ostatnie lata w przemyśle cementowym to okres intensywnych poszukiwań rozwiązań zmniejszających emisję CO₂. Napędzają je dwa czynniki – ekologiczny i ekonomiczny. Ten pierwszy wynika z przyjętej na poziomie europejskim polityki ograniczającej negatywny wpływ gazów cieplarnianych na fatalne w skutkach zmiany klimatyczne, natomiast drugi z galopującego wzrostu kosztów uprawnień do emisji CO₂. Podstawowym efektem działania branży cementowej, który bezpośrednio wpływa na odbiorcę wyrobów, jest stałe zmniejszanie oferty cementów wysokoklinkierowych CEM I. Zastępuje się je w coraz większym stopniu cementami „niskoemisyjnymi” z dużą zawartością nieklinkierowych składników głównych. Rozwiązania te, oprócz oczywistego efektu ekologicznego, niosą za sobą nowe wyzwania związane z zapewnieniem oczekiwanych właściwości betonu, m.in. technologicznych, wytrzymałości oraz trwałości [1].

Z punktu widzenia producenta betonu, który musi zapewnić zdefiniowane przez zamawiającego właściwości użytkowe (narzucone przez projektanta konstrukcji), bogata oferta rynkowa różnych rodzajów cementu nie oznacza bynajmniej możliwości użycia każdego z nich, w każdym zamierzonym zastosowaniu. Dotyczy to przede wszystkim odporności betonu na przewidywane oddziaływanie środowiska, w którym będzie pracował, czyli klas ekspozycji określonych normami PN-EN 206 [2] i PN-B-06265 [3]. Ograniczenia zawiera rozdz. 5.1.1 normy PN-EN 206, który dopuszcza do stosowania w betonie wyłącznie składniki o ustalonej przydatności do konkretnego założonego zastosowania betonu. Ogólną przydatność cementu określają normy PN-EN 197-1 [4], PN-EN 14216 [5] oraz PN-EN 197-5 [6], ale jednoznacznie wynika z nich, że ustalona ogólna przydatność składnika nie oznacza jego przydatności w przypadku dowolnego założonego zastosowania betonu i dowolnego składu betonu. W związku z tym PN-EN 206 w rozdz. 5.2.2 zaleca, aby wziąć pod uwagę:

- realizację robót;
- przeznaczenie betonu;
- warunki pielęgnacji (np. obróbka cieplna);

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

²⁾ CEMEX Polska Sp. z o.o.

³⁾ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

* Adres do korespondencji: piotr.gorak@cemex.com

- warunki środowiska, na działanie którego będzie narażona konstrukcja (klasy ekspozycji XC, XD, XS, XF, XA);
- potencjalną reaktywność kruszywa z alkaliami zawartymi w składnikach.

Ze względu na konieczność zapewnienia przewidywanej w projekcie trwałości konstrukcji, w załączniku F (w tablicach F2, F3 i F4) do krajowego uzupełnienia PN-B-06265:2022-08 [3], określono obszary zastosowania cementów w poszczególnych klasach ekspozycji:

- tablica F2 zawiera cementy zgodne z PN-EN 197-1 [4] lub PN-B-19707 [7] lub PN-EN 197-5 [6];

- tablica F3 zawiera cementy CEM II-A,B,C-M zgodne z PN-EN 197-1 [4] lub PN-B-19707 [7] lub PN-EN 197-5 [6];

- tablica F4 zawiera cementy zgodne z PN-EN 14216 [5].

Literą „X” oznaczono akceptowalny zakres stosowania w danej klasie ekspozycji, a literą „O” wymaganie potwierdzenia przydatności cementu w danej klasie ekspozycji. Kryterium takiego podziału cementów jest efektem dotychczasowych długoletnich doświadczeń lub ich braku w stosowaniu w poszczególnych klasach ekspozycji. Cement CEM I jest bezspornie odporny na wszystkie rodzaje oddziaływań środowiska, natomiast im większa zawartość składników głównych innych niż klinkier i/lub większa liczba ich kombinacji, tym większe są ograniczenia. Warto zwrócić uwagę na ich charakter. W poprzedniej wersji krajowego uzupełnienia PN-B 06265:2018-10 [8] litera „O” w tablicach załącznika F oznaczała *brak możliwości stosowania*, natomiast w przypadku [3] *wymaga potwierdzenia przydatności*. Rezygnacja z kategorycznego wykluczenia użycia pewnych cementów w określonych klasach ekspozycji oznacza w zasadzie możliwość zastosowania każdego cementu w każdych warunkach środowiskowych, pod warunkiem potwierdzenia ich przydatności zgodnie z procedurami normowymi – np. metodami równoważnych właściwości betonu. Logika takiego podejścia wynika z faktu, że oznaczenie w tablicach cementu literą „O” nie wynika z ewidentnie złych doświadczeń użycia go w danym środowisku, a raczej z braku wystarczających ogólnych pozytywnych dowodów potwierdzających wymaganą trwałość betonu. W takim przypadku konieczne jest indywidualne potwierdzenie wymagań konkretnej receptury betonu, a obowiązek ten spoczywa na producencie betonu projektowanego lub właścicielu receptury (np. wykonawcy robót, inwestorze, dostawcy surowców itp.).

Wraz z rozszerzaniem asortymentu rynkowego nowych rodzajów cementów pojawia się wiele publikacji przedstawiających wyniki badań ich wpływu na trwałość betonu [9]. Rozszerzają one wiedzę ogólną o nowych produktach, ale nie zwalniają producenta betonu z obowiązku przeprowadzenia dowodu w badaniach wstępnych o równoważnych właściwościach użytkowych betonu, w przypadku gdy wskazują na to ograniczenia normowe.

W artykule przedstawiono analizę możliwości przeprowadzenia takiego dowodu wg propozycji przedstawionej w normie PN-EN 206 [2]. Wykorzystano wyniki programu badawczego dotyczącego nowych możliwości zastosowania cementów z grupy CEM II/C-M [10].

Metody oceny równoważnych właściwości betonu

Sposobem na akceptację danego cementu w zamierzonym zastosowaniu (przewidywanej klasie ekspozycji XC, XS, XD, XA, XF, XM), w przypadku którego zapisy normowe (tablice F2, F3 i F4 w załączniku F normy PN-B 06265 [3]) wymagają potwierdzenia przydatności, jest wykorzystanie zalecenia sformułowanego w uwadze nr 1 do przywołanych tablic – *Cementy, których stosowania nie przewidziano w danych klasach ekspozycji (...) mogą być zastosowane po potwierdzeniu możliwości ich stosowania za pomocą metod powiązanych z oceną i porównaniem właściwości użytkowych (pkt 5.2.5.3 lub 5.2.5.4 PN-EN 206+A2:2021-08)*. W rozdziałach tych norma PN-EN 206 [2] oraz jej krajowe uzupełnienie PN-B 06265 [3], podają ogólne zasady koncepcji dwóch proponowanych metod, natomiast w celu pozyskania bardziej szczegółowych informacji odsyłają do dokumentu technicznego CEN/TR 16639 [11].

Zasady koncepcji równoważnych właściwości użytkowych betonu (ECPC – *equivalent concrete performance concept*) w przypadku zastosowania specjalnych dodatków i specjalnych cementów, których pochodzenie oraz charakterystyki są dokładnie określone i udokumentowane, dopuszczają zmianę wymagań dotyczących:

- minimalnej zawartości cementu;
- maksymalnego współczynnika woda/cement.

Wówczas należy sprawdzić, czy właściwości użytkowe betonu, przede wszystkim związane z odpornością na oddziaływanie środowiska, są równoważne właściwościom betonu referencyjnego, zgodnie z wymaganiami dotyczącymi danej klasy ekspozycji. Koncepcję należy stosować wyłącznie w przypadku użycia cementów zgodnych z PN-EN 197-1 lub PN-EN 197-5, wraz z dodatkami.

Z kolei zasady koncepcji kombinacji równoważnych właściwości użytkowych (EPCC – *equivalent performance of combinations concept*) dopuszczają określony zestaw kombinacji cementu zgodnego z PN-EN 197-1 lub PN-EN 197-5 oraz dodatku (lub dodatków) o ustalonej przydatności, które w całości mogą być uwzględnione w wymaganiach betonu dotyczących:

- maksymalnego współczynnika woda/cement;
- minimalnej zawartości cementu.

Metoda postępowania obejmuje trzy zasadnicze elementy:

- identyfikację rodzaju cementu, zgodnego z normą europejską i mającego taki sam skład lub podobny jak założona kombinacja;
- ocenę, czy betony zawierające taką kombinację mają zbliżoną wytrzymałość i trwałość, z uwzględnieniem określonej klasy ekspozycji, jak betony zawierające zidentyfikowany rodzaj cementu;
- wprowadzenie kontroli produkcji, która zapewni określenie i wdrożenie tych wymagań w przypadku betonów zawierających odpowiednią kombinację.

Z opisanych w normie zasad koncepcji równoważnych właściwości użytkowych ECPC oraz kombinacji równoważnych właściwości użytkowych EPCC wynika, że samo potwierdzenie tej „równoważności” nie polega bynajmniej na werbalnym

stwierdzeniu „podobieństwa” ocenianego zestawu materiałowego w danej recepturze betonu w odniesieniu do przyjętego wzorca, jako spełniającego wymagania wytrzymałości i trwałości. Potrzebne są konkretne materialne dowody wynikające z analiz teoretycznych i wyników badań, w przypadku których ocena zgodności z kryteriami uwiarygodniona jest analizą statystyczną. Pozyskaniu takich dowodów służy dokument techniczny CEN/TR 16639 [11], w którym podane są zasady i metody postępowania oraz przykłady wynikające z dotychczasowej praktyki stosowanej w niektórych krajach europejskich. Obszernie omówiono w nim również zasady koncepcji współczynnika k , wraz ze sposobem wyznaczania go w konkretnym zestawie materiałowym danej receptury, co może być przydatne w analizowanym przypadku kombinacji cement-dodatek, a to z kolei jest potrzebne w użyciu koncepcji kombinacji równoważnych właściwości użytkowych (EPCC).

Obecnie w sytuacji wprowadzania do produkcji coraz większej liczby różnych rodzajów cementów wieloskładnikowych, zasady koncepcji ECPC oraz EPCC będą często używanym narzędziem, umożliwiającym akceptację danego cementu do zastosowania w klasie ekspozycji, w przypadku której wymagane jest potwierdzenie jego przydatności. Warto zwrócić uwagę na jeszcze dwa aspekty korzystania z koncepcji równoważnych właściwości użytkowych. W obu metodach maksymalny współczynnik woda/cement oraz minimalna zawartość cementu mogą zostać skorygowane, ale tylko w odniesieniu do wartości granicznych składu betonu określonych w tablicach F.1 w normach PN-EN 206 oraz PN-B-06265. Zwraca się uwagę, że dotyczą one przypadków użycia cementów zgodnych z PN-EN 197-1 lub PN-EN 197-5, oraz dodatku (lub dodatków) o ustalonej przydatności (czyli popiołu lotnego zgodnego z PN-EN 450-1 [12], pyłu krzemionkowego klasy 1 zgodnego z PN-EN 13263-1 [13], mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego zgodnego z PN-EN 15167-1 [14], ewentualnie kruszyw wypełniających (np. mączki wapiennej) zgodnych z PN-EN 12620 [15]). Nie można tego ograniczenia traktować ogólnie, a tylko w kontekście betonów zgodnych z normami PN-EN 206 oraz PN-B-06265. W przypadku cementów lub dodatków, których przydatność ustalano na podstawie np. Europejskich lub Krajowych Ocen Technicznych, należy przewidzieć w obecnym systemie prawnym wprowadzenie betonu o takim składzie jako jednostkowe zastosowanie wyrobu budowlanego, i oczywiście nie można wystawić Krajowej Deklaracji Właściwości Użytkowych w odniesieniu do kompletu normowego PN-EN 206 oraz PN-B-06265.

Właściwości porównywanych cementów

Z obszernego programu badań trzech cementów z grupy CEM II/C-M odniesionych do cementu CEM II/B-V [10], do analizy równoważnych właściwości użytkowych betonu wybrano wyniki cementu CEM II/C-M (W-LL) 32,5R. Podstawowe właściwości porównywanych cementów zaprezentowano w tabeli 1, natomiast możliwe obszary ich zastosowania do betonu w zależności od środowiska użytkowania (PN-B-06265 [3] – tablica F1 dla CEM II/B-V i tablica F2 dla

CEM II/C-M (W-LL)) w tabeli 2. **Widoczne ograniczenia normowe skłaniają do próby odpowiedzi na pytanie, czy realnie jest rozszerzenie możliwości aplikacji cementu CEM II/C-M (W-LL) i czy dotychczas wykonane badania są wystarczające w tym celu [2].**

W przyjętym programie badań [10] receptury mieszanki betonowej do danej klasy ekspozycji XC2 lub XC4 zostały skomponowane z uwzględnieniem maksymalnego wskaźnika w/c oraz minimalnej zawartości cementu (tabela 3). W przypadku danej klasy ekspozycji skład obu betonów (z cementem CEM II/C-M i z cementem CEM II/B-V) był zatem iden-

Tabela 1. Podstawowe właściwości porównywanych cementów
Table 1. Basic properties of the compared cements

Właściwość	Rodzaj cementu	
	CEM II/C-M (W-LL) 32,5R	CEM II/B-V 32,5R (cement odniesienia)
Początek wiązania [min]	330	220
Koniec wiązania [min]	390	280
Wodozadność [%]	29,2	31,0
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	5230	4330
Wytrzymałość na ściskanie:		
po 2 dniach [MPa]	14,1	16,7
po 28 dniach [MPa]	43,5	40,2
Zawartość klinkieru (K) [%]	50 – 64	65 – 79

Tabela 2. Obszary zastosowania porównywanych cementów wg PN-B-06265 [3]

Table 2. Scopes of use of compared cements according to PN-B-06265 [3]

Rodzaj cementu	Oddziaływanie korozyjne					
	XC	XS	XD	XF	XA	XM
CEM II/B-V	XC1 do XC4	XS1- XS3	XD1- XD3	XF1- XF2	XA1- XA3	XM1- XM3
CEM II/C-M (W-LL)	XC1 do XC2	o	o	o	o	o

tyczny. Mógł się jedynie nieco różnić ilością dodawanej domieszki upłynniającej, która miała zapewnić uzyskanie takiej samej konsystencji. Przy tak zrealizowanym programie badań,

Tabela 3. Zalecane wartości graniczne dotyczące składu betonów wg PN-B-06265 [3]

Table 3. Recommended limit values for the composition of concrete according to PN-B-06265 [3]

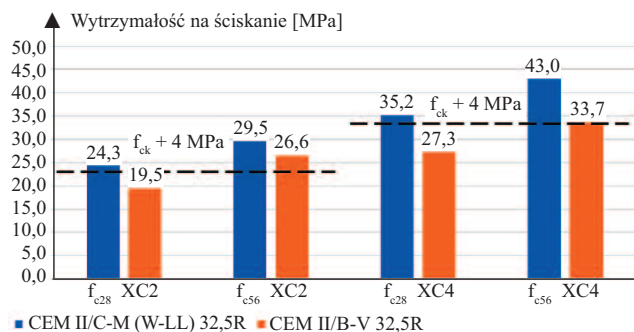
Klasa ekspozycji	Minimalna klasa wytrzymałości	Maksymalny wskaźnik w/c	Minimalna zawartość cementu [kg/m ³]
XC2	C16/20	0,65	280
XC4	C25/30	0,55	300

Łąco, jaki sobie postawiono, został w pełni zrealizowany. Łąco można było bowiem odpowiedzieć na pytanie, czy nowo oferowany cement CEM II/C-M jest „lepszy” czy „gorszy” od dobrze już znanego i powszechnie stosowanego na rynku cementu CEM II/B-V.

Wyniki badania wytrzymałości betonów na ściskanie (tabela 4, rysunek 1) wskazują wyraźnie, że te z cementem CEM II/C-M (W-LL) osiągają większe wartości po 7, 28 i 56

Tabela 4. Wyniki wytrzymałości na ściskanie badanych betonów
Table 4. Compressive strength of the tested concretes

Klasa ekspozycji	Klasa wytrzymałości	Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
			f_{c2}	f_{c7}	f_{c28}	f_{c56}
XC2	C16/20	CEM II/C-M (W-LL) 32,5R	5,1	13,6	24,3	29,5
XC2	C16/20	CEM II/B-V 32,5R	6,6	11,4	19,5	26,6
XC4	C25/30	CEM II/C-M (W-LL) 32,5R	8,9	21,3	35,2	43,0
XC4	C25/30	CEM II/B-V 32,5R	9,3	17,9	27,3	33,7



Rys. 1. Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 i 56 dniach dojrzewania

Fig. 1. Comparison compressive strength of concretes after 28 and 56 days of curing

dniach dojrzewania niż te z cementem referencyjnym CEM II/B-V. Odwrotnie jest tylko w przypadku wytrzymałości dwudniowej, ale to oznacza, że w początkowej fazie dojrzewania wolniej zachodzą procesy hydratacji. Fakt ten nie może jednak dyskwalifikować, gdyż dwudniowa wytrzymałość betonu nie podlega ocenie zgodności, a wpływa jedynie na warunki technologiczne wykonania konstrukcji, tj. usunięcie deskowania lub podpór, obciążenie konstrukcji, czas pielęgnacji. Pozostałe charakterystyki opisujące rozwój wytrzymałości w czasie, zwłaszcza wytrzymałość 28-dniową i 56-dniową, jako związane z przyporządkowaniem betonu do odpowiedniej klasy, zdecydowanie wskazują cement CEM II/C-M (W-LL) jako lepszy od CEM II/B-V.

Problemem w analizie wyników zrealizowanego programu badań pozostaje fakt, że jego bazowym założeniem było uzyskanie przez beton wzorcowy klasy C16/20 w klasie ekspozycji XC2 oraz odpowiednio C25/30 w klasie ekspozycji XC4. Tymczasem nie uzyskano wystarczających wartości wytrzymałości w przypadku przyjętych składów betonu (maksymalnej wartości w/c i minimalnej ilości cementu w odpowiednich klasach ekspozycji), aby można było je zakwalifikować do wymaganych klas po 28 dniach dojrzewania (tabela 5). W przypadku 56-dniowej wytrzymałości beton wzorcowy spełnia kryteria wymaganej klasy C16/20 w klasie ekspozycji XC2, natomiast nie spełnia warunku C25/30 w klasie ekspozycji XC4 (tabela 5). Gdyby program badawczy został rozszerzony o badania i ocenę 90-dniowej wytrzymałości, przy znanych tendencjach rozwoju wytrzymałości betonów z cementami zawierającymi popiół lotny krzemionkowy, beton o założonym składzie na pewno osiągnąłby wytrzymałość średnią, pozwalającą na spełnienie kryterium klasy C25/30, wymaganą w klasie ekspozycji XC4. Jeżeli jednak brakuje wyniku badania po 90 dniach dojrzewania, to nie można uznać

Tabela 5. Ocena wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 i 56 dniach w odniesieniu do minimalnych klas wytrzymałości na ściskanie właściwych dla poszczególnych klas ekspozycji wg PN-B 06265

Table 5. Assessment of the compressive strength of concrete after 28 and 56 days in relation to the minimum compressive strength classes appropriate for individual exposure classes according to PN-B 06265

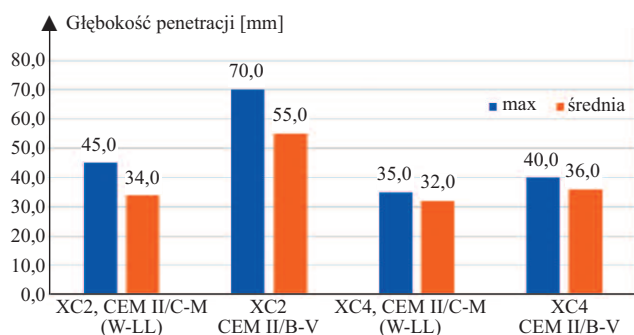
Klasa ekspozycji	Minimalna klasa wytrzymałości	Ocena wytrzymałości na ściskanie betonu z:	
		CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	CEM II/B-V 32,5 R
po 28 dniach dojrzewania:			
XC2	C16/20	TAK	NIE
XC4	C25/30	TAK	NIE
po 56 dniach dojrzewania:			
XC2	C16/20	TAK	TAK
XC4	C25/30	TAK	NIE

analiz teoretycznych za wystarczający dowód spełnienia kryteriów akceptacji wymaganej klasy betonu. Inaczej jest w przypadku betonu z cementem CEM II/C-M (W-LL), który spełnia kryteria klasy wytrzymałości już po 28 dniach dojrzewania w obu klasach ekspozycji.

Porównanie efektywności nowego produktu w odniesieniu do uzyskiwanej wytrzymałości wykazało, że zrealizowany zakres badań potwierdza jedynie trend, natomiast nie jest wystarczający do oceny równoważnych właściwości użytkowych. Jest natomiast wystarczający jako badanie wstępne analizowanych składów betonu. Receptury, w przypadku których uzyskuje się parametry wytrzymałościowe później niż po upływie 28 dni, wymagają redefiniowania terminu uzyskania klasy (56 lub 90 dni) z pełnymi tego konsekwencjami, tzn. informacją dla odbiorcy betonu, który musi przewidzieć sposób postępowania podczas pielęgnacji betonu w czasie dojrzewania oraz możliwościami rozdeskowywania czy obciążania wykonanej konstrukcji (informacja o równoważnym czasie oceny wytrzymałości powinna się znaleźć na dokumentach sprzedażowych i technicznych). Drugim sposobem na rozwiązanie tego problemu jest opracowanie i ocena nowych receptur betonu o mniejszym wskaźniku w/c i/lub większej ilości cementu niż wielkości graniczne dotyczące danych klas ekspozycji. Wówczas można rozpocząć przeprowadzenie dowodu o równoważnych właściwościach użytkowych betonu.

Na rysunku 2 przedstawiono **wyniki badania głębokości penetracji wody** pod ciśnieniem betonów po 28 dniach dojrzewania, w odniesieniu do prognozowanych klas ekspozycji. Podobnie jak przy ocenie wytrzymałości, betony na bazie CEM II/C-M (W-LL) wykazują większą odporność na wnikiwanie wody niż te z cementem CEM II/B-V. Można stwierdzić, że są „lepsze”, natomiast nie powinny być poddane ocenie równoważnych właściwości betonu z powodu niespełnienia kryteriów minimalnej klasy wytrzymałości betonu wzorcowego po 28 dniach dojrzewania w danych klasach ekspozycji.

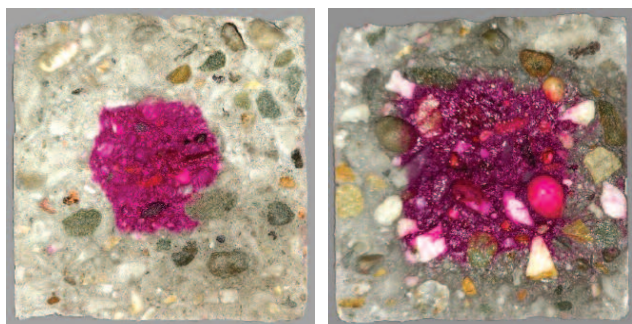
Trzecią ocenianą właściwością porównywanych betonów była ich **odporność na karbonatyzację**, która jest szczególnie istotna w klasie ekspozycji XC. Badania betonów przewi-



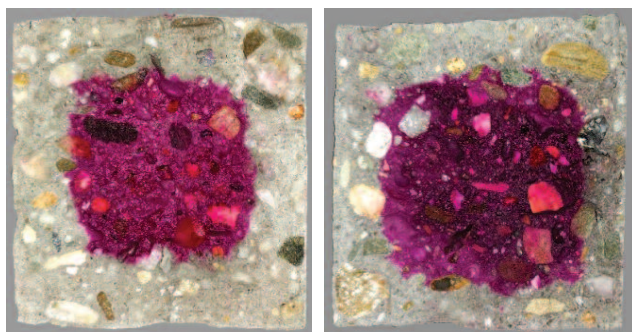
Rys. 2. Wyniki badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem
Fig. 2. Depth of water penetration into concretes under pressure

dzianych do stosowania w klasie ekspozycji XC2 w zasadzie miały potwierdzić założenia (tabela 3) o dopuszczeniu do stosowania cementu CEM II/C-M (W-LL) w tej klasie. Natomiast badania betonów do klasy ekspozycji XC4 miały potwierdzić przydatność tego cementu w tej klasie ekspozycji z uwagi na ograniczenie normowe (tabela 3).

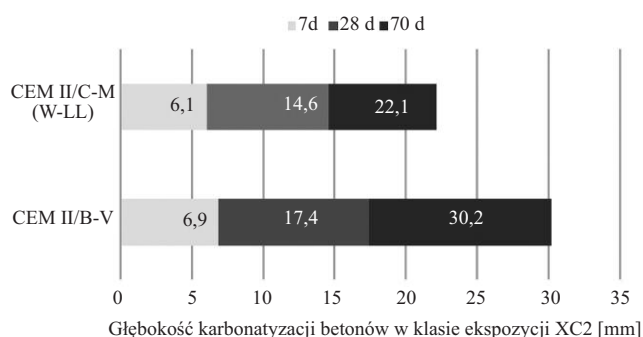
Efekt oddziaływania CO₂ w komorze klimatycznej na próbki betonowe po 56 dniach dojrzewania, wg procedury PN-EN 12390-12 [16] i użycia jako wskaźnika fenoloftaleiny, przedstawiają fotografie 1 i 2. Na rysunkach 3 i 4 zesta-



Fot. 1. Widok próbek betonów odpowiadających składem minimalnym kryteriom klasy ekspozycji XC2 po badaniu odporności na karbonatyzację
Photo 1. View of concrete samples meeting the minimum composition criteria for exposure class XC2 after testing for resistance to carbonation

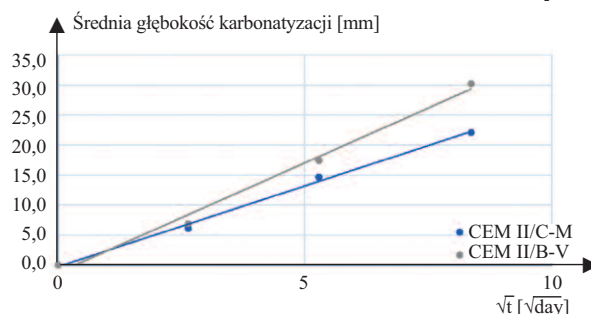


Fot. 2. Widok próbek betonów odpowiadających składem minimalnym kryteriom klasy ekspozycji XC4 po badaniu odporności na karbonatyzację
Photo 2. View of concrete samples meeting the minimum composition criteria for exposure class XC4 after testing for resistance to carbonation



Rys. 3. Głębokość karbonatyzacji betonów wykonanych na CEM II/B-V oraz CEM II/C-M(W-LL), spełniających kryteria składu w przypadku klasy ekspozycji XC2, po 7, 28 i 70 dniach oddziaływania CO₂

Fig. 3. Depth of carbonation of concretes made of CEM II/B-V or CEM II/C-M(W-LL) cement, meeting the composition criteria for exposure class XC2, after 7, 28 and 70 days of exposure to CO₂



Klasa ekspozycji – rodzaj cementu	Stała szybkość karbonatyzacji K_{AC} [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-0,5}$]
XC2 – CEM II/B-V 32,5R	3,66
XC2 – CEM II/C-M(W-LL) 32,5R	2,69

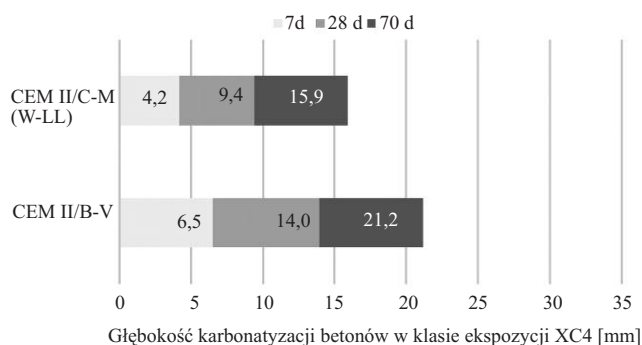
Rys. 4. Porównanie szybkości przebiegu procesu karbonatyzacji betonów w klasie ekspozycji XC2 oraz stałej szybkości karbonatyzacji K_{AC} [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-0,5}$] wyznaczonej na podstawie uzyskanych wyników

Fig. 4. Comparison of the speed of the carbonation process of concretes in exposure class XC2 and the carbonation rate constant K_{AC} [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-0,5}$] determined on the basis of the obtained results

wiono natomiast wyniki badania głębokości karbonatyzacji oraz szybkości procesu karbonatyzacji w przypadku betonów o minimalnych kryteriach składu w przypadku klasy ekspozycji XC2, a na rysunkach 5 i 6 – betonów spełniających kryteria składu dla klasy XC4.

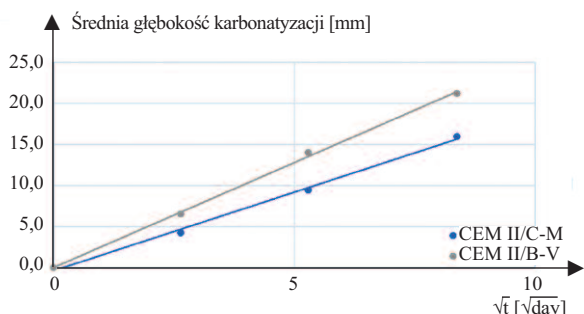
Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono większą głębokość karbonatyzacji oraz większą szybkość procesu karbonatyzacji betonu wzorcowego wykonanego z cementem CEM II/B-V niż betonu z cementem CEM II/C-M (W-LL). W przypadku obu rodzajów betonu widoczna jest wyraźna tendencja zmniejszania się głębokości karbonatyzacji oraz szybkości procesu karbonatyzacji wraz ze wzrostem ilości cementu oraz zmniejszaniem wskaźnika w/c. W efekcie oznacza to większą odporność na karbonatyzację betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL).

Stawiając pytanie, czy przedstawione analizy odporności betonów na karbonatyzację mogą być użyte w przeprowadzeniu dowodu o równoważnych właściwościach użytkowych ocenianych betonów, odpowiedź na nie jest analogiczna jak w przypadku prezentowanej oceny wytrzymało-



Rys. 5. Zestawienie głębokości karbonatacji betonów wykonanych na CEM II/B-V oraz CEM II/C-M(W-LL), spełniających kryteria składu dla klasy ekspozycji XC4 po 7, 28 i 70 dniach oddziaływania CO₂

Fig. 5. Depth of carbonation of concretes made of CEM II/B-V or CEM II/C-M(W-LL) cement, meeting the composition criteria for exposure class XC4, after 7, 28 and 70 days of CO₂ exposure



Klasa ekspozycji – rodzaj cementu	Stała szybkość karbonatacji K _{AC} [mm·d ^{-0,5}]
XC4 – CEM II/B-V 32,5R	2,56
XC4 – CEM II/C-M(W-LL) 32,5R	1,92

Rys. 6. Porównanie szybkości przebiegu procesu karbonatacji betonów w klasie ekspozycji XC4 oraz stałej szybkości karbonatacji K_{AC} [mm·d^{-0,5}] wyznaczonej na podstawie uzyskanych wyników

ści lub odporności na penetrację wody pod ciśnieniem. Nie mogą zostać użyte, ze względu na niespełnienie wymagań minimalnej klasy wytrzymałości betonu wzorcowego po 28 dniach dojrzewania.

Założenia i korekty do prawidłowej oceny równoważnych właściwości użytkowych betonu

Pomimo zastrzeżeń dotyczących formalnych możliwości zastosowania oceny równoważnych właściwości użytkowych betonu na podstawie zrealizowanego programu badawczego, w artykule przedstawiono tok postępowania w takiej analizie na przykładzie dwóch zbadanych właściwości betonu, tj. odporności na penetrację wody pod ciśnieniem oraz odporności na karbonatację. Wywód należy rozpocząć od faktu, że nie zostało spełnione podstawowe założenie programu badawczego dotyczące minimalnych wymaganych klas wytrzymałości na ściskanie betonu wzorcowego po 28 dniach dojrzewania we wskazanych klasach ekspozycji XC2 i XC4. W ta-

kim przypadku są dwa wyjścia. Pierwsze to przeprojektowanie betonu w taki sposób, aby osiągnąć wystarczającą wytrzymałość charakterystyczną dla wymaganej klasy ekspozycji przez zmniejszenie wskaźnika w/c i/lub zwiększenie ilości cementu i powtórzenie programu badawczego. Drugi sposób to zmiana definicji klasy wytrzymałości odniesionej nie do 28-dniowej wytrzymałości, ale do 56-dniowej, a nawet 90-dniowej (dla klasy XC4). Konieczne byłoby przy tym uzupełnienie badań o wytrzymałość 90-dniową. Ten sposób, to ścieżka dedukcji „pod prąd” – trochę niebezpieczna z punktu widzenia praktycznego. Odbiorca, nieświadomy definicji klasy po 90 dniach dojrzewania, może niewłaściwie współpracować w procesie wbudowywania, pielęgnacji i ochrony dojrzewającego betonu i wówczas beton może nigdy nie uzyskać projektowanych właściwości.

Nie zważając na nieścisłości założeń programu badawczego [10], wykorzystano uzyskane wyniki badań do zobrazowania procedury oceny wytypowanych równoważnych właściwości użytkowych, zestawiając je w tabelach 6 i 7. Posługując się wytycznymi raportu technicznego CEN/TR 16639 [11], obliczono współczynnik T_j w odniesieniu do ocenianego aspektu trwałości (j).

$$T_j = \frac{m_r - \frac{m_t}{1+0,01d_j}}{s/\sqrt{n}} \quad (1)$$

w którym:

$$s = \sqrt{\left\{ s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0,01d_j)^2} \right\}} \quad (2)$$

gdzie:

- m_r – średnia z wyników badania próbek betonu referencyjnego;
- m_t – średnia z wyników badania próbek betonu testowanego;
- s_r – odchylenie standardowe wyników badania betonu referencyjnego;
- s_t – odchylenie standardowe wyników badania betonu testowanego;
- n – liczba wyników badania;
- d_j – graniczna wartość ocenianego aspektu trwałości (j) (wg tabeli 3 w CEN/TR 16639 [11]).

Tabela 6. Zestawienie parametrów do przykładowej oceny równoważnych właściwości użytkowych betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5R w odniesieniu do betonów z cementem CEM II/B-V 32,5R (na podstawie CEN/TR 16639) w zakresie odporności na penetrację wody

Table 6. List of parameters for an exemplary assessment of equivalent performance properties of concretes with CEM II/C-M(W-LL) 32,5R cement in relation to concretes with CEM II/B-V 32,5R cement (based on CEN/TR 16639) in terms of resistance to water penetration

Klasa ekspozycji betonu	Głębokość penetracji wody [mm]					
	beton testowany (z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5R)			beton referencyjny (z cementem CEM II/B-V 32,5R)		
XC2	45	29	27	70	45	50
	m _t = 33,7 s _t = 9,9			m _r = 55,0 s _r = 13,2		
	s = 15,2 T _j = 3,31 > T _{j,lim(n=3)} = 1,533					
XC4	35	31	29	40	34	32
	m _t = 31,7 s _t = 3,1			m _r = 35,3 s _r = 4,2		
	s = 4,8 T _j = 3,94 > T _{j,lim(n=3)} = 1,533					

Tabela 7. Zestawienie parametrów do przykładowej oceny równoważnych właściwości użytkowych betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5R w odniesieniu do betonów z cementem CEM II/B-V 32,5R (na podstawie CEN/TR 16639) w zakresie głębokości karbonatyzacji

Table 7. List of parameters for an exemplary assessment of equivalent performance properties of concretes with CEM II/C-M(W-LL) 32,5R cement in relation to concretes with CEM II/B-V 32,5R cement (based on CEN/TR 16639) in terms of resistance to carbonation depth

Klasa ekspozycji betonu	Głębokość karbonatyzacji [mm]							
	beton testowany (z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5R)				beton referencyjny (z cementem CEM II/B-V 32,5R)			
XC2	22,69	21,24	20,77	20,88	33,29	30,35	27,09	29,28
	23,64	22,50	22,06	22,79	30,70	31,00	28,65	31,42
	$m_t = 22,07$		$s_t = 1,02$		$m_r = 30,22$		$s_r = 1,88$	
	$s = 2,04$							
$T_j = 18,39 > T_{j, \lim(n=3)} = 1,345$								
XC4	16,78	17,00	13,70	15,90	23,01	19,91	19,67	20,50
	19,00	15,92	14,53	14,63	23,06	21,37	19,68	22,54
	$m_t = 15,93$		$s_t = 1,69$		$m_r = 21,22$		$s_r = 1,48$	
	$s = 1,97$							
$T_j = 12,81 > T_{j, \lim(n=3)} = 1,345$								

Porównano wartości głębokości penetracji wody (tabela 6) i głębokości karbonatyzacji (tabela 7) uzyskane w przypadku betonów testowanych i betonów referencyjnych. Analiza, prócz bezpośredniego porównania średnich z „n” próbek (n = 3 w przypadku badań głębokości penetracji wody oraz n = 8 – badań głębokości karbonatyzacji), uwzględnia również odchylenia standardowe obu zbiorów danych. W wyliczeniu współczynnika statystycznego T_j przyjęto graniczną wartość d_j ocenianego aspektu j (głębokość penetracji wody j lub głębokość karbonatyzacji j jako aspekt trwałości), równą +30%. Ze względu na brak głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wśród ocenianych wg wytycznych CEN/TR 16639, wartość d_j przyjęto jako analogiczną w ocenie karbonatyzacji, migracji chlorków oraz mrozoodporności w obecności środków odladzających. Ostatecznie, w porównywanych parach betonów opracowanych do klas ekspozycji XC2 i XC4, współczynnik statystyczny T_j w przypadku głębokości penetracji wody, jak i głębokości karbonatyzacji jest większy od ustalonej wartości granicznej $T_{j, \lim}$ dla zbioru „n” wyników (tabela 8). Oznacza to, że pod względem trwałości oceniane receptury z cementem CEM II/C-M (W-LL) można uznać za równoważne z cementem CEM II/B-V. Aby można było uznać te analizy za ważne, należy zwrócić uwagę, że muszą być spełnione kryteria dotyczące wszystkich deklarowanych przez producenta właściwości betonu, od klasy wytrzymałości począwszy.

Tabela 8. Wartości graniczne $T_{j, \lim}$ wg CEN/TR 16639
Table 8. Limit values $T_{j, \lim}$ according to CEN/TR 16639

Liczba wyników badania (n)	Wartość graniczna $T_{j, \lim}$
3	1,533
4	1,440
5	1,397
6	1,372
7	1,356
8	1,345
9	1,337
10	1,330
11	1,325
12	1,321

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule przykład przeprowadzenia dowodu o równoważnych właściwościach użytkowych ocenianego betonu z cementem CEM II/C-M (W-LL) poka-

zuje, w jaki sposób można wykorzystać narzędzie statystyczne zaproponowane w raporcie technicznym CEN/TR 16639 [11]. Przeanalizowano wybrane wyniki badań z programu badawczego, którego celem była analiza porównawcza kilku nowych cementów, odniesiona do betonu referencyjnego z cementem CEM II/B-V. O ile porównanie tych samych właściwości betonu o takim samym składzie, ale z różnym cementem wykazało w dość prosty sposób, że stosowanie cementu CEM II/C-M (W-LL) daje korzystny efekt w przypadku każdej badanej cechy (wytrzymałość na ściskanie, odporność na penetrację wody pod ciśnieniem, odporność na karbonatyzację), o tyle statystyczne uwiarygodnienie tej tezy potrzebuje jasnych i konkretnych podstaw do prowadzonych analiz. Wzorzec, w odniesieniu do którego sprawdzana jest równoważność właściwości, musi przede wszystkim wykazywać zgodność ze wszystkimi wymaganiami normowymi stawianymi w analizowanej klasie ekspozycji. Dopiero wtedy można korzystać z narzędzia sprawdzającego przedstawionego w raporcie technicznym CEN/TR 16639. W przypadku choćby częściowej niezgodności, którą zawiera przedstawiony w artykule przykład analiz, wyniki takich badań nie mogą stanowić rozstrzygającego dowodu o równoważnych właściwościach użytkowych nowego rozwiązania odniesionego do wzorca sprawdzonego we wcześniejszym stosowaniu.

Literatura

[1] Środa B. Cementy niskoklinkierowe – terazniejszość i skomplikowana przyszłość, BTA 1 (97)/2022.
 [2] PN-EN 206+A2: 2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
 [3] PN-B-06265:2022-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2: 2021-08.
 [4] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
 [5] PN-EN 14216:2015-09 Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji.
 [6] PN-EN 197-5:2021-5 Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI.
 [7] PN-B-19707:2013-10 Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności.
 [8] PN-B-06565:2018-10 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
 [9] Bajorek G, Drabczyk M, Nowicka-Semen J. Znaczenie cementów niskoklinkierowych w kształtowaniu trwałości elementów żelbetowych. Materiały Budowlane. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.09.
 [10] Bajorek G, Górak P, Łagosz A. Ocena właściwości użytkowych betonu z cementem CEM II/C-M w aspekcie rozszerzenia obszaru możliwości aplikacji, Monografie Technologii Betonu, XII Konferencja Dni Betonu, Tradycja i Nowoczesność, Wisła, 9-11 października 2023, s. 659 – 675.
 [11] CEN/TR 16639:2014 Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept.
 [12] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
 [13] PN-EN 13263-1+A1:2010 Pył krzemionkowy. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
 [14] PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
 [15] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
 [16] PN-EN 12390-12:2020-06 – Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji.

Przyjęto do druku: 20.05.2024 r.