

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: **Jan Deja**
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darlak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

WŁAŚCIWOŚCI BETONU STWARDNIAŁEGO

PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE

prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Politechnika Lubelska

Ocena wytrzymałości betonu w istniejącej konstrukcji przy małej liczbie odwiertów rdzeniowych według nowelizacji norm PN-EN 1990-2 i PN-EN 1992-1

Assessment of concrete strength in existing structure basing on low number of cores in accordance with PN-EN 1992-1 standard

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasady oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badania odwiertów rdzeniowych. Bazując na aktualnych normach wskazano na zależność wytrzymałości charakterystycznej betonu od liczby zbadanych próbek, także gdy ich liczba jest mała, co zobrazowano przykładem liczbowym. Przystawiono także, jak znaczna rozrzut wyników badań próbek wpływa na częściowy współczynnik materiałowy w obliczeniach bezpieczeństwa istniejących konstrukcji.

Abstract

In the paper the rules of assessment of concrete strength in existing structure basing on concrete core testing are presented. On the basis of actual European standards the dependence of characteristic strength value and number of tested specimens is shown, even if number of cores is low. The calculative example is presented. Also the influence of large number of cores on the partial material factor in assessment of existing structure safety is presented.

1. Wprowadzenie

Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcjach istniejących realizowana jest zgodnie z PN-EN 13791 *Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i*

prefabrykowanych wyrobach betonowych [1] na podstawie badania odwiertów rdzeniowych pobranych z konstrukcji i badanych zgodnie z PN-EN 12504 *Badania betonu w konstrukcjach. Część 1: Próbk rdzeniowe – pobieranie, ocena i badanie* [2]. Normy zostały znowelizowane w roku 2019. Stały się przedmiotem prezentacji i analiz [3,4] oraz ożywionej dyskusji w czasie konferencji *Dni betonu* w roku 2023.

Analizując normę [1] zauważyć trzeba przede wszystkim, że rozróżniono w niej sposób oceny wytrzymałości betonu ze względu na cel: ocenę ukierunkowaną na uzyskanie danych dla określenia bezpieczeństwa konstrukcji i ocenę ukierunkowaną na stwierdzenie, czy wbudowany został beton o parametrach wytrzymałościowych, które zostały wyspecyfikowane w zamówieniu.

W niniejszym artykule zaprezentowano jedynie dane w odniesieniu do oceny ukierunkowanej na określenie bezpieczeństwa konstrukcji. Te dane odniesiono do zaleceń już znowelizowanych lub będących w trakcie nowelizacji norm z serii Eurokod: EN 1990-2 Eurocode – *Basis of structural and geotechnical design. Part 2: Assessment of existing structures* [5] (nowa norma przyjęta przez CEN w roku 2024), FprEN 1990-1:2022 Eurocode – *Basis of structural and geotechnical design design. Part 1: New structures* [6] (norma w trakcie nowelizacji) oraz PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2: *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich* [7] (znowelizowana norma wprowadzona przez PKN do katalogu norm aktualnych w roku 2024).

2. Podstawowe zasady ustalania wytrzymałości betonu na podstawie badania odwiertów rdzeniowych - zasady podstawowe normy PN-EN 13791

W normie PN-EN 13791 [1] zalecono, aby ocena wytrzymałości betonu odbywała się na podstawie badania rdzeni:

- o stosunku wysokości do średnicy 2:1 lub 1:1
 - przy stosunku wymiarów 2:1 dopuszcza się 5% odchylenia od tego stosunku, a przy stosunku wymiarów 1:1 – 10%,
 - przeliczenie wyników uzyskanych przy stosunku wymiarów 1:1 na wyniki dla stosunku 2:1 realizowane jest przez współczynnik CLF = 0,82; nie podano współczynników przeliczeniowych dla innych stosunków wymiarów,
- o średnicy nie mniejszej niż 75 mm
 - jedynie przy małym rozstawie prętów zbrojeniowych można używać rdzeni o średnicy co najmniej 50 mm, przy czym stosunek średnicy rdzenia do średnicy ziaren kruszywa powinien być nie mniejszy niż 3, średnica ziaren kruszywa nie większa niż 16 mm, a wartość uznana za reprezentatywną dla danego punktu pomiarowego powinna być uzyskana z co najmniej 3 rdzeni;
 - orientacyjnie podano, że rdzenie o średnicy 100 mm i stosunku wysokości do średnicy 2:1 mają wytrzymałość na ściskanie o około 7% większą niż rdzenie o średnicy 50 mm przy takim samym stosunku (ale nie ma dowodu na podobną zależność przy stosunku 1:1),
- w liczbie nie mniejszej niż 8, a w przypadku próbek o średnicy 50 mm - 12.

Wartość charakterystyczną wytrzymałości betonu w konstrukcji, odpowiadającą próbkom o stosunku wysokości do średnicy 2:1, ustala się w

założeniu rozkładu normalnego przy co najmniej 8 zbadanych próbkach na postawie wyrażeń:

$$f_{ck, is} = f_{c, mean} - k_n s, \quad (1)$$

lub

$$f_{ck, is} = f_{c, lowest} + M, \quad (2)$$

gdzie n jest liczbą zbadanych próbek; $s = \sqrt{\frac{(f_{c,i} - f_{c, mean})^2}{n-1}}$ - odchyleniem standardowym; k_n – wartością ustalaną na podstawie tablicy 1 w zależności od liczby próbek; $f_{c, mean}$ średnim, a $f_{c, lowest}$ - najmniejszym wynikiem badania rdzeni; M zależy od $f_{c, lowest}$ ($f_{c, lowest} < 12$ MPa $\rightarrow M = 1$ MPa, 12 MPa $\leq f_{c, lowest} < 16$ MPa $\rightarrow M = 2$ MPa, 16 MPa $\leq f_{c, lowest} < 20$ MPa $\rightarrow M = 3$ MPa, $f_{c, lowest} > 20$ MPa $\rightarrow M = 4$ MPa).

Tablica 1 Wartości k_n w zależności od liczby próbek wg PN-EN 13791

n	8	10	12	16	20	30	∞
k_n	2,00	1,92	1,87	1,81	1,76	1,73	1,64

Podstawą klasyfikacji betonu jest próbka normowa o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Otwartą kwestią pozostaje ustalenie miarodajnej wytrzymałości, jeśli badane są rdzenie o średnicy różnej od 150 mm, co najczęściej ma miejsce. W PN-EN 13791 [1] nie ma jednak w tym zakresie rekomendacji (jest jedynie podana wyżej informacja dotycząca rdzeni o średnicy < 75 mm). Można zatem mniemać, że kwestię średnicy uznaje się za nieistotną i nie ma konieczności przeliczeń.

Najważniejsze wzbudzające kontrowersje postanowienia normy [1] to podanie procedury określania jedynie wytrzymałości charakterystycznej betonu, bez odniesienia do jego klasy oraz podanie wyrażeń pozwalających na określenie tej wytrzymałości jedynie przy liczbie pobranych odwiertów nie mniejszej niż 8 [3, 4].

Interpretacja braku klasy betonu jest następująca. W obliczeniach bezpieczeństwa konstrukcji należy używać właśnie określonej badaniami wytrzymałości charakterystycznej, a nie ogólnie klasy betonu. Oczywiście stosowanie jako parametru obliczeniowego klasy betonu jest kuszące ze względu na możliwości wielu programów obliczeniowych, w których klasę betonu wprowadza się jako daną podstawową. Jednak pamiętać trzeba, że wytrzymałość charakterystyczna „w ramach” klasy może być zróżnicowana, (np. w przypadku klasy C30/37 - 30,0 MPa $\leq f_{ck} < 35$ MPa) i obliczona przy użyciu tych wartości nośność konstrukcji może być różna (przy wytrzymałości 36,5 MPa nośność konstrukcji jest zdecydowanie większa niż przy wytrzymałości 30,5 MPa). A więc przy użyciu jako parametru klasy betonu, nośność może być niedoszacowana, co w efekcie prowadzić może do niepotrzebnych i kosztownych wzmocnień.

Druga z wątpliwości - wymaganie minimalnej liczby ośmiu próbek, pojawia się w związku z tym, że obowiązkiem badającego konstrukcję jest *po pierwsze nie szkodzić*. W sytuacji, gdy pobieranie dużej liczby próbek może zagrozić bezpieczeństwu konstrukcji, liczba próbek musi być ograniczona. W świetle postanowień PN-EN 13791 [1] wydaje się, że ocena wytrzymałości przy liczbie próbek mniejszej niż osiem jest niemożliwa. Ale postanowienia te oznaczają jedynie

tylę, że wyrażenia normy [1] i ich parametry mogą być używane wtedy, gdy pobrano co najmniej 8 rdzeni. Jeśli pobrana została mniejsza liczba rdzeni należy sięgnąć do norm z serii Eurokod.

2. Ocena wytrzymałości materiałów według EN 1990-1 i EN 1990-2

W EN 1990-2 [5] poświęconej ocenie bezpieczeństwa konstrukcji istniejących zalecono, aby w obliczeniach stosować charakterystyczne wytrzymałości materiałów określone na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji, a w tym celu należy posługiwać się metodą analizy statystycznej zawartą w aneksie D do EN 1990-1 [6]. Zalecenia te zostały też zaimplementowane do normy projektowania konstrukcji z betonu PN-EN 1992-1 [7] w aneksie I, zatytułowanym *Ocena konstrukcji istniejących*. Zgodnie z powyższymi wytycznymi charakterystyczne wytrzymałości materiałów w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji należy przyjmować na podstawie:

- opracowanych statystycznie badań próbek pobranych z konstrukcji,
- badań próbek pobranych z konstrukcji w kombinacji z analizą statystyczną badań reprezentatywnej liczby próbek pobranych z podobnej konstrukcji.

Próbki należy pobierać z części konstrukcji reprezentatywnych dla przeprowadzanej oceny w sposób bezpieczny dla konstrukcji, a powstałe ubytki należy uzupełnić.

W aneksie D normy [6] podano zasady ustalania obliczeniowej i charakterystycznej wartości badanego parametru materiału, pod warunkiem, że zapewniono podobieństwo badań z normowymi metodami ustalania tego parametru (np. podobieństwo badań odwiertów rdzeniowych betonu do badania próbek normowych). Ustalając wartość charakterystyczną parametru należy wziąć po uwagę rozrzut wyników, niepewność związaną z liczbą próbek i wiedzę z zakresu statystyki. Tylko wtedy, gdy liczba próbek jest wystarczająco duża, klasyczna statystyka jest możliwa do zastosowania, natomiast najczęściej mamy do czynienia z małą liczbą próbek. W tej sytuacji należy przeprowadzić interpretację wyników zgodnie z procedurami Bayesian'a podanymi w normie ISO 12491 [8].

W EN 1990-1 [6] adaptowano tę metodę do ustalania wartości zmiennej będącej parametrem materiałowym w założeniu, że zmienna ma rozkład normalny (taki przyjmuje się w ocenie betonu) lub logarytmiczny (w ocenie stali zbrojeniowej, i opisie zmiennych wartości geometrycznych), nie ma wiedzy o wartości średniej zbadanej wcześniej na podobnej konstrukcji, natomiast wariantowo – znany lub nie znany jest wskaźnik zmienności V_X zbadany na podobnych konstrukcjach. To, czy sytuacje są podobne norma pozostawia do oceny eksperckiej.

W przypadku rozkładu normalnego, wartość obliczeniową zmiennej X_d ustalać należy na podstawie jej wartości charakterystycznej $X_k(n)$ ze wzoru:

$$X_d = \eta_d \frac{X_k(n)}{\gamma_M} = \frac{\eta_d}{\gamma_M} m_X \{1 - k_n V_X\} \quad (3)$$

gdzie m_X jest zbadaną wartością średnią, k_n zależy od liczby próbek n , a η_d jest współczynnikiem konwersji zależnym od typu testu i rodzaju materiału wprowadzanym, jeśli właściwości materiału w konstrukcji i w próbce różnią się oraz gdy materiał jest wrażliwy na efekty długotrwałe, γ_M jest częściowym materiałowym współczynnikiem bezpieczeństwa (patrz p. 4).

Jeśli wskaźnik zmienności V_x jest wcześniej nieznan, a wykonane zostaną co najmniej trzy pomiary, można obliczyć go na podstawie odchylenia standardowego s_x :

$$V_x = \frac{s_x}{m_x}; \quad s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum (X_i - m_x)^2. \quad (4)$$

Wartości k_n w zależności od liczby próbek w dwóch przypadkach – gdy wskaźnik zmienności jest znany z wcześniejszych podobnych badań i gdy nie jest znany, zestawiono w tabelicy 2. Gdy wskaźnik zmienności nie był wcześniej znany nie można szacować wartości charakterystycznej parametru, jeśli zbadane są tylko dwie lub jedna próbka.

Tabela 2 Wartości k_n odpowiadające 5% kwantylowi badanego parametru materiałowego wg EN 1990-1 [6] i PN-EN 1992-1

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	>30
wcześniej znane V_x	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
wcześniej nieznan V_x	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

W normie [6] rekomendowano, aby w praktyce używać przypadku, gdy wskaźnik zmienności jest znany z wcześniejszych podobnych badań (należy przyjąć największą jego możliwą wartość). Jeśli jest nieznan, należy go obliczyć, a we wzorze (1) przyjąć $V_x \geq 0,10$. W opinii autorki, wskaźnik można oszacować na podstawie rozrzutu wyników badań sklerometrycznych, które wykonywane są w większej liczbie punktów i skorzystać z pierwszego wiersza tabelicy 2.

3. Zalecenia dla ustalania wytrzymałości betonu w konstrukcji istniejącej w normie projektowania konstrukcji z betonu PN-EN 1992-1

Do normy projektowania konstrukcji z betonu wyrażenia (3) i (4) oraz tabela 2 zostały adaptowane bez zmian i znajdują się w załączniku I.

W tabelicy 3 pokazano wyniki obliczeń wytrzymałości charakterystycznej według PN-EN 13791 [1], EN 1990-1 [6] i PN-EN 1992-1 [7] przy różnej liczbie zbadanych próbek. Dla przykładu przyjęto, że średnia wytrzymałość $m_x = 35,5$ MPa, a odchylenie standardowe $s_x = 3,91$ MPa (a więc wskaźnik zmienności $V_x = 11\%$). Z tabelicy 3 wynika, że przy obliczeniu wytrzymałości charakterystycznej z uwzględnieniem uzyskanego w tych badaniach wskaźnika zmienności, dla liczby próbek równej co najmniej 8 metody PN-EN 13791 [1] i EN 1990-1 [6] dają ten sam wynik (kolumna 3 i 7 tabelicy). Ocenę na podstawie mniejszej liczby próbek (ale co najmniej trzech) umożliwia jedynie EN 1990-1 [6]. W tej sytuacji im mniejsza liczba próbek tym mniejsza wytrzymałość charakterystyczna (kolumna 7) - przy trzech próbkach wytrzymałość charakterystyczna jest aż o niemal 1/3 mniejsza niż wytrzymałość średnia. Jeśli wskaźnik zmienności został określony na podstawie innej próby z tej samej partii betonu (np. badania innych fragmentów tej samej konstrukcji,

o których wiadomo, że betonowane były w tym samym czasie z tej samej partii betonu) lub na podstawie badań sklerometrycznych, to przy tej samej wartości wskaźnika zmienności uzyskuje się znacznie większe wartości, niż przy współczynniku nieznanym. Można nawet oszacować wartość charakterystyczną wytrzymałości, jeśli zostały zbadane dwie lub nawet jedna próbka.

Tablica 3. Wytrzymałości charakterystyczne betonu obliczone wg PN-EN 13791, EN 1990-1 i PN-EN 1992-1 w założeniu $m_x = 35,5$ MPa i $V_x = 11\%$ (wcześniej znanego lub określonego na podstawie badań)

Liczba zbadanych próbek	Według PN-EN 13791 [1]		Według EN 1990-1 [6] i PN-EN 1992-1 [7]			
	k_n	f_{ck} [MPa]	wcześniej znane V_x		wcześniej nieznanne V_x	
	k_n	f_{ck} [MPa]	k_n	f_{ck} [MPa]	k_n	f_{ck} [MPa]
1	2	3	4	5	6	7
1			2,31	26,47		
2			2,01	27,64		
3			1,89	28,11	3,37	22,32
4			1,83	28,34	2,68	25,02
5			1,80	28,46	2,33	26,39
6			1,77	28,58	2,18	26,98
8	2,00	27,68	1,74	28,70	2,00	27,68
10	1,92	27,99	1,72	28,77	1,92	27,99
12	1,87	28,19				
16	1,81	28,42				
20	1,76	28,62	1,68	28,93	1,76	28,62
30	1,73	28,74	1,67	28,97	1,73	28,74
>30	1,64	29,09	1,64	29,09	1,64	29,09

Wytrzymałość charakterystyczną betonu na ściskanie obliczoną zgodnie ze wzorami (3) i (4) można skorygować ze względu na strefę, z której pobrano rdzenie:

$$f_{ck} = \frac{f_{ck, is}}{k_{\mu fc}} \quad (5)$$

Wartości $k_{\mu fc}$ określone są tu następująco:

$k_{\mu fc} = 0,95$, jeśli rdzenie pobierane są tylko z dolnych części elementów (strefa niższa niż 70% wysokości betonowanego elementu), niekoniecznie reprezentatywnych dla całego weryfikowanego obszaru,

$k_{\mu fc} = 0,90$, jeśli rdzenie pobierane są z różnych stref w ocenianym elemencie, ale niekoniecznie reprezentatywnych dla całego weryfikowanego obszaru,

$k_{\mu fc} = 0,85$, jeśli rdzenie pobrane są dokładnie z obszaru poddanego weryfikacji.

Dodatkowo przy sprawdzaniu stanów granicznych należy uwzględnić efekt długotrwałego obciążenia, przemnażając f_{ck} przez współczynnik:

- $k_{tc} = 0,85$, jeśli 100% obciążenia stanowią obciążenia stałe lub zmienne działające dłużej niż 1 godzinę,
- $k_{tc} = 1,0$, jeśli obciążenia zmienne działające krócej niż 1 godzinę stanowią co najmniej 20% całkowitego obciążenia,
- wartości pośrednie należy interpolować.

4. Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla wytrzymałości betonu w ocenach bezpieczeństwa konstrukcji

Jeśli w ramach oceny bezpieczeństwa konstrukcji wytrzymałość betonu została zbadana zgodnie z zasadami przedstawionymi w p. 2÷4 współczynnik materiałowy $\gamma_M = 1,5$ należy skorygować w zależności od współczynnika zmienności wyników. W załączniku I normy PN-EN 1992-1 [7] zapisano, że korekta nie jest potrzebna, jeśli współczynnik zmienności w badaniach $V_{fc, is}$ jest nie większy niż wartość graniczna $V_{fc, is, lim}$, która zależy od liczby zbadanych próbek (tablica 4).

Tablica 4 Wartość graniczna $V_{fc, is, lim}$ oraz k_n i $k_{d, n}$ używane w procesie korekty współczynnika materiałowego betonu wg PN-EN 1992-1

n	4	5	8	10	12	16	20	30	∞
$V_{fc, is, lim}$			0,13	0,15	0,17	0,20	0,21	0,23	0,29
k_n	2,63	2,33	2,00	1,92	1,87	1,81	1,76	1,73	1,64
$k_{d, n}$	11,40	7,85	5,07	4,51	4,19	3,85	3,64	3,44	3,04

Według aneksu A normy PN-EN 1992-1 [7] współczynnik materiałowy betonu należy skorygować zgodnie z następującymi wyrażeniami (wyrażenie ważne, jeśli współczynnik zmienności jest nie większy niż 0,20):

$$\gamma_c = \frac{e^{\alpha_R \cdot \beta_{tgt} \cdot V_{RC}}}{\mu_{RC}}, \quad (6)$$

$$V_{RC} = \sqrt{V_{fc, is, corr}^2 + V_{Ac}^2 + V_{\theta c}^2}, \quad (7)$$

$$\mu_{RC} = \mu_{fc, is} \cdot \mu_{Ac} \cdot \mu_{\theta c}. \quad (8)$$

We wzorach (6÷8) występują wskaźniki zmienności V i wartości bias μ :

- ze względu na pole przekroju betonu $V_{Ac} = 0,040$ i $\mu_{Ac} = 1,00$,
- ze względu na niepewność modelu $V_{\theta c} = 0,070$ i $\mu_{\theta c} = 1,02$,
- ze względu na uzyskany w badaniach odwiertów rdzeniowych wskaźnik zmienności $V_{fc, is}$

$$V_{fc, is, corr} = \frac{k_{d, n}}{\alpha_R \cdot \beta_{tgt}} V_{fc, is}, \quad \mu_{fc, is} = e^{k_n \cdot V_{fc, is}}. \quad (9)$$

W sytuacji trwałej i przejściowej, zgodnie z podejściem EN 1990-1 [6] docelowy wskaźnik niezawodności dla przewidywanego okresu użytkowania 50 lat $\beta_{tgt} = 3,8$, a współczynnik wrażliwości $\alpha_R = 0,8$. Wartości k_n i $k_{d, n}$ należy przyjmować z tablicy 4 w zależności od liczby zbadanych odwiertów rdzeniowych.

W tablicy 5 dokonano przykładowej korekty współczynnika materiałowego γ_{RC} zgodnie ze wzorem (6) dla sytuacji stałej i przejściowej w założeniu, że wskaźnik zmienności zbadanych odwiertów rdzeniowych wynosi 20% (co jest większe niż $V_{fc, is, lim}$ dla 16 i mniej próbek). Korekta normowej wartości współczynnika $\gamma_{RC} = 1,5$

jest tym większa im mniejsza jest liczba zbadanych próbek. Przy ośmiu próbkach współczynnik ten należy w obliczeniach zwiększyć do 1,87, a przy szesnastu do 1,53.

Tablica 5. Skorygowane współczynniki materiałowe γ_{RC} betonu przy ocenie konstrukcji w sytuacjach trwałych i przejściowych wg PN-EN 1992-1, w założeniu $V_{fc, is}=20\%$ uzyskanego w badaniach odwiertów rdzeniowych

Liczba próbek	$V_{fc, is}$	$\mu_{fc, is}$	$V_{fc, is, corr}$	μ_{RC}	γ_{RC}
8	0,20	1,49	0,33	1,52	1,87
10	0,20	1,47	0,30	1,50	1,70
12	0,20	1,45	0,28	1,48	1,61
16	0,20	1,44	0,25	1,46	1,53

6. Podsumowanie

Wytrzymałość betonu używana w ocenach bezpieczeństwa konstrukcji istniejących może być oceniana na podstawie małej liczby odwiertów, ale do jej oszacowania stosować należy reguły podane w normach serii Eurokod.

W normie EC2-1-1 zalecono korekty wytrzymałości charakterystycznych otrzymanych na podstawie odwiertów rdzeniowych ze względu na strefę pobierania próbek oraz charakter obciążenia konstrukcji (stałe/zmienne) a także, przy dużej wartości wskaźnika zmienności wyników, zwiększenie materiałowych współczynników bezpieczeństwa.

Literatura

- [1] PN-EN 13791: 2019 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
- [2] PN-EN 12504: 2019 Badania betonu w konstrukcjach. Część 1: Próbkki rdzeniowe – pobieranie, ocena i badanie
- [3] Moczko A.: Nowa norma europejska PN-EN 13791: 2019. Blaski i cienie oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach budowlanych na podstawie badania odwiertów rdzeniowych, materiały konferencyjne Dni Betonu 2023,
- [4] Moczko A.: Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach budowlanych na podstawie badania odwiertów rdzeniowych w świetle nowej normy europejskiej PN-EN 13791: 2019, Przegląd budowlany, nr 9-10/2023, s. 199-203
- [5] EN 1990-2:2024 Eurocode – Basis of structural and geotechnical design design. Part 2: assessment of existing structures
- [6] FprEN 1990-1:2022 Eurocode – Basis of structural and geotechnical design design. Part 1: new structures
- [7] PN-EN 1992-1-1:2024 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich
- [8] ISO 12491: 1997 Statistical methods for quality control of building materials and components

Dr inż. Katarzyna Mróz, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki
Dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki

Ocena podatności betonu na termiczne odpryskiwanie w świetle rekomendacji RILEM

Assessment of Concrete Susceptibility to Fire Spalling in the context of RILEM Recommendations

Streszczenie

Termiczne odpryskiwanie betonu stanowi istotny problem inżynierski, występujący w warunkach działania wysokiej i dynamicznie narastającej temperatury, charakterystycznej dla pożarów. Odpryskiwanie prowadzi do ubytku przekroju poprzecznego betonu podczas nagrzewania, skutkując zmniejszeniem nośności elementów konstrukcyjnych oraz stwarzając realne zagrożenie dla ekip ratowniczych pracujących podczas pożaru. Szczególnie narażone na odpryskiwanie są betony wysokowartościowe, charakteryzujące się niską porowatością i przepuszczalnością. Komitet Techniczny RILEM 306-SPF opracował rekomendacje dotyczące oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie w skali technicznej (badania przesiewowe) i wytyczne uzupełniające dla badań odporności ogniowej. Głównym celem badań przesiewowych jest wyłonienie mieszanek betonowych o odporności na odpryskiwanie w warunkach pożaru. Niniejszy referat przedstawia zasady oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie zarówno w ramach badań przesiewowych, jak i badań odporności ogniowej, w odniesieniu do najnowszych rekomendacji RILEM opublikowanych na przełomie 2023 i 2024 roku. Omówione są zarówno podstawy teoretyczne przyjętych rozwiązań, jak i przykłady praktycznego zastosowania tych badań w projektowaniu betonu odpornego na termiczne odpryskiwanie.

Abstract

Fire spalling of concrete is a significant engineering problem that occurs under the high and dynamically increasing temperatures characteristic of fires. Spalling leads to a loss of concrete cross-sectional area during heating, resulting in a reduction in the load-bearing capacity of structural elements and posing a real danger to emergency crews working during a fire. High-performance concretes, characterized by low porosity and permeability, are particularly prone to spalling.

The RILEM 306-SPF Technical Committee has developed recommendations for assessing the susceptibility of concrete to fire spalling on a technical scale (screening tests) and supplementary guidelines for fire resistance tests. The main objective of screening tests is to select concrete with resistance to spalling under fire conditions. This paper presents the principles of assessing the susceptibility of concrete to fire spalling in both screening and fire resistance tests, with reference to the latest RILEM recommendations published in 2023/2024. Both the theoretical basis of the adopted solutions and examples of practical application of these tests in the design of concrete being resistant to fire spalling are discussed.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie bezpieczeństwa konstrukcji w warunkach pożaru jest jednym z kluczowych wyzwań współczesnego budownictwa. Wysoka temperatura, dynamicznie narastające gradienty cieplne oraz towarzyszące im naprężenia wewnętrzne mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych, w tym do termicznego odpryskiwania betonu. Termiczne odpryskiwanie to nagłe i gwałtowne odspojenie fragmentów betonu z powierzchni narażonej na działanie ognia, prowadzące do redukcji przekroju poprzecznego i osłabienia właściwości nośnych elementu. Termiczne odpryskiwanie stwarza również bezpośrednie zagrożenie dla ekip ratowniczych oraz osób znajdujących się w strefie pożaru, z uwagi na możliwość wystąpienia gwałtownych eksplozji materiału.

Znaczenie problemu zostało szeroko dostrzeżone w środowisku naukowym i inżynierskim, w szczególności po przypadkach pożarów w tunelach, co doprowadziło do licznych badań eksperymentalnych i teoretycznych mających na celu jego zrozumienie oraz minimalizację skutków. Potwierdzono, że podatność betonu na termiczne odpryskiwanie zależy od wielu czynników, w tym od składu mieszanki betonowej, rodzaju zastosowanego cementu, klasy wytrzymałości betonu, porowatości, zawartości wody oraz warunków dojrzewania [1–3]. Obok czynników materiałowych, zwrócono uwagę na znaczny wpływ warunków brzegowych w czasie ekspozycji betonu na ogień na stopień odpryskiwania betonu [4,5]. Zarówno scenariusz pożaru, jak i stan naprężeń w elemencie decydują o intensywności lub w ogóle pojawieniu się termicznego odpryskiwania. Czynniki te, zarówno materiałowe, jak i zewnętrzne, mechaniczne i termiczne, decydują o zachowaniu się betonu nie tylko w przypadku pożaru w obiektach budowlanych, ale także w czasie badań laboratoryjnych. Odpowiednio dobrana metodyka badania ma zatem istotne znaczenie dla uzyskania właściwych wniosków o podatności betonu na termiczne odpryskiwanie.

Aktualna wersja Eurokodu 2 (PN-EN 1992-1-2:2024) [6], w rozdziale 10 *Rules for spalling*, zawiera nowe, bardziej szczegółowe wytyczne dotyczące termicznego odpryskiwania dla elementów konstrukcyjnych. Zapisy te nie wyjaśniają jednak, w jaki sposób przeprowadzić badanie podatności betonu na odpryskiwanie, w przypadku, gdy przeprowadzenie takiej oceny jest konieczne.

W odpowiedzi na potrzebę ujednolicenia metod badawczych oraz umożliwienia porównywalności wyników, Komitet Techniczny RILEM 256-SPF: *Spalling of Concrete Due to Fire: Testing and Modelling*, opracował rekomendacje dotyczące metod oceny podatności betonu na odpryskiwanie. Rekomendacje te obejmują zarówno uproszczone badania przesiewowe, jak i wytyczne dotyczące prowadzenia

badzeń pełnoskalowych w warunkach badań odporności ogniowej wg EN 1363-1 [7] i ISO 834-1 [8]:

- Recommendation of RILEM TC 256-SPF on the method of testing concrete spalling due to fire: material screening test [9],
- Recommendation of RILEM TC 256-SPF on fire spalling assessment during standardised fire resistance tests: complementary guidance and requirements [10].

Celem niniejszego referatu jest przegląd i analiza metod oceny podatności betonu na odpryskiwanie w świetle zaleceń wymienionych rekomendacji RILEM oraz przedstawienie ich zastosowania w praktyce inżynierskiej. Omówione zostaną podstawy fizykochemiczne termicznego odpryskiwania, procedury badawcze oraz przykłady wdrożeń w procesie projektowania betonu odpornego na działanie ognia.

2. Podstawy fizykochemiczne termicznego odpryskiwania betonu

Mechanizmy termicznego odpryskiwania betonu są złożone i wynikają ze współdziałania fizycznych i chemicznych procesów zachodzących w materiale pod wpływem wysokiej temperatury. Do najważniejszych należą: wzrost ciśnienia pary wodnej w porach betonu, naprężenia termiczne oraz uszkodzenia i osłabienie betonu wynikające z działania wysokiej temperatury. Każdy z tych mechanizmów może działać niezależnie, jednak w praktyce najczęściej nakładają się one na siebie, co znacząco zwiększa ryzyko pojawienia się odpryskiwania w betonie.

Jednym z podstawowych czynników prowadzących do odpryskiwania jest wzrost ciśnienia pary wodnej w porach betonu [11,12]. Pod wpływem wzrastającej temperatury woda zawarta w betonie zaczyna odparowywać, a w miarę dalszego nagrzewania para wodna zaczyna przemieszczać się w głąb elementu, w kierunku chłodniejszych warstw betonu. W betonach o niskiej porowatości ruch pary wodnej jest utrudniony. Gromadzi się ona w zamkniętych porach, tworząc na pewnej głębokości nieprzepuszczalną dla gazów warstwę, ang. *moisture clog*, w sąsiedztwie której obserwuje się znaczny wzrost ciśnienia pary wodnej i wody w przekroju betonu [13]. Jeśli ciśnienie to przekroczy lokalną wytrzymałość betonu na rozciąganie, dochodzi do nagłego, odspojenia się fragmentu materiału.

Drugim mechanizmem są naprężenia termiczne, które powstają na skutek nierównomiernego nagrzewania betonu. W warunkach pożaru powierzchnia elementu betonowego szybko osiąga wysoką temperaturę, podczas gdy jego wnętrze pozostaje stosunkowo chłodne. Prowadzi to do powstawania gradientów temperatury, a tym samym do nierównomiernych odkształceń termicznych w przekroju elementu. Beton, będąc materiałem o niskiej wytrzymałości na rozciąganie, jest szczególnie wrażliwy na takie obciążenia. W połączeniu z osłabieniem struktury spowodowanym wzrostem temperatury, naprężenia te mogą prowadzić do powstania delaminacji i odprysków fragmentów powierzchni [3].

Jednocześnie, wraz ze wzrostem temperatury zachodzą w betonie nieodwracalne przemiany chemiczne. Już w temperaturze około 105–150 °C następuje odparowanie wody wolnej, a powyżej 200 °C do dehydratacji żelu C-S-H. W wyższej temperaturze (ok. 400–600 °C) dochodzi do rozkładu portlandytu, co dalej osłabia spójność struktury. W wyniku tych przemian beton ulega uszkodzeniu i maleje jego wytrzymałość na rozciąganie co sprzyja jego odspojeniu pod wpływem ciśnienia pary i/lub naprężeń termicznych [1].

Najpopularniejszą teorią wyjaśniającą przyczyny termicznego odpryskiwania jest współwystępowanie wzrastającego ciśnienia pary wodnej, naprężeń termicznych i

degradacji mikrostruktury betonu. Wraz z pojawianiem się nowych metod diagnostycznych oraz rozwojowi modeli numerycznych pojawiają się bardziej zaawansowane modele wyjaśniające to trudne do przewidzenia i niebezpieczne zachowanie się betonu.

Należy pamiętać, że obok zmian, które zachodzą w samym materiale, warunki brzegowe, które oddziałują na sam element konstrukcyjnym czy element badawczy mają istotny wpływ na jego zachowanie się w czasie ekspozycji na ogień. To, czy dojdzie do termicznego odpryskiwania, w jakim momencie oraz z jaką intensywnością, zależy nie tylko od właściwości samego betonu, ale również od charakteru pożaru. Dotyczy to również sposobu przeprowadzenia badania ogniowego. W laboratoryjnej ocenie podatności betonu na termiczne odpryskiwanie różnice w metodologii mogą prowadzić do odmiennych wyników nawet przy badaniu tego samego materiału. Stanowi to dodatkowe wyzwanie w zakresie opracowania metodologii realizacji badań tego typu.

3. Badania przesiewowe termicznego odpryskiwania betonu

Podczas normowych badań odporności ogniowej PN-EN 1363, odpryski wpływają na odporność ogniową elementu i mogą być w trakcie tych badań inwentaryzowane. Jednak ze względów praktycznych i ekonomicznych istnieje potrzeba prostszych badań przesiewowych betonu, realizowanych na mniejszych elementach, w celu wstępnego doboru składu betonu z uwagi na najmniejszą podatność na odpryskiwanie. Procedura dotycząca przeprowadzania badań przesiewowych przedstawia metodologię badawczą, która jest dostosowywana do indywidualnego problemu badawczego. W badaniach przesiewowych wyróżnia się (i) *materiałowe badania przesiewowe* oraz (ii) *badania przesiewowe produktów*.

3.1 Cel badań przesiewowych

Opracowane przez zespół RILEM rekomendacje [9] dotyczą *badania przesiewowych materiału i badań przesiewowych produktów*.

Badania przesiewowe materiału są zazwyczaj realizowane przez zespoły, które opracowują składy betonów. Celem tego typu badań jest porównanie zachowania się betonów o różnym składzie w warunkach ogniowych i określenie np. wpływu udziału składników (w/c, rodzaj kruszywa, rodzaj cementu, udział dodatków mineralnych, ilość i rodzaj włókien, itp.). Celem *badania przesiewowych materiału* jest wytypowanie składów betonów o najwyższej odporności na odpryskiwanie.

W *badaniach przesiewowych produktów* zastosowanie betonu jest znane (beton na elementy konstrukcyjne: słupy, ściany; elementy osłonowe; el. obudowy tuneli itp.). W takim przypadku konfiguracja stanowiska badawczego, kształt elementów są dobierane pod kątem jak najwierniejszego odtworzenia sposobu obciążenia i pracy w konstrukcji docelowego zastosowania końcowego betonu. Celem tych badań jest przebadanie kilku kompozycji betonów i wybór składu betonu odpornego na odpryskiwanie zanim przystąpi się do czasochłonnnych w przygotowaniu i kosztownych badań odporności ogniowej elementów betonowych w skali rzeczywistej.

Należy podkreślić, że *badania przesiewowe produktów*, niezależnie od stopnia odtworzenia warunków brzegowych w elementach badawczych nie mogą zastąpić badań odporności ogniowej elementów prowadzonych wg normy PN-EN 1363.

Rekomendacja RILEM dla badań przesiewowych materiału [9] obejmuje informacje dotyczące badanych rodzajów materiałów i ich charakterystyki, rodzajów i geometrii próbek, warunków przechowywania, metod badań i mierzonych parametrów. Zawiera także informacje na temat technik obserwacji odpryskiwania podczas badania oraz metod oceny ilościowej odpryskiwania po badaniu.

Badania przesiewowe powinny pozwolić na wyselekcjonowanie betonu o optymalnym pod względem odporności na termiczne odpryskiwanie. Wytypowany w ten sposób beton powinien zostać wykorzystany do wykonania elementów pełnoskalowych, na których przeprowadza się ocenę odporności ogniowej wg PN-EN 1363. Badania odporności ogniowej potwierdzą brak występowania odpryskiwania w elemencie lub poziom odpryskiwania na bezpiecznym dla celów projektowych poziomie.

3.2 Geometria próbek i konfiguracja badania

Próbki stosowane w badaniach powinny mieć kształt płyty prostokątnej lub kołowej, o minimalnych wymiarach (minimalna długość boku, średnica i grubość) podanych w Tabeli 1. Minimalne wymiary elementów badawczych zaproponowano na podstawie doświadczeń badawczych członków Komitetu Technicznego RILEM 256-SPF, w oparciu o stosowane zasady dobrych praktyk dla tego typu badań.

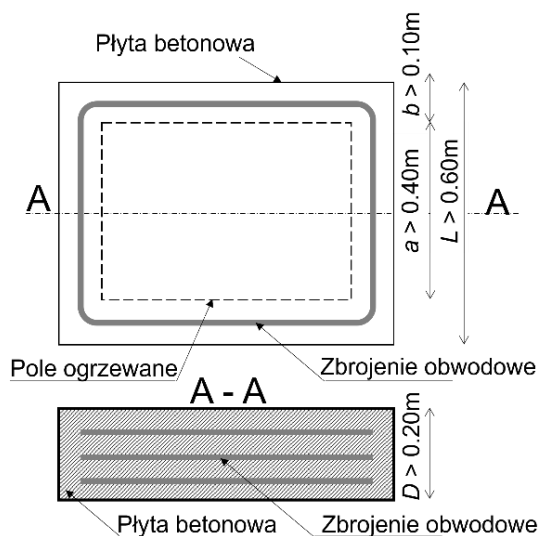
Wykazano, że skrępowanie odkształceń termicznych w płaszczyźnie płyty w czasie badania sprzyja pojawieniu się odpryskiwania. Dotyczy to nie tylko samego faktu jego pojawienia się, ale także jego głębokości i intensywności. Skrępowanie odkształceń w płaszczyźnie płyty powoduje ograniczenie pojawienia się mikropęknięć w przekroju badanego elementu i swobodnego zarysowania się płyty w czasie badania. Skutkuje to pogorszeniem właściwości transportowych w betonie dla pary wodnej i wody, a zatem zwiększeniem ciśnienia porowego w kolejnych warstwach betonu, w których łatwiej i częściej dochodzi do odpryskiwania [14].

Tabela 1. Minimalne wymiary elementów badawczych do badań przesiewowych [9].

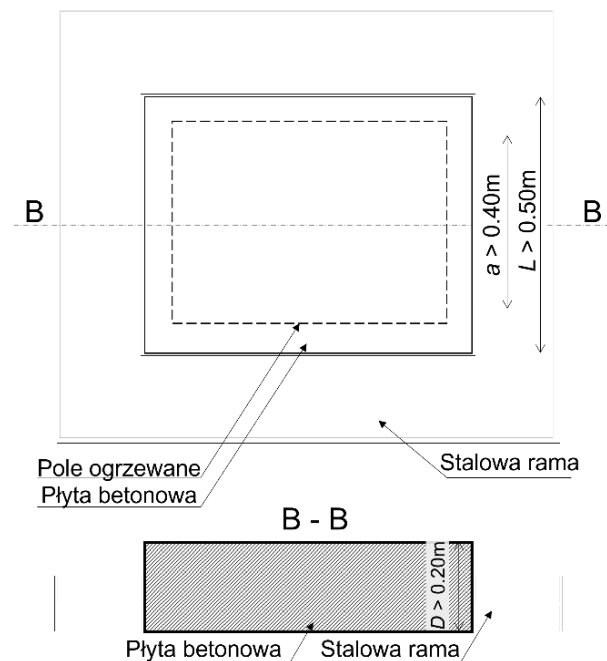
płyty prostokątne	
minimalny wymiar dł. boku L , Rys. 1, Rys. 2	0,50 m
minimalny wymiar dł. boku pola ogrzewanego a	0,40 m
płyty kołowe	
minimalna średnica L , Rys. 3	0,60m
minimalny średnica pola ogrzewanego a , Rys. 3	0,50m
minimalna grubość płyty D:	
płyta nieobciążona (i)	0,30 m
płyta skrępowana pasywnie, Rys. 1 / (ii-A), Rys. 2 / (iii-B), Rys. 3 (iii-C)	0,20 m
płyta obciążona, Rys. 4 / (iv-D)	0,15 m

Skrępowanie odkształceń termicznych w elemencie betonowym można wprowadzić na kilka rekomendowanych przez komitet RILEM sposobów; (i) zwiększając grubość płyty, co powoduje utrudnienie powstawania rys w nieogrzewanej obwodowej części płyty (ang. *cold rim*), (ii-A) wprowadzając obwodowe zbrojenie w trzech warstwach: zwiększa się wytrzymałość płyty na rozciąganie ograniczając możliwość odkształcenia elementu w strefie obwodowej płyty, Rys. 1, (iii-B) krępując odkształcenia płyty poprzez stalową ramę w przypadku

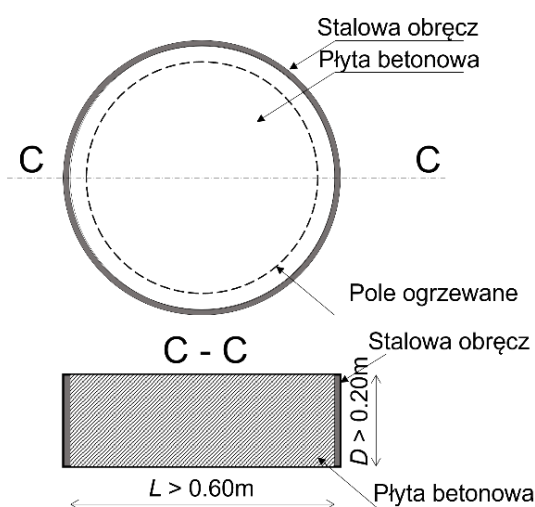
płyt prostokątnych, Rys. 2, lub (iii-C) stalową obręcz (sztywną rurę bezszwową) w przypadku płyt kołowych, Rys. 3, (iv-D) wprowadzając obciążenie ściskające w płaszczyźnie płyty w postaci: elementów sprężających, siłowników hydraulicznych lub innych urządzeń umożliwiających wprowadzenie dwu-, lub przynajmniej jedno-kierunkowego ściskania w płaszczyźnie płyty na poziomie 2 MPa, który, jak wynika z badań jest wystarczającym naprężeniem dla zapewnienia skrępowania płyty, Rys. 4.



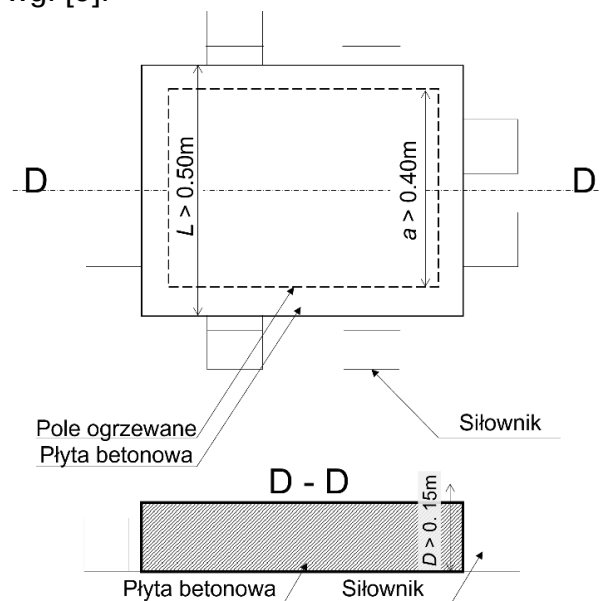
Rys. 1. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez zbrojenie obwodowe, wg. [9].



Rys. 2. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez stalową ramę, wg. [9].

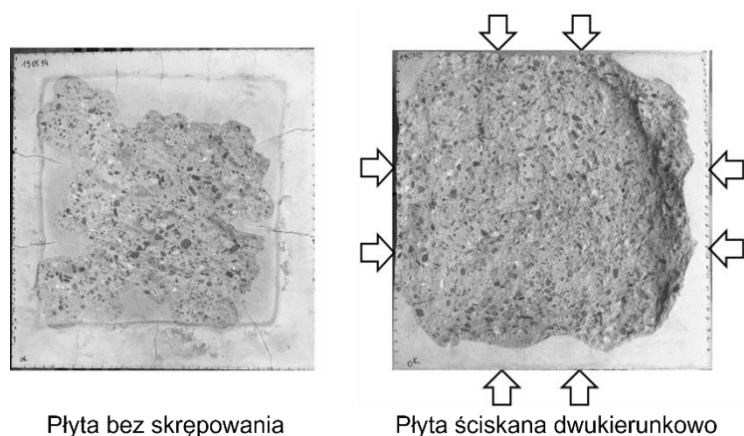


Rys. 3. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez stalową obręcz, wg. [9].



Rys. 4. Skrępowanie odkształceń termicznych w płycie przez obciążenie zewnętrzne.

Wymagana minimalna grubość elementów badawczych jest zatem związana z koniecznością zapewnienia skrzepowania odkształceń termicznych betonu w czasie badania ogniowego. Uwolnienie odkształceń termicznych i umożliwienie swobodnego zarysowania się płyty powoduje dalece różne wyniki przeprowadzonego badania. Przykład termicznego odpryskiwania w płycie bez skrzepowania i w płycie ściskanej dwukierunkowo przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Wpływ obecności skrzepowania odkształceń termicznych w badaniach przesiewowych na termiczne odpryskiwanie betonu o takim samym składzie (badania własne)

3.3 Pielęgnacja próbek i wiek betonu w chwili badania

Próbki mogą być przygotowywane w laboratorium lub w warunkach budowy, ale należy zapewnić im odpowiednią jakość wykonania i zachować jednorodność warunków dojrzewania dla wszystkich wykonanych elementów.

Prawidłowa pielęgnacja betonu i jednakowe warunki przechowywania stanowią istotne czynniki mogące wpływać na wyniki badań, głównie poprzez kształtowanie profilu wilgotnościowego w płytach do badań przesiewowych. Proces pielęgnacji warunkuje tempo hydratacji cementu oraz ogranicza niekontrolowane wysychanie, które może prowadzić do powstania gradientów wilgotności w przekroju elementu. Zbyt intensywna utrata wilgoci z powierzchni skutkuje przesuszeniem strefy przypowierzchniowej, co może fałszować mechanizm odpryskiwania poprzez sztuczne ograniczenie ciśnienia pary wodnej. Z kolei niedostateczna pielęgnacja może prowadzić do zatrzymania nadmiernej ilości wody w rdzeniu betonu, co w warunkach wysokotemperaturowych sprzyja gwałtownemu wzrostowi ciśnienia wewnętrznego i intensyfikacji odpryskiwania.

Z tego względu, zapewnienie kontrolowanej, ujednoliconej pielęgnacji próbek w badaniach przesiewowych jest kluczowe dla uzyskania reprezentatywnych, powtarzalnych wyników i wiarygodnej oceny wpływu składu mieszanki na podatność na termiczne odpryskiwanie.

Po rozformowaniu, płyty powinny być przechowywane przez 7 dni pod folią, w celu zapewnienia odpowiedniej pielęgnacji. Następnie próbki należy przechowywać w stałych warunkach, definiując temperaturę i wilgotność powietrza, oraz zapewniając płytom swobodną dopływ powietrza z każdej strony. Należy zapewnić jednakowe warunki przechowywania dla wszystkich próbek, unikając ich przesuszenia.

Zaleca się, aby badania były prowadzone na próbkach w jednakowym wieku, nie wcześniej niż po 90 dniach, w jak najkrótszym możliwie odstępie czasowym dla całej serii badań. Zalecenia dotyczące realizacji badań po 90 dniach wynikają z doświadczeń wskazujących na istotne procesy zachodzące w mikrostrukturze betonu, a zwiększające podatność na termiczne odpryskiwanie dojrzałego betonu. Wyróżnić tutaj należy proces hydratacji w szczególności dla spoiw z dodatkami mineralnymi o charakterze pucolanowym i tych o niskim wskaźniku wodno-cementowym. Po 28-dniach zachodzi dalsze zagęszczanie mikrostruktury, które powoduje obniżanie porowatości i zmniejszenie przepuszczalności betonu, zwiększając ryzyko odpryskiwania. Ponadto jak pokazują doświadczenia, podczas oceny wpływu rodzaju kruszywa, typu i ilości włókien czy też dodatków mineralnych, na podatność betonu na termiczne odpryskiwanie, bardziej jednolite w serii wyniki uzyskuje się w betonach dojrzałych. Starszy beton charakteryzuje się bardziej ustabilizowanym rozkładem wilgotności na przekroju, co wpływa na lepszą identyfikację rzeczywistego oddziaływania poszczególnych składników na mechanizm odpryskiwania.

3.4 Przygotowanie, realizacja badania i pomiary

Podczas badania przesiewowego próbki są poddawane ogrzewaniu jednostronnemu, w pozycji pionowej lub poziomej, zgodnie ze standardową krzywą pożarową zdefiniowaną w ISO 834-1. Czas trwania badania powinien wynosić co najmniej 30 minut i powinien być taki sam dla wszystkich badanych płyt w kampanii badawczej. Zwykle badanie trwa 60 minut. Próbkę mogą być badane bez obciążenia, z obciążeniem ściskającym w płaszczyźnie płyty albo z pasywnym skrupowaniem odkształceń termicznych, jak opisano w rozdziale 3.2. zapewniając ten sam typ obciążenia dla wszystkich badanych elementów.

W czasie badania należy rejestrować w sposób ciągły temperaturę, a w przypadku obciążenia zewnętrznego, również wartość siły przekazywanej na płytę. W przypadku wystąpienia odpryskiwania monitoruje się parametry opisujące postęp i zasięg odpryskiwania.

- początek i czas trwania odpryskiwania (min);
- ogólny opis zdarzeń odpryskiwania wraz z opisem jego charakteru (oszacowanie wielkości odprysków i kształtu, jeśli to możliwe);
- ilość i intensywność zdarzeń odpryskiwania oraz dominująca formę odpryskiwania (odpryskiwanie powierzchniowe, odpryskiwanie kruszywa, zdarzenia eksplozyjnego odpryskiwania [15]);
- określany jest także moment, w którym wystąpi odslonięcie zbrojenia.

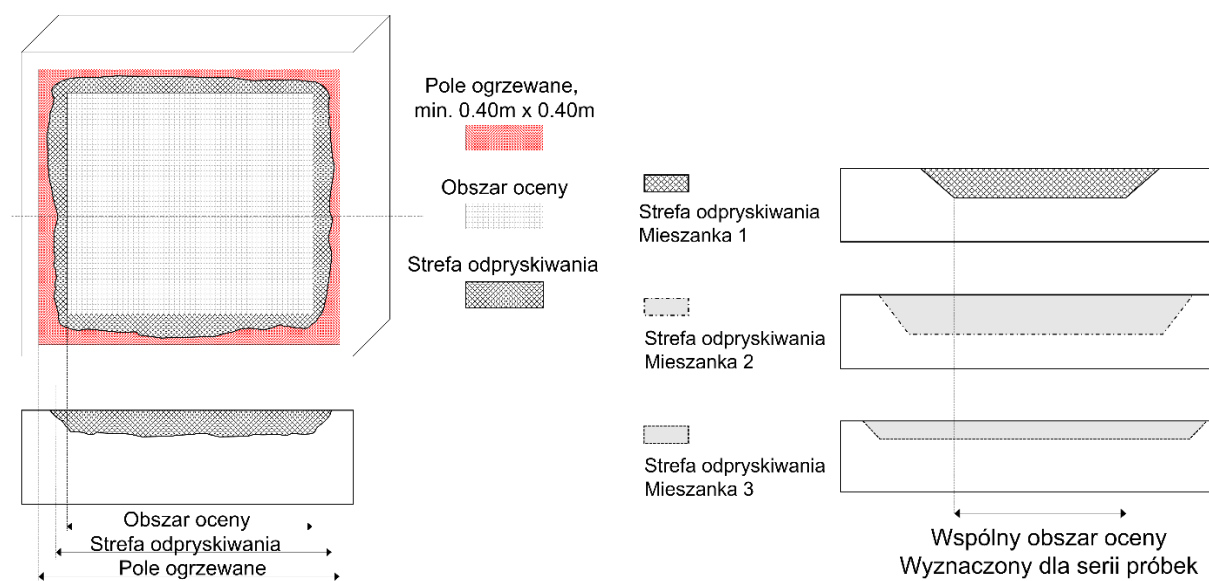
Po zakończeniu badania oględziny badanej próbki przeprowadzane są w ciągu 24 godzin. Czas upływający od zakończenia badania jest istotny dla oszacowania ilości i zasięgu odprysków, w szczególności w przypadku stosowania kruszyw wapiennych, dla których obserwuje się w kontakcie z wilgocią zawartą w powietrzu proces ponownego uwodnienia tlenku wapnia, ekspansję produktów reakcji, które prowadzą do złuszczeń.

W przypadku braku uszkodzeń jest to odnotowane w raporcie. W przypadku wystąpienia uszkodzeń i odprysków pojawia się konieczność oceny ilości i zasięgu ich występowania. W rekomendacji RILEM zdefiniowano obszar, dla którego dokonuje się inwentaryzacji odpryskiwania (*assessment area*). Wyznaczenie tego obszaru stanowi istotny element procedury badawczej, ponieważ pozwala na

rzetelną ocenę rozległości i głębokości odprysków oraz na porównanie betonów o różnym składzie.

Obszar podlegający ocenie jest to ogrzewana powierzchnia, z wyłączeniem nieogrzewanej obwodowej części płyty. Dodatkowo należy wykluczyć strefę, w której występuje nierównomierne odpryskiwanie. Jest to obszar, gdzie widoczna jest zmienność między powierzchniami z intensywnym odpryskiwaniem, a fragmentami pozbawionymi uszkodzeń. Takie przejściowe strefy nie są reprezentatywne i mogą zaburzać wyniki oceny, ponieważ warunki termiczne i mechaniczne przy krawędziach często różnią się od tych panujących w środkowej części próbki podlegającej równomiernemu ogrzewaniu.

Obszar płyty podlegający ocenie powinien obejmować możliwie największą jednorodną powierzchnię płyty w strefie centralnej, w którym odpryskiwanie ma charakter równomierny, Rys.6. Co istotne, tak wyznaczony obszar powinien zostać ustalony dla wszystkich płyt badanych w danej serii, umożliwiając porównanie betonów. W praktyce oznacza to, że należy wyznaczyć najmniejszy wspólny jednorodny obszar, który występuje we wszystkich badanych próbkach. Przykład właściwego wyznaczenia obszaru oceny dla serii próbek przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 6. Wyznaczenie obszaru oceny po badaniu przesiewowym, wg. [9].

Rys. 7. Wyznaczenie obszaru oceny dla serii próbek, wg. [9].

W sytuacji, gdy nie da się jednoznacznie wskazać obszaru o spójnym charakterze odpryskiwania, zaleca się, aby obszar oceny przyjąć jako powierzchnię o 10% mniejszą niż powierzchnia bezpośrednio ogrzewana.

Dokładne wyznaczenie obszaru ma istotne znaczenie, ponieważ na jego podstawie ustala się:

- średnią głębokość odpryskiwania w obszarze oceny;
- maksymalną głębokość odpryskiwania (nawet jeśli znajduje się poza regularną siatką).

Pomiary głębokości odprysków mogą być wykonywane ręcznie w regularnej siatce w co najmniej 20 równomiernie rozłożonych punktach lub za pomocą narzędzi

zautomatyzowanych, np. skanowania 3D, umożliwiających sporządzenie mapy odprysków.

Wyniki badań powinny być dokładnie udokumentowane w raporcie, który obejmuje: przedstawienie składu mieszanki betonowej, właściwości mechanicznych i fizycznych betonu, informacje o kształcie próbek i warunkach ich przechowywania. Dodatkowo w raporcie zamieszcza się opis sposobu realizacji obciążenia termicznego i mechanicznego. Raport zawiera wszystkie obserwacje i pomiary związane z występowaniem i charakterystyką odprysków.

3.5 Wnioski z badań przesiewowych

Badania przesiewowe mają na celu identyfikację składu betonowej o najniższej podatności na termiczne odpryskiwanie. Jeżeli badane mieszanki mają na celu być stosowane w elementach konstrukcyjnych, wytypowana mieszanka jako najbardziej odporna na termiczne odpryskiwanie powinna następnie zostać zastosowana do wykonania elementów w skali rzeczywistej, które posłużą do przeprowadzenia pełnoskalowych badań odporności ogniowej. Takie badania pozwolą potwierdzić brak odprysków lub ich występowanie na poziomie akceptowalnym z punktu widzenia bezpieczeństwa i wymagań projektowych. Raportowanie odpryskiwania w badaniach odporności ogniowej przeprowadza się zgodnie z wytycznymi RILEM opisanymi w kolejnym rozdziale.

4. Ocena podatności betonu na termiczne odpryskiwanie podczas realizacji badań odporności ogniowej: uzupełniające wytyczne i wymagania

Badania pełnoskalowe mają na celu przede wszystkim ocenę odporności ogniowej elementów pełnoskalowych. Mogą one również dostarczyć przydatnych informacji na temat charakteru i zasięgu termicznego odpryskiwania. Wymaga to jednak, aby raport z badań był sporządzany w sposób bardziej szczegółowy niż ten wymagany przez normę dotyczącą badań odporności ogniowej, w której jedynie odnotowuje się wystąpienie tego zjawiska.

W porównaniu do podstawowych wymagań norm ISO 834-1 oraz EN 1363-1, które definiują ogólne warunki badań odporności ogniowej (m.in. przebieg obciążenia ogniowego, wymagania dotyczące pieca i sposobu przyłożenia obciążeń mechanicznych), zalecenia RILEM TC 256-SPF [10] w zakresie oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie wprowadzają szereg dodatkowych, bardziej szczegółowych wytycznych. Celem tych uzupełnień jest umożliwienie rzetelnej identyfikacji i ilościowej oceny odpryskiwania, czego standardowe badanie wg normy nie obejmuje. Poniżej przedstawiono, rekomendacje RILEM w tym zakresie.

4.1 Dodatkowa charakterystyka betonu

Poza 28-dniową wytrzymałością betonu na ściskanie, należy wyznaczyć referencyjną wytrzymałość na ściskanie (w dniu badania) na próbkach przechowywanych w takich samych warunkach jak główny element badawczy.

Ponadto, ze względu na istotny wpływ wilgotności betonu na wyniki odpryskiwania, zaleca się dokładne oznaczenie zawartości wilgoci w różnych strefach próbki: 0–2,5 cm i 2,5–5 cm od powierzchni ekspozowanej, oraz powyżej 5 cm głębokości (rdzeń). Zalecana procedura oznaczania wilgotności w warstwie

przypowierzchniowej (do 5 cm) polega na przygotowaniu cylindrycznych próbek o średnicy co najmniej 10 cm i długości równej grubości badanego elementu. Aby zapewnić takie same warunki dojrzewania, próbki powinny pozostać w plastikowych formach aż do momentu badania. Przed określeniem wilgotności próbki należy przeciąć, np. poprzez rozłupywanie lub cięcie „na sucho”. Określenie wilgotności realizuje się suszenie w $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ do uzyskania stabilnej masy powstałych dysków.

4.2 Pielęgnacja betonu

Normy ISO 834-1 i EN 1363-1 nie precyzują wymagań dotyczących sposobu przechowywania betonu ani wieku betonu w momencie realizacji badań. Dla omawianych celów, podobnie jak w badaniach przesiewowych, zalecany wiek betonu w chwili badania to co najmniej 3 miesiące dojrzewania w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Ponadto, ważnym jest unikanie przyspieszonego suszenia, ponieważ może to zaburzyć profil wilgotności i zafałszować ocenę odprysków. Elementom w czasie dojrzewania i przechowywania powinno się zapewnić stałą cyrkulację powietrza. Należy unikać układania płyt bezpośrednio na podłożu, w szczególności powierzchni eksponowanej na działanie ognia. Zaleca się układanie płyt na przekładkach umożliwiających dostęp powietrza.

4.3 Pomiary i obserwacje specyficzne dla odpryskiwania

Podczas przeprowadzania badań odporności ogniowej z uwzględnieniem oceny podatności na termiczne odpryskiwanie, rekomendowane jest stosowanie dodatkowych procedur pomiarowych i obserwacyjnych, wykraczających poza standardowe wymagania norm ISO i EN.

W czasie badania zaleca się prowadzenie ciągłej oceny wizualnej i akustycznej. Należy rejestrować moment rozpoczęcia i zakończenia odprysków, a także określać ich intensywność, lokalizację i charakter. Jeżeli dojdzie do odsłonięcia zbrojenia w wyniku odprysków, należy zaraportować czas. Dla pełnej analizy rozwoju odpryskiwania, rekomenduje się nagrywanie wideo oraz dźwięku przez cały czas trwania badania.

Po zakończeniu badania i ostudzeniu elementu, przeprowadza się inwentaryzację odprysków. Podobnie jak w badaniach przesiewowych, może być wykonana ręcznie w układzie siatki pomiarowej obejmującej co najmniej 100 punktów pomiarowych lub przy zastosowaniu innych dokładnych technik pomiarowych. Na podstawie tych danych należy określić: średnią głębokość odprysków na całej powierzchni ogrzewanej, średnią głębokość odprysków mierzoną w obrębie obszarów z odpryskami, a także maksymalną głębokość, jeśli nie została uchwycona w siatce pomiarowej.

Dodatkowo, po zakończeniu badania należy przeprowadzić ocenę oderwanych fragmentów betonu. Informacje dotyczą rozmiarów i objętości oraz opisu kształtu, a także wykonania dokumentacji fotograficznej z odniesieniem (np. linijką).

4.4 Raport końcowy z badań odporności ogniowej z uzupełnieniem o termiczne odpryskiwanie

Raport końcowy z badania powinien zawierać rozszerzony zakres danych. Oprócz wyników standardowych, należy w nim ująć rzeczywisty, objętościowy skład mieszanki betonowej, szczegóły dotyczące zastosowanych włókien (jeśli były używane), parametry zbrojenia, wyniki pomiarów wilgotności i wytrzymałości betonu

na ściskanie, w tym referencyjną wartość, a także wszystkie obserwacje i dane ilościowe związane z odpryskiwaniem. Normy ISO i EN ograniczają wymagany zakres raportowania do podstawowych kryteriów odporności ogniowej, pomijając szczegółową analizę i inwentaryzację odprysków.

Stosowanie rekomendacji RILEM w zakresie oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie podczas badań odporności ogniowej ma istotne znaczenie, ponieważ stanowi uzupełnienie ogólnych norm ogniowych (takich jak ISO 834-1 czy EN 1363-1), które nie obejmują tego problemu w wystarczającym stopniu. Odpryskiwanie może prowadzić do znacznej utraty przekroju nośnego i przyspieszonej degradacji elementu, a tym samym wpływać na jego rzeczywistą odporność ogniową.

5. Przykłady praktycznego zastosowania rekomendacji w projektowaniu betonu odpornego na termiczne odpryskiwanie

Badania przesiewowe zgodne z rekomendacjami RILEM [9], ukierunkowane na ocenę odporności betonu na termiczne odpryskiwanie, znajdują coraz szersze zastosowanie również w Polsce. Przykładem jest jedna z kampanii badawczych przeprowadzonych na Politechnice Krakowskiej, której celem była ocena skuteczności modyfikacji składu betonu poprzez dodatek włókien polipropylenowych oraz stalowych w ograniczaniu termicznego odpryskiwania betonu, w kontekście jego docelowego zastosowania w prefabrykowanych obudowach tunelowych.

Badania przeprowadzono w piecu wysokotemperaturowym DRAGON, gdzie płyty betonowe poddano jednostronnemu nagrzewaniu zgodnie z krzywą ISO 834-1 oraz dwukierunkowemu ściskaniu w płaszczyźnie płyty. Wprowadzenie obciążenia miało na celu odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy elementu oraz zwiększenie ryzyka wystąpienia zdarzeń odpryskiwania, poprzez ograniczenie możliwości swobodnych odkształceń i transportu pary wodnej.

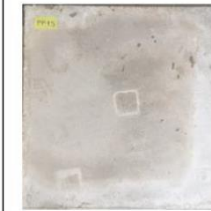
Zrealizowano ocenę pięciu betonów z różnym udziałem włókien PP i stalowych. W płycie bez włókien (referencyjnej) zaobserwowano liczne zdarzenia odpryskiwania występujące w sposób ciągły. Termiczne odpryskiwanie, objęło 89% powierzchni ogrzewanej, z maksymalną głębokością odprysków sięgającą 29 mm. Mieszanki z dodatkiem włókien PP, niezależnie od ilości dozowania (w zakresie 1, 1,5 i 2%) skutecznie zapobiegły wystąpieniu odprysków. W badaniach wskazano na dwa poziomy dozowania włókien, umożliwiające skuteczne wyeliminowanie odpryskiwania, dla których dodatkowo zaobserwowano ograniczenie zarysowania elementu.

W przypadku betonów z włóknami PP i stalowymi odnotowano wystąpienie sieci drobnych spękań powierzchniowych i brak odpryskiwania. Porównanie wyglądu płyt po badaniu przedstawiono na Rys. 8.

Zidentyfikowano problem wtórnego złuszczenia się powierzchni betonu po kilku dniach od badania, wynikające z ponownego uwodnienia tlenku wapnia powstałego z kruszywa wapiennego obecnego w betonie.

Badania przesiewowe umożliwiły szybkie i technicznie wiarygodne wskazanie optymalnych mieszanek pod względem odporności na termiczne odpryskiwanie. Potwierdziły tym samym zasadność stosowania tej metody jako efektywnego narzędzia inżynierskiego. Dzięki porównaniu pięciu różnych mieszanek betonowych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, możliwe było szybkie i skuteczne

zidentyfikowanie składu wykazującego najkorzystniejsze zachowanie z uwagi na termiczne odpryskiwanie.

Zdjęcie powierzchni po 7 dniach od badania				
Pęcznienie kruszyw wapiennych	Złuszczenie części powierzchni	Brak zmian (niska T_{max})	Intensywne złuszczenie powierzchni (wysoka T_{max})	Złuszczenie części powierzchni
				

Rys. 8. Wyniki przykładowej kampanii badań przesiewowych (badania własne).

6. Podsumowanie i wnioski

W odpowiedzi na ryzyko związane z termicznym odpryskiwaniem oraz brak jego uwzględnienia w normowych badaniach odporności ogniowej (ISO 834-1, EN 1363-1), rekomendacje RILEM TC 256-SPF wprowadzają badania przesiewowe jako pomocne narzędzie inżynierskie służące do wczesnej oceny podatności mieszanek betonowych. Badania te mają na celu identyfikację i selekcję składu betonu, który nie wykazuje tendencji do odpryskiwania w warunkach pożaru.

Procedura badań przesiewowych została opracowana w sposób elastyczny. Pozwala dopasować ją do etapu projektowego: *badania przesiewowe materiału* stosuje się przy opracowywaniu nowych składów mieszanki betonowej, natomiast *badania przesiewowe produktów*, przy optymalizacji składu betonu pod kątem zdefiniowanego zastosowania. Umożliwia to efektywne porównywanie różnych składów mieszanki i eliminację mieszanek podatnych na odpryskiwanie jeszcze przed realizacją czasochłonnych i kosztownych badań pełnoskalowych.

Rekomendacje RILEM zawierają szczegółowe wytyczne dotyczące geometrii próbek, metod pielęgnacji, wieku betonu, konfiguracji termicznej i mechanicznej badania, sposobu obserwacji odprysków oraz precyzyjnego wyznaczania obszaru oceny jak i sposobu inwentaryzacji odprysków. Dzięki temu badania przesiewowe są powtarzalne, porównywalne i wiarygodne. Zaleca się ze szczególną uwagą i w jednakowych warunkach pielęgnować i przechowywać próbki betonu w celu uzyskania zbliżonych stanów wilgotnościowych, ponieważ te czynniki silnie determinują możliwość wystąpienia odprysków.

Zaleca się również rozszerzenie obserwacji w zakresie odpryskiwania podczas realizacji normowych badań odporności ogniowej. Zgodnie z rekomendacjami RILEM, należy prowadzić dodatkowe obserwacje i dokumentować charakterystykę odprysków.

Konsekwentne wdrażanie badań przesiewowych zgodnie z zaleceniami RILEM powinno być coraz szerzej stosowaną praktyką w procesie projektowania i oceny podatności betonu na termiczne odpryskiwanie.

7. Literatura

- [1] G.A. Houry, Y. Anderberg, Concrete Spalling Review, 2000.
- [2] I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance

- évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse Dr. (2004).
- [3] R. Jansson, Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies, KTH, Stockholm, 2013.
- [4] K. Mróz, I. Hager, M. Tekieli, Effect of cold rim on extent and type of concrete fire spalling, in: 5th Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo., Borås, Sweden, 2017: pp. 51–62.
- [5] F. Lo Monte, R. Felicetti, A. Meda, A. Bortolussi, Influence of the test method in the assessment of concrete sensitivity to explosive spalling, in: 5th Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo., Borås, Sweden, 2017: pp. 289–300.
- [6] PN-EN 1992-1-2:2024-05, Eurokod 2 -- Projektowanie konstrukcji z betonu -- Część 1-2: Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe, 2004.
- [7] EN-1363-1:201, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements, 2012.
- [8] ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, 1999.
- [9] P. Pimienta, R. McNamee, I. Hager, K. Mróz, L. Boström, S. Mohaine, S.-S. Huang, J.-C. Mindeguia, F. Robert, C. Davie, R. Felicetti, M.J. Miah, M. Lion, F. Lo Monte, M. Ozawa, I. Rickard, K. Sideris, M.C. Alonso, A. Millard, U.-M. Jumppanen, L. Bodnarova, J. Bosnjak, S. Dal Pont, V. Dao, D. Dauti, F. Dehn, R. Hela, T. Hozjan, M. Juknat, J. Kirnbauer, J. Kolsek, M. Korzen, H. Lakhani, C. Maluk, F. Meftah, B. Moreau, F. Pesavento, D.T. Pham, K. Pistol, J.P. Correia Rodrigues, M. Roosefid, M. Schneider, U.K. Sharma, L. Stelzner, B. Weber, F. Weise, Recommendation of RILEM TC 256-SPF on the method of testing concrete spalling due to fire: material screening test, Mater. Struct. 56 (2023) 164. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02202-z>.
- [10] P. Pimienta, R. McNamee, F. Robert, L. Boström, S.-S. Huang, K. Mróz, C. Davie, S. Mohaine, M.C. Alonso, L. Bodnarova, J. Bosnjak, S. Dal Pont, V. Dao, D. Dauti, F. Dehn, R. Felicetti, I. Hager, R. Hela, T. Hozjan, M. Juknat, U.-M. Jumppanen, J. Kirnbauer, J. Kolsek, M. Korzen, H. Lakhani, M. Lion, F. Lo Monte, C. Maluk, F. Meftah, M.J. Miah, A. Millard, J.-C. Mindeguia, B. Moreau, Y. Msaad, M. Ozawa, F. Pesavento, D.T. Pham, K. Pistol, I. Rickard, J.P.C. Rodrigues, M. Roosefid, M. Schneider, U.K. Sharma, K. Sideris, L. Stelzner, B. Weber, F. Weise, Recommendation of RILEM TC 256-SPF on fire spalling assessment during standardised fire resistance tests: complementary guidance and requirements, Mater. Struct. 57 (2024) 3. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02248-z>.
- [11] L.T. Phan, Pore pressure and explosive spalling in concrete, Mater. Struct. Constr. 41 (2008) 1623–1632.
- [12] R. Felicetti, F. Lo Monte, P. Pimienta, A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating, Cem. Concr. Res. 94 (2017) 13–23.
- [13] R. Jansson, L. Boström, Fire Spalling – the Moisture Effect, in: 1st Int. Work. Concr. Spalling Due to Fire Expo. - From Real Life Exp. to Pract. Appl. to Lab-Scale Investig. Numer. Model., Leipzig, Germany, 2009: pp. 120–129.
- [14] K. Mróz, Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire, Cracow University of Technology, 2020.
- [15] K. Mróz, I. Hager, Causes and mechanism of concrete spalling under high temperature caused by fire, Cem. Wapno Bet. 6 (2017) 445–456.

Kinga DZIEDZIC

mgr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Dominik NOWICKI

mgr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Michał A. GLINICKI

prof. dr hab. inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Reaktywność alkaliczna mieszaniny kruszywa grubego łamanego i piasku w betonie

Alkaline reactivity of blends of crushed coarse aggregate and sand in concrete

Streszczenie

Dobór kruszyw mineralnych pod kątem odporności na wystąpienie szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo jest jednym ze znanych wymagań stawianych przy projektowaniu betonu trwałego w środowisku wilgotnym, ewentualnie narażonego na oddziaływanie soli odladzających. Znaczenie reaktywności alkalicznej kruszywa drobnego (piasku naturalnego) wzbudza niekiedy kontrowersje. Przeprowadzono badania doświadczalne reaktywności alkalicznej mieszaniny kruszyw o zróżnicowanym składzie mineralnym – grysów szarogłazowych i amfibolitowych z piaskiem naturalnym z różnych kopalń. Do oceny reaktywności kruszyw wykorzystano metodę „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) polegającą na oznaczaniu ekspansji próbek betonu w roztworze NaOH w temperaturze 60°C w okresie do 84 dni. Wyniki badań wykazały znaczny wpływ reaktywności piasku na ekspansję betonu oraz na resztkową wytrzymałość betonu na ściskanie. Wykazano korelację zmierzonej ekspansji próbek z obniżeniem dynamicznego modułu sprężystości betonu. Z uwagi na rozsądnie niedługi czas badania i brak konieczności rozdrabniania kruszywa metoda MCPT okazała się praktyczną alternatywą dla innych metod określania reaktywności alkalicznej kruszywa, oferując jednocześnie możliwość oceny praktycznego stosu okruszowego.

Abstract

The selection of mineral aggregates with regard to their resistance to harmful alkali-aggregate reaction is one of the established requirements in the design of durable concrete intended for use in humid environments or potentially exposed to de-icing salts. The significance of the alkali reactivity of fine aggregate (natural sand) is sometimes a subject of debate. Experimental studies were conducted on the alkali reactivity of aggregate mixtures with varied mineral compositions-greywacke and amphibolite crushed stones with natural sand from different quarries. To assess aggregate reactivity, the „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) method was used. This method involves measuring the expansion of concrete specimens immersed in a NaOH solution at 60°C

over 84 days. The results showed a significant influence of sand reactivity on concrete expansion and residual compressive strength of the concrete. A correlation was demonstrated between the measured expansion of specimens and the reduction in the dynamic modulus of elasticity of concrete. Given the relatively short testing time and the fact that the method does not require aggregate crushing, the MCPT proved to be a practical alternative to other methods of assessing aggregate alkali reactivity, while also enabling the evaluation of the practical aggregate gradation stack.

1. Wprowadzenie

Projektowanie składu betonu na trwałość w warunkach eksploatacji konstrukcji inżynierskich wymaga selekcji składników z uwzględnieniem stabilności ich właściwości w środowiskach agresywnych. Kruszywa mineralne w betonie cementowym stanowią na ogół składniki o niezmiennych właściwościach mechanicznych. Do wyjątków należą kruszywa zawierające reaktywne minerały krzemionkowe podatne na reakcję z wodorotlenkami sodu i potasu w cieczy porowej betonu cementowego, tzw. reakcję alkalia-krzemionka (ASR). Ich zastosowanie w betonie konstrukcyjnym może wywołać przedwczesne uszkodzenia w postaci spękań, delaminacji i pęcznienia elementów, przyczyniając się do zmniejszenia przydatności eksploatacyjnej konstrukcji [1-2].

Selekcję kruszyw niereaktywnych alkalicznie przeprowadza się głównie za pomocą analizy petrograficznej kruszywa i analizy potencjalnej ekspansji betonu w warunkach przyspieszających występowanie szkodliwych skutków reakcji ASR. Klasyfikację reaktywności alkalicznej kruszywa na ogół przeprowadza się osobno dla każdej frakcji kruszywa, zwłaszcza rozdzielając kruszywo grube i drobne. Zgodnie z zaleceniami normowymi, zidentyfikowana reaktywność jednej z frakcji kruszywa wymaga takiego samego traktowania całego stosu okruszowego i zastosowania odpowiednich środków zapobiegających uszkodzeniom wskutek ASR. Alternatywnie, należy wymienić reaktywną frakcję kruszywa na niereaktywną. Takie podejście nie wpisuje się w aktualne trendy zrównoważonego wykorzystania surowców mineralnych.

Rola reaktywności alkalicznej kruszywa drobnego wzbudza niekiedy kontrowersje. Z doniesień literaturowych wynika, że ekspansja wskutek ASR wzrasta wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren kruszywa z powodu zwiększonej powierzchni reaktywnych składników kruszywa. Stwierdzono jednak, że zależność ta nie jest monotoniczna w przypadku niektórych kruszyw mineralnych i największa ekspansja występuje dla pośredniej frakcji [3-4]. Ze względu na zależność reaktywności od wielkości ziarna, kruszywa powinny być klasyfikowane na podstawie badań takich frakcji, jakie zostaną użyte w betonie, bez ich rozdrabniania.

Na świecie i w Polsce do klasyfikacji podatności kruszyw na reakcję alkalia-krzemionka stosuje się przede wszystkim metodę przyspieszoną 14-dniową w 80°C (PB/1/18 [5]) oraz metodę roczną w 38°C (PB/2/18 [6]). Jednak obie metody mają swoje wady. Metoda przyspieszona wymaga rozdrobnienia kruszywa do 2 mm, więc miarodajna ocena reaktywności alkalicznej zmieszanych frakcji kruszywa jest utrudniona. Metoda roczna jest problematyczna ze względu na intensywne wyciekanie alkaliów [7] oraz mało praktyczny, długi czas badania. Unormowana w roku 2019 metoda Miniature Concrete Prism Test (MCPT) [8] ma eliminować wady powyższych metod przy dość krótkim czasie badania (8 tygodni), bez potrzeby rozdrabniania kruszywa grubego. W badaniach laboratoryjnych [9-10] metoda MCPT wykazała dobrą

zgodność z metodą roczną. Co jeszcze ważniejsze, wykazano lepszą zgodność tej metody z pomiarami skutków ASR na blokach betonowych ekspozycyjnych na oddziaływanie naturalnych warunków klimatycznych [11].

Celem badań jest ocena reaktywności alkalicznej mieszaniny kruszyw do betonu, złożonej z frakcji drobnej i grubej kruszyw o zróżnicowanym składzie mineralnym. Zakres badań obejmuje grube kruszywo łamane ze skały litej oraz naturalnie występujące kruszywa drobne (piaski). Obok metodyki PB/1/18 [5] do badań zastosowano metodykę MCPT, tj. procedurę badania ekspansji próbek betonu ekspozycyjnych na oddziaływanie roztworu 1 M NaOH w temperaturze 60°C.

2. Materiały i metody badawcze

Do badań użyto kruszywo grube łamane z szarogłazu (S) i amfibolitu (A), frakcji 2/8 i 8/16. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalne piaski kwarcowe (B, W, T) i mieszaninę piasków naturalnych (X) o uziarnieniu do 2 mm. Selekcja piasku była uzasadniona zróżnicowaniem potencjalnej reaktywności alkalicznej (Tab.1). Do wykonania betonu zastosowano cement portlandzki CEM I 52.5 R o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0,88$. Skład chemiczny cementu przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 1. Charakterystyka kruszyw mineralnych.

Ozn.	Rodzaj kruszywa	Gęstość [g/cm ³]	Ekspansja oznaczona metodą przyspieszoną *) [%]	
			14 dni	28 dni
S	Grys szarogłazowy	2,71	0,31	0,52
A	Grys amfibolitowy	2,89	0,16	0,26
B	Naturalny piasek kopalny	2,65	0,09	0,23
W	Naturalny piasek rzeczny	2,66	0,30	0,46
T	Naturalny piasek kopalny	2,65	0,36	0,57
X	Mieszanina piasków (50% B+50% W)	2,66	0,16	0,32

*) wg PB/1/18 [5]

Tabela 2. Skład cementu zgodnie z PN-EN 196-2.

Rodzaj cementu	Składnik [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
CEM I 52,5 R	19,42	5,45	2,94	64,10	1,75	3,50	0,24	0,97	1,03

Mieszanki betonowe zaprojektowano zgodnie z wymaganiami procedury MCPT [8], stosując ograniczenie uziarnienia kruszywa grubego do 12.5 mm. Stos okruszowy kruszywa skomponowano z odpowiednich frakcji gysu i piasku. Kruszywo drobne użyte zostało bez ingerencji w uziarnienie, a brakującą frakcję 2/4 mm uzupełniono frakcją 2/4 mm kruszywa grubego. Zawartość cementu była stała 420 kg/m³, współczynnik wodno-cementowy w/c wynosił 0,45; do wody zarobowej dodano wodorotlenku sodu w celu podwyższenia zawartości alkaliów do $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1,25\%$. Odstępstwem od procedury normowej było użycie mieszaniny kruszyw o zróżnicowanej reaktywności.

Z każdej mieszanki zaformowano próbki o wymiarach 50x50x285 mm z czopikami pomiarowymi. Próbki były zagęszczane na stole wibracyjnym i przechowywane w formach w warunkach wysokiej wilgotności (RH>95%) przez 24 h. Następnie próbki umieszczono w wodzie o temp. 60°C na 24 h, po czym zanurzono je w 1 molowym roztworze wodorotlenku sodu i przechowywano przez 84 dni. Próbkę referencyjną przechowywano w tym samym czasie w wodzie o temperaturze 20-22°.

Okresowo przeprowadzano pomiary wydłużenia próbek oraz pomiary rezonansowego modułu sprężystości betonu za pomocą urządzenia GrindoSonic MK5 z detektorem piezoelektrycznym, podobnie jak w przypadku [12-13]. Na zakończenie wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie na próbkach sześciennych o boku 50 mm wyciętych z belek betonowych.

3. Wyniki badań i dyskusja

W Tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyników badań ekspansji oraz wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie betonu po badaniach ekspansji oraz próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie w 20°C. Podano wartości średnie z trzech próbek, przy czym rozrzut wyników nie przekraczał $\pm 11\%$.

Tabela 3. Zestawienie pomiarów ekspansji próbek betonowych i wytrzymałości na ściskanie.

Kruszywo grube	Rodzaj piasku	Ekspansja próbek w 1 M NaOH i 60°C [%]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 84 dniach ekspozycji	
		56 dni	84 dni	NaOH 60°C	H ₂ O 20°C
Szarogłaz (S)	B	0,065	0,092	57,2	59,0
	W	0,093	0,119	64,3	73,1
	T	0,120	0,158	64,2	73,9
Amfibolit (A)	B	0,048	0,075	56,6	67,6
	X	0,069	0,115	55,5	63,8
	W	0,095	0,159	51,9	66,5

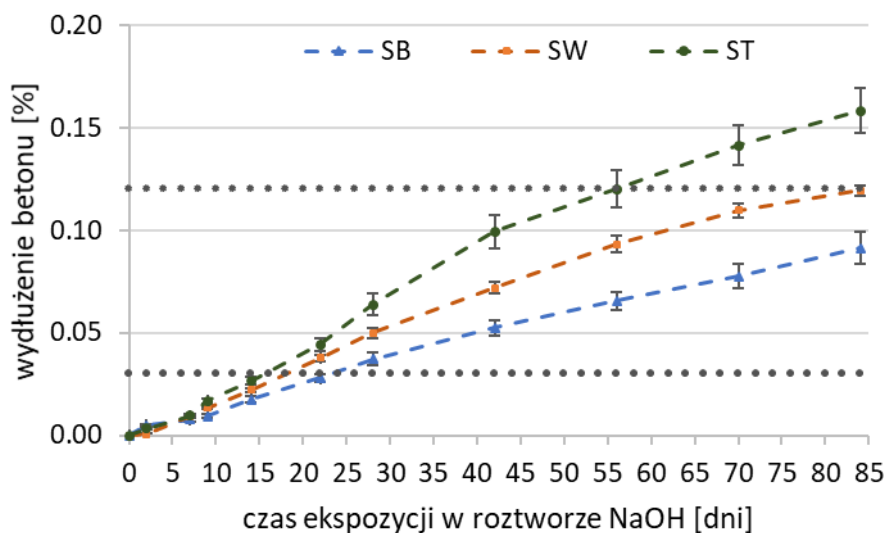
Na rysunku 1 przedstawiono wydłużenie próbek betonu w czasie przechowywania w 1 M roztworze wodorotlenku sodu w temperaturze 60°C. Kryteria oceny reaktywności alkalicznej kruszywa zgodnie z procedurą MCPT są następujące: wydłużenie próbek betonowych po 8 tygodniach ekspozycji, wynoszące do 0,03%; 0,03-0,12% i 0,12-0,24%, odpowiada kolejno kategorii kruszywa niereaktywnego, umiarkowanie reaktywnego i silnie reaktywnego. Odnosząc się do kryteriów normowych MCPT badane kruszywa grube nawet w zestawieniu z piaskiem niereaktywnym B kwalifikują się do kategorii kruszyw umiarkowanie reaktywnych. Jak stwierdzono, zastąpienie piasku B innym piaskiem naturalnym o większej potencjalnej reaktywności (Tabl.1) wywołuje wyraźne podwyższenie ekspansji betonu, sięgające do 110%.

Kruszywo szarogłazowe zostało rozpoznane w literaturze jako kruszywa potencjalnie reaktywne [14], za wyjątkiem złóż w Nowej Zelandii. Zasadniczym powodem ich reaktywności jest obecność takich minerałów reaktywnych jak kwarc mikrokrystaliczny i kryptokrystaliczny [15]. Zwłaszcza przy zewnętrznym

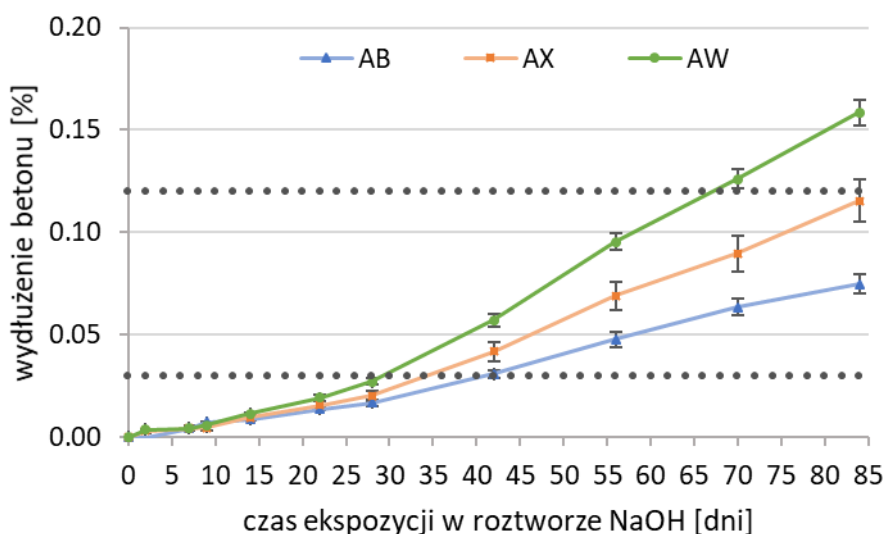
oddziaływaniu środków odladzających na beton kruszywa szarogłazowe istotnie przyczyniły się do degradacji betonu, ujawniającego się przez znaczne spękania i znaczne obniżenie współczynnika sprężystości [16].

Kruszywa amfibolitowe występujące w Polsce są uznawane za niereaktywne, co jest potwierdzone obserwacjami dotychczas eksploatowanych obiektów betonowych. Natomiast dane literaturowe [14] wskazują, że wśród minerałów głównych amfibolitu mogą występować hornblenda, plagioklasy, kwarc, epidot, kalcyt i tytanit, w żyłach występuje kwarc, chloryt i kalcyt. Reaktywną fazą amfibolitu jest przede wszystkim kwarc mikrokrystaliczny, a także kwarc kryptokrystaliczny występujący w żyłach i strefach ścinania. Zarówno rodzaj minerałów reaktywnych, jak też ich ilość wpływają ostatecznie na podatność kruszywa na reakcję z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie.

a)



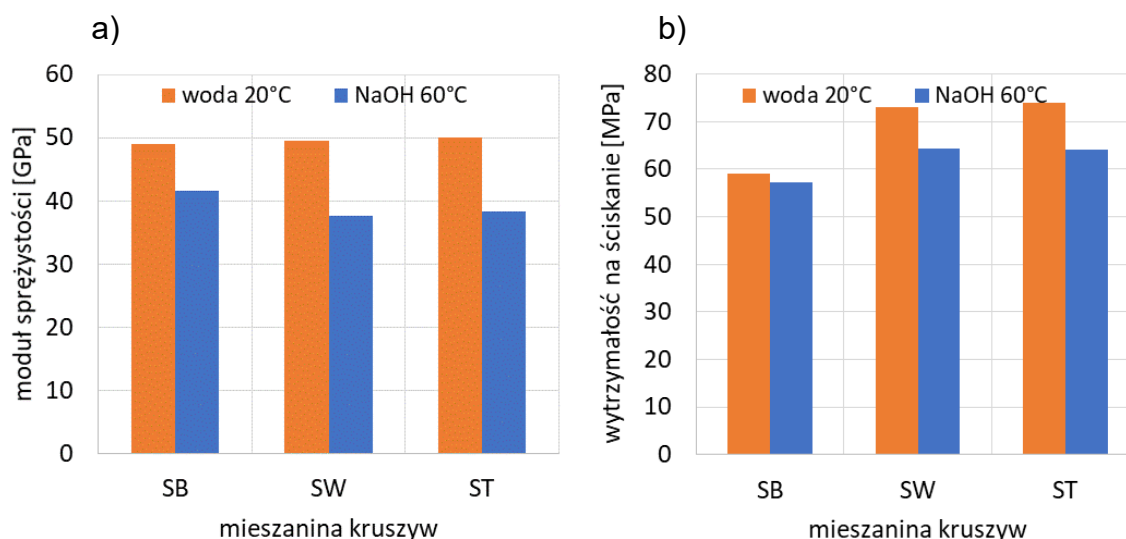
b)



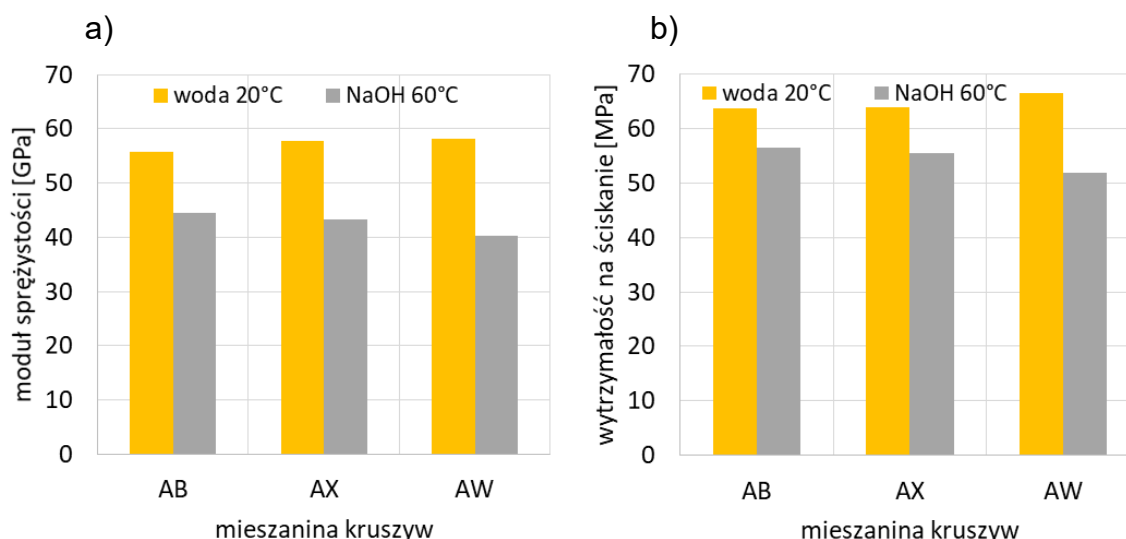
Rys. 1. Wydłużenie próbek betonowych z grysem szarogłazowym (a) i grysem amfibolitowym (b) w czasie przechowywania w roztworze NaOH w temperaturze 60°C.

W przypadku wszystkich mieszanin kruszyw zauważono wpływ zastosowanego kruszywa drobnego na końcową ekspansję próbek betonu - im większa potencjalna reaktywność piasku, tym większa końcowa ekspansja mieszaniny kruszyw w MCPT. Po zamianie piasku kwarcowego potencjalnie niereaktywnego (B) na piasek potencjalnie reaktywny (W) nastąpił umiarkowany wzrost wydłużenia, ok. 20%-30%, próbek betonu z szarogłazem (S), natomiast w przypadku amfibolitu (A) było to aż 110%. Podobną korelację tj. istotny wpływ reaktywności piasku na końcową ekspansję próbek betonowych stwierdzono w badaniach z udziałem zewnętrznego dostępu alkaliów [16]. W pracy [17] piasek rzeczny został zidentyfikowany jako przyczyna uszkodzeń wskutek ASR w analizowanych konstrukcjach, a w badaniach laboratoryjnych wykazano, że w zależności od rodzaju zastosowanego niereaktywnego kruszywa grubego (wapień i granit) klasyfikacja reaktywności piasku może ulec zmianie.

W przypadku wszystkich analizowanych próbek betonu stwierdzono spadek rezonansowego modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie betonu na skutek przechowywania próbek w roztworze NaOH w temperaturze 60°C (Rys.2 i 3). Redukcja modułu sprężystości była tym większa im większa reaktywność piasku stosowanego w stosie okrucowym kruszywa. Próbki z piaskiem reaktywnym (W) po przechowywaniu w warunkach promujących rozwój ASR charakteryzowały się wyraźnie niższym modułem sprężystości niż próbki z piaskiem niereaktywnym – odwrotnie niż w próbkach referencyjnych przechowywanych w wodzie. W przypadku wytrzymałości na ściskanie nie zauważono podobnej zależności, chociaż przechowywanie próbek w warunkach promujących ASR wywołało wyraźny spadek wytrzymałości – od 2% do 15%.



Rys. 2. Rezonansowy moduł sprężystości (a) i wytrzymałość na ściskanie (b) próbek betonu po ich przechowywaniu przez 84 dni w warunkach promujących ASR i próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie – beton z grysem szarogłazowym.



Rys. 3. Rezonansowy moduł sprężystości (a) i wytrzymałość na ściskanie (b) próbek betonu po ich przechowywaniu przez 84 dni w warunkach promujących ASR i próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie – beton z grysem amfibolitowym.

Stopień pogorszenia właściwości mechanicznych jest istotnym czynnikiem oceny ryzyka związanego w wystąpieniem reakcji [12]. Na ogół oczekuje się, że wszystkie właściwości mechaniczne betonu pogarszają się w wyniku destrukcyjnego działania reakcji alkalia-kruszywo, a stopień pogorszenia właściwości mechanicznych zależy od reaktywności kruszywa, uziarnienia i właściwości ekspansywnych produktów ASR. W wyniku ekspozycji próbek betonowych na 60°C i wysoką wilgotność w pracy [18] stwierdzono wyraźny spadek modułu sprężystości o 21-36% i umiarkowany spadek wytrzymałości na ściskanie 7%-14%. Uzyskane aktualnie wyniki badań potwierdzają ten zakres zmian właściwości mechanicznych oraz potwierdzają zróżnicowaną podatność tych właściwości na uszkodzenia wywołane przez ASR – moduł sprężystości betonu jest najlepiej skorelowany z zasięgiem uszkodzeń wskutek reakcji alkalia-kruszywo w betonie.

4. Perspektywy wykorzystania, kierunki badań

Nie ma porównywalnych, wcześniejszych wyników badań krajowych, dotyczących wpływu reaktywnego kruszywa drobnego na ekspansję betonu z mieszaniną kruszywa drobnego i grubego. Według tzw. starej normy, tj. PN-B-06714-34:1991/Az1:1997 [19] badania ekspansji prowadzone były na próbkach pryzmatycznych o przekroju 25x25mm na kruszywie rozdrobnionym do 4 mm. Wówczas nie było możliwości jednoczesnego zastosowania kruszywa drobnego i grubego >4 mm, aby rozpoznać interakcję różnych frakcji. Również z powodu małego przekroju próbek nie było możliwości racjonalnego zastosowania kruszywa grubego, jako że z podstaw mechaniki betonu wynika, że wymiar przekroju próbki powinien być co najmniej 4 razy większy od maksymalnego wymiaru ziarna kruszywa. Niekontrolowany wyciek alkaliów z próbek o tak małym przekroju poprzecznym, przechowywanych wg starej normy, w znaczącym stopniu zwiększał niepewność oznaczenia reaktywności alkalicznej kruszyw. Zastrzeżenia wobec wiarygodności „starej normy” były wielokrotnie publikowane, np. [20], ale dopiero wyniki diagnostyki

przeprowadzonej w roku 2018 [2] potwierdziły je na konkretnym przykładzie nawierzchni z betonu. Niedawne krajowe badania ekspansji zaprawy w 1 molowym roztworze NaOH w temperaturze 80°C przeprowadzono zastępując kolejne frakcje rozdrobnionego kruszywa niereaktywnym kruszywem wapiennym [21]. Wykazano, że frakcja 1-2 mm wywołuje nieco większą ekspansję zaprawy niż frakcja 2-4 mm, podobnie jak w pracy [3].

Oprócz wyników wspomnianej już pracy [17], objaśniającej znaczącą rolę reaktywnego piasku w betonie, znane są porównywalne doświadczenia zagraniczne z krajów sąsiadujących z Polską. Na podstawie doświadczeń niemieckich piaski i żwiry z kilku cieków rzecznych (Łaby, Muldy, Elstery) w obszarze dawnego zlodowacenia są normowo wykluczone z kategorii niereaktywnej [22]. Wybrane, niedawno rozpoznane niemieckie przypadki reaktywności kruszywa o istotnym znaczeniu gospodarczym pobieżnie opisano np. w [23]- autostrada A12 i most graniczny nad Odrą, [24] - podkłady kolejowe Deutsche Bahn. Znane są też porównywalne doświadczenia z rozpoznawania reaktywności kruszyw z Litwy i krajów skandynawskich. Badania wykazują, że zakres wielkości ziaren kruszywa najbardziej wpływających na ekspansję wskutek reakcji alkalia–krzemionka zależy od składu mineralnego kruszywa. W kilku publikacjach analizowano wpływ różnych rozmiarów reaktywnych ziaren, np. opalu, na ekspansję betonu. Zauważono, że mniejsze ziarna zwykle powodują większą ekspansję, jednak dla ziaren o średnicy poniżej 50–150µm ekspansja na ogół jest znikoma. Efekt pesymium, czyli maksymalnej ekspansji przy określonej wielkości ziaren, odnotowano w literaturze dla różnych kruszyw w szerokim zakresie uziarnienia, niekiedy dla ziaren > 1 mm.

Mniej uwagi poświęcono w literaturze wpływowi rozmiaru przekroju próbki na wyniki pomiarów ekspansji. Badania pokazują, że mniejsze próbki wykazują mniejszą ekspansję wywołaną reakcją ASR, co oznacza istnienie tzw. efektu skali – współzależności między rozmiarem ziaren kruszywa, wymiarami przekroju próbki i zawartością reaktywnej krzemionki. Efekt pesymium może nie być cechą samej reakcji ASR, ale wynikać z geometrii próbki i specyficznego rozkładu naprężeń. Efekt skali wyjaśniono w [25] na podstawie pojęć mechaniki pękania, dochodząc do stwierdzenia, że większy stosunek rozmiaru maksymalnego ziarna kruszywa do rozmiarów przekroju próbki powoduje większe naprężenia i szybsze pękanie, co umożliwia rozprężenie żelowych produktów reakcji. Dlatego interpretacja wyników powinna uwzględniać złożoną charakterystykę zjawisk ekspansyjnych.

Zastosowanie metody MCPT do oceny reaktywności krajowych kruszyw może przynieść korzyści ekonomiczne. Z pobieżnego oszacowania wynika, że przewidywane koszty wykonania badań metodą MCPT będą zbliżone do kosztu badań metodą przyspieszoną wg GDDKiA PB/1/18 (brak kruszenia kruszywa grubego, niższa temperatura 60°C zamiast 80°C, ale dłuższy czas – 8 tygodni zamiast 2 tygodni). Korzyści ekonomiczne trzeba przede wszystkim oczekiwać w polepszonej jakości oceny kruszyw, zwłaszcza zestawów kruszywa drobnego i grubego. Długotrwałe metody badawcze, jak PB/2/18 trwająca 12 miesięcy, nie są wystarczająco zabezpieczone przed wyciekaniem alkaliów z próbek na zewnątrz, co powoduje rozbieżności bądź wątpliwości oceny. Przeprowadzone badania porównawcze wg PB/2/18 i RILEM AAR-13 [26] wykazały znaczące zmniejszenie ekspansji betonu badanego bez kontroli wycieku alkaliów. Niestety procedura RILEM AAR-13 [26], polegająca na owijaniu próbek bandażem nasączonym roztworem alkalicznym, jest

nader skomplikowana i ma niewielką przydatność do powszechnego stosowania w laboratoriach materiałów budowlanych.

Metodyka MCPT jest ciągle mało znana poza Ameryką Północną. Niedawny raport z badań sponsorowanych przez AASHTO i Transportation Research Board [27] zawiera najbardziej aktualne zalecenia dotyczące ulepszenia dotychczas stosowanych metod ASTM do oceny reaktywności alkalicznej kruszyw w betonie przeznaczonym do budowy infrastruktury drogowej. Ponieważ krajowe wytyczne GDDKiA do klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich są metodycznie oparte o procedury ASTM i RILEM sprzed roku 2019, warto zapoznać się z następującymi wnioskami z raportu [27]:

1. Długotrwałe badanie reaktywności alkalicznej kruszywa w betonie metodą ASTM C1293 (odpowiednik PB/2/18 [6]) jest nadal uznawane za najlepszy sposób selekcji kruszywa niereaktywnego na podstawie kryterium 12 miesięcznego wydłużenia próbek $\leq 0,04\%$ (kategoria R0 wg [6]);
2. Istnieje duża zgodność oceny reaktywności alkalicznej kruszywa i identyfikacji kruszywa niereaktywnego na podstawie wspomnianej powyżej metody ASTM C1293 (wydłużenie $\leq 0,04\%$ po 12 miesiącach) i metody MCPT według normy AASHTO T 380 [8] (wydłużenie $\leq 0,03\%$ po 56 dniach).

W rezultacie podsumowania [27] metoda AASHTO T 380 została zalecona jako miarodajna alternatywa dla długotrwałej metody ASTM C1293 do selekcji kruszyw niereaktywnych. Ponadto, metoda AASHTO T 380 została też zalecona jako narzędzie do określenia niezbędnej zawartości dodatków mineralnych w składzie betonu w celu zapobiegania szkodliwym skutkom reakcji alkalia-kruszywo. Niezbędną zawartość dodatków mineralnych należy określić stosując kryterium wydłużenia próbek betonu $\leq 0,025\%$ po 84 dniach ekspozycji zgodnie z procedurą AASHTO T 380 [8]. Warto tu zauważyć, że powyższe kryterium zaproponowane w [27] i jeszcze nie skodyfikowane, zostało zastrzone (czas wydłużony z 56 do 84 dni) w stosunku do oryginalnego w dotychczasowej wersji [8].

Konieczność oceny przydatności środków zapobiegawczych do hamowania degradacji betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka pojawia się wtedy, gdy wiemy na pewno że kruszywo jest potencjalnie reaktywne lub mamy uzasadnione przypuszczenie, że może być reaktywne, jak np. w przypadku kruszywa z recyklingu zgodnie z PN-EN 12620+A1:2010, G.3.2 [28]. Zastosowanie metody MCPT w takim zakresie może przynieść kolejne korzyści ekonomiczne, ponieważ ma znaczny potencjał do szczegółowego rozpoznania zakresu zastosowań innowacyjnych dodatków do betonu oraz cementu z innowacyjnymi nieklinkierowymi składnikami głównymi. Określenie „innowacyjny” obejmuje tu aktywne dodatki mineralne lub składniki główne cementu poza zakresem dodatków dobrze rozpoznanych, takich jak krzemionkowy popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopiecowy lub pył krzemionkowy. Skuteczność procedury badawczej GDDKiA PB/4/18 [29], opartej o metodę ASTM C1567 badania zaprawy w temperaturze 80 °C, została ustalona w odniesieniu do dobrze znanych powyższych dodatków. Widmo emisyjności i niedostatku surowców do produkcji cementu i betonu napędza poszukiwania nowych surowców mineralnych lub odpadowych, niekiedy wśród surowców o podwyższonej zawartości tlenków sodu i potasu. Do ustalenia ich przydatności w zakresie odporności na szkodliwą reakcję ASR może posłużyć metoda AASHTO T380. Postęp tym

zakresie wymaga jednak dodatkowych badań, zwłaszcza rozpoznania składu cieczy porowej betonu z innowacyjnymi dodatkami.

Do rozpoznawania potencjalnej reaktywności kruszywa z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa przechowywanie próbek betonu w 1 molowym roztworze NaOH ma sens. Do kwalifikacji przydatności środków zapobiegawczych (zwłaszcza nowych dodatków mineralnych) i prognozowania długoterminowej degradacji betonu należy raczej ustalić warunki otoczenia stabilizujące dany skład cieczy porowej, zwłaszcza zapobiegając wymywaniu alkaliów. Kinetyka reakcji alkalia-krzemionka zależy przede wszystkim od stężenia jonów sodu i potasu w cieczy porowej. Stężenie alkaliów w roztworze porowym betonu zmienia się z upływem czasu, zatem jednoznaczne określenie jego stężenia jest dość trudne. Na stężenie alkaliów w cieczy porowej betonu wpływają następujące czynniki:

- zawartość alkaliów w cemencie i dodatkach mineralnych,
- stopień przereagowania faz zawierających alkalia w cemencie i dodatkach mineralnych,
- absorpcja alkaliów przez ziarna kruszywa albo ich uwalnianie z kruszywa, w zależności od jego charakterystyki,
- adsorpcja alkaliów przez fazę C–A–S–H przy niskim stosunku $Ca/(Si + Al)$,
- przyłączanie alkaliów przez żelowe produkty reakcji z reaktywną krzemionką,
- ewentualne wnikanie roztworów alkalicznych z otoczenia,
- w/c, wiek betonu i wilgotnościowe warunki środowiska, wpływające na powyższe czynniki.

Mówiąc zatem o zawartości alkaliów w cieczy porowej konieczne jest przyjęcie upraszczających założeń, dotyczących sposobu jej określania. Jeżeli pominąć zewnętrzne źródła alkaliów (np. roztwory soli odladzających), to najwyższe stężenie alkaliów w roztworze porowym uzyskuje się biorąc pod uwagę tylko pierwszy z powyższych czynników i pomijając inne efekty jako mało istotne. Nawet w przypadku kruszywa niereaktywnego, karbonatyzacja zaczynu cementowego i nasiąkanie betonu wilgocią wpływają na przemieszczanie się alkaliów.

Co najmniej od czasu publikacji Diamonda [30], wiadomo, że skład chemiczny żelowych produktów ASR zmienia się w zależności od otaczającego środowiska, w tym temperatury, reaktywności kruszywa, zawartości alkaliów itp. Istotne znaczenie ma dostępność jonów Ca^{+} , która decyduje o tworzeniu żelu o niskiej lub wysokiej zawartości wapnia, co z kolei różnicuje właściwości fizyczne żelu ASR, takie jak zdolność pęcznienia, lepkość i sztywność [31]. Ostatecznie to zdolność pęcznienia żelowych produktów reakcji pomnożona przez ich ilość określa niszczącą siłę wywołującą spękania i odpryski w betonie.

Powyższe uwagi i wstępna analiza niepublikowanych jeszcze wyników IPPT PAN wskazują na potrzebę badań w kierunku modyfikacji metody MCPT przy jej zastosowaniu do kwalifikacji przydatności nowych dodatków mineralnych. Potrzeba modyfikacji dotyczy roztworu służącego do przechowywania próbek betonu. Standardowa kąpiel w 1 molowym NaOH stale dostarcza „paliwa” do reakcji, co może znacząco przesłaniać rozpoznanie skuteczności środków zapobiegających rozwojowi uszkodzeń betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

1. Zastosowanie metody „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) do oceny reaktywności alkalicznej mieszaniny różnych frakcji kruszywa mineralnego o zróżnicowanej reaktywności pozwala na wyodrębnienie wpływu frakcji drobnej na ekspansję betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka. Zróżnicowanie potencjalnej reaktywności naturalnych piasków kwarcowych wpływa na znaczny wzrost ekspansji próbek betonu, sięgający do 110% po 84-dniowej ekspozycji próbek w roztworze NaOH w temperaturze 60°C.
2. Ekspansja próbek betonu w środowisku promującym rozwój reakcji alkalia-krzemionka jest skorelowana z redukcją rezonansowego modułu sprężystości. Przy zwiększonej potencjalnej reaktywności piasku naturalnego, stosowanego w stosie okruszowym kruszywa, następuje szybsza redukcja modułu sprężystości betonu.
3. Metoda oznaczania reaktywności kruszywa w betonie w 1 molowym roztworze NaOH o temperaturze 60°C pozwala na kategoryzację reaktywności alkalicznej w sposób analogiczny, jak metody dotąd stosowane w kraju.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki jako część projektu Preludium pt. „Przewidywanie właściwości termo-sprężystych materiałów kompozytowych w układzie aktywnej krzemionki z wodorotlenkami metali alkalicznych w polu temperatury i promieniowania gamma” (2023/49/N/ST8/02157).

6. Bibliografia

- [1] Owsiak Z. Korozja wewnętrzna betonu. Monografie, Studia, Rozprawy (M66). Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (2015)
- [2] Glinicki M.A., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Dąbrowski M., Bogusz K., Lisowski P., Analiza przyczyn uszkodzeń jednowarstwowej betonowej nawierzchni drogi ekspresowej, Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 21 (3) (2022) 183-201
- [3] Dunant C.F., Scrivener K.L., Effects of aggregate size on alkali-silica reaction induced expansion, Cement and Concrete Research 42 (6) (2012) 745–751
- [4] Multon S., Leklou N., Petit L., Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research 38 (3) (2008) 350–359
- [5] Procedura Badawcza GDDKiA PB/1/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C. GDDKiA (2019)
- [6] Procedura Badawcza GDDKiA PB/2/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3. GDDKiA (2019)
- [7] Lindgård, J., Andiç-Çakir, O., Fernandes, I., Rønning, T.F., Thomas, M.D.A., Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, Cement and Concrete Research 42(2) (2021) 223-243

- [8] AASHTO T 380 Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT), American Association of State Highway and Transportation Officials (2019)
- [9] Latifee E.R., Rangaraju P.R., Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7) (2015)
- [10] Konduru H., Rangaraju P.R., Amer O., Reliability of Miniature Concrete Prism Test in Assessing Alkali-Silica Reactivity of Moderately Reactive Aggregates, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674 (4) (2020)
- [11] Tanesi J., Drimalas T., Chopperla K.S.T., Beyene M., Ideker J.H., Kim H., Montanari L., Ardani A., Divergence between Performance in the Field and Laboratory Test Results for Alkali-Silica Reaction, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674 (5) (2020)
- [12] Dziedzic K., Glinicki M.A., Risk assessment of reactive local sand use in aggregate mixtures for structural concrete, *Construction and Building Materials*, 408 (2023) 133826
- [13] Dziedzic K., Glinicki M.A., Assessment of aggregate mixture reactivity in concrete at 60°C, *Structure and Environment* 16 (3) (2024) 153-157; DOI: 10.30540/sae-2024-015
- [14] Fernandes I., Ribeiro A.M., Broekmans M., Sims I., Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis, RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method, Springer (2016)
- [15] Glinicki M.A., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Gibas K., Podatność wybranych kruszyw ze skał osadowych na reakcję alkalia-kruszywo, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 18 (10) (2019) 5-24
- [16] Bogusz K., Glinicki M.A., Stabilność objętościowa i właściwości sprężyste betonu w symulowanych warunkach oddziaływania eksploatacyjnego na nawierzchnie drogowe, *Cement Wapno Beton*, 27(6) (2022) 410-424
- [17] Deschenes R.A., Hale W.M., Alkali-silica reaction in concrete with previously inert aggregates, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31 (2) (2019)
- [18] Hafci A., Turanli L., Bektas F., Wpływ rozszerzalności powodowanej reakcją kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu na właściwości mechaniczne betonu, *Cement Wapno Beton*, 26(1) (2021) 12-23
- [19] Drimalas T., Folliard K.J., Ideker J.H., Parashar A., Thomas M.A.D., Ghanizadeh A., Hossack A.M., Fournier B., Alkali-Silica Reactivity Potential and Mitigation: Test Methods and State of Practice, NCHRP Research Report 1083, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC, 2023
- [19] PN-B-06714-34:1991/Az1:1997 Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczenie reaktywności alkalicznej
- [20] Góralczyk S. Reaktywność alkaliczna kruszyw - czas wprowadzić doskonalsze metody badania, *Kruszywa* nr 2/2011, str. 13-15.
- [21] Zapała-Sławeta J., Impact of Aggregate Grain Size on ASR-Induced Expansion, *Materials* 2023, 16(24), 7506; <https://doi.org/10.3390/ma16247506>

- [22] DAfStb – Richtlinie: Vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali – Richtlinie). Ausgabe Oktober 2013
- [23] <https://porr.de/projekte/a12-frankfurt-oder/> - materiały informacyjne firmy PORR
- [24] <https://afdfraktion-lsa.de/schaeden-infolge-von-betonkrebs-an-schienenstrecken-der-deutschen-bahn-2/> - interpelacja poselska w sprawie wypadku kolejowego w pobliżu Garmish-Partenkirchen
- [25] Gao X. X., Multon S., Cyr M., Sellier A., Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect, *Cement and Concrete Research* 44 (2013) 25–33
- [26] Yamada K., Kawabata Y., de Rooij M.R., Pedersen B.M., Brueckner R., Ideker J.H., Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing to assess the expansion potential of alkali-silica reaction. *Materials and Structures* 54, 201 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01684-z>
- [27] Drimalas T., Folliard K.J., Ideker J.H., Parashar A., Thomas M.A.D., Ghanizadeh A., Hossack A.M., Fournier B., Alkali-Silica Reactivity Potential and Mitigation: Test Methods and State of Practice, NCHRP Research Report 1083, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC, 2023
- [28] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [29] Procedura Badawcza GDDKiA PB/4/18 Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny cementu, dodatków mineralnych i kruszyw według zmodyfikowanej metody ASTM C1567, GDDKiA
- [30] Diamond S., Chemistry and other characteristics of ASR gels, in: *Proceedings of the 11th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Quebec, Canada, 2000, pp. 31–40.
- [31] Joo H.E., Takahashi Y., Analytical and experimental studies on alkali-silica reaction mechanism: Aggregate cracking and chemical composition change of gel, *Cement and Concrete Composites* 139 (2023) 105003

dr inż., Wioletta Jackiewicz-Rek

mgr inż., Jakub Zabawski

dr inż., Maciej Kalinowski

dr inż., Karol Chilmon

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

mgr inż., Ewelina Fiks

mgr inż., Arkadiusz Fornal

ATLAS

Wykorzystanie autorskiej metody analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego

Using an original image analysis method to assess efflorescence on the surface of colored architectural concrete

Streszczenie

Beton architektoniczny może być pięknym tworzywem w rękach projektantów i architektów przekutym na trwałe formy przez technologów i wykonawców konstrukcji. Jego wszechstronność przyczyniła się do szerokiego zastosowania w różnych realizacjach budowlanych, w szczególności w przestrzeniach publicznych, gdzie kolorowe elewacje, wnętrza i nawierzchnie z betonu stają się coraz powszechniejsze. W przestrzeni publicznej można zauważyć barwione nawierzchnie betonowe i elewacje budynków. W Polsce, w ostatnich latach, beton barwiony wykorzystano do kształtowania formy wielu obiektów publicznych, szczególnie muzealnych np. Muzeum Wojska Polskiego na warszawskiej cytadeli, Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie, Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku czy też Muzeum Józefa Piłsudskiego w Sulejówku. Jednakże brak ujednoliconych metod badania trwałości barwy betonu barwionego utrudnia rzetelną ocenę jego odporności na czynniki degradacji. Zmiany kolorystyczne mogą być spowodowane ekspozycją na promieniowanie UV, zabrudzeniami, uszkodzeniami mechanicznymi czy wykwitami solnymi na powierzchni. W niniejszej pracy zaproponowano nowy sposób oceny wykwitów węglanowych na powierzchni barwionych betonów architektonicznych poddanych przyspieszonemu starzeniu. Badania przeprowadzono na próbkach betonu zróżnicowanych pod względem rodzaju i ilości cementu i pigmentów. Zmiany barwy określono za pomocą spektrofotometru, natomiast zakres zmian powierzchniowych analizowano algorytmicznie na podstawie skanów wysokiej rozdzielczości przy użyciu środowiska programistycznego Python. Sformułowane wnioski dostarczają praktycznych wytycznych dotyczących wdrożenia proponowanej metodyki w procesie kontroli jakości elementów z betonu barwionego.

Abstract

Architectural concrete can be a beautiful material in the hands of designers and architects, transformed into durable forms by technologists and construction contractors. Its versatility has contributed to its wide use in various construction projects, especially in public spaces, where colored facades, interiors and surfaces made of concrete are becoming increasingly common. In public spaces, you can see colored concrete surfaces and building facades. In Poland, in recent years, colored concrete has been used to shape the form of many public buildings, especially museums, such as the Polish Army Museum in the Warsaw Citadel, the Museum of Modern Art in Warsaw, the Museum of the Second World War in Gdańsk or the Józef Piłsudski Museum in Sulejów. However, systematic evaluation of color durability in pigmented concrete remains challenging due to the absence of standardized test protocols. Chromatic alterations may arise from ultraviolet exposure, soiling, mechanical abrasion, or crystallization (efflorescence) on the surface. This study introduces an analytical methodology for quantifying carbonate efflorescence on colored architectural concretes subjected to accelerated aging. Concrete specimens, formulated with varying cement types and pigments, were assessed for colorimetric changes using a spectrophotometer, while surface alterations were quantified through algorithmic image analysis of high-resolution scans implemented in the Python programming environment. The results yield practical guidelines for employing this assessment technique in the quality control of pigmented concrete elements.

1. Beton architektoniczny

Beton architektoniczny może być pięknym tworzywem w rękach projektantów i architektów przekutym na trwałe formy przez technologów i wykonawców konstrukcji. O ile z betonem zwykłym różnych klas i właściwości nie ma specjalnie trudności realizacyjnych, to do „architektury” trzeba się odpowiednio przygotować. Starania dotyczą głównie jakości powierzchni betonu, której kształtowanie rozpoczyna się już na etapie projektowania, kiedy to planowane są nie tylko kształt elementu, wymiary, zbrojenie, otulina, ale również cechy związane z estetyką powierzchni w tym jej kolor, rysunek i tekstura. Te założenia projektowe warunkują często technologię wykonania i szereg czynników, które trzeba przewidzieć, a które dosłownie odcisną piętno na powierzchni betonu licowego. Nie bez znaczenia jest tutaj skład mieszanki betonu architektonicznego, który tylko pieczołowicie dobrany w połączeniu z odpowiednio dostosowaną technologią wykonania gwarantują pożądany efekt architektoniczno-plastyczny powierzchni elementu czy też obiektu [1÷4]. Jeśli „obraz” całości jest zgodny z oczekiwaniami i specyfikacją, to należy pamiętać o specjalnym zabezpieczeniu powierzchni, aby nie uległa destrukcji ani na etapie dalszej budowy i wykańczania obiektu ani podczas użytkowania i eksploatacji. Nie chodzi tylko o właściwą pielęgnację betonu w konstrukcji ale również zabezpieczenia przed wpływem czynników korozyjnych czy aktami wandalizmu. Dzisiejsze możliwości i dostępne na rynku środki pozwalają na skuteczne zabezpieczenie powierzchni betonowych.

Niezależnie od rodzaju wykończenia powierzchni betonu architektonicznego, każdy jego rodzaj może być barwiony. Można łączyć barwienie z formami strukturalnymi, szlifowaniem, piaskowaniem uzyskując bardzo efektowne różnorodne powierzchnie, które często są dodatkowym wyrazem znaczenia obiektów z nich wykonanych.

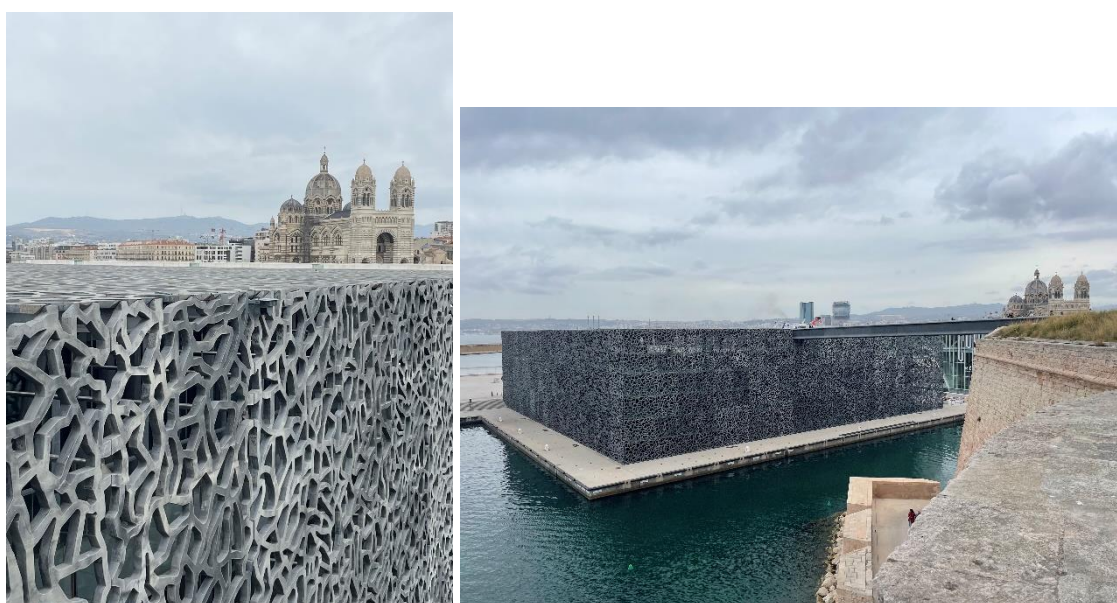
Dodatkowo można w ten sposób łatwo zintegrować budowle z otoczeniem dzięki dopasowaniu odcienia do otaczającego krajobrazu czy też sąsiedniej zabudowy.

Beton barwiony umożliwia subtelne wpisanie obiektu w otoczenie.

Pozostaje tylko kwestia trwałości estetycznej i technicznej takich rozwiązań, które w znacznej mierze zależą od staranności projektowej w doborze ilościowym i jakościowym składników betonu, substancji barwiących, a także reżimu

technologicznego wykonania i zabezpieczenia konstrukcji z betonu. Znane są realizacje z kolorowego betonu, których barwa, struktura i parametry techniczne pozostają niezmiennie przez dekady. Przykładem może być wybudowany w roku 2014 budynek Muzeum Cywilizacji Europejskiej i Śródziemnomorskiej (MuCEM) w Marsylii, gdzie ażurową fasadę wykonano z barwionego w masie betonu wysokiej wytrzymałości z dodatkiem czarnych pigmentów nieorganicznych, zapewniających głęboki kolor odporny na działanie promieniowania UV i aerozoli morskich. Elewacja muzeum składa się z około 400 prefabrykowanych paneli o wymiarach 6 x 3 m (rys. 1).

Architekt tego budynku Rudy Ricciotti za projekt otrzymał nagrodę Colored Concrete Works Award 2017. Kolejnym przykładem świadczącym o trwałości jest budynek CBR w Brukseli mający już status chronionego zabytku (od 2018 roku). Zaprojektowany przez architektów Constantina Brodzkiego i Marcela Lambrichsa i zbudowany w latach 1967÷1970 posiada fasadę złożoną z 756 owalnych prefabrykowanych modułów z białego cementu rozłożonych na dziewięciu piętrach i dwóch równoległych skrzydłach. Biały beton architektoniczny też może być barwiony, najczęściej bielą tytanową – tak jak ostatnio zrealizowany obiekt Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie wykonany ze spektakularnie białego betonu z białego cementu i z białym pigmentem.



Rys.1. Muzeum Cywilizacji Europejskiej i Śródziemnomorskiej (MuCEM) w Marsylii [materiały własne]

1.1 Barwienie powierzchni betonu

Kolor powierzchni betonu można uzyskać na dwa sposoby – w efekcie barwienia betonu „w masie” lub jedynie zmiany koloru na powierzchni (powierzchniowe barwienie betonu).

Barwa betonu stwardniałego zależy od wielu czynników, takich jak: ilość dozowanego pigmentu, współczynnik masowy pigment-spoivo, rodzaj cementu oraz jego skład chemiczny, kolor kruszywa, współczynnik wodno-cementowy, warunki dojrzewania betonu i warunki jego eksploatacji. Uzyskanie jednolitej barwy powierzchni betonu barwionego jest zależne od warunków materiałowych i technologicznych. Ważne jest, aby mieszanka betonowa podczas układania w poszczególnych partiach miała tę samą konsystencję, była wykonana z tych samych materiałów i była w pełni zhomogenizowana. Z uwagi na to, zaleca się stosowanie odpowiednich środków kontroli produkcji w celu ograniczenia skutków ryzyka niejednorodności kolorystycznej. Trwałość uzyskanej barwy jest zależna od warunków ekspozycji na jakie powierzchnia betonowa została wystawiona – kolor będzie się zmieniał w zależności od środowiska. W środowisku przemysłowym i morskim, betony barwione wykazują znaczne zmiany koloru w stosunku do warunków mniej agresywnych. Powierzchniowe barwienie betonu uzyskuje się między innymi poprzez użycie barwników na bazie kwasów – zastosowanie ich pozwala na stworzenie często skomplikowanych kształtów czy też rysunków na jego powierzchni. Barwniki na bazie kwasów wnikają na głębokość kilkunastu milimetrów w głąb powierzchni betonu i tym samym reagują ze związkami, które powstały w wyniku hydratacji spoiwa cementowego. Duży wpływ na końcową barwę ma struktura betonu, ilość naniesionego środka i głębokość jego penetracji. Innym sposobem powierzchniowego barwienia betonu, jest stosowanie cienkowarstwowych powłok, które zmieniają odcień powierzchni betonu lub ujednolicają kolorystycznie powierzchnię zewnętrzną.

1.2 Pigmenty

Istnieje wiele różnych substancji barwiących, dzięki którym można uzyskać efekt barwienia, m.in. barwniki, laki i pigmenty. Pigmenty w odróżnieniu od barwników nie są rozpuszczalne w wodzie, dlatego też są bardziej efektywne w procesie barwienia betonu. Dostępne na rynku pigmenty do betonu można podzielić na: ciekłe, proszkowe, granulowane. Pigmenty wykorzystywane w produkcji barwionego betonu to głównie wysokoprocentowe tlenki żelaza. Wykorzystuje się tlenki żelaza barwiące na czerwono, hydroksytlenki żelaza – na żółto, mieszaninę tlenków i hydroksytlenków żelaza dające pomarańczowy lub brązowy kolor, tlenek chromu – zielony i tlenek kobaltu – niebieski. Czarny kolor uzyskuje się przy użyciu tlenków żelaza i/lub modyfikowanej sadzy technicznej. Do barwienia betonu wykorzystuje się również tlenki manganu, tlenki i wodorotlenki kobaltu, glinu, niklu i antymonu, zieleni i błękitów ftalocyjaninowych [5] oraz pigmenty specjalne, zwane tak z uwagi na swoje dodatkowe właściwości (oprócz barwienia) np. metaliczny połysk, właściwości luminescencyjne i właściwości magnetyczne [6].

Wyróżnia się również podział na pigmenty organiczne i nieorganiczne. Pigmenty nieorganiczne z reguły nie wpływają szkodliwie na przebieg wiązania cementu. Pozyskiwane są z naturalnych źródeł mineralnych. Ich skład chemiczny to głównie tlenki, siarczki lub siarczany [7]. Pigmenty organiczne charakteryzują się większą siłą

barwienia - nawet 10-krotnie większą niż pigmenty mineralne [8]. Z uwagi na różnorodne czynniki zewnętrzne, przy projektowaniu mieszanki betonowej bardzo ważne jest staranne dobranie odpowiedniego do założeń pigmentu.

Długotrwałe badania wyrobów betonowych o różnych kolorach wykazały, że najwyższą trwałością charakteryzują się głównie nieorganiczne pigmenty tlenkowe, dzięki swojej strukturze i składowi chemicznemu [9]. Udział pigmentów nieorganicznych w mieszankach betonowych nie wpływa znacznie na reologię oraz na cechy wytrzymałościowe stwardniałego betonu [10]. Tlenki żelaza w różnych proporcjach stanowią główny składnik większości dostępnych kolorów, przybierając różne odmiany w zależności od warunków zastosowanego procesu technologicznego [11].

Pigmenty stosowane do barwienia betonu powinny spełniać wymagania normy PN-EN 12878 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie. Wymagania i metody badań” [N1]. Substancje barwiące nie są traktowane jako dodatki, ani domieszki – tworzą osobną grupę modyfikatorów. Każdy pigment przeznaczony do barwienia betonu powinien charakteryzować się znaczną odpornością na intensywnie alkaliczne środowisko, a także być odpornym na wpływ światła i czynników atmosferycznych. Jednocześnie powinien gwarantować powtarzalność koloru w przypadku gotowych wyrobów [11].

Dozowanie pigmentu do mieszanki betonowej jest zależne od jego rodzaju oraz od zaprojektowanego nasycenia barwy. Wielkość dozowania podaje się w % masy spoiwa. Zwykle zalecane dozowanie pigmentów proszkowych wynosi 3-5%, a pigmentów ciekłych 4-6%. Typowe dozowanie pigmentów mieszczą się w przedziale 1-10%.

1.3 Wykwity na powierzchni betonu

Wykwity na powierzchni betonu to zjawisko niepożądane, często występujące w konstrukcjach betonowych, w szczególności narażonych na działanie czynników atmosferycznych. Objawiają się one w postaci białych lub jasnozabarwionych nalotów, głównie na powierzchniach elewacyjnych, nowo wykonanych prefabrykatów, czy właśnie betonach architektonicznych. Zjawisko to ma przede wszystkim charakter estetyczny, ale może także świadczyć o procesach migracyjnych soli i nadmiarze wilgoci, co ma znaczenie dla trwałości betonu.

Wykwity dzieli się przede wszystkim na:

- Wykwity pierwotne: pojawiają się wkrótce po zakończeniu procesu dojrzewania betonu, gdy zawartość wilgoci w mieszance jest wciąż wysoka. Głównym sprawcą jest uwalnianie się wodorotlenku wapnia (Ca(OH)_2) z matrycy cementowej i jego migracja na powierzchnię, gdzie w reakcji z CO_2 z powietrza powstaje nierozpuszczalny węgiel wapnia (CaCO_3).

- Wykwity wtórne: powstają po pewnym czasie eksploatacji konstrukcji i są efektem zawilgocenia elementu oraz rozpuszczania i migracji soli (np. Na^+ , K^+ , SO_4^{4-}) z wnętrza betonu na zewnątrz.

Proces wykwitów zależy od obecności rozpuszczalnych soli w betonie, działania wody (transport soli), parowania (transport soli do powierzchni) i dwutlenku węgla w powietrzu (w przypadku CaCO_3). Wykwity rozpoznaje się głównie wizualnie, jednak możliwe jest bardziej zaawansowane badanie przy pomocy analizy mikroskopowej SEM/EDS, które pozwalają na identyfikację składu chemicznego i morfologii soli, czy też spektroskopii do określania mineralogiczne osadów. Znane są metody

ograniczania wykwitów przez modyfikację składu betonu dodatkami mineralnymi (popioły lotne, żużle) i ograniczanie zawartości cementu portlandzkiego czy też obniżanie w/c, poprawa szczelności betonu, stosowanie aktywowanych alkalicznie materiałów czy też użycie nano-dodatków (nano-krzemionka, grafen), które ograniczają porowatość i skurcz betonu. Przydatne są również zabiegi powierzchniowe w tym hydrofobizacja betonu (silany, siloksany) czy też stosowanie powłok mineralnych i organicznych (np. krzemianowe).

Wykwity pogarszają odbiór wizualny powierzchni, dlatego są szczególnie niepożądane w przypadku kolorowych kompozytów cementowych monolitycznych i prefabrykowanych, w tym kostki brukowej [12]. Wykwit węglanowy według wymagań zawartych w normach i aprobaty technicznych nie jest klasyfikowany jako kryterium oceny jakości wyrobu [N2÷N4].

Choć wykwyty nie zagrażają trwałości kompozytu, mają istotny wpływ na postrzeganie jakości kolorystycznej oraz jednorodność zabarwienia, zwłaszcza betonu architektonicznego w ciemnych odcieniach.

2. Cel i zakres badań

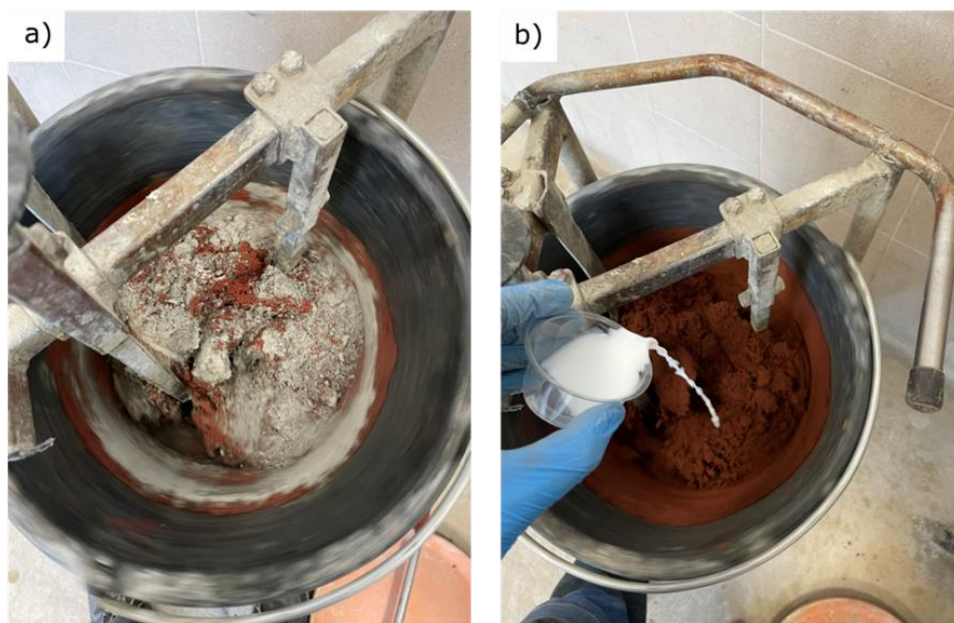
Celem badań prezentowanych w pracy była ocena możliwości zastosowania metody analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego. W tym celu zaprojektowano, wykonano i przebadano 48 składów betonów z pigmentami, (łącznie 288 próbek betonu barwionego). Wykonane próbki, po 7 dniowej pielęgnacji w komorze klimatycznej (Temp. = $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i RH = $90 \pm 5\%$), zostały dostosowane do badań – z próbek cylindrycznych wycięto górną powierzchnię, a próbki prostokątne zostały przełamane na dwie połowy. Nominalne wymiary próbek wykorzystanych do badań to: kostka $20 \times (40 \div 50) \times 100$ mm, walec 20×100 mm. Szerokość kostki różni się między poszczególnymi seriami z uwagi na sposób przygotowania próbki do badania – próbki zostały przełamane. Do badań wykorzystano 48 próbek cylindrycznych i 96 próbek prostokątnych. Probki poddano przyspieszonemu starzeniu według autorskiej metody w komorze karbonatyzacyjnej oraz skanowano powierzchnie próbek z użyciem skanera oraz badano ich barwę za pomocą spektrofotometru przed rozpoczęciem pierwszego cyklu przyspieszonego starzenia, a następnie po 5 cyklach oraz 10 cyklach starzenia. Obrazy ze skanera poddano analizie graficznej.

Zaprojektowano betony barwione zróżnicowane pod względem rodzaju i zawartości cementu oraz rodzaju pigmentu. Zdecydowano się na zastosowanie dwóch różnych zawartości cementu – 350 i 450 kg/m^3 . Ilość pigmentu we wszystkich składach próbek była określona jako 8% masy spoiwa, a domieszki jako 1% masy spoiwa. Współczynnik woda-cement był stały we wszystkich składach i wynosił 0,28. Z uwagi na to, że dodawane pigmenty były pigmentami w formie dyspersji wodnej, wodę z dyspersji uwzględniono przy określeniu całkowitego współczynnika woda-cement. Do wykonania próbek zostały wykorzystane 4 różne rodzaje cementów i 5 różnych pigmentów.

2.1 Materiały i wykonanie próbek

Do wykonania próbek zastosowano cztery różne cementy: CEM I 42,5 R, CEM II/A-V 42,5 R-NA, CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R i CEM II/A-S 42,5 R spełniające wymagania normy PN-EN 197-1 „Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” Użyto również piasku kopalnianego o

frakcji 0/2 zgodnego z wymaganiami PN-EN 13139 „Kruszywa do zaprawy”. Woda użyta do wykonania próbek była wodą z sieci wodociągowej zgodna z normą PN-EN 1008 „Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”. W celu ograniczenia tworzenia się wykwitów węglanowych użyto domieszki uszczelniającej ATLAS Angucel ES-200 zgodnej z PN-EN 934-2. Wykorzystano pięć różnych pigmentów w formie upłynnionej. Wśród nich znalazły się trzy pigmenty o kolorze antracytowym (ATLAS COLOR SD-050 Kolor antracytowy - na bazie tlenków żelaza, ATLAS COLOR SD-800 Kolor antracytowy - na bazie wielkocząsteczkowej sadzy technicznej i ATLAS COLOR SD-960 Kolor antracytowy – na bazie tlenków żelaza i modyfikowanej sadzy technicznej (mix)), jeden czerwony (ATLAS COLOR SR-040 Kolor czerwony – na bazie tlenków żelaza) i jeden żółty (ATLAS COLOR SY-020 Kolor żółty – na bazie tlenków żelaza). Wykonano również badania pigmentów na skaningowym mikroskopie elektronowym, które potwierdziły różną morfologię wykorzystanych pigmentów – zaobserwowano zróżnicowanie w zależności od rodzaju pigmentu - od ziaren o morfologii sferycznej po „igiełkowate” i nieforemne. Próbkę betonową wykonano stosując stałą procedurę uwzględniającą kolejność i czas dozowania i mieszania składników. Do wstępnie nasycanego kruszywa połową wody zarobowej dodawano pigment, cement, pozostałą objętość wody i domieszkę uszczelniającą zachowując przy tym odpowiednio te same, ustalone czasy i warunki mieszania w trosce o pełną homogenizację składników (rys. 2). Próbkę betonową zostały zaformowane na dwa sposoby za pomocą: prasy żyratorowej i prasy hydraulicznej (rys. 3). Poprzez różne sposoby zagęszczania mieszanki uzyskano dwa kształty próbek – w formie kostki (za pomocą prasy hydraulicznej) i cylindra (w prasie żyratorowej).



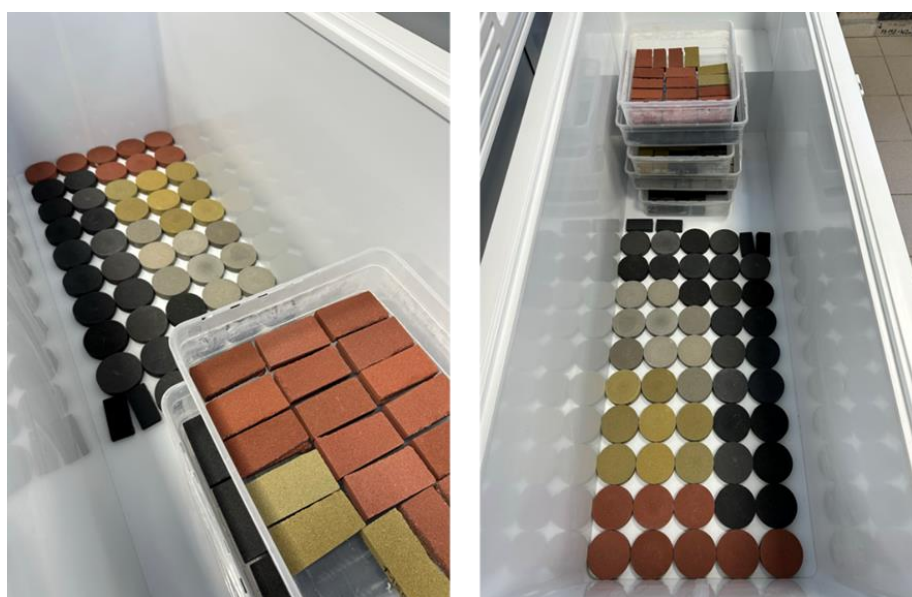
Rys.2. Wykonywanie próbek betonu barwionego a) dodanie cementu b) dozowanie domieszki [materiały własne]



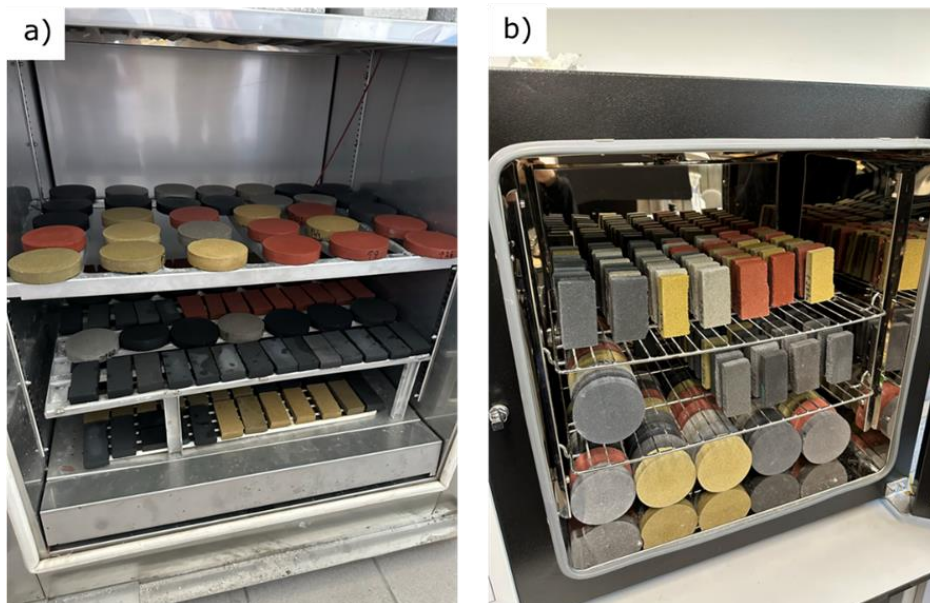
Rys.3. Wykonywanie próbek betonu barwionego a) formowanie próbek za pomocą prasy hydraulicznej b) formowanie za pomocą prasy żyratorowej [materiały własne]

2.2 Starzenie próbek betonowych barwionych

Opracowano autorską metodę starzenia próbek betonowych barwionych w celu „pobudzenia” powstawanie ewentualnych wykwitów na ich powierzchni. Metoda ta polegała na cyklicznej zmianie środowiska, w którym znajdowały się próbki – w ciągu jednego cyklu (24 godziny) przyspieszonego starzenia próbki znajdowały się w pojemniku wypełnionym wodą destylowaną (8 godzin), gdzie po częściowym zanurzeniu próbek (do 75% ich wysokości), w wyniku podciągania kapilarnego wody, łatwo-wymywalne związki z matrycy cementowej były transportowane na powierzchnię zewnętrzną próbek (rys. 4). Następnie, próbki umieszczano w komorze karbonatyzacyjnej, w środowisku o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotności $70 \pm 5\%$ oraz stężeniu dwutlenku węgla 3% , na 16 godzin (rys. 5).



Rys. 4. Próbkę podczas nasycania wodą destylowaną [materiały własne]



Rys.5. Próbkki umieszczone w: a) komorze karbonatyzacyjnej; b) suszarce [materiały własne]

Przed badaniami spektrofotometrem oraz skanowaniem powierzchni próbki były suszone do stałej masy po 5 i 10 cyklach starzenia.

2.3 Metody badań

Skanowanie powierzchni próbek betonowych odbywało się w stałych warunkach oświetlenia, przygotowano w tym celu pomieszczenie-ciemnię bez dostępu światła zewnętrznego. Do skanowania powierzchni próbek użyto skanera FUJITSU ScanSnap SV600 wyposażonego w matrycę CCD. Skaner oświetlał skanowaną próbkę oraz wyjście obiektywu białym światłem z lampy LED. Próbki zostały zeskanowane przed rozpoczęciem procedury przyspieszonego starzenia, jak i w trakcie jego trwania – po 5 i 10 cyklach przyspieszonego starzenia w komorze karbonatyzacyjnej. Próbki przed rozpoczęciem procesu skanowania zostały wysuszone do stałej masy, z uwagi na to, że barwa próbek zmienia się wraz ze zmianą ich wilgotności. Próbki zostały kolejno zeskanowane na jednolitym tle.

Badanie barwy próbek betonowych barwionych odbyło się z wykorzystaniem spektrofotometru NS800 firmy 3nh. Zgodnie z opracowaną metodą badania na każdej badanej próbce wykonano 16 pomiarów w losowych miejscach na jej powierzchni górnej. Następnie określono parametry barw w przestrzeni CIELAB. Badanie spektrofotometrem pozwala opisać kolor na podstawie trzech wartości składowych (L; a; b). Składowa L odpowiada za jasność, składowa a za kolor czerwony i zielony, składowa b za kolor niebieski i żółty. Różnicę barw wyraża się jako odległość między punktami barw w przestrzeni kolorymetrycznej – wzór (1).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

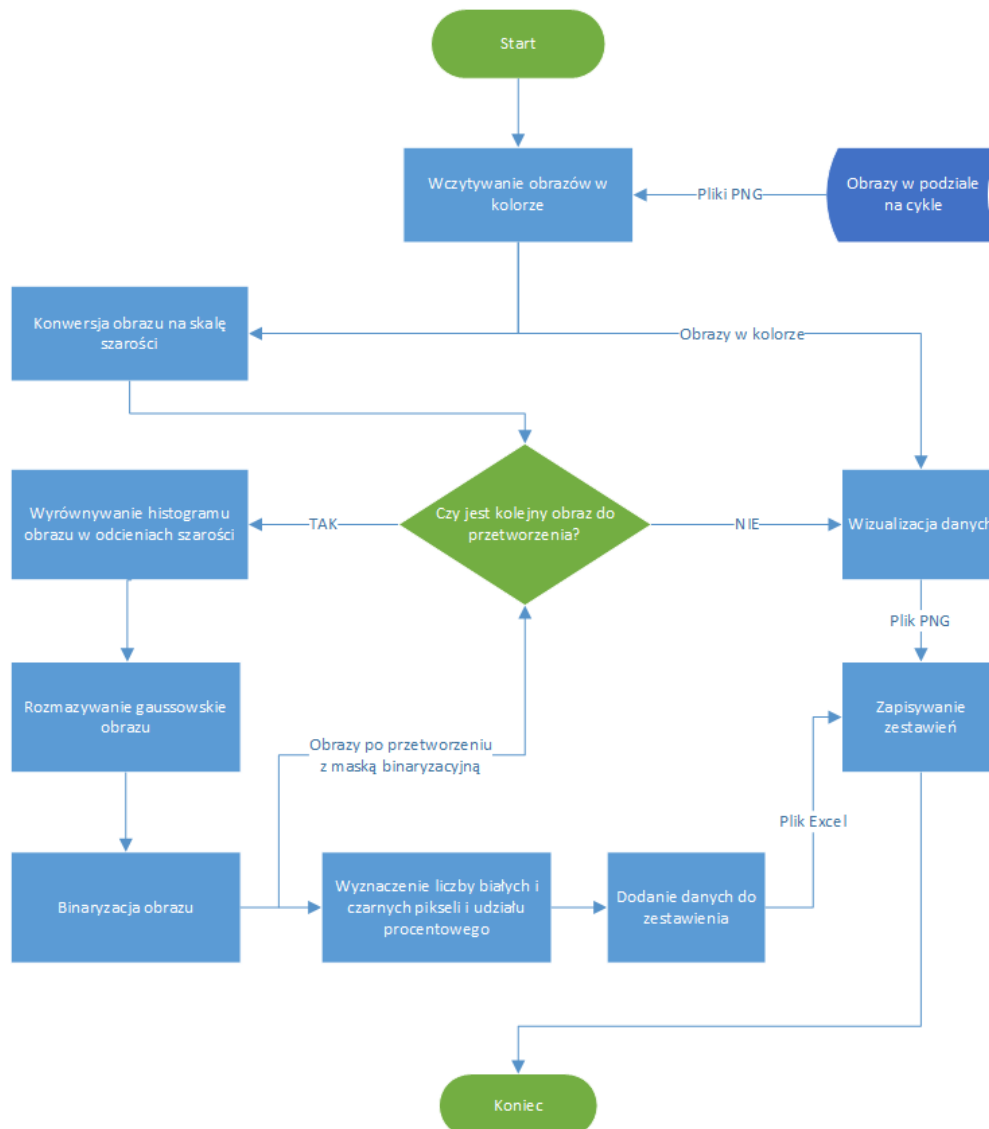
gdzie:

ΔL^* , Δa^* , Δb^* - różnice wartości każdej ze współrzędnych dwóch porównywanych barw psychofizycznych – próbki i wzorca.

ΔE_{ab}^* - różnica barw pomiędzy próbką a wzorcem.

2.4 Automatyczna analiza obrazu – algorytm

Algorytm do automatycznej analizy obrazu został stworzony w języku programowania Python. Schemat blokowy skryptu został przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy skryptu do automatycznej analizy obrazu

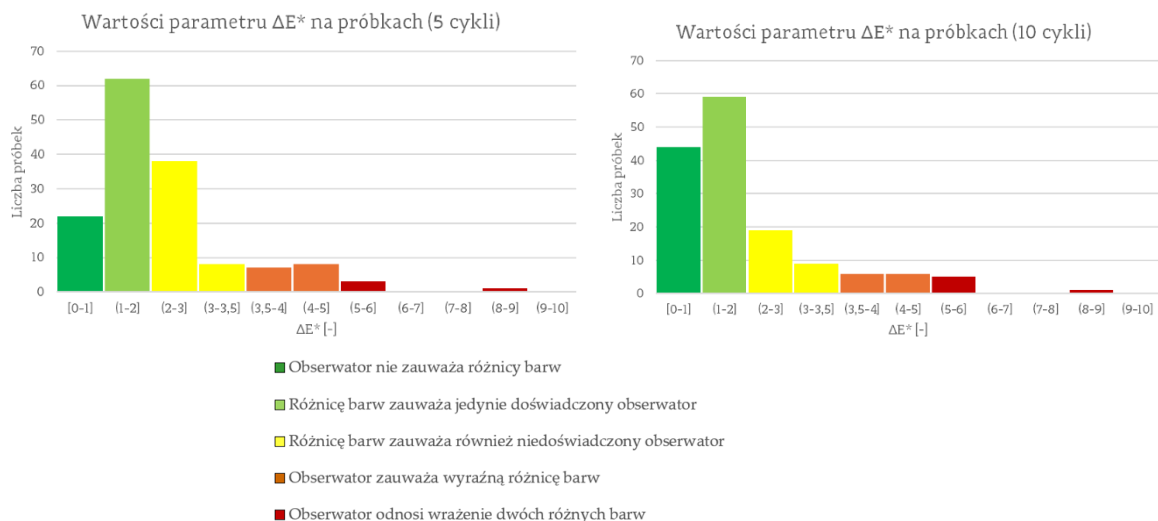
Opracowany algorytm umożliwia automatyczną analizę obrazów zeskanowanych powierzchni próbek. Algorytm przetwarza pobrany obraz na skalę szarości, wyrównuje histogram utworzony na obrazie w skali szarości i stosuje rozmycie gaussowskie. W następnym etapie algorytm poddaje przetworzony obraz binaryzacji. W ten sposób powstaje obraz, w którym każdy piksel jest określony kolorem białym, bądź czarnym. Próg binaryzacji wszystkich badanych próbek jest stały i wynosi 170.

Program zlicza liczbę pikseli czarnych oraz białych i określa procentowy stosunek do całkowitej liczby pikseli w obrazie. Dzięki takiemu rozwiązaniu, program jest w stanie określić na jakiej powierzchni próbki zaistniała istotna zmiana barwy. Następnie, program tworzy zestawienie z danymi liczbowymi w programie Excel oraz zestawienie graficzne, na którym widnieją zdjęcia próbki w trzech terminach badania – skan, obraz w skali szarości z rozmyciem gaussowskim, zbinaryzowany obraz i histogram reprezentujący liczbę pikseli o określonej barwie w skali szarości.

3. Wyniki

3.1 Badanie barwy próbek betonowych

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki różnicy barwy próbek betonowych po 5 i 10 cyklach procedury przyspieszonego starzenia. Współrzędne barwy początkowej i końcowej zostały wykorzystane do obliczenia parametru ΔE_{ab}^* za pomocą wzoru (2). Według przyjętej skali parametru ΔE_{ab}^* , można stwierdzić, że na większości badanych próbek zarówno po pięciu jak i dziesięciu cyklach przyspieszonego starzenia obserwator nie zauważył różnicy w barwie, albo różnica będzie zauważalna jedynie przez doświadczonego obserwatora, ponieważ większość próbek betonu barwionego charakteryzuje się wartościami ΔE_{ab}^* zawierającymi się w przedziale 0-1 oraz 1-2. W badaniu po 10 cyklach przyspieszonego starzenia można zauważyć wzrost liczby próbek w przedziale parametru ΔE_{ab}^* od 0 do 1 oraz spadek w przedziale 2-3 w stosunku do badania po 5 cyklach przyspieszonego starzenia.



Rys. 7. Różnica barwy ΔE^* na próbkach betonu barwionego po 5 i 10 cyklach przyspieszonego starzenia

Duży współczynnik zmienności na parametrach a i b na ciemnych próbkach (kolor antracytowy) wynika z faktu, że wielkość tych parametrów przy opisywaniu koloru czarnego w przestrzeni trójwymiarowej CIELAB jest pomijalna – wynika to z faktu, że kolor czarny, biały oraz ich połączenie w różnych proporcjach jest opisywane za pomocą parametru L, więc parametry a i b nie uczestniczą w opisie tych kolorów. Parametry a i b występują w opisie barwy czarnej przy badaniu spektrofotometrem, lecz ich wielkość jest bliska zeru, dlatego też występuje pomiędzy poszczególnymi

pomiarami przeskok przez wartość zerową z ujemnej na dodatnią (bądź odwrotnie) – stąd współczynnik zmienności tych parametrów ma dużą wartość. Przykładowo, dla próbki 258b, współczynnik zmienności parametru b w każdym terminie badania jest wysoki i wynosi nawet 837 % (tab. 1).

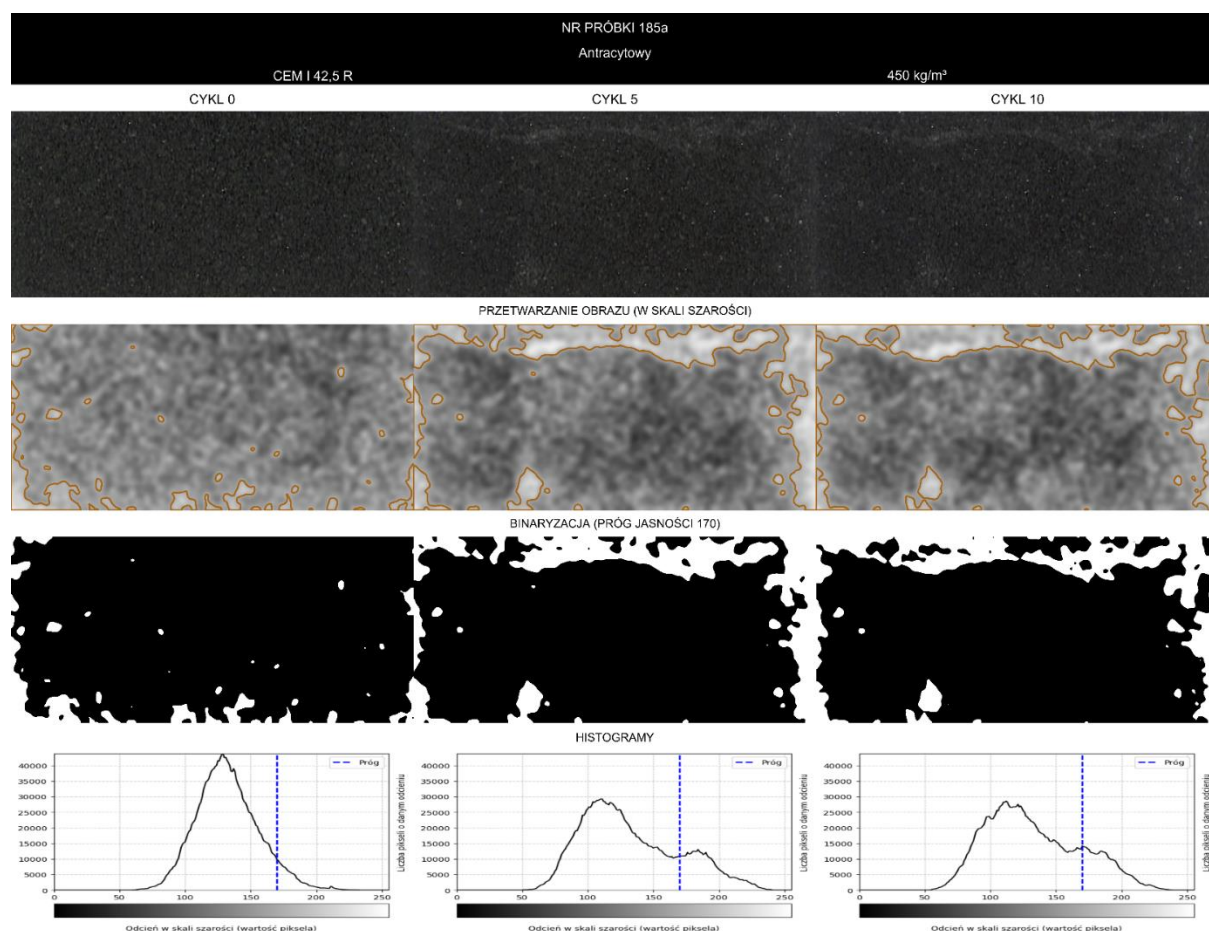
Tab. 1. Wyniki badania barwy próbki nr 258b za pomocą spektrofotometru

NR PRÓBK	258b									
CYKL	0			5				10		
	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM	Zmiana [%]	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM
L*	23,400	0,389	1,662	21,941	0,605	2,758	-6,234	25,394	1,546	6,087
a*	0,396	1,236	312,570	0,336	0,031	9,160	-15,155	0,258	0,075	29,243
b*	-0,092	0,768	-836,952	0,660	0,096	14,611	-818,856	0,053	0,208	389,135
ΔE*				1,642				2,004		

W celu dokładności określenia barwy powierzchni betonowych zdecydowano się na pomiar w szesnastu losowo wybranych miejscach na powierzchni każdej próbki. Uśredniając wynik otrzymano barwę, która różniła się w każdym etapie przyspieszonego starzenia – przed starzeniem, po 5 i po 10 cyklach przyspieszonego starzenia. Potwierdzono też przypadki próbek, kiedy parametr ΔE_{ab}^* próbki po dziesięciu cyklach przyspieszonego starzenia w porównaniu do parametru ΔE_{ab}^* po pięciu cyklach widocznie zmalał. To zjawisko spowodowane jest losowością wykonywania pomiarów na powierzchni próbek. Z uwagi na punktowe sprawdzanie parametrów barwy, taki efekt można uzyskać, kiedy większość pomiarów zostaje wykonane poza zmianą powierzchniową (wykwitem, bądź przebarwieniem). Jest to największa wada badania barwy próbki za pomocą spektrofotometru. Z drugiej strony można uzyskać również zbyt duży parametr ΔE_{ab}^* gdy zbyt często pomiar będzie wykonywany na miejscowej zmianie powierzchniowej/przebarwieniu.

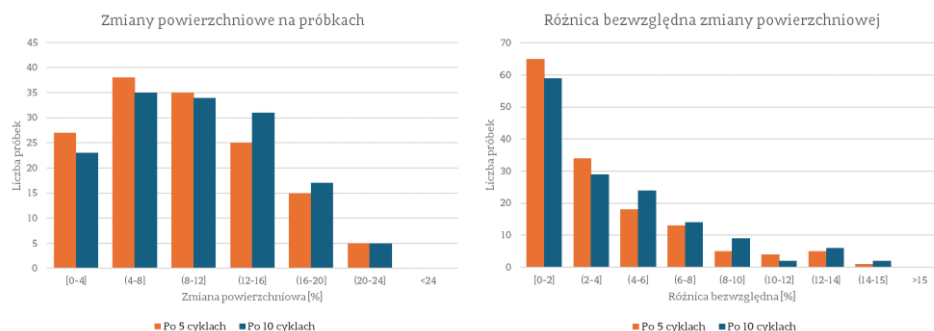
3.2 Automatyczna analiza obrazu – algorytm

Wyniki zostały automatycznie wygenerowane przez autorski skrypt do analizy obrazu. Program przeanalizował obrazy graficzne powstałe poprzez skanowanie powierzchni próbek betonowych. Zgodnie z zasadą działania skryptu, automatycznie zostały stworzone zestawienia graficzne obrazujące zmianę barwy na powierzchni próbki oraz zbiorcza tabela, w której zawarte są ilości pikseli białych i czarnych, i obliczone wartości zmiany powierzchniowej wyrażone w wartości procentowej. Przykładowe zestawienie graficzne próbki o numerze 185a wykonane w trzech terminach badania przedstawiono na rysunku 8– są to zdjęcia pokazane najwyżej. W kolejnym wierszu na zestawieniu przedstawiono próbki w skali szarości podczas graficznego przetwarzania obrazu, program stosuje rozmycie gaussowskie na zbinaryzowanym obrazie i wykrywa skupiska pikseli o tej samej barwie (białe, czarne). W kolejnym wierszu pokazano próbkę zbinaryzowaną ze stałym wcześniej ustalonym progiem binaryzacji, obszary zaznaczone kolorem białym przedstawiają zmiany powierzchniowe na próbce, a obszar o kolorze czarnym jest obszarem, który nie uległ zmianom. Do zestawienia graficznego dołączono również histogram dla każdego zdjęcia próbki, pokazuje on ile pikseli na zdjęciu reprezentuje dany odcień w skali szarości.



Rys. 8. Przykładowe zestawienie stworzone za pomocą skryptu do automatycznej analizy obrazu

Algorytm zlicza procentową zawartość obszaru białego w stosunku do całej próbki. Na rysunku 8 przedstawiono wykresy z liczbą próbek klasyfikujących się w poszczególnych przedziałach procentowych zmian powierzchniowych na próbkach. Zmiany powierzchniowe na badanych próbkach zwykle nie przekraczają 24%. Zarówno po 5 cyklach starzenia jak i po 10 cyklach najczęściej badanych próbek klasyfikuje się w trzech pierwszych przedziałach procentowych tj. od 0 do 12%. Za pomocą algorytmu można było ilościowo scharakteryzować wszystkie powierzchnie próbek. Można w ten sposób wskazać te, których zmiany miały największą powierzchnię (najwięcej wykwitów). W analizowanym przypadku były to próbki o kolorze antracytowym oraz zawartością cementu 350 kg/m³. Obszar objęty największą zmianą powierzchniową zajmował 23,12% powierzchni badanej próbki.



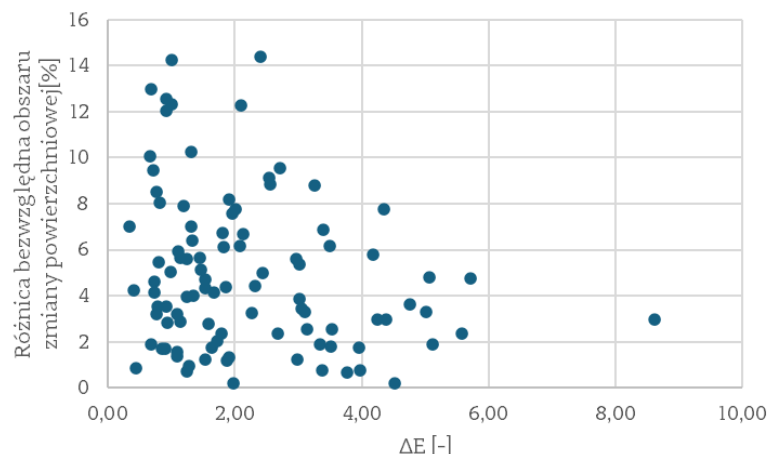
Rys. 9. Zmiany powierzchniowe na próbkach oraz różnice bezwzględne procentowej zmiany powierzchni wykwitu na próbkach

Z uwagi na to, że każda próbka była badana w trzech terminach obliczono również przyrosty zmian powierzchniowych, przedstawiono wykres różnicy bezwzględnej pomiędzy zmianą powierzchniową w trakcie oraz po procedurze przyspieszonego starzenia, a zmianą powierzchniową przed rozpoczęciem procedury (rys. 9). Różnice bezwzględne obszaru objętego zmianą w większości zawierają się od 0 do 6% zarówno po 5 jak i 10 cyklach procedury przyspieszonego starzenia próbek betonu barwionego.

Opracowana procedura przyspieszonego starzenia próbek przyczyniła się do wzrostu powierzchni wykwitu na próbkach betonu barwionego. Dzięki temu można było potwierdzić użyteczność opracowanej metodyki oceny zmian na powierzchni betonu barwionego. Po 10 cyklach przyspieszonego starzenia zmniejszyła się liczba próbek w trzech pierwszych przedziałach procentowych w porównaniu do tych samych próbek po 5 cyklach (rys. 9). Podobna zależność dotyczy różnicy bezwzględnej zmiany powierzchniowej. W dwóch pierwszych przedziałach procentowych zauważyć można spadek liczby próbek, na których zmiana powierzchniowa wzrosła po większej liczbie cykli przyspieszonego starzenia.

4. Wnioski

Zaprezentowane wyniki z badania barwy spektrofotometrem oraz z analizy obrazu zostały ze sobą skorelowane w celu określenia zależności pomiędzy badanymi właściwościami. Analiza zależności różnicy bezwzględnej obszaru zmiany powierzchniowej od parametru ΔE_{ab}^* przedstawionej na rysunku 10 nie wskazuje na istnienie żadnej korelacji. Potwierdza to tylko założenia, które były podstawą opracowanej metody bazującej na analizie obrazu. Badanie barwy spektrofotometrem określa jedynie uśrednioną zmianę barwy powierzchni próbki betonu barwionego, a algorytm do automatycznej analizy obrazu wskazuje obszary na próbce, które uległy zmianie.



Rys. 10. Wykres braku zależności różnicy bezwzględnej obszaru zmiany powierzchniowej od parametru ΔE^*

Badania spektrofotometrem określają zupełnie inne właściwości powierzchni i nie można ich stosować zamiennie. Potencjał do tworzenia się wykwitów jest możliwy do zarejestrowania tylko przy użyciu narzędzia do analizy całej powierzchni próbki betonu barwionego tak jak w przypadku zaproponowanego algorytmu. Badania punktowe wykonane za pomocą spektrofotometru nie pozwalają na ocenę zasięgu występowania wykwitów na powierzchni próbki betonowej. Ponadto średnia barwa na próbce zależy od tego w jakim punkcie wykonamy pomiar. Pomiar w losowych punktach na powierzchni betonu barwionego może określić jej uśrednioną barwę, o współczynnikach zmienności dla poszczególnych jej parametrów zależnych od jednorodności kolorystycznej próbki.

Zaproponowaną metodę można wykorzystać do wielu analiz – jak w przypadku przeprowadzonego programu badawczego potwierdzono, że zastosowanie cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5 N w przyjętym zakresie zmienności skutkowało najmniejszą tendencją do przyrostu zmian powierzchniowych wraz ze zwiększeniem masy spoiwa w mieszance betonowej. Zaś próbki z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R wykazały największą predyspozycję do wzrostu intensywności powstawania wykwitów na swoich powierzchniach wraz ze zwiększeniem zawartości spoiwa w mieszance betonowej (to tylko część wniosków, dotyczących wpływu cementu i pigmentów na powstawanie wykwitów, których zakres nie został uwzględniony w proponowanym referacie).

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników ustalono dodatkowo, że:

- Zaproponowany skrypt do automatycznej analizy obrazu może być użytecznym narzędziem do opisywania procentowej powierzchni wykwitu na badanej próbce;
- Zastosowanie analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego daje miarodajne, ilościowe wyniki;
- Intensywność powstawania wykwitów na powierzchni betonu barwionego jest zależna od czasu ekspozycji na zmienne warunki wilgotnościowe, CO₂ i temperaturę - w przedmiotowej pracy symulowane warunkami przyspieszonego starzenia.

2. Literatura

- [1] W. Jackiewicz-Rek, „Kształtowanie jakości gładkiego betonu architektonicznego”, Mat. Bud., Art. nr 9, 2015.
- [2] W. Jackiewicz-Rek i M. Mroczek, „Fotobeton jako sposób urozmaicenia formy architektonicznej budowli”, Mat. Bud., Art. nr 12, 2014.
- [3] W. Jackiewicz-Rek i P. P. Woyciechowski, „Wady betonu architektonicznego w konstrukcji”, Mat. Bud., Art. nr 2, 2014.
- [4] W. Jackiewicz-Rek i K. Kuniczuk, „Ocena jakości betonu architektonicznego w konstrukcji”, Inżynier Budownictwa, Art. nr 11, 2013.
- [5] P. Łukowski, „Modyfikacja materiałowa betonu.” Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2016.
- [6] P. Sulcova, "Options synthesis and application testing of inorganic pigments." Proceedings of 7th conference on international participation of particular substances in science, industry and environment, Technical University of Kosice, Kosice. 2012.
- [7] V. Hospodarova, J. Junak, N. Stevulova, "Color pigments in concrete and their properties." Pollack Periodica 10.3 (2015): 143-151.
- [8] K. Kurpiński, „Barwienie betonu - Praktyczne wskazówki cz. 1”. (2019).
- [9] H. Lee, J. Lee, , M. Yu, "Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks." Cement and Concrete Research 33.11 (2003): 1889-1896.
- [10] V. Corinaldesi, S. Monosi, L. M. Ruello, "Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC." Construction and building materials 30 (2012): 289-293.
- [11] E. Szymczak, M. Oleksik, "Barwienie betonu-techniczne aspekty stosowania pigmentów." Budownictwo, Technologie, Architektura (2018).
- [12] W. Kurdowski, A. Garbacik, Wykwity na betonie, Budownictwo Technologie Architektura, numer specjalny, 2005.
- [N1] PN-EN 12878:2014-05 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie -- Wymagania i metody badań”.
- [N2] PN-EN 1338:2005 „Betonowe kostki brukowe -- Wymagania i metody badań”.
- [N3] PN-EN 1339:2005 „Betonowe płyty brukowe -- Wymagania i metody badań”.
- [N4] PN-EN 1340:2004 „Krawężniki betonowe -- Wymagania i metody badań”.

dr inż. Artur Golda¹⁾
dr inż. Arkadiusz Janic¹⁾
dr inż. Katarzyna Synowiec¹⁾
mgr inż. Kamil Zięba¹⁾
dr inż. Grzegorz Cygan²⁾

¹⁾ Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o., Heidelberg Materials Polska

²⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

Właściwości betonu z zastosowaniem składnika cyrkularnego w postaci kruszywa z recyklingu (RCA)

Properties of concrete with circular component as recycled concrete aggregate (RCA)

Streszczenie

Model gospodarki obiegu zamkniętego (cyrkularnej), zakłada maksymalnie efektywne korzystanie z zasobów. Koncentruje się na ponownym użyciu, odnawianiu i recyklingu istniejących materiałów, aby wydłużyć cykl życia produktów. W praktyce oznacza to ograniczenie odpadów do minimum. Sprostanie założeniom gospodarki cyrkularnej można osiągnąć przez zagospodarowanie znaczącego strumienia odpadów budowlanych, który stanowi gruz z rozbiórki obiektów budowlanych. Selektownie odzyskany gruz betonowy, odpowiednio przetworzony i rozdzielony na frakcje, może stanowić wartościowy składnik betonu. Szczególnie w kontekście planowanych zmian normalizacyjnych, które mają umożliwić stosowanie kruszyw z recyklingu w większym stopniu.

W artykule opisano właściwości kruszyw z recyklingu betonu uzyskanego w wyniku innowacyjnego procesu wieloetapowego kruszenia i separacji, przeprowadzonego w Zakładzie Recyklingu Betonu w Dąbrowie Górniczej. Kruszywo z recyklingu zastosowano w betonie jako częściowy zamiennik kruszywa naturalnego. Ocenie poddano wpływ na właściwości mieszanki betonowej, szczególnie w aspekcie urabialności, a także na wytrzymałość na ściskanie betonu stwardniałego. Zaadresowane zostały również dalsze plany badawcze, zorientowane głównie na obszar trwałości betonu ze składnikiem cyrkularnym.

Abstract

The circular economy model assumes the most efficient use of resources. It focuses on the reuse, renewal, and recycling of existing materials to extend the life cycle of products. In practice, this means minimizing waste. Meeting the goals of a circular economy can be achieved by managing a significant stream of construction waste, which includes rubble from the demolition of buildings. Selectively recovered concrete rubble, properly processed and separated into fractions, can become a valuable component of concrete. Particularly in the context of planned standardization changes that are expected to allow the use of recycled aggregates to a greater extent.

This article describes the properties of recycled concrete aggregates obtained through an innovative multi-stage crushing and separation process carried out at the Concrete Recycling Plant in Dąbrowa Górnicza. The recycled aggregate was used in concrete

as a partial replacement for natural aggregate. The study evaluated its impact on the properties of the concrete mix, particularly in terms of workability, as well as on the compressive strength of the hardened concrete. Further research plans were also addressed, mainly focused on the durability of concrete containing circular component.

1. Wstęp

Liczba ludności na świecie, według statystyk ONZ, przekroczyła 8 mld w 2022 roku [1], a prognozowany dalszy wzrost populacji, zakłada poziom ok 9,7 mld w 2050 roku [2]. Tak dynamiczny przyrost demograficzny stanowi poważne wyzwanie dla gospodarki - rozumianej jako system instytucji i procesów służących zaspokajaniu potrzeb ludności poprzez produkcję i dystrybucję dóbr oraz usług. To właśnie potrzeby człowieka wyznaczają globalne kierunki rozwoju gospodarczego [3, 4]. Jednocześnie priorytetem pozostaje zapewnienie, aby potrzeby obecnych oraz przyszłych pokoleń były zaspokajane w równym stopniu. Z tego względu, już w latach 70-tych ubiegłego wieku zaproponowano model gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) [5], który zakłada maksymalne wykorzystanie zasobów, poprzez wdrożenie takich procesów, jak wielokrotne użycie, naprawa, regeneracja oraz recykling, dzięki czemu materiały oraz produkty pozostają w obiegu gospodarczym jak najdłużej [6]. Gospodarka cyrkularna zakłada przy tym redukcję strumienia generowanych odpadów i jednocześnie ograniczenie zużycia surowców naturalnych. Model ten znacząco różni się od dominującego w gospodarkach rozwiniętych, uprzemysłowionego modelu liniowego „weź-wyprodukuj-zużyj”, którego efektem jest rosnący strumień odpadów. W 2022 r. w Unii Europejskiej wytworzono łącznie 2,23 mld t odpadów, z czego 38 % wygenerował sektor budownictwa [7]. Bank Światowy szacuje, że globalna ilość odpadów komunalnych może wzrosnąć o 70 % do 2050 r. [8].

Komisja Europejska uznaje GOZ za kluczowy element transformacji gospodarczej [9]. Dla sektora budowlanego opracowano przewodnik „Circularity in the Built Environment: A Reading Guide” [10], podkreślający, że budownictwo odpowiada za około 50 % zużycia surowców pierwotnych i 30÷40 % emisji CO₂ w UE. Co więcej, jedna trzecia unijnych odpadów pochodzi z rozbiórek i modernizacji budynków. Zasadnicze znaczenie ma zatem projektowanie z myślą o demontażu (Design for Deconstruction, DfD), które ogranicza ilość odpadów, podnosi wartość odzyskiwanych materiałów i obniża koszty utylizacji.

W Polsce implementację zasad GOZ w budownictwie przyspieszy nowelizacja ustawy o odpadach, która – zgodnie z Dyrektywą 2018/851/UE – od 1 stycznia 2025 r. nałożyła na wytwórców odpadów budowlanych i rozbiórkowych obowiązek ich segregacji, w co najmniej sześciu frakcjach: drewno, metale, szkło, tworzywa sztuczne, gips oraz odpady mineralne (w tym beton, cegły, płytki, materiały ceramiczne i kamień) [11]. Takie regulacje sprzyjają planowaniu i projektowaniu obiektów, z uwzględnieniem procesów recyklingu i ponownemu wykorzystaniu materiałów w nowych inwestycjach.

2. Recykling betonu

W Polsce, po zakończeniu okresu użytkowania obiektu, konstrukcje są najczęściej rozbierane, a powstały materiał – pozbawiony określonych właściwości – trafia na składowiska lub jest wykorzystywany do wykonywania podbudów i niwelacji terenu. Ponieważ beton jest najczęściej wytwarzanym materiałem budowlanym [12], a do jego produkcji zużywa się znaczne ilości zasobów naturalnych (piaski i żwiru stanowią 70–

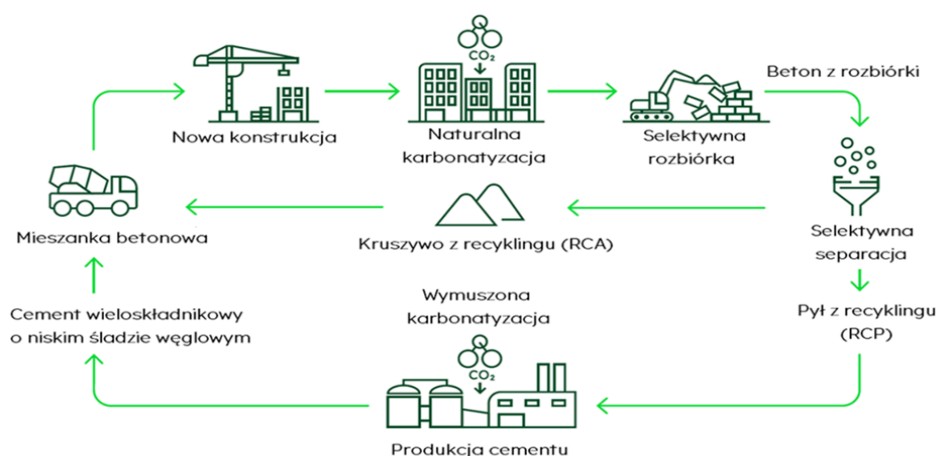
80 % masy mieszanki), ograniczenie eksploatacji kopalin oraz zmiana podejścia do recyklingu stają się pilnym wyzwaniem. Warto podkreślić, że możliwy jest 100% (kompletny) recykling betonu.

2.1. Konwencjonalna produkcja kruszyw z recyklingu

W klasycznym ujęciu recyklingu betonu, pierwszym krokiem jest oddzielenie elementów betonowych od materiałów bitumicznych, drewna, elementów murowych, płyt gipsowych itp. Wstępnie posegregowany materiał trafia do kruszarek szczękowych, z wbudowanym separatorem magnetycznym pozwalającym na oddzielenie elementów stalowych. Rozdrobniony materiał rozdzielony jest na frakcje drobne (< 4 mm) oraz frakcje grube (zazwyczaj < 100 mm), które kierowane są do ponownego kruszenia. W tym podejściu, maksymalizuje się uzysk frakcji grubych oraz minimalizuje się ilość frakcji drobnej, a jakość kruszywa z recyklingu zależy w dużej mierze od jakości materiału pochodzącego z rozbiórki. Kruszywa te charakteryzują się niższą gęstością, większą porowatością i wyższą nasiąkliwością niż kruszywa naturalne [13]. Utrudnia to ich wykorzystanie w produkcji betonu, z uwagi na niekorzystny wpływ na urabialność mieszanki betonowej oraz wytrzymałość betonu [13, 14].

2.2. Selektywna separacja – nowe podejście do recyklingu betonu

W celu poprawy jakości kruszyw z recyklingu betonu i pełnego wykorzystania ich potencjału, proponowano różne metody przetwarzania, takie jak obróbka termiczna i/lub chemiczna, które jednak okazały się kosztowne lub mało efektywne [14]. Selektywna separacja stanowi obiecującą alternatywę: umożliwia wytwarzanie wysokiej jakości kruszyw RCA (Recycled Concrete Aggregates) oraz pyłu RCP (Recycled Cement Paste), który może być wykorzystany jako składnik cementu bezpośrednio lub po procesie wymuszonej karbonatyzacji [15] (rys. 1). Kluczowym założeniem jest efektywne oddzielenie stwardniałego zaczynu cementowego od kruszywa.



Rys. 1. Gospodarka cyrkularna na przykładzie betonu [16]

W 2024 r. grupa Heidelberg Materials uruchomiła w Dąbrowie Górniczej pierwszy na świecie zakład recyklingu betonu, który wykorzystuje opatentowaną technologię

ReConcrete® opartą na selektywnej separacji, wytwarzając jednocześnie kruszywa z recyklingu oraz pył z recyklingu RCP (rys. 2).



Rys. 2. Zakład Recyklingu Betonu, Heidelberg Materials Polska, Dąbrowa Górnicza

Skuteczność wdrożonego procesu recyklingu, potwierdzają badania i przeprowadzona analiza wpływu kruszyw drobnych i grubych na właściwości betonu, które wykazały, że nasiąkliwość i gęstość kruszyw z recyklingu są kluczowe [17].

Celem artykułu jest kompleksowa ocena przydatności wysokiej jakości składnika cyrkularnego (RCA), pozyskanego w innowacyjnym, wieloetapowym procesie kruszenia i separacji prowadzonym w Zakładzie Recyklingu Betonu w Dąbrowie Górniczej, do zastosowań w betonach konstrukcyjnych. Ocena obejmuje szczegółową charakterystykę granulometryczną oraz fizyczną kruszywa. Określono wpływ częściowego zastąpienia naturalnego kruszywa grubego, na reologię mieszanki betonowej oraz wytrzymałość na ścislenie stwardniałego betonu. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań trwałościowych, ukierunkowanych na weryfikację długookresowych właściwości betonów zawierających komponenty cyrkularne, w kontekście planowanych zmian normalizacyjnych dopuszczających szersze stosowanie kruszyw pochodzących z recyklingu.

3. Materiały i metody badań

Przedmiotem badań opisanych w artykule były mieszanki betonowe zaprojektowane z następujących składników:

- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-LL) 42,5N,
- kruszywo naturalne żwirowe,
- kruszywo z recyklingu (RCA) wyprodukowane w zakładzie Heidelberg Materials Polska w Dąbrowie Górniczej,
- superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylianowych (PCE).

Dobór materiałów został przeprowadzony w oparciu o ich dostępność rynkową, właściwości użytkowe oraz zgodność z obowiązującymi normami. Każdy z komponentów posiada właściwości umożliwiające jego zastosowanie w technologii betonu konstrukcyjnego, zarówno w kontekście trwałości, jak i efektywności środowiskowej.

3.1. Cement

W pracy zastosowano cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-LL) 42,5N z Cementowni GóraŹdŹe, Heidelberg Materials Polska, zgodny z wymagania normy PN-EN 197-1 [19]. Właściwości użytkowe cementu zestawiono w tabeli 1, natomiast skład chemiczny w tabeli 2. Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N to cement niskoemisyjny, dla którego obliczony współczynnik netto śladu węglowego (GWPnet – Global Warming Potential) wynosi 418 kg CO₂ na tonę produktu. Dzięki obniżonej emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji, materiał ten wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju i ograniczania wpływu budownictwa na środowisko naturalne. Ponadto, charakterystyka techniczna cementu umożliwia jego szerokie zastosowanie zarówno w betonach zwykłych, jak i specjalistycznych, typu betony architektoniczne czy samozagęszczalne.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N

Kategoria	Właściwość	Wartość średnia
Właściwości mechaniczne	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	19,4
	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	52,4
Właściwości fizyczne	Początek czasu wiązania [min]	221
	Woda do konsystencji normowej [%]	28,8
	Stałość objętości [mm]	0,6
	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	4059
	Ciepło hydratacji [J/g]	244

Tabela 2. Skład chemiczny cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5N

Skład chemiczny [% masy]									
Strata prażenia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
3,45	22,21	5,62	3,63	58,10	2,76	2,64	0,062	0,22	0,62

3.2. Kruszywo

Zastosowane kruszywa – zarówno naturalne, jak i pochodzące z recyklingu (RCA) – spełniały wymagania określone w normie PN-EN 12620 [20] dotyczącej kruszyw do betonu oraz były zgodne z zaleceniami normy PN-EN 206 [21] w zakresie ich stosowania w mieszankach betonowych. Właściwości kruszyw zestawiono w tabeli 3 oraz tabeli 4.

Tabela 3. Właściwości kruszywa naturalnego

Właściwość	Frakcja 2/8	Frakcja 8/16
Kategoria kruszywa z recyklingu	G _c 85/20	G _c 85/20
Pyły	f _{1,5}	f _{1,5}
Kategoria mrozoodporności	F ₁	F ₁
Zawartość ziaren nieforemnych	Fl ₁₅	Fl ₁₅
Gęstość ziaren [Mg/m ³]	2,62	2,61
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA ₃₀	LA ₃₀
Zawartość chlorków [%]	<0,01	<0,01
Nasiąkliwość [%]	1,03	0,98

Kruszywo z recyklingu (RCA) posiada status wyrobu budowlanego zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa oraz zostało objęte certyfikowanym systemem zakładowej kontroli produkcji (ZKP), prowadzonym zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12620 [20]. Deklarowanym systemem oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych jest system 2+, co oznacza, że nadzór nad procesem produkcyjnym sprawowany jest przez jednostkę notyfikowaną, a producent zobowiązany jest do prowadzenia ciągłego monitoringu jakości wyrobu.

Tabela 4. Właściwości kruszywa RCA typu A+ [22] z zakładu w Dąbrowie Górniczej

Właściwość	Fracja 4/8	Fracja 8/16
Kategoria kruszywa z recyklingu	G _c 85/20	G _c 85/20
Pyły	f _{1,5}	f _{1,5}
Składniki kruszywa grubego z recyklingu	R _{CU95}	R _{CU95}
Zawartość ziaren nieforemnych	Fl ₁₅	Fl ₁₅
Gęstość ziaren [Mg/m ³]	2,60	2,60
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA ₃₀	LA ₂₅
Zawartość chlorków [%]	<0,01	<0,01
Nasiąkliwość [%]	7,4	4,8

3.3. Domieszka chemiczna

W badaniach zastosowano domieszkę chemiczną na bazie eterów polikarboksylowych o właściwościach przedstawionych w tabeli 5.

Tabela 5. Właściwości domieszki chemicznej

Właściwość			
Składnik podstawowy	Gęstość*	Odczyn pH*	Zawartość części stałych
Eter polikarboksylowy	1,05 g/cm ³	6,0	21,2%
*pomiar w temp. 20 °C			

3.4. Projektowanie betonu ze składnikiem cyrkularnym RCA

Program badawczy zakładał ocenę wpływu kruszywa grubego z recyklingu na właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Analizowano różne kompozycje składu z uwagi na zmienny stopień zastąpienia kruszywa naturalnego 2/16 mm kruszywem z recyklingu 4/16 mm (objętościowo 30%, 50%, 80%, 100%). W tabeli 6 zestawiono receptury mieszanek betonowych. Przyjęte oznaczenia odpowiadają udziałowi kruszywa z recyklingu, np. RCA 30 odpowiada 30% zastąpieniu kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu. Dla pełnej kompensacji nasiąkliwości (WA₂₄) w badaniach stosowano kruszywo wysuszone w 105 °C oraz dodatkową ilość wody, obliczoną wg udziału poszczególnych frakcji. Przed zasadniczym mieszaniem składników, kruszywo było wstępnie nasycane częścią całkowitej wody zarobowej, przez 30 minut.

Tabela 6. Receptury betonu przy zróżnicowanym udziale kruszywa z recyklingu (RCA)

Składnik	Zawartość składnika [kg/m ³]				
	REF	RCA 30	RCA 50	RCA 80	RCA 100
Piasek 0/2 mm	705	705	705	705	705
Żwir 2/8 mm	477	320	238	96	-
Żwir 8/16 mm	663	444	331	136	-
RCA typu A+ 4/8 mm	-	146	220	352	440
RCA typu A+ 8/16 mm	-	207	313	501	627
CEM II/B-M (S-LL) 42,5N	300	300	300	300	300
Woda efektywna	165	165	165	165	165
Woda całkowita	176	193	202	217	228
Superplastyfikator	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

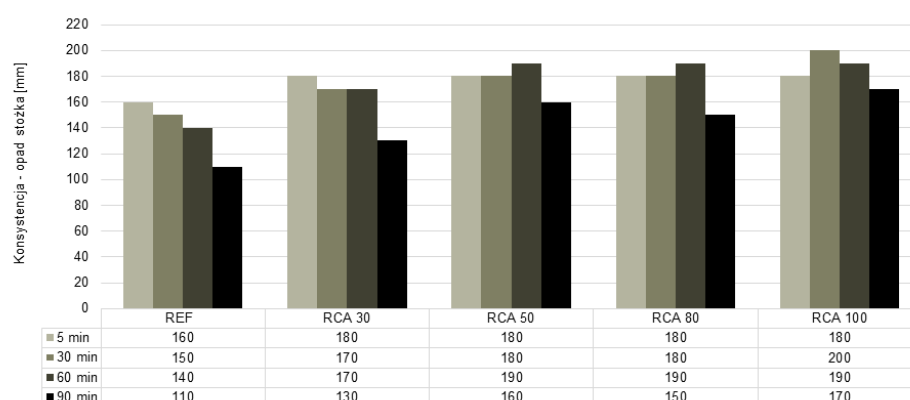
4. Omówienie wyników badań

W rozdziale zestawiono i omówiono wyniki badań:

- konsystencji oznaczonej metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [23],
- zawartości powietrza w mieszance betonowej wg PN-EN 12350-7 [24],
- wytrzymałości na ściskanie betonu wg PN-EN 12390-3 [25],
- odporności na karbonatyzację oznaczonej metodą przyspieszoną wg PN-EN 12390-12 [26].

4.1. Właściwości mieszanki betonowej

Oznaczenie konsystencji oraz zawartości powietrza wykonano po 5, 30, 60 i 90 minutach od momentu pierwszego kontaktu wody z cementem. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys.3 i w tabeli 7.



Rys. 3. Konsystencja mieszanek betonowych

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastąpienie części kruszywa naturalnego kruszywem grubym z recyklingu (RCA) korzystnie wpływa na kształtowanie i utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej w czasie (rys. 3). Najwyższy opad stożka w każdym terminie badania odnotowano dla receptury, w której stopień zastąpienia kruszywem z recyklingu wynosił 100% (RCA 100). Uzyskane wyniki badań są zbieżne z rezultatami opisanymi przez Silva i wsp.[27] oraz Kou i wsp. [28], którzy efekt upłynnienia uzasadnili m.in. niepełnym nasyceniem porów kruszywa,

w czasie badania konsystencji mieszanki betonowej. Jest to związane głównie ze zwiększoną ilością wolnej wody, która musiała zostać dodana podczas mieszania, aby zrekompensować wyższą nasiąkliwość RCA. Mieszanka referencyjna charakteryzowała się najmniejszym opadem stożka.

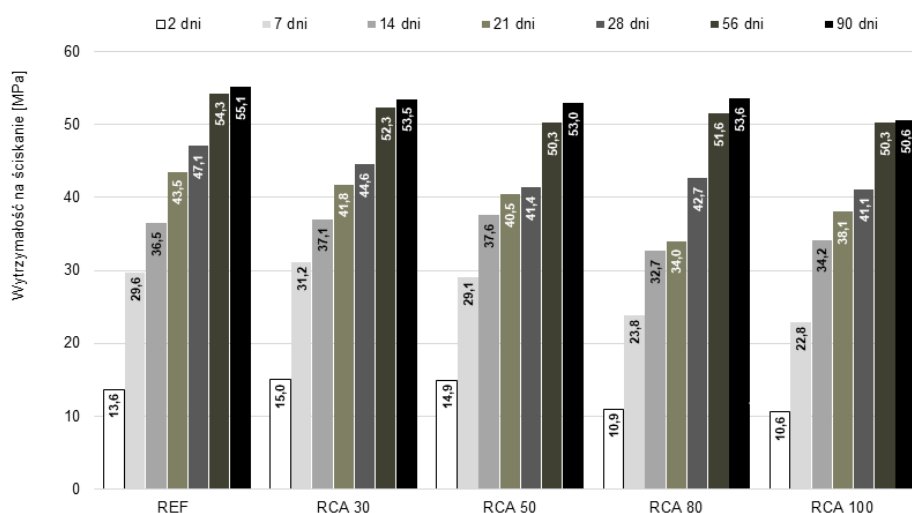
Tabela 7. Zawartość powietrza w mieszance betonowej

Oznaczenie	Zawartość powietrza [%]			
	5 min	30 min	60 min	90 min
REF	2,2	2,5	3,2	3,6
RCA 30	2,0	2,4	2,6	3,2
RCA 50	1,3	1,5	2,6	3,0
RCA 80	1,4	1,6	1,6	2,3
RCA 100	0,8	0,8	1,5	2,4

Zaobserwowano, iż początkowa zawartość powietrza (po 5 min) maleje wraz ze wzrostem udziału kruszywa RCA. Dla mieszanki referencyjnej zawartość powietrza oznaczono na poziomie 2,2%, podczas gdy dla RCA 100 zawartość powietrza wyniosła tylko 0,8%. Dla wszystkich badanych mieszanek stwierdzono jednak wzrost zawartości powietrza w czasie. Wyniki oznaczenia po 90 min są wyższe (odpowiednio 3,6% i 2,4%), choć względnie różnice są mniejsze, a generalny trend został utrzymany. Podobne zależności opisano w pracach [27, 28].

4.2. Właściwości betonu stwardniałego

Wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu określono zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [25]. Dla lepszego rozpoznania wpływu kruszywa z recyklingu (RCA) na rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu, badanie przeprowadzono po 2, 7, 14, 21, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania betonu – rys. 4.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonów przy zmiennej zawartości kruszywa grubego z recyklingu (RCA)

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały, że we wczesnym etapie dojrzewania betonu, zastosowanie do 50% kruszywa z recyklingu nie wpływa

negatywnie na wytrzymałość – wartości są porównywalne lub nawet wyższe niż dla betonu z kruszywem naturalnym (REF). W przypadku wyników 28-dniowych odnotowano niewielki spadek wytrzymałości na ściskanie, nieprzekraczający 13% przy zastosowaniu kruszywa RCA w ilości 100% kruszywa grubego. W późniejszym okresie dojrzewania tj. 56 i 90 dni, stwierdzono zmniejszoną różnicę pomiędzy wynikami wytrzymałości betonu referencyjnego i betonu z kruszywem RCA, co może być tłumaczone efektem wewnętrznej pielęgnacji betonu.

Odporność betonu na karbonatyzację określono metodą przyspieszoną zgodnie z normą PN-EN 12390-12 [26]. Badanie wykonano na próbkach dojrzewających w wodzie przez 56 dni (czas równoważny), następnie przez 14 dni w warunkach laboratoryjnych. Pomiar głębokości karbonatyzacji przeprowadzono po 28 i 70 dniach przechowywania próbek w komorze, gdzie koncentracja dwutlenku węgla wynosiła $3 \pm 0,5\% \text{CO}_2$, uśrednione wyniki głębokości karbonatyzacji zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8. Głębokość karbonatyzacji

Oznaczenie	Średnia głębokość karbonatyzacji [mm]	
	28 dni	70 dni
REF	3	5
RCA 30	4	7
RCA 50	5	8
RCA 80	5	9
RCA 100	9	10

Betony zawierające kruszywo grube z recyklingu charakteryzują się wyższą głębokością karbonatyzacji w porównaniu do betonu referencyjnego, przy czym stopień zastąpienia kruszywa naturalnego nie jest czynnikiem jednoznacznie determinującym odporność betonu na karbonatyzację. Wzrost udziału RCA (od 30% do 100%) wiąże się z proporcjonalnym wzrostem głębokości karbonatyzacji, szczególnie po 70 dniach. Jednocześnie, różnice między poszczególnymi betonami, np. RCA 30 – RCA 50 mieszczą się w zakresie powtarzalności metody. Jedynie w przypadku pełnej substytucji kruszywem z recyklingu (RCA 100) można zaobserwować jednoznaczny wpływ na zwiększenie głębokości karbonatyzacji względem betonu referencyjnego. Dla wszystkich analizowanych kompozycji składu głębokość karbonatyzacji jest mniejsza niż 10 mm (tabela 8), co wskazuje na dobrą odporność betonu na karbonatyzację.

5. Podsumowanie

Stosowanie składnika cyrkularnego (kruszywa z recyklingu RCA) jako częściowego i/lub całkowitego substytutu naturalnego kruszywa grubego w betonie, jest możliwym i korzystnym rozwiązaniem technologiczno-materiałowym, co więcej wydaje się nieuniknione, z uwagi na aspekty ekologiczne i ekonomiczne. Powstanie Zakładu Recyklingu Betonu Heidelberg Materials Polska w Dąbrowie Górniczej jest przykładem aktywnego działania na rzecz wdrażania rozwiązań gospodarki obiegu zamkniętego i stosowania w szerszym zakresie i większym potencjałem technologicznym betonowego gruzu budowlanego. Zastosowana technologia wieloetapowego kruszenia i separacji, pozwala na uzyskanie produktów, które można ponownie stosować, zapewniając przy tym ich wysoką jakość.

Projektowanie betonu ze składnikiem cyrkularnym wymaga w pierwszym etapie określenia gęstości oraz nasiąkliwości kruszywa z recyklingu. Należy mieć również na względzie, że koniecznym jest wstępne nasycanie kruszywa. Ponadto, szczególnie istotna jest bieżąca kontrola produkcji oraz dotrzymanie reżimu technologicznego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż poprzez zastąpienie naturalnego kruszywa grubego kruszywem z recyklingu (RCA) możliwe jest uzyskanie korzystnych właściwości reologicznych mieszanki betonowej, szczególnie zachowania urabialności w czasie. Wytrzymałość na ściskanie betonów zawierających składnik cyrkularny, względem betonu referencyjnego jest na porównywalnym poziomie – najbardziej zbliżone wytrzymałości na ściskanie uzyskano dla betonów, w których stopień zastąpienia kruszywa naturalnego wynosił 30%. Ponadto, uzyskanie niskiej głębokości karbonatyzacji (< 10 mm) wskazuje na wysoką odporność na karbonatyzację.

Wyniki te wskazują, że beton z udziałem RCA można bezpiecznie projektować i stosować w konstrukcjach, pod warunkiem przestrzegania zasad związanych z nasycaniem kruszywa i kontrolą procesu produkcyjnego. Nadchodzące zmiany normalizacyjne, dopuszczające do 100 % kruszywa grubego z recyklingu, znajdują solidne oparcie w przedstawionych danych eksperymentalnych, torując drogę do szerokiego wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie betonowym.

Wyniki badań opisane w niniejszym artykule uzyskano w ramach realizowanej agendy badawczej projektu współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej na podstawie umowy nr POIR. 02.01.00-00-0058/20-00

6. Literatura

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2024: Summary of Results. New York: United Nations; 2024. Available from: [https://population.un.org/wpp/summary of Results](https://population.un.org/wpp/summary%20of%20Results). New York: United Nations; 2024. Available from: <https://population.un.org/wpp/>
- [2] Population Connection. New United Nations Population Estimates and Projections [Internet]. Washington (DC): Population Connection; 2022 Jul 11 [cited 2025 May 26]. Available from: <https://populationconnection.org/article/new-united-nations-population-estimates-and-projections/>
- [3] Begg D, Fischer S, Dornbusch R. *Makroekonomia*. Warszawa: PWE; 2014
- [4] Gruchman B, red. *Ekonomia społeczna i gospodarka rynkowa*. Warszawa: PWN; 2002
- [5] Boulding KE. The economics of the coming spaceship Earth. In: Jarrett H, editor. *Environmental Quality in a Growing Economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 1966. p. 3–14
- [6] European Commission. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Brussels: European Commission; 2015.
- [7] Eurostat. Waste statistics - Statistics Explained. 2024. Dostępne na: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics
- [8] Bank Światowy (2018), What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050
- [9] European Commission. A new Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Commission; 2020.

- [10] European Circular Economy Stakeholder Platform. Circularity in the Built Environment: A Reading Guide. Brussels: ECESP; 2025. Available from: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/circularity-built-environment-reading-guide>
- [11] European Union. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Off J Eur Union. 2018 Jun 14;L150:109-140.
- [12] Ashby, M.F. Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice, 2nd ed.; Elsevier/Butterworth-Heinemann: Waltham, MA, USA, 2013.
- [13] Joseph, H.S.; Pachiappan, T.; Avudaiappan, S.; Maureira-Carsalade, N.; Roco-Videla, Á.; Guindos, P.; Parra, P.F. A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. Sustainability 2023, 15, 4932. [CrossRef]
- [14] Shaban, W.M.; Yang, J.; Su, H.; Mo, K.H.; Li, L.; Xie, J. Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review. J. Adv. Concr. Technol. 2019, 17, 151–167. [CrossRef]
- [15] Zajac M, Skocek J, Durdzinski P, Bullerjahn F, Skibsted J, Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. Cem Concr Res. 2020;134:106090. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106090
- [16] HeidelbergMaterials. Annual and sustainability report 2023. Heidelberg: Heidelberg Materials AG; 2024 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.heidelbergmaterials.com/annual-report-2023>
- [17] Skocek J, Ouzia A, Vargas Serrano E, Pato N. Recycled sand and aggregates for structural concrete: toward the industrial production of high-quality recycled materials with low water absorption. Sustainability. absorption. Sustainability 2024;16(2):814. doi:10.3390/su16020814
- [18] Akram A, Słowik M. Wpływ uziarnienia i współczynnika miażdżenia kruszywa na właściwości stwardniałego betonu. Materiały Budowlane. 2023;615(11):41-45. doi:10.15199/33.2023.11.09
- [19] PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [20] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [21] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [22] prPN-B-06265
- [23] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [24] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe
- [25] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [26] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu - Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [27] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: a review. Constr Build Mater. 2018;178:19-31. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.
- [28] Kou SC, Poon CS, Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. Cem Concr Compos. 2011;33(8):788-795. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.05.0w 09.

mgr inż. Paula Karwowska

Budimex S.A

mgr inż. Patryk Chmura

P.P.M.B. „Bosta Beton” Sp. z o.o.

"Projektowanie betonu o obniżonej migracji jonów chlorkowych – studium przypadku z realizacji kontraktu Baltic Hub T3 Terminala w Gdańsku"

“Design of concrete with reduced chloride ion migration - a case study based on the Baltic Hub T3 Terminal in Gdańsk.”

Streszczenie

Budowa terminala Baltic Hub T3 w Gdańsku stanowi jedną z kluczowych inwestycji infrastrukturalnych w rejonie Morza Bałtyckiego, zwiększając możliwości przeładunkowe i umacniając pozycję Polski w międzynarodowej wymianie handlowej. W niniejszym artykule przedstawiono studium przypadku projektowania betonu o obniżonej migracji jonów chlorkowych dla potrzeb konstrukcyjnych tego obiektu, ze szczególnym uwzględnieniem surowych wymagań dotyczących trwałości w agresywnym środowisku morskim, zwłaszcza w strefie rozbryzgu, gdzie mgły i aerozole bogate są w chlorki, poddane cyklicznemu rozmrażaniu i zamrażaniu. Zaprezentowano podejście i wyzwania, które stawiane są przed Wykonawcą oraz Dostawcą betonu towarowego.

W artykule omówiono główne założenia technologiczne, w tym dobór rodzaju cementu, ograniczenie stosunku wodno-cementowego oraz zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych, co pozwoliło na uzyskanie niskiej porowatości i wysokiej szczelności matrycy cementowej. Istotną część opracowania stanowią badania laboratoryjne i terenowe, w tym testy przepuszczalności metodą NT Build 492, prowadzone w trakcie rocznego okresu dostaw betonu, które potwierdziły skuteczność projektowanej mieszanki. W pracy zwrócono również uwagę na praktyczne wyzwania związane z poborem próbek do badań.

Uzyskane wyniki mogą być cenną wskazówką w zakresie doboru materiałów i metod badawczych w innych realizacjach, gdzie istnieje istotne ryzyko korozji zbrojenia wywołanej migracją jonów chlorkowych. Studium przypadku pokazuje, że kompleksowe podejście do doboru składników betonu oraz jego kontroli pod kątem agresji chlorkowej pozwala zapewnić długookresową trwałość konstrukcji, obniżając koszty utrzymania i przekładając się na bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacyjną całej inwestycji.

Abstract

The construction of the Baltic Hub T3 Terminal in Gdańsk is one of the key infrastructure investment projects in the Baltic Sea region aimed at increasing cargo

handling capacity and strengthening Poland's position in international trade. This article presents a case study on the design of concrete with reduced chloride ion migration specifically tailored to meet the structural requirements of the terminal. Special attention is given to the stringent durability criteria required for demanding marine environment, particularly in the splash zone, where concrete is exposed to chloride-rich mists and aerosols along with cyclical freezing and thawing process. The study outlines some challenges that the Contractor and the supplier of ready-mixed concrete had to face in the course of execution.

The article presents the main technological assumptions, including the selection of cement type, reduction of the water-to-cement ratio, and the use of suitable chemical admixtures, all of which contributed to achieving low porosity and high cement matrix density. A significant part of the study is dedicated to laboratory and field tests, such as permeability tests using the NT Build 492 method, conducted over a one-year period of concrete deliveries. These tests confirmed the effectiveness of the designed concrete mix. The study also highlights practical challenges related to sample collection for testing.

The findings serve as a valuable reference and guidance for selecting materials and testing methodologies in future projects where chloride-induced reinforcement corrosion poses a significant risk. This case study demonstrates that a comprehensive approach to the selection of concrete components and its quality control in terms of chloride aggression ensures long-term structural durability, minimizes maintenance costs, and enhances both safety and operational efficiency of the entire investment.

1.Wprowadzenie

Eksplotacja żelbetowych konstrukcji w strefach nadmorskich wiąże się z intensywnym oddziaływaniem środowiska agresywnego, w szczególności z obecnością jonów chlorkowych pochodzących z wody morskiej, aerozoli solnych oraz stosowania soli odladzających. Jony chlorkowe penetrują beton, prowadząc do utraty pasywności stali zbrojeniowej i inicjacji korozji. Szczególnie niebezpieczne są warunki zmienne, takie jak strefa rozbryzgu czy przemienne zamrażanie i rozmrażanie.

Agresja chemiczna spowodowana działaniem wody morskiej na beton wynika z obecności wielu rozpuszczalnych soli w jej składzie. Zasolenie wód morskich oraz oceanicznych wynosi na ogół 3,5%. Odbiega od tego zasolenie Bałtyku, które wynosi zaledwie 0,7%, a Morza Martwego 31,5%. We wszystkich morzach proporcje soli są praktycznie stałe i na przykładzie Oceanu Atlantyckiego wynoszą odpowiednio: chlorki 2,00%, siarczany 0,28%, kationy sodu 1,11%, magnezu 0,14%, wapnia 0,05%, potasu 0,04%. W wodzie morskiej znajduje się również pewna ilość rozpuszczonego CO₂. Płytkie rejony blisko brzegu, szczególnie w klimacie gorącym, gdzie ma miejsce intensywne parowanie, mogą zawierać większe stężenie soli.

Przemienne zwilżanie i osuszanie powierzchni betonu tworzy znacznie ostrzejsze warunki dla betonu, niż te, gdzie jest stale zanurzony. Jest to spowodowane odkładaniem się soli na powierzchni betonu oraz w porach z racji wnikania wody morskiej i odparowywania czystej wody. Wietrzenie solankowe może obejmować strefę do głębokości kilku milimetrów i działać erozyjnie na zaczyn cementowy i

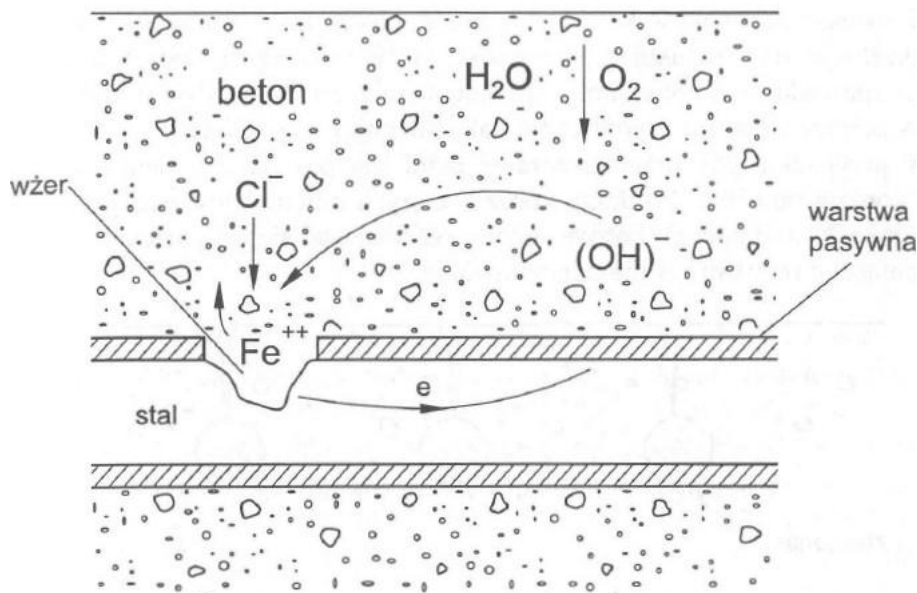
zatopione w nim kruszywo. Wybór odpowiedniego kruszywa dla trwałości takiego elementu jest kluczowe, tak samo jak betonu, który wykazuje niską przepuszczalność strefy powierzchniowej.

Zabezpieczenie konstrukcji w takich warunkach wymaga projektowania betonu o wysokiej szczelności, odpowiedniej mikrostrukturze i ograniczonej przepuszczalności dla agresywnych mediów. W tym celu stosuje się m.in. cementy wieloskładnikowe, domieszki chemiczne oraz kontrolę składu granulometrycznego kruszyw.

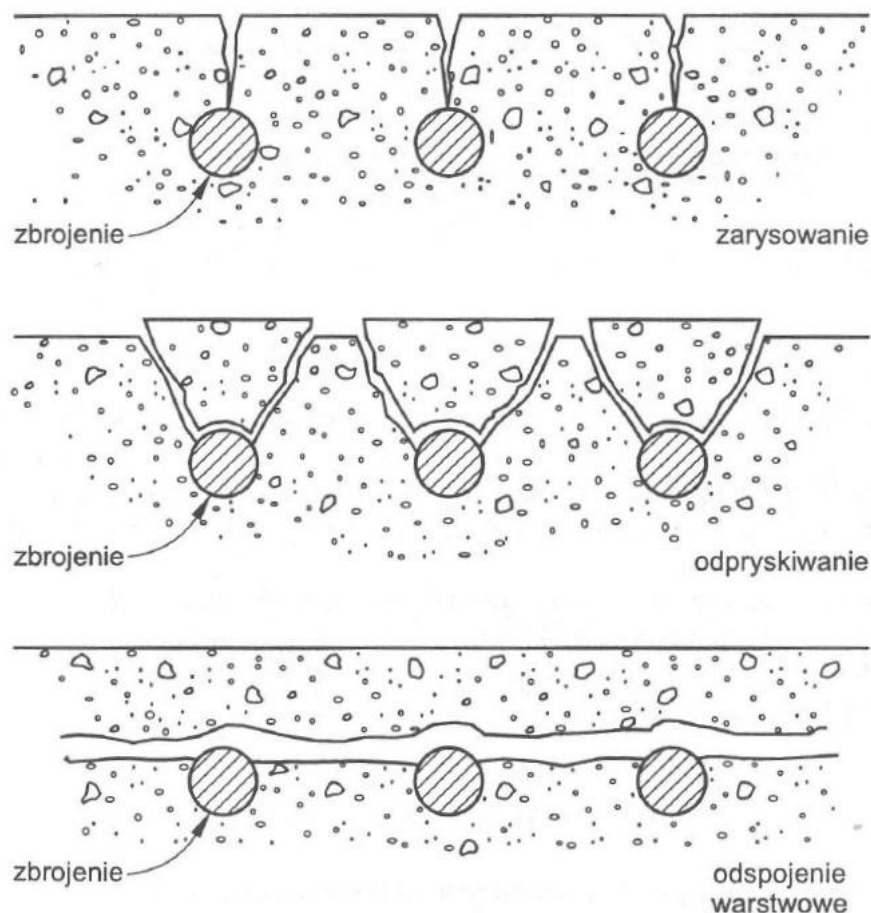
2. Korozja chlorkowa

Zdecydowanie najbardziej niszczący efekt działania wody morskiej na konstrukcje betonowe wywołany jest działaniem chlorków na stal zbrojeniową. Zniszczenie betonu otaczającego stal jest konsekwencją tej korozji. Korozja zbrojenia jest jedną z głównych przyczyn niszczenia konstrukcji żelbetowych.

Mechanizm korozji zbrojenia następuje w obecności wody i tlenu, gdy zostanie uszkodzona warstwa pasywna zabetonowanej stali przez jony chlorkowe. Warstwa ta tworzy się wkrótce po rozpoczęciu procesu hydratacji cementu i składa się z cząstek $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ściśle przyległych do powierzchni stali. Korozja w suchym betonie, w pełni zanurzonej oraz prawdopodobnie poniżej 60% wilgotności względnej nie występuje – chyba, że w wodzie zawarty jest rozpuszczony tlen. Wilgotność optymalna dla przebiegu procesu korozji wynosi 70-80%.



Rysunek 1. Przebieg korozji elektrochemicznej w obecności chlorków [7].



Rysunek 2. Powstawanie zniszczeń wywołanych korozją: zarysowania, odpryskiwanie, odspojenia warstwowe [7].

Chlorki mogą występować w betonie przez wprowadzenie ich do mieszanki z zanieczyszczonym kruszywem, wodą morską lub lekko zasoloną np. z rzeki. Wymienione składniki nie powinny być zastosowane do wytwarzania żelbetu i normy ograniczają zawartość chlorków w betonie niezależnie od jego pochodzenia. Norma PN-EN 206 dopuszcza maksymalnie 1% zawartości jonów chlorkowych w stosunku do masy cementu w betonie niezbrojonym, 0,2% w żelbecie i 0,1% w elementach sprężonych. Kluczowe są chlorki rozpuszczalne w wodzie, które stanowią tylko część całkowitej zawartości chlorków. Całkowita zawartość chlorków określana jest jako zawartość chlorków rozpuszczalnych w kwasach, którą można oznaczyć na podstawie m.in. ASTM C 1152-90 lub PN-EN 14629. Źródłem chlorków może być również cement, który zazwyczaj zawiera ich poniżej 0,10% masy. Woda pitna może zawierać 250 ppm jonów chlorkowych, co przy stosunku $w/c = 0,40$ wprowadziłaby do mieszanki betonowej mniej więcej tyle samo chlorków co cement portlandzki.

Problem korozji chlorkowej pojawia się zazwyczaj, gdy jony chlorkowe wnikają do wnętrza betonu. Ich źródłem najczęściej jest sól, stosowana do usuwania lodu czy woda morska. Chlorki mogą być również transportowane przez drobne kropelki wody morskiej unoszące się w powietrzu. Odnotowano przypadek, gdzie chlorki utrzymywały się w powietrzu na odległości 2 km. Niezależnie od źródła, chlorki przenikają do wnętrza betonu w wyniku przepływu roztworów je zawierających, dyfuzji jonów Cl^- czy

absorpcji. Przemienne zwilżanie i wysychanie betonu powoduje stopniowe wnikanie soli w kierunku stali zbrojenia. Maksymalna zawartość jonów chlorkowych w porach kapilarnych może przewyższać ich zawartość w wodzie morskiej – fakt taki odnotowano po 10 latach użytkowania betonu w sąsiedztwie wody morskiej. Beton w strefie przyptywów (krótki okres wysychania) jest mniej podatny na korozję niż w strefie spryskiwania (zwilżanie następuje tylko, gdy morze jest wzburzone lub występuje silny wiatr). Najbardziej narażony na korozję jest beton zwilżany przez wodę morską tylko okazjonalnie np.: wokół pachołów cumowniczych czy hydrantów z których pobierana jest woda morską.

Nie istnieje graniczna – uniwersalna wartość zawartości chlorków przy powierzchni stali zbrojeniowej, która powoduje jej korozję. Nadmierna ilość chlorków w wyjściowej mieszance pociąga za sobą intensyfikację procesów korozyjnych wywołanych czynnikami zewnętrznymi. Występuje wówczas większa szybkość korozji od tej niż, gdyby ta sama ilość chlorków wniknęła do betonu podczas eksploatacji. Zabezpieczenie przed korozją sprowadza się do ograniczenia wnikania chlorków poprzez kontrolę grubości otuliny zbrojenia oraz przepuszczalność otuliny betonu. Warto nadmienić, iż całkowita zawartość chlorków nie decyduje o tym, czy korozja nastąpi, czy nie. Część chlorków ulega związaniu podczas procesu hydratacji, a inna część jest związana fizycznie na powierzchni porów żelowych. Kluczowe dla agresji chlorkowej są wolne chlorki, które są zawsze obecne w cieczy porowej i występują w nadmiarze w stosunku do jonów koniecznych do zachowania równowagi.

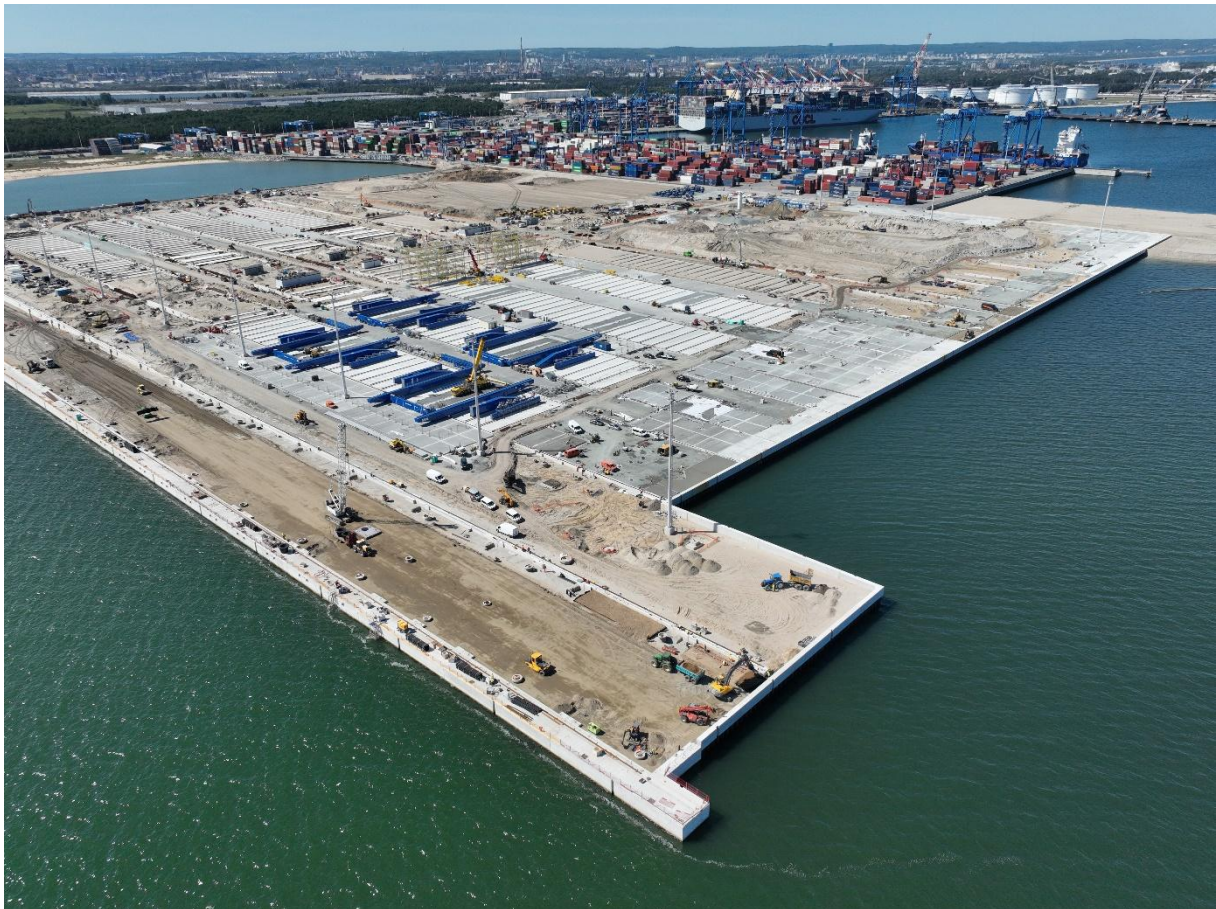
Podstawową formą wiązania jonów chlorkowych w betonie jest ich reakcja z C_3A . Produktem tej reakcji jest sól Friedela. Wysoka zawartość cementu, bogatego w glinian trójwapniowy jest pożądana, aby zwiększyć odporność na korozję chlorkową betonu. W przypadku cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy, wiązanie chlorków może następować również przez gliniany, występujące w żużlu, co jednak nie zostało w pełni potwierdzone. Obecność znacznej ilości siarczanów w wodzie morskiej powoduje reakcję pomiędzy jonami C_3A i $C-S-H$ w wyniku czego powstaje ettringit. Nie powoduje to jednak szkodliwej ekspansji, ponieważ w obecności chlorków jest rozpuszczalny i może być wypłukiwany przez wodę morską, jednak zaleca się aby ograniczać zawartość C_3A w cemencie do 8-10% w zależności od stężenia SO_3 . Należy mieć na uwadze, że jego wysoka zawartość (C_3A) nie jest zalecana, ponieważ wpływa niekorzystnie na korozję siarczanową oraz przyczynia się do szybkiego wczesnego wydzielania ciepła – co nie jest korzystne w masywnych elementach. Projektując beton należy wziąć pod uwagę wszystkie zagrożenia i szukać kompromisu, który okaże się najbardziej bezpieczny dla danej konstrukcji. Stosowanie cementów bogatych w dodatki typu II jest pożądaną, ponieważ znacznie redukuje przepuszczalność betonu, zwiększając jego opór właściwy i zmniejszając tym samym szybkość korozji.

3. Założenia i wymagania Kontraktu

3.1 Charakterystyka inwestycji

Terminal DCT T3 w Gdańsku to jedna z największych inwestycji morskich w Polsce, realizowana w bezpośrednim sąsiedztwie Zatoki Gdańskiej. Ze względu na lokalizację

i funkcję, konstrukcje żelbetowe narażone są na długotrwałe działanie czynników korozyjnych, w tym chlorków i zmiennych warunków klimatycznych. Kluczowym założeniem kontraktu było ograniczenie ryzyka korozji zbrojenia w długim okresie eksploatacji, poprzez zastosowanie betonu charakteryzującego się niską przepuszczalnością i wysoką trwałością w środowisku agresji chlorkowej. Wymagania te zostały wyrażone zarówno w dokumentacji projektowej, jak i w warunkach technicznych dostaw betonu, uwzględniających konieczność spełnienia określonych parametrów potwierdzonych odpowiednimi badaniami, m.in. według metody NT Build 492.



Zdjęcie 1. Widok nowopowstałego Terminala T3
Źródło: Budimex S.A.

3.2 Wymagania techniczne

Dokumentacja kontraktowa określała maksymalny współczynnik migracji jonów chlorkowych wg metody NT Build 492, dostosowany do klasy ekspozycji XS3/XD3. Dodatkowo wymagano stopnia mrozoodporności F200 oraz odporności na sole odladzające w kategorii FT2. Beton musiał również spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości (min. C35/45) oraz niskiej zawartości jonów chlorkowych ogółem ($Cl^- \leq 0,10\%$).

W dokumentacji kontraktowej jednoznacznie określono wymagania dotyczące trwałości betonu w kontekście migracji jonów chlorkowych. Jednym z podstawowych

kryteriów było osiągnięcie odpowiednio niskiego współczynnika migracji, potwierdzonego metodą badawczą NT Build 492 – zgodnie z którą dopuszczalna wartość współczynnika migracji wynosiła maksymalnie $X \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^*$ (w zależności od elementu i jego lokalizacji w konstrukcji). Tak zdefiniowane wymagania stanowiły istotne ograniczenie technologiczne, które determinowało dobór składników betonu, parametry mieszanki oraz procedury kontroli jakości na etapie produkcji i wbudowywania.

4.Proces projektowania receptury betonu

4.1Cele projektowe

Głównym celem projektowania receptury betonu przeznaczonego do realizacji konstrukcji terminalu DCT T3 było zapewnienie długoterminowej trwałości materiału w warunkach silnej ekspozycji na jony chlorkowe. Założenia technologiczne obejmowały przede wszystkim uzyskanie niskiego współczynnika migracji chlorków, zgodnego z wymaganiami kontraktowymi, co miało kluczowe znaczenie w kontekście ochrony zbrojenia przed korozją. Równocześnie beton musiał spełniać wymagania w zakresie wytrzymałości na ściskanie ($\geq \text{C35/45}$) oraz zapewniać trwałość zgodnie z zakładanym okresem użytkowania konstrukcji, wynoszącym co najmniej 100 lat.

Cele projektowe były ściśle powiązane z zapisami dokumentacji technicznej inwestycji oraz wymaganiami Zamawiającego i Inwestora, które kładły nacisk na jakość, trwałość i odporność materiałów na czynniki środowiskowe. Projektowana mieszanka betonowa musiała zatem łączyć właściwości wytrzymałościowe z bardzo wysoką szczelnością strukturalną, a cały proces jej opracowania podporządkowano osiągnięciu spójnych parametrów zarówno na etapie badań laboratoryjnych, jak i w rzeczywistych warunkach budowy.

4.2 Dobór składników

4.2.1 Cement

W projektowanej mieszance zastosowano cement hutniczy - CEM III/A, którego głównym składnikiem jest żużel wielkopiecowy, istotnie wpływający na poprawę trwałości betonu w środowiskach agresywnych chemicznie, w tym chlorkowych. Dodatki typu II – zarówno o właściwościach pucolanowych, jak i hydraulicznych – odgrywają kluczową rolę w nowoczesnej technologii betonu. Pucolany reagują z wodorotlenkiem wapnia, natomiast dodatki hydrauliczne, po aktywacji, wykazują własności wiążące. Efektem obydwóch tych procesów jest wytworzenie dodatkowych produktów hydratacji, poza fazami klinkierowymi, które powstają podczas hydratacji. Produkty te doszczelniają mikrostrukturę zaczynu oraz betonu. Dodatkowa ilość fazy C-S-H o niskim stosunku C/S tworząca się po dłuższym okresie dojrzewania przerywa kapilary, co istotnie wpływa na współczynnik dyfuzji jonów stwardniałej matrycy cementowej.

Przyczynia się to do zwiększenia trwałości betonów z dodatkami w środowisku agresywnym chemicznie. Odporność korozyjna betonów ma duży związek z mikrostrukturą oraz składem fazowym. W przypadku mikrostruktury, największa

różnica wynika ze zmniejszenia porowatości kapilarnej na rzecz porowatości żelowej. Ogranicza to współczynnik dyfuzji agresywnych mediów nawet o kilka rzędów wielkości w stosunku do odpowiednich betonów opartych na cemencie portlandzkim.

4.2.2 Domieszki chemiczne

Domieszki redukujące ilość wody

Domieszki upłynniające, zastosowane w recepturze, umożliwiają obniżenie ilości wody zarobowej przy zachowaniu wymaganej urabialności mieszanki. Wpływa to korzystnie na zagęszczenie struktury betonu, zmniejszenie porowatości oraz podniesienie jego wodoszczelności. Efektem jest ograniczenie kapilarnego transportu wody i agresywnych jonów (m.in. chlorków i siarczanów), co znacząco poprawia trwałość oraz odporność betonu na korozję stali zbrojeniowej. Szczególnie istotne jest zmniejszenie powierzchniowej nasiąkliwości, co ogranicza gromadzenie się soli na powierzchni i wzmacnia mrozoodporność betonu.

Domieszki napowietrzające

W celu uzyskania odpowiedniej odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie zastosowano domieszki napowietrzające, pozwalające na tworzenie i stabilizację równomiernie rozproszonych mikroporów powietrznych. Taki układ porów skutecznie przerywa sieć porów kapilarnych, ograniczając absorpcję wody i jej penetrację w głąb betonu. Jednocześnie mikropory działają jak bufor w przypadku zamarzającej wody, zwiększając odporność na uszkodzenia mrozowe. Napowietrzenie korzystnie wpływa także na urabialność mieszanki betonowej.

4.2.3 Kruszywo

W doborze kruszywa kierowano się zarówno jego właściwościami mechanicznymi, jak i fizycznymi. Zastosowane kruszywo amfibolitowe charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie oraz niską porowatością, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszoną nasiąkliwość betonu i jego lepszą mrozoodporność. Kluczowe znaczenie miał również optymalny dobór uziarnienia, w tym proporcji kruszywa grubego i drobnego, co umożliwiło uzyskanie szczelnego i stabilnego stosu okrucowego, poprawiającego szczelność oraz jednorodność gotowej mieszanki betonowej.

5. Receptura betonu i jej uzasadnienie

5.1 Skład receptury i właściwości technologiczne mieszanki

Receptura betonu zaprojektowana na potrzeby realizacji terminalu DCT T3 została opracowana z uwzględnieniem wysokich wymagań w zakresie trwałości, szczelności i odporności na agresję środowiskową. Główne składniki oraz ich źródła przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Składniki mieszanki betonowej

Składniki	Surowce
Cement	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA - Ożarów
Kruszywo drobne	Piasek 0/2 mm
Kruszywo grube	Grys amfibolitowy 2/8 mm
Kruszywo grube	Grys amfibolitowy 8/16 mm
Plastyfikator	Baza chemiczna: lignosulfoniany
Superplastyfikator	Baza chemiczna: PCE
Napowietrzacz	Baza chemiczna: syntetyczne tensydy
Woda	Woda wodociągowa

Właściwości uzyskanej mieszanki betonowej oraz deklarowane parametry techniczne przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości betonu

Zasadnicze charakterystyki	Deklarowane właściwości
Klasa wytrzymałości na ściskanie	C35/45
Klasa konsystencji	S3
Stosunek wodno-cementowy	<0,40
Klasy ekspozycji	XC4 XS3 XD3 XF4 XA3 XM3
Klasy zawartości chlorków	Cl 0,10
D _{max} [mm]	16
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	40
Stopień mrozoodporności	F200
Kategoria odporności na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odładzających	FT2

Zgodnie z wymaganiami Dokumentacji Kontraktowej w przypadku stosowania cementu CEM III i dla globalnej klasy temperatury określonej (dla realizowanej Inwestycji jako XT1) cechującej się średniorocznym zakresem temperatur 5,0-15,0°C przyjmuje się wymagania dotyczące trwałości betonu w odniesieniu do korozji wywołanej chlorkami - zawartość w tabeli 3.

Tabela 3. Wymagania dotyczące trwałości betonu

Strefa	Rodzaj spoiwa wg 197-1	Min. Zawartość spoiwa [kg/m ³]	w/c	Klasa betonu	Średni współczynnik migracji chlorków [10 ⁻¹² m ² /s]

Atmosferyczna	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	6,0
Rozbryzgów/ pływów	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	4,0
Zanurzona/pogrążona	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	4,0

Dla ujednolicenia i zastosowania jednej receptury dla wszystkich elementów wykonanych z projektowanej mieszanki przyjęto wymaganie względem średnika współczynnika migracji jonów na poziomie $4,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.2 Uzasadnienie przyjętych proporcji i technologii

Wybór receptury został podporządkowany wymogowi uzyskania betonu o jak najniższej przepuszczalności dla agresywnych mediów, przede wszystkim jonów chlorkowych, a także zapewnienia wysokiej odporności na działanie mrozu i soli odladzających. Kluczowe decyzje projektowe obejmowały:

- zastosowanie cementu CEM III z dodatkiem żużla wielkopiecowego, wpływającego korzystnie na makroteksturę matrycy cementowej i zdolność wiązania chlorków,
- ograniczenie stosunku wodno-cementowego do wartości $\leq 0,40$, co znacząco zmniejsza porowatość kapilarną betonu,
- wykorzystanie domieszek chemicznych, w tym superplastyfikatora oraz plastyfikatora, umożliwiających uzyskanie wymaganej konsystencji przy obniżonej zawartości wody zarobowej,
- napowietrzenie mieszanki do poziomu 4,5–6,0% objętościowego powietrza, co pozwala na zapewnienie odporności na zamrażanie i odmrażanie, zgodnie z wymaganiami stopnia F200 i kategorii FT2,
- odpowiedni dobór kruszywa o wysokiej trwałości, niskiej nasiąkliwości i zrównoważonym składzie granulometrycznym, zapewniającym szczelność stosu okruszowego i jednorodność mieszanki.

Należy również podkreślić znaczenie odpowiedniej technologii w budowywania jak i pielęgnacji betonu. W warunkach narażenia na wodę morską wskazane jest, aby beton poddany był wstępnej pielęgnacji w warunkach kontrolowanych przez co najmniej 7 dni, zanim zostanie wystawiony na działanie środowiska agresywnego. Woda morska nie zapewnia odpowiedniej pielęgnacji, chyba, że beton raz zanurzony, zostanie w niej na stałe.

Nieprawidłowe w budowywanie jak i brak prawidłowej pielęgnacji, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania, może znacząco obniżyć trwałość materiału, niezależnie od jakości składników, dlatego należy zapobiegać m.in. niedogęszczeniom, pęknięciom skurczowym i niewłaściwym naprężeniom użytkowym.

6. Opis właściwości betonu

6.1 Przepuszczalność betonu

Jednym z najważniejszych parametrów ocenianych w kontekście trwałości betonu była jego przepuszczalność dla jonów chlorkowych. W celu jej oceny zastosowano metodę badawczą NT Build 492, która pozwala na określenie współczynnika migracji chlorków w warunkach przyspieszonego pola elektrycznego. Metoda ta dobrze odwzorowuje zdolność betonu do przeciwdziałania przenikaniu chlorków w realnym środowisku eksploatacji.

Wyniki badań wykazały, że współczynnik migracji uzyskany dla zaprojektowanej mieszanki betonowej mieścił się poniżej wartości granicznej określonej w kontrakcie, co jednoznacznie potwierdziło skuteczność zastosowanej technologii betonu w zakresie ochrony zbrojenia przed korozją chlorkową. Dodatkowo, niska przepuszczalność ograniczała także penetrację wody, siarczanów oraz innych agresywnych substancji, wzmacniając ogólną odporność chemiczną betonu.

6.2 Wytrzymałość na ściskanie

Projektowana wytrzymałość betonu na ściskanie wynosząca minimum C35/45 była nie tylko wymogiem konstrukcyjnym, ale również istotnym czynnikiem wpływającym na mikrostrukturę materiału. Wyższa wytrzymałość wiąże się ze zmniejszoną porowatością, gęstszą strukturą matrycy cementowej oraz lepszą szczelnością — co w sposób pośredni ogranicza szybkość przenikania jonów chlorkowych i wody do wnętrza betonu. Parametr ten pełnił, więc podwójną rolę: nośną i trwałościową.

6.3 Odporność na mróz i sole odladzające

Ze względu na lokalizację inwestycji w strefie rozbryzgu oraz ekspozycję na działanie soli odladzających, konieczne było spełnienie wysokich wymagań dotyczących odporności betonu na działanie mrozu. Mieszanka została zaprojektowana tak, aby osiągała mrozoodporność stopnia F200 oraz kategorii FT2 (działanie mrozu w obecności soli).

Osiągnięto to poprzez wprowadzenie domieszki napowietrzającej, dzięki której uzyskano stabilny układ mikroporów powietrznych w przedziale 4,5–6,0%. Taka struktura umożliwia kompensację ciśnienia powstającego przy zamarzaniu wody w porach kapilarnych, a także ogranicza wnikanie roztworów chlorkowych w zmiennych warunkach wilgotności i temperatury.

6.4 Trwałość ogólna betonu w środowisku morskim

Zintegrowane podejście do projektowania receptury — obejmujące odpowiedni cement, niskie W/C, domieszki chemiczne i napowietrzające, optymalny dobór kruszywa oraz kontrolowaną pielęgnację — pozwoliło uzyskać beton o wysokim stopniu trwałości. Materiał ten może być skutecznie stosowany w konstrukcjach eksploatowanych w klasach ekspozycji XS3 i XD3, gdzie dominującym zagrożeniem jest agresja chlorkowa i cykliczne zamrażanie/rozmarzanie.

7. Badania i ocena skuteczności receptury

7.1 Metody badawcze

W celu weryfikacji założeń technologicznych oraz trwałości zaprojektowanego betonu, przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych i terenowych zarówno na mieszance betonowej, jak i na próbkach betonu stwardniałego. Badania te miały na celu ocenę właściwości fizycznych, mechanicznych i trwałościowych, w tym odporności na agresję chlorkową i działanie mrozu.

Zakres badań obejmował*:

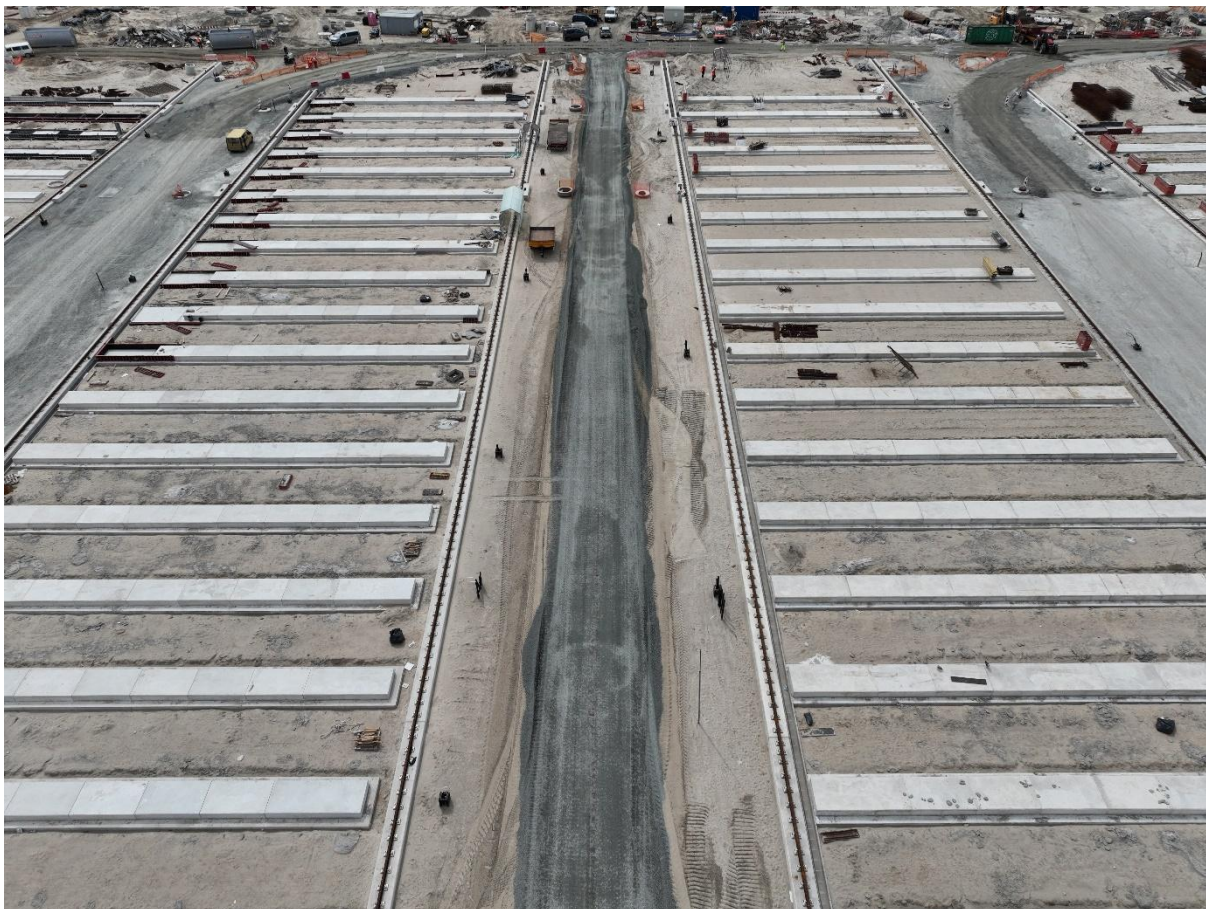
- Właściwości mieszanki betonowej:
 - konsystencja (metoda opadu stożka) badana wg PN-EN 12350-2,
 - zawartość powietrza (metoda ciśnieniowa) badana wg PN-EN 12350-7,
 - temperatura mieszanki i czas zachowania urabialności.
- Badania wytrzymałościowe i trwałościowe betonu stwardniałego:
 - Wytrzymałość na ściskanie – oznaczana zgodnie z PN-EN 12390-3,
 - Mrozoodporność – stopień F200, badana wg PN-B-06265,
 - Odporność na sole odladzające – kategoria FT2, badana wg PN-B-06265,
 - Migracja jonów chlorkowych – badana zgodnie z metodą NT Build 492,
 - Penetracja wody pod ciśnieniem – oznaczana zgodnie z PN-EN 12390-8,
 - Zawartość chlorków rozpuszczalnych w kwasach – określona według PN-EN 14629.

**wydania norm aktualne w dniu badania*

Regularność i zakres badań dostosowano do wymagań kontraktu oraz zmiennych warunków produkcji i transportu, co umożliwiło bieżącą kontrolę jakości oraz ocenę stabilności właściwości mieszanki w dłuższym horyzoncie czasowym.

7.2 Wyniki badań i ich interpretacja

Analizie poddano wyniki badań wykonanych na próbkach pobieranych z partii betonu wbudowywanego w okresie od jesieni 2023 roku do końca 2024 roku. W tym czasie na potrzeby realizacji terminalu DCT T3 w Gdańsku łącznie wbudowano około 19000 m³ mieszanki betonowej o recepturze omówionej w niniejszym artykule.



Zdjęcie 2. Widok elementów, które zostały m.in. wykonane z analizowanej receptury
Źródło: Budimex S.A.

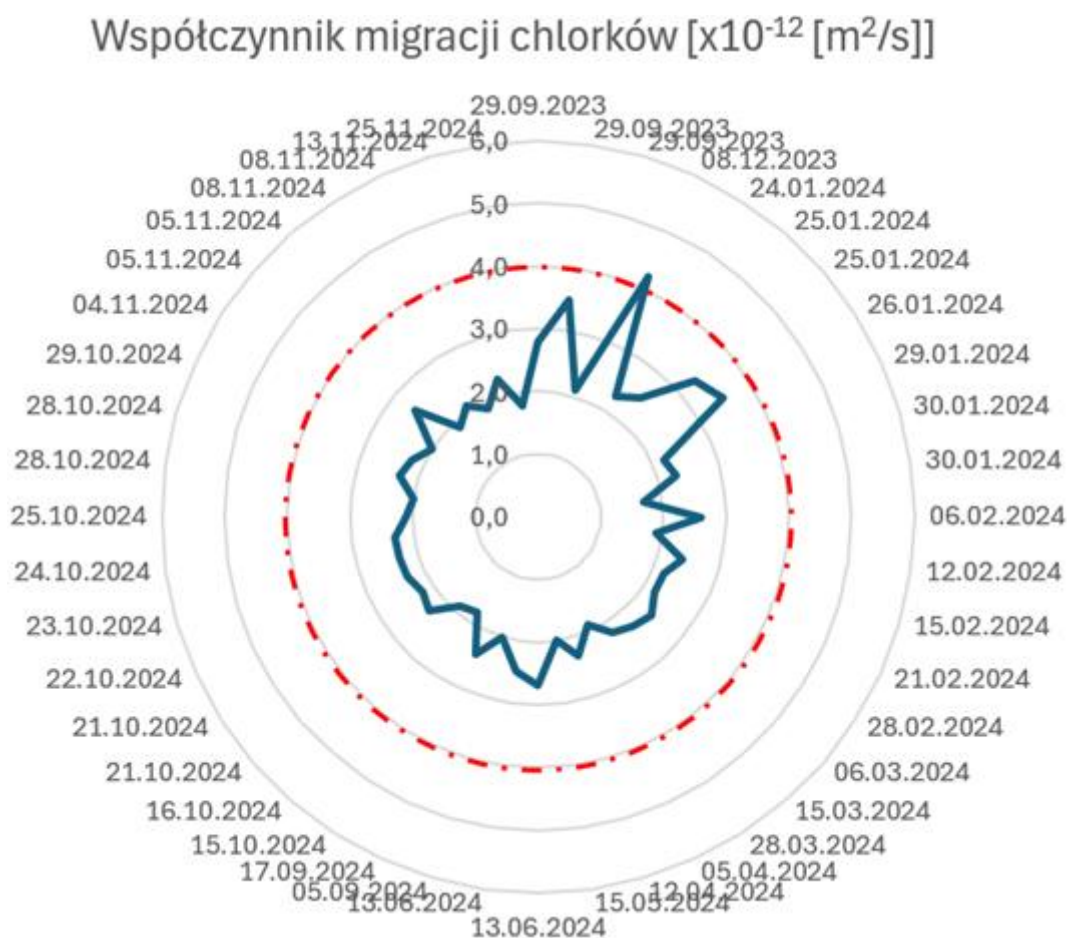
W celu oceny wpływu postępującej hydratacji cementu na szczelność betonu oraz wynikowy współczynnik migracji jonów chlorkowych, przeprowadzono analizę porównawczą trzech par próbek badanych po 28 oraz 90 dniach dojrzewania.

Choć metoda NT Build 492 nie uwzględnia czasu równoważnego (tj. czasu dojrzewania próbki jako zmiennej), uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na korzystny wpływ wydłużonego czasu hydratacji na ograniczenie przepuszczalności betonu. Zaobserwowano wyraźne uszczelnienie struktury matrycy cementowej w próbkach 90-dniowych, co przekłada się na niższy współczynnik migracji chlorków.

Zjawisko to związane jest z kontynuacją procesów hydratacyjnych i dojrzewaniem wtórnych produktów wiążących (głównie C-S-H), które wypełniają przestrzenie porowe i skutecznie ograniczają kapilarny transport agresywnych jonów. Potwierdza to znaczenie odpowiedniej pielęgnacji betonu oraz fakt, że jego właściwości trwałościowe rozwijają się w czasie, zwłaszcza w mieszankach z cementami z większą zawartością dodatków typu II, takimi jak CEM III/A.

Tabela 4. Porównanie współczynnika migracji jonów chlorkowych w zależności od czasu dojrzewania betonu

Para próbek	Czas dojrzewania próbki	Różnica względem próby 28-dniowej [%]	Uwagi / Obserwacje
1	90 dni	17 %	Wyraźna poprawa szczelności
2	90 dni	13 %	Wyraźna poprawa szczelności
3	90 dni	11 %	Wyraźna poprawa szczelności



Wykres 1. Zestawienie wyników badań współczynnika migracji chlorków.

Przeprowadzone badania laboratoryjne i terenowe pozwoliły na ocenę stabilności parametrów technologicznych oraz trwałościowych betonu. Poniżej przedstawiono zbiorcze wyniki wybranych badań:

Tabela 5. Zestawienie średnich wartości przeprowadzonych badań

Parametr badawczy	Jednostka	Wymaganie kontraktowe	Wynik średni [ilość wyników do analizy]	Uwagi
Wytrzymałość na ściskanie ($f_{cm,28}$)	MPa	$\geq 45,0$	54,4 [200]	PN-EN 12390-3
Współczynnik migracji chlorków	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$\leq 4,0$	2,3 [44]	Badanie przyspieszone wg NT Build 492
Penetracja wody pod ciśnieniem	mm	≤ 40	26 [6]	PN-EN 12390-8
Konsystencja mieszanki betonowej	klasa	S3	150 mm [200]	PN-EN 12350-2
Zawartość powietrza w mieszance betonowej	% obj.	4,5–6,0	5,2 [200]	PN-EN 12350-7
Odporność betonu na działanie mrozu	Stopień	F200	Ubytek masy = 0,16% Obniżenie wytrzymałości = 3,90% Próbki nie wykazywały spękań [5]	PN-B-06265
Odporność na działanie mrozu w obecności soli odladzających	Kategoria	FT2	Ubytek masy po 28 dniach = 0,14 Ubytek masy po 56 dniach = 0,26 [8]	PN-B-06265
Zwartość chlorków ogółem (rozpuszczalne w kwasach)	% m.c.	$\leq 0,10$	0,03 [31]	PN-EN 14629

Wyniki jednoznacznie potwierdzają wysoką jakość i powtarzalność wytwarzanej mieszanki betonowej, a także skuteczność przyjętej receptury w zakresie ograniczania migracji chlorków, zapewnienia trwałości w środowisku morskim oraz odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie. Szczególnie niska przepuszczalność i stabilność zawartości powietrza świadczą o poprawnym doborze składników, skutecznym napowietrzeniu oraz właściwym nadzorze nad produkcją i wbudowywaniem betonu.

8. Wnioski

8.1 Podsumowanie efektów projektowania receptury

Realizacja betonu konstrukcyjnego o ograniczonej migracji jonów chlorkowych na potrzeby inwestycji DCT T3 w Gdańsku wykazała, że odpowiednio zaprojektowana mieszanka może skutecznie zabezpieczyć elementy żelbetowe przed degradacją w warunkach morskich i zimowych. Kluczowe znaczenie miały następujące czynniki:

- Zastosowanie cementu CEM III/A z wysoką zawartością żużla wielkopiecowego, który przyczynił się do zmniejszenia porowatości matrycy cementowej i zdolności przenikania chlorków,
- Obniżony stosunek wodno-cementowy ($\leq 0,40$), wsparty odpowiednimi domieszkami upłynniającymi i redukującymi wodę zarobową,
- Zastosowanie domieszek napowietrzających, umożliwiających uzyskanie odporności mrozowej stopnia F200 oraz kategorii FT2,
- Optymalizacja składu kruszywa, prowadząca do uzyskania szczelnego stosu okruszowego oraz ograniczenia jamistości,
- Kontrola jakości wykonania i pielęgnacji, szczególnie na etapie dojrzewania betonu przed jego narażeniem na środowisko agresywne.

Efektem było uzyskanie materiału o podwyższonej trwałości, niskiej przepuszczalności i odporności na czynniki destrukcyjne typowe dla konstrukcji nabrzeżnych i portowych.

8.2 Rekomendacje dla przyszłych projektów

W oparciu o doświadczenia wyniesione z realizacji oraz przeprowadzone badania, sformułowano następujące zalecenia:

- Dobór cementu powinien uwzględniać nie tylko parametry wytrzymałościowe, ale również odporność na agresję chemiczną i zdolność do wiązania jonów chlorkowych.
- Pielęgnacja betonu powinna być prowadzona w sposób ciągły i kontrolowany, szczególnie w pierwszych 7 dniach, w celu zapewnienia właściwego przebiegu hydratacji i ograniczenia skurczu plastycznego.
- Jakość wykonawstwa (szalunki, zagęszczanie, warunki pogodowe) musi być ściśle monitorowana — zaleca się stosowanie systemów oceny szczelności powierzchni oraz właściwe oczyszczanie styków roboczych.
- Projektowanie mieszanki powinno uwzględniać specyfikę strefy ekspozycji (np. strefa rozbryzgu, zanurzenia, aerozole), co pozwala dobrać klasę ekspozycji i stopień zabezpieczenia.
- Pobór próbek do badań powinien być zaplanowany zgodnie z wcześniej ustalonym harmonogramem i częstotliwością badań oraz w przypadkach szczególnych.

Czy można zaradzić korozji, gdyby jednak wystąpiła?

Postęp korozji chlorkowej uległby ograniczeniu, gdyby:

- osuszono beton,
- ograniczono dostęp tlenu przez zastosowanie określonych barier.

Stwierdzono, że azotyny sodu i wapnia są efektywne jako inhibitory korozji w warunkach prób laboratoryjnych. Nie ma pewności czy inhibitory są efektywne na zawsze, czy tylko opóźniają potencjalną korozję. Wprowadzone inhibitory zabezpieczają całą zabetonowaną stal ale nie są substytutem betonu o niskiej przepuszczalności. Można rozważyć również zabezpieczanie stali przez pokrycia epoksydowe czy ochrony katodowej. W specjalnych przypadkach można stosować zbrojenie ze stali nierdzewnej lub pokryte taką stalą, jednak jest to rozwiązanie bardzo kosztowne. Opracowana została technika odsalania betonu, w której chlorki usuwane są przez przepuszczenie dużego prądu stałego między korodującą stalą zbrojenia (katodą) i zewnętrzną anodą, która pozostaje w kontakcie elektrolitycznym z betonem. Jony chlorkowe migrują wówczas w kierunku anody zewnętrznej, oddalając się od powierzchni zbrojenia. Metoda ta posiada też negatywne konsekwencje i może przyczynić się do reakcji alkalia-kruszywo, która normalnie by nie wystąpiła. Całkowite usunięcie chlorków raczej nie jest możliwe, a z czasem korozja może postępować od nowa.

Zastosowanie powyższych rozwiązań w sposób kompleksowy pozwala istotnie wydłużyć okres użytkowania konstrukcji i ograniczyć koszty związane z jej eksploatacją oraz utrzymaniem.

Literatura

- [1] PN-EN 206+A2:2021-08 – Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] PN-EN 12390-3:2019-07 – Badanie betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek.
- [3] PN-EN 12390-8:2019-08 – Badanie betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [4] PN-B-06265:2022-08 – Beton – Wymagania dotyczące mrozoodporności.
- [5] NT Build 492:1999 – Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.
- [6] PN-EN 14629:2008 – Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie przenikania wody przy ciśnieniu.
- [7] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

-
- [8] Gołaszewski, J. (2013). *Domieszki do betonu – mechanizmy działania, wpływ na właściwości betonu, zalecenia technologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [9] Deja, J. (red.). (2012). *Beton – technologie i metody badań*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

dr inż. Agnieszka Michalik

mgr inż. Piotr Kupisz

inż. Łukasz Zacharski

Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie

mgr inż. Edyta Gosk

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

Mrozoodporność betonu lekkiego zbrojonego włóknem stalowym

Streszczenie

Betony lekkie kruszywowe, ze względu na możliwość osiągnięcia wysokich wytrzymałości przy niskim ciężarze (niskiej gęstości), mogą być szeroko stosowane zarówno w prefabrykacji jak i w budownictwie monolitycznym, gdzie znaczenie ma szybkie i ekonomiczne budownictwo. Analiza literatury wskazała, że znaczącym ograniczeniem jego zastosowania jest niska wytrzymałość na rozciąganie (kruchość) a także niska mrozoodporność, co znacznie ogranicza jego zastosowanie w konstrukcjach zewnętrznych. Przy wykonywaniu betonu na kruszywie lekkim istotne jest wstępne nasączenie kruszywa oraz odpowiednie wymieszanie składników, z uwagi na wysoką porowatość i nasiąkliwość kruszyw lekkich. W pracy przedstawiono metodę wykonywania betonu na kruszywie lekkim z dodatkiem rozproszonych włókien stalowych. Przedstawiono również wyniki badań mrozoodporności oraz właściwości betonu związane z rozciąganiem i zbrojeniem betonu lekkiego tj. wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu do betonu lekkiego niezbrojonego, oraz dystrybucja włókien metodą tomografii komputerowej. W niniejszej pracy zastosowano wysokowytrzymałe kruszywo lekkie w dwóch frakcjach, powstałe ze spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni (m.in. popioły lotne). Jako zbrojenie zastosowano włókna stalowe haczykowate. Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe prawidłowo rozprawdzają się w betonie lekkim stanowiąc efektywne zbrojenie dla kruchej matrycy cementowej. Natomiast prawidłowe napowietrzenie zaprawy cementowej a następnie betonu na kruszywie lekkim jest istotne dla zapewnienia wysokiej mrozoodporności do zastosowania na zewnątrz. Praca przyczyni się do pozyskania nowej wiedzy w zakresie betonów lekkich i możliwościach ich zastosowania w konstrukcjach zewnętrznych.

Abstract

Lightweight aggregate concretes (LWAC), due to the possibility of achieving high strengths at low weight (low density), can be widely used both in prefabrication and in

monolithic construction, where fast and economical construction is important. Analysis of the literature has shown that a significant limitation of its use is low tensile strength (brittleness) and low frost resistance, which significantly limits its use in external structures. When making concrete on lightweight aggregate, it is important to pre-soak the aggregate and properly mix the components, due to the high porosity and water absorption of lightweight aggregates. The paper presents a method for making concrete on lightweight aggregate with the addition of dispersed steel fibers. The results of the frost resistance tests and concrete properties related to the tension and reinforcement of lightweight concrete are also presented, i.e. tensile strength in bending, tensile strength in splitting, residual tensile strength, compared to unreinforced lightweight concrete, and fibers distribution using the computed tomography method. In this work, high-strength lightweight aggregate in two fractions, resulting from the sintering of waste materials from power plants and combined heat and power plants (including fly ash), was used. Hooked steel fibers were used as reinforcement. The test results indicate that steel fibers distribute properly in lightweight concrete, constituting an effective reinforcement for the brittle cement matrix. On the other hand, proper aeration of the cement mortar and then concrete on lightweight aggregate is important for ensuring high frost resistance for outdoor use. The work will contribute to the acquisition of new knowledge in the field of lightweight concrete and the possibilities of their use in outdoor structures.

1. Wprowadzenie

Beton zwykły jest najczęściej wykorzystywanym materiałem konstrukcyjnym w budownictwie, stąd betony lekkie na kruszywach lekkich często są postrzegane jako materiał charakteryzujący się głównie niską gęstością i ograniczoną przydatnością konstrukcyjną, co ograniczało ich zastosowanie jedynie jako izolacja termiczna i akustyczna. Jednak wraz z rozwojem wysokowytrzymałych kruszyw lekkich, cementów i domieszek chemicznych, współczesne betony lekkie kruszywowe (ang. LWAC - Lightweight Aggregate Concrete) z powodzeniem mogą być stosowane jako wartościowy materiał konstrukcyjny. Ze względu na możliwość osiągnięcia wysokich wytrzymałości (nawet > 60 MPa) przy niskim ciężarze (niskiej gęstości), betony lekkie kruszywowe mogą być szeroko stosowane zarówno w prefabrykacji jak i w budownictwie monolitycznym [1-4], gdzie współczesna infrastruktura stoi w obliczu zwiększonego zapotrzebowania na szybkie i ekonomiczne budownictwo. Redukcja ciężaru własnego i wysoki stosunek wytrzymałości do masy to główne przewagi betonu LWAC nad betonem zwykłym, np. przy budowie wiaduktów, mostów o dużej rozpiętości, pływających platformach, wieżowcach, gdzie ciężar własny betonu zwykłego stanowi znaczną część obciążenia obliczeniowego [2]. Zmniejszając ciężar konstrukcji, lekki beton zmniejsza również obciążenia projektowe np. fundamentów i stropów, co może przyczynić się do obniżenia kosztów. Betony lekkie LWAC znajdują również zastosowanie w produkcji takich elementów jak: pustaki kominowe, pustaki wentylacyjne, pustaki ścienne, gazony, palisady, bloczki fundamentowe. Betony LWAC sprawdzą się również jako izolacja termiczna w ścianach piwnicznych i fundamentowych, a także jako warstwa podłogi betonowej (pełnią rolę podłoża betonowego i izolacji termicznej jednocześnie).

Analiza literatury wskazała, że ograniczeniem stosowania betonu na kruszywie lekkim w konstrukcjach jest jego kruchość, charakteryzująca się niską wytrzymałością na rozciąganie co ogranicza jego zastosowanie konstrukcyjne. Dodatkowo zapewnienie mrozoodporności betonu LWAC rozszerzy zakres jego stosowania na zewnątrz. Powyższe wady związane z kruchością można wyeliminować wprowadzając zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych, które stanowią będą zbrojenie rozproszone zwiększające energię pęknięcia betonu LWAC. Natomiast odporność na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie betonu lekkiego można podwyższyć poprzez wprowadzenie do receptury domieszek napowietrzających, gdyż stosowane kruszywo lekkie spiekane wykazuje dobrą mrozoodporność. Modyfikacja betonu na kruszywie lekkim spiekany w mrozoodporny fibrobeton na kruszywie lekkim przyczyni się do wzrostu jego zastosowania w budownictwie konstrukcyjnym oraz w zastosowaniach na zewnątrz.

W niniejszej pracy zastosowane będzie wysokowytrzymałe kruszywo lekkie powstałe ze spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni (m.in. popioły lotne) [5]. Kruszywo to pozwala wykonać betony lekkie wysokiej wytrzymałości (> 60 MPa). Stosowanie kruszyw lekkich powstałych z materiałów odpadowych jest zgodne z polityką zrównoważonego budownictwa, która wskazuje na oszczędność surowców naturalnych i jak największe zastosowanie surowców z recyklingu [11, 12]. Badania nad zastosowaniem kruszywa lekkiego w betonach konstrukcyjnych z powodzeniem prowadzone są m.in. na Politechnice Łódzkiej [6, 7], Politechnice Krakowskiej [4, 8] oraz w ostatnich latach w również w Instytucie Techniki Budowlanej [9, 10].

Praca przyczyni się do poszerzenia wiedzy w zakresie technologii fibrobetonów na kruszywie lekkim. [1, 3, 13, 14]. Dotychczas prowadzone badania betonu na kruszywie lekkim spiekany wykazały, że znaczącym ograniczeniem jego zastosowania jest niska wytrzymałość na rozciąganie (kruchość) a także niska mrozoodporność, co znacznie ogranicza jego zastosowanie w konstrukcjach zewnętrznych. Badania fibrobetonów z włóknami wskazują, że dodatek włókien stalowych w odpowiedniej ilości przyczynia się do wzrostu cech wytrzymałościowych oraz mechanicznych, jednak istotna jest również dobrze zaprojektowana i mrozoodporna matryca cementowa, co stanowi problem naukowy w niniejszej pracy. Z uwagi na charakterystykę ziarn kruszywa lekkie odznaczają się wysoką porowatością i nasiąkliwością co może przyczynić się do problemów technologicznych przy wykonywaniu mieszanek betonowych i odpowiednim ich napowietrzeniu. Kluczowe jest zawartość wody w recepturze betonu z kruszywem lekkim taka, aby mogły efektywnie zajść reakcje hydratacji cementu, odpowiednie napowietrzenie zaczynu cementowego oraz zapewnienie otuliny kruszywa i włókien stalowych w recepturze fibrobetonu lekkiego. Również istotnym czynnikiem jest wcześniejsze nasączenie kruszywa lekkiego. Wszystkie te aspekty zostały przedstawione w niniejszym artykule.

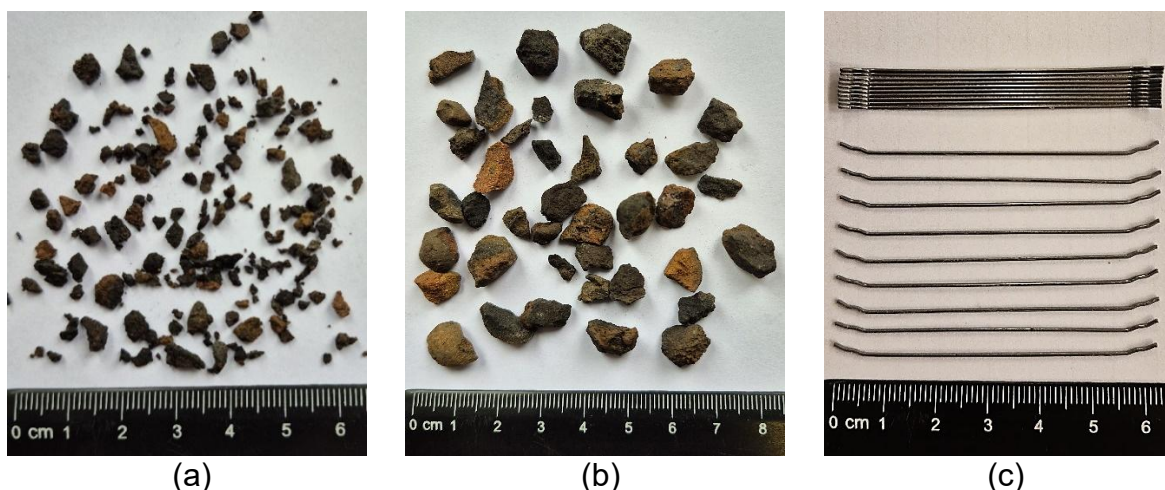
2. Materiały

2.1 Kruszywo lekkie, włókna stalowe

W niniejszej pracy do betonu lekkiego kruszywowego zastosowano ekologiczne, sztuczne kruszywo lekkie w dwóch frakcjach: 1-4 i 4-9 mm, powstałe w

wyniki spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni takich jak popioły lotne. Sztuczne kruszywo lekkie produkowane jest w technologii bezodpadowej, proces spiekania jest autotermiczny – paliwo zewnętrzne potrzebuje jest jedynie do zainicjowania spiekania. Odzyskiwane jest ciepło procesowe (spaliny o temperaturze do 1000 °C), które częściowo wykorzystywane jest do celów produkcyjnych. Otrzymywane kruszywo lekkie jest produktem ekologicznym, którego cenne właściwości, takie jak trwałość, wytrzymałość i niska waga, determinują dalsze wykorzystanie w budownictwie jako kruszywo do betonów lekkich, w lekkich prefabrykowanych elementach budowlanych, w warstwach termoizolacyjnych, w drogownictwie, w geotechnice i ogrodnictwie (warstwy drenażowe).

Na fotografii 1 a i b przedstawiono wygląd kruszywa lekkiego o dwóch frakcjach. A w tabeli 1 i 2 przedstawiono właściwości kruszywa lekkiego zastosowanego w niniejszej pracy.



Fotografia 1 Kruszywo lekkie fibrobetonie lekkim kruszywowym, (a) kruszywo lekkie 1-4 mm, (b) kruszywo lekkie 4-9 mm, (c) włókna stalowe.

Tabela 1. Właściwości kruszywa lekkiego spiekanego frakcji 1-4 mm

Właściwości	frakcja 1-4 mm
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	650
Zawartość chlorków [%]	≤ 0,05
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie [%]	≤ 1,0
Zawartość siarki całkowitej [%]	≤ 1,0
Promieniowanie radioaktywne	$f_1 \leq 1,2$
	$f_1 \leq 240 \text{ Bq/kg}$
Uwalniane metale ciężkie	poniżej najwyższej dopuszczalnej wartości

Tabela 2. Właściwości kruszywa lekkiego spiekanego frakcji 4-9 mm

Właściwości	frakcja 4-9 mm
Gęstość ziarn [kg/m ³]	1300
Nasiąkliwość po 24h [%]	20
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	700
Zawartość pyłów [%]	1,9
Odporność na miażdżenie [MPa]	5,0

Zastosowano zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych o średnicy 0,75 mm, haczykowatym kształcie, długości 60 mm i smukłości (stosunek długości do średnicy) 80. Włókna charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie 2 200 MPa i modułem Younga 210 GPa.

2.2 Receptura betonu lekkiego

W tabeli 3 przedstawiono zaprojektowaną recepturę betonu lekkiego z włóknami stalowymi. Z założenia miał to być beton do zastosowań na zewnątrz (mrozoodporny) oraz zbrojony włóknami stalowymi, w celu poprawy odporności na kruche pękanie. Włókna stalowe o kształcie haczykowatym i długości 50-60 cm są najczęściej stosowane do zbrojenia betonu.

Tabela 3. Receptura betonu lekkiego z włóknami stalowymi

Składnik	Ilość na 1 m ³ [kg]
Cement CEM I 42,5 N	420
Kruszywo lekkie 1-4 mm	200
Kruszywo lekkie 4-9 mm	610
Piasek 0-2	400
Woda *)	115
Domieszka plastifikator	1% mc
Domieszka napowietrzająca	0,25% mc
Włókna stalowe	20

*) woda dodatkowa do wstępnego nasączenia kruszywa 15% masy kruszywa lekkiego (121,5 kg/m³) opisana w punkcie 2.3

W niniejszej pracy zastosowano następujące oznaczenia betonów:

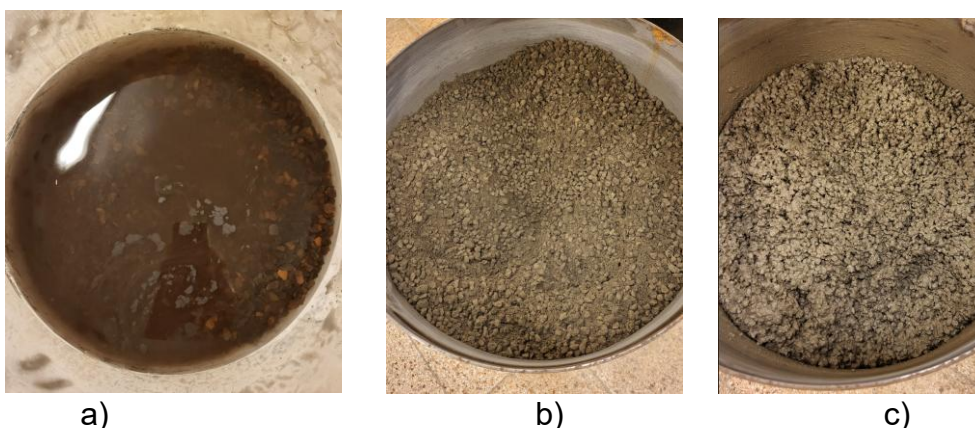
- **LK** – beton lekki kontrolny, zgodny z recepturą w Tabeli 1, bez włókien;
- **LW** – beton lekki z włóknami, zgodny z recepturą w Tabeli 1.

2.3 Wykonanie fibrobetonu na kruszywie lekkim

W projektowaniu i wykonaniu betonów na kruszywie lekkim najistotniejsza jest porowatość kruszywa lekkiego i jego zdolność do absorpcji znacznej ilości wody. Nasiąkliwość zastosowanego kruszywa lekkiego 4/9 wynosi około 20%, dlatego istotne

jest uwzględnianie wody wchłoniętej przez kruszywo w ilości całkowitej wody w mieszance betonowej. Analiza literatury oraz własne doświadczenia laboratoryjne wykazały, że wprowadzenie kruszywa lekkiego suchego do mieszanki wraz z innymi składnikami (piasek, cement, woda, domieszki) powoduje niestabilność parametrów mieszanki i stwardniałego betonu przez postępującą absorpcję wody i domieszek przez ziarna kruszywa lekkiego. Konieczne jest zatem wstępne nasączenie kruszywa lekkiego przed wprowadzeniem go do mieszanki. W pierwszych próbach kruszywo lekkie nasączano w plastikowym pojemniku, zalewając go całkowicie wodą (fotografia 2a), odczekano ok 20-30 minut i odlano wodę a następnie odczekano ok 30 min w celu powierzchniowego wyschnięciem. Kolejno wprowadzono kruszywo do mieszanki betonowej wraz z innymi składnikami betonu. Jednak taka procedura jest czasochłonna i sprawdza się dla betonów wykonywanych w skali laboratoryjnej, gdzie objętości betonów są niewielkie. Dlatego opracowano metodę wstępnego zwilżania kruszywa lekkiego bezpośrednio w mieszarce betonowej. Próby laboratoryjne pozwoliły ustalić, że do suchego kruszywa lekkiego należy dodać wodę dodatkową w ilości 15% masy całkowitej kruszywa lekkiego (drobnego i grubego) i przemieszać w mieszarce przez kilka minut (fotografia 2b). Taka ilość pozwoli na zaabsorbowanie odpowiedniej ilości wody przez kruszywo lekkie bez pozostawiania wodnej otoczki na ziarnach kruszywa. Na fotografii 2 przedstawiono widok kruszywa nasączanego przez zalewanie wodą (fotografia 2a) oraz kruszywa po dodaniu 15% wody dodatkowej (fotografia 2b).

Kolejnym czynnikiem jest odpowiednie napowietrzenie betonu lekkiego w celu zapewnienia mrozoodpornej matrycy cementowej. Zastosowane kruszywo lekkie wykazuje pełną mrozoodporność jednak jego porowata struktura może zaburzyć proces napowietrzania zaczynu cementowego poprzez absorpcję wody z domieszką napowietrzającą. Dlatego w niniejszej pracy zastosowano metodę wcześniejszego napowietrzania zaprawy cementowej (cement, piasek naturalny, woda, domieszka napowietrzająca, plastyfikator), a następnie dodanie do nasączonego kruszywa. Na fotografii 2c przedstawiono widok mieszanki betonowej.



Fotografia 2. Nasączenie kruszywa przed wykonaniem betonu, a) zalewanie wodą, b) dodanie odpowiedniej ilości wody do kruszywa, c) mieszanka betonowa z kruszywem lekkim.

Włókna stalowe dodano do mieszanki betonowej i kontynuowano mieszanie przez około 4 minuty w celu jednorodnego rozmieszczenia włókien.

3. Metody badań

Wykonano następujące badania mieszanek betonowych i lekkich betonów stwardniałych z włóknami:

- konsystencja mieszanki betonowej metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2:2019 [15]
- zawartość powietrza w mieszance metoda ciśnieniową wg PN-EN 12350-7:2019 [16]
- gęstość mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6:2019 [17]
- odporności na zamrażanie-rozmrażanie wg PN-B-06250:1988 [18].
- nasiąkliwość betonu stwardniałego wg PN-B-06250:1988 [18]
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-3 [19]
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach wg PN-EN 12390-5:2019 [20]
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach PN-EN 12390-6:2024 [21]
- moduł sprężystości betonu wg PN-EN 12390-13:2012 [22]
- wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu wg PN-EN 14651+A1:2007 [23]
- analiza dystrybucji włókien metodą tomografii komputerowej.

4. Wyniki badań

4.1 Właściwości mieszanki betonowej

W tabeli 4 przedstawiono właściwości mieszanki betonowej LK (beton lekki kontrolny) oraz LW (beton lekki z włóknami). Badano konsystencję metodą opadu stożka PN-EN 12350-2 [15], zawartość powietrza metodą ciśnieniową PN-EN 12350-7 [16] oraz gęstość mieszanki PN-EN 12350-6 [17].

Tabela 4. Wyniki badań mieszanek betonowych z kruszywem lekkim

Oznaczenie betonu	Konsystencja metodą opadu stożka [mm]	Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość mieszanki betonowej [kg/m ³]
Beton LK (kontrolny)	70	6,5	1850
Beton LW (z włóknami)	60	7,0	1875

Z Tabeli 2 wynika, że dodatek 20 kg/m³ włókien stalowych spowodował niewielki spadek urabialności (mniejszy opad stożka) i zwiększenie gęstości mieszanki. Na fotografii 3 przedstawiono widok badania konsystencji mieszanki kontrolnej LK metodą opadu stożka. Mieszanka jest jednorodna, zwarta, nie wystąpiło zjawisko segregacji ani nadmiernego bleedingu.



Fotografia 3. Badanie konsystencji betonu lekkiego metodą opadu stożka

2.4.2 Właściwości stwardniałego betonu lekkiego

Mrozoodporność betonów lekkich z włóknami stalowymi

Badanie mrozoodporności zostało wykonane w celu analizy możliwości zastosowania fibrobetonu na kruszywie lekkim na zewnątrz. Mrozoodporność betonów osiąga się poprzez napowietrzenie mieszanki betonowej przez co w zaczynie tworzą się pory kuliste zapewniające ochronę przed zamarzaniem wody i zwiększaniem swojej objętości w betonie. Dla betonów na kruszywie lekkim, porowatym napowietrzenie mieszanki jest ryzykowne, gdyż może dodatkowo osłabić parametry wytrzymałościowe betonu. Dla betonu LK i LW zgodnego z recepturą w tabeli 1, wykonano serię próbek sześciennych o boku 100 mm i wykonano badanie odporności na zamrażanie-rozmrażanie wg PN-B-06250:1988 [18]. Po każdych 25 cyklach sprawdzano wygląd próbek pod kątem obecności złuszczeń i spękań, odprysków. Badanie przerwano po 200 cyklach zamrażania-rozmrażania, która wskazuje na pełną mrozoodporność betonów LK i LW. Dodatkowo przeprowadzono badanie mrozoodporności również na zaprawie (cement, woda, piasek) bez kruszywa lekkiego, aby sprawdzić mrozoodporność samej zaprawy. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badania mrozoodporności po 200 cyklach zamrażania - rozmrażania

Rodzaj betonu	Spadek wytrzymałości na ściskanie F200	Zmiana masy po badaniu F200
	[%]	[g]
LK	8,2	0,8
LW	1,3	1,4
zaprawa	6,2	-0,1

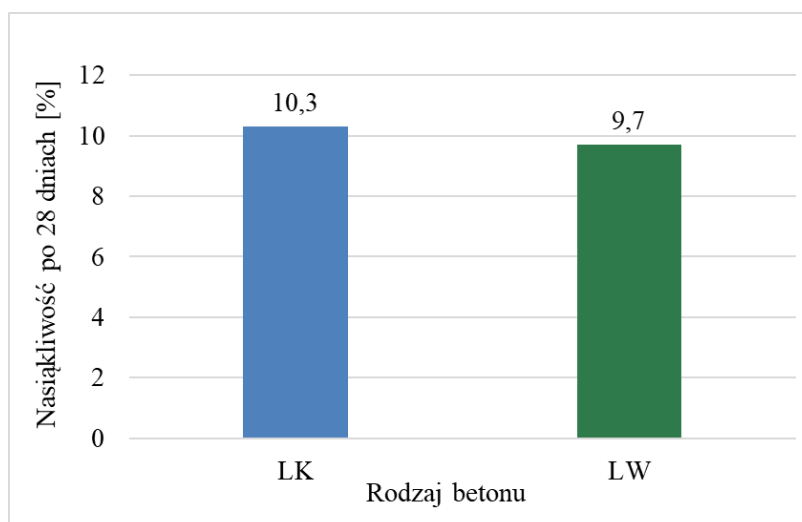
Aby beton spełniał dany stopień mrozoodporności postawione są następujące kryteria [18]:

- próbki nie wykazują pęknięć,
- masa ubytków betonu w postaci złuszczeń i odprysków nie przekracza 5% masy próbek nie zamrażanych,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek nie zamrażanych nie jest większe niż 20%.

Wyniki badań wskazują, że zarówno beton lekki LK jak i z dodatkiem włókien stalowych LW oraz zaprawa spełniają stopień mrozoodporności F200 i mogą być stosowane na zewnątrz.

Nasiąkliwość

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań nasiąkliwości po 28 dniach betonów LK i LW badanej wg PN-B-06250:1988 Beton zwykły [18].



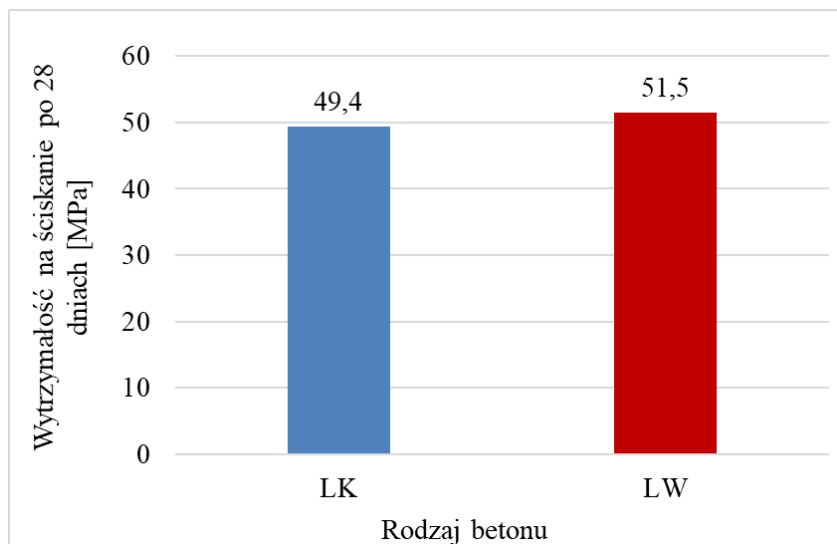
Rysunek 1. Wyniki badania nasiąkliwość betonu LK i LW

Nasiąkliwość betonów LK i LW jest na podobnym poziomie. Wysoka nasiąkliwość spowodowana jest obecnością porowatego kruszywa lekkiego i napowietrzenia

matrycy cementowej w celu zapewnienia mrozoodporności betonu lekkiego i może wpłynąć na późniejsze cechy wytrzymałościowe betonu lekkiego.

Wytrzymałość na ściskanie

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach.

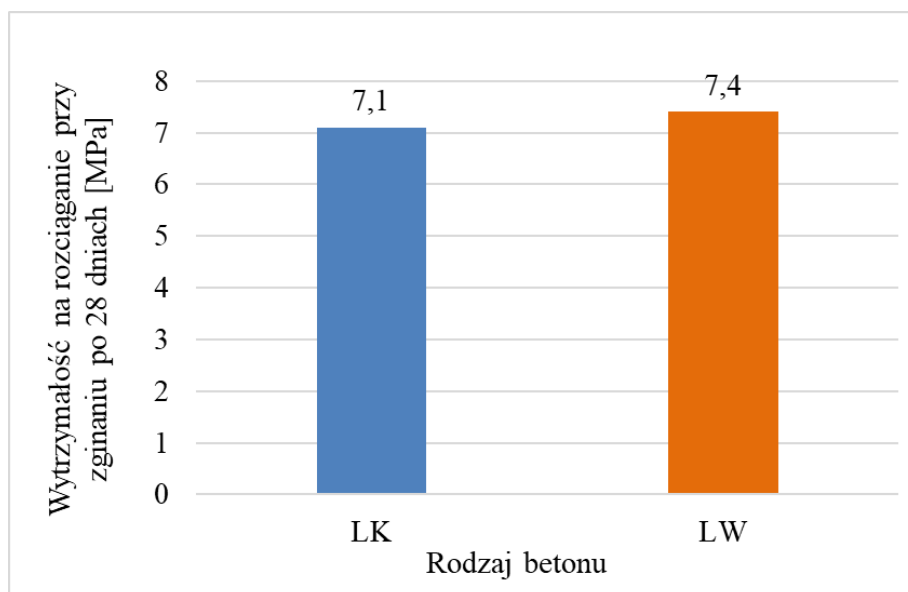


Rysunek 2. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu LK i LW

Wyniki badań analizowanych betonów lekkich wskazują, że dodatek 20 kg/m² włókien stalowych do betonu lekkiego podnosi wytrzymałość na ściskanie o ok. 5%. Zarówno beton LK jak i LW spełniają wymagania dla klasy wytrzymałości na ściskanie LC40/44 wg 206+A2:2021-08 [20].

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach.

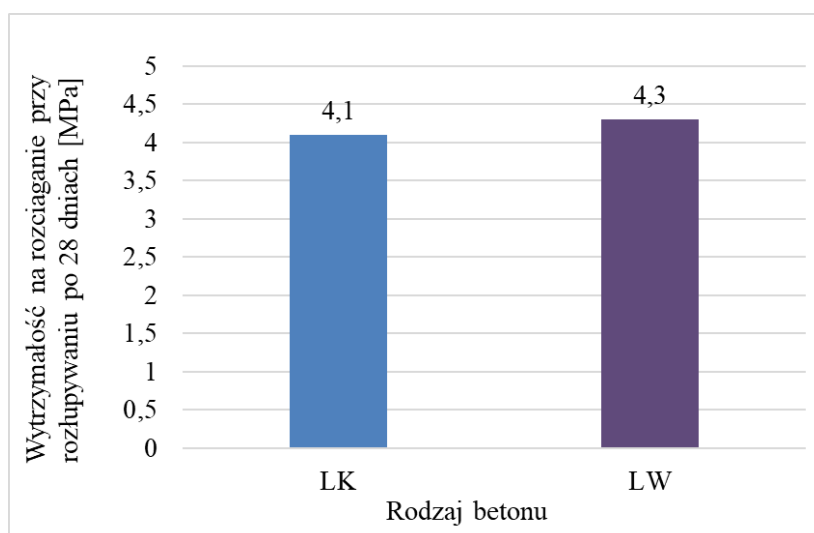


Rysunek 3. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie betonu LK i LW

Wyniki badania wytrzymałości na zginanie badanych betonów LK i LW są porównywalne, beton LW osiągnął ok. 4. % wyższą wytrzymałość na zginanie niż beton LK, co daje perspektywy w zastosowaniu betonu LW w betonach konstrukcyjnych.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozłupywanie przeprowadzony wg normy PN-EN 12390-6:2024 [22], na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań.



Rysunek 4. Wyniki badania wytrzymałości na rozłupywanie betonu LK i LW

Wyniki badań wskazują, że analizowany beton LW ma o ok. 5% wyższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu niż beton LK.

Moduł sprężystości betonu

Moduł sprężystości betonu wykonano po 90 dniach wg PN-EN 12390-13:2021 [23], na fotografii 4 przedstawiono próbki przygotowane do badania, a na fotografii 5 badanie modułu sprężystości. W tabeli 6 przedstawiono wyniki badania modułu sprężystości przy ściskaniu.



Fotografia 4. Próbki na badanie modułu sprężystości



Fotografia 5. Badanie modułu sprężystości

Tabela 6. Wyniki badań modułu sprężystości przy ściskaniu

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie próbek towarzyszących [MPa]	Moduł sprężystości przy ściskaniu [GPa]
Beton LK	51,4	26,8
Beton LW	53,0	26,2

Wyniki badania modułu sprężystości betonów LK i LW są zbliżone. Są to dosyć wysokie wartości jak dla betonu lekkiego, moduł betonu zwykłego wynosi w granicach 20 GPa.

Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu

Wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu wykonano po 28 dniach wg normy PN-EN 14651+A1:2007 [24] tylko dla betonu z włóknami LW. Na fotografii 6 przedstawiono betonową belkę o wymiarach 150x150x550 mm z nacięciem które stanowi miejsce propagacji pęknięcia próbki.

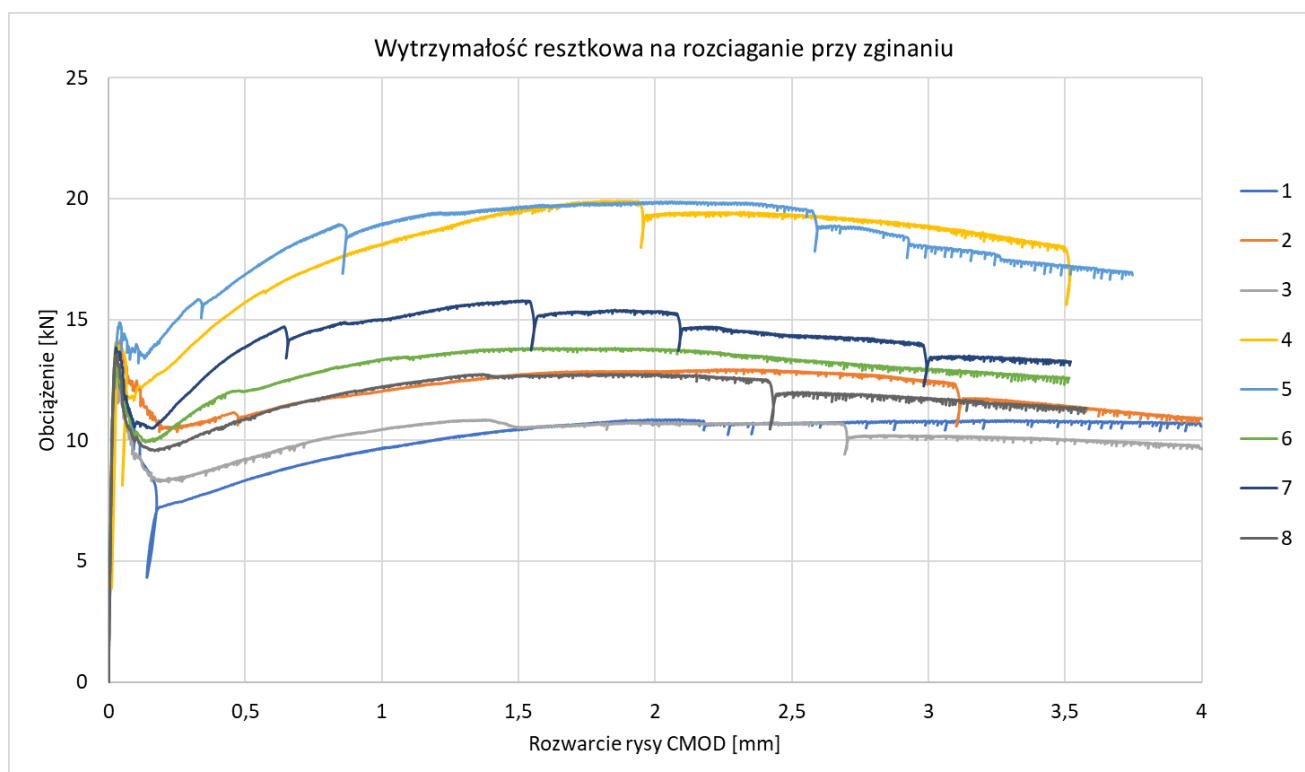


Fotografia 6. Próbka z betonu lekkiego po badaniu wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu. Strzałką zaznaczono nacięcie i pęknięcie próbki.

W tabeli 7 i na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu.

Tabela 7. Wyniki badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu

L.p.	Oznaczenie próbki	Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu [MPa]				
		Przy granicy proporcjonalności LOP $f_{f/ct, L}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
			CMOD ₁ = 0,5 mm	CMOD ₂ = 1,5 mm	CMOD ₃ = 2,5 mm	CMOD ₄ = 3,5 mm
1	LW_1	4,10	2,64	3,31	3,38	3,44
2	LW_2	4,49	3,48	4,02	4,05	3,64
3	LW_3	3,89	2,92	3,39	3,39	3,19
4	LW_4	4,46	4,97	6,16	6,13	5,70
5	LW_5	4,73	5,32	6,21	6,20	5,48
6	LW_6	4,17	3,85	4,38	4,28	4,00
7	LW_7	4,42	4,41	5,03	4,58	4,21
8	LW_8	4,32	3,44	4,01	3,78	3,59
wartość średnia		4,32	3,88	4,56	4,47	4,16



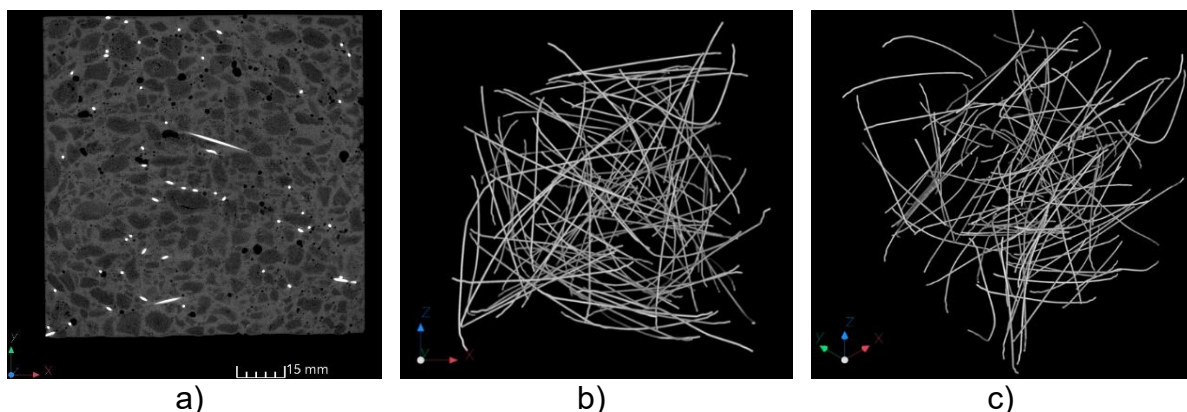
Rysunek 5. Wykresy obciążenie rozwarzenie rysy CMOD dla betonu LW

Badanie wytrzymałości resztkowej jest główną miarą efektywności zbrojenia betonu lekkiego. Po pęknięciu matrycy cementowej dalsze obciążenia przenoszone są przez włókna. W przypadku betonu lekkiego zbrojonego włóknami stalowymi wszystkie próbki z włóknami przeniosły obciążenia. Wyniki badań wskazują na wysokie

wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu, potwierdzając efektywność (skuteczność) zbrojenia betonu lekkiego przez włókna stalowe.

Analiza dystrybucji włókien metodą tomografii komputerowej

Analizę rozmieszczenia włókien w betonie przeprowadzono na betonowych próbkach sześciennych z betonu lekkiego o boku $100 \times 100 \times 100$ mm. Próbki zawierały włókna w ilości 20 kg/m^3 . Badanie wykonano w celu obserwacji dystrybucji włókien w stwardniałym betonie lekkim, oraz sprawdzenia czy włókna rozkładają się równomiernie w mieszance betonowej podczas mieszania. Badanie wykonano na tomografii komputerowej General Electric (GE V|TOME|X M300) na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Na fotografii 7 przedstawiono wyniki badań.



Fotografia 7. Obrazy dystrybucji włókien wygenerowane metodą tomografii komputerowej

Obrazy wygenerowane metodą tomografii komputerowej wskazują, że włókna stalowe w betonie rozkładają się równomiernie. Nie tworzą się skupiska włókien tzw. jeże. Dzięki równomiernemu rozmieszczeniu skuteczność zbrojenia włókien jest wysoka.

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano beton lekki zbrojony włóknami stalowymi, do zastosowań na zewnątrz. Istotne w procesie wykonywania betonu na kruszywach lekkich jest odpowiednie wcześniejsze nasączenie kruszywa w celu wchłonięcia pewnej ilości wody a bez pozostawiania warstwy wody na powierzchni ziaren. Wypróbowano metodę zalewania kruszywa lekkiego wodą a następnie zlewanie wody i osuszanie kruszywa, lecz metoda ta jest czasochłonna i nie praktyczna. Właściwą metodą wykonywania betonów na kruszywie lekkim jest wcześniejszy dodatek do samego kruszywa dodatkowej wody w ilości około 15% masy całkowitej kruszywa lekkiego. Drugą kwestią w wykonywaniu fibrobetonów lekkich jest zapewnienie mrozo odpornej matrycy cementowej. W pracy napowietrzona została zaprawa cementowa a następnie dodana do nasączonego kruszywa lekkiego. Na końcu dodano włókna stalowe, które rozmieściły się jednorodnie w mieszance.

Wyniki badania mrozoodporności, zarówno samej zaprawy jak i betonu kontrolnego bez włókien LK oraz betonu z włóknami LW potwierdzają, że możliwe jest osiągnięcie mrozoodpornej matrycy cementowej dla betonu lekkiego z włóknami. Przy znacznej porowatości kruszywa lekkiego oraz dodatkowym napowietrzeniu zaprawy cementowej uzyskano mrozoodporny i wytrzymały lekki fibrobeton. Nieco wyższe właściwości wytrzymałościowe betonu LW spowodowane są obecnością włókien, lecz efekt ten nie jest zbyt duży z uwagi na napowietrzoną matrycę i porowate kruszywo lekkie. Kluczowym badaniem skuteczności zbrojenia betonu lekkiego jest badanie wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu, w którym beton osiągnął wysokie wytrzymałości resztkowe, po pęknięciu matrycy cementowej włókna przenosiły dalsze obciążenia.

Z pracy wyciągnięto następujące wnioski główne:

- w celu prawidłowego nasączenia kruszywa lekkiego należy wcześniej dodać wody w ilości 15% masy kruszywa lekkiego i przemieszać, a następnie dodać resztę składników,
- w celu napowietrzenia betonu lekkiego proponuje się napowietrzyć wcześniej zaprawę a następnie dodać do nasączonego kruszywa lekkiego,
- włókna stalowe prawidłowo rozprowadzają się w betonie lekkim stanowiąc efektywne zbrojenie dla kruchej matrycy cementowej,
- prawidłowe napowietrzenie zaprawy cementowej a następnie dodanie do betonu na kruszywie lekkim jest istotne dla zapewnienia betonu o wysokiej mrozoodporności do zastosowania na zewnątrz,
- wyniki wytrzymałościowe betonu z włóknami stalowymi LW są wyższe o ok 5% od wyników betonu kontrolnego bez włókien LK. Tak niewielka różnica może być spowodowana porowatą strukturą betonu oraz porowatym kruszywem.
- planowane są dalsze badania w tym temacie między innymi analiza mikroskopowa strefy kontaktowej włókno-zaczyn, badania z innym rodzajem włókien stalowych w tym włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych.

6. Bibliografia

- [1] G. König, K. Holschemacher, D. Weiße, H. Schneider, Fibre reinforced lightweight aggregate concrete, 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB 2004, 20-22 September 2004, Varenna, Italy, s. 1321 – 1330,
- [2] J. Zivkovic, M. Lukovic, J. Arve Øverli, D.A. Hordijk, Brittleness of high-strength lightweight aggregate concrete, SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: 24-26 October 2018, Funchal, Madeira Island, Portugal,
- [3] Hugo Costa, Esteves D. Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, Simões T., Design and Characterization of Self-Compacting Fiber-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC) – BEFIB 2012, Guimarães, Portugal,
- [4] Domagała. L., Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe, Monografia 462, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014.

- [5] Łuczaj K., Urbańska P., Certyd - nowe, lekkie, wysokowytrzymałe kruszywo spiekane, *Materiały Budowlane* 12/2015, str. 42-45.
- [6] Krawczyk Ł., Urban T., Badania eksperymentalne na docisk lekkiego betonu kruszywowego wzmocnionego stalowym zbrojeniem rozproszonym, *Inżynieria i Budownictwo* 2021, r. 77, nr 8, str. 386—390.
- [7] Urban T., Gołdyn M., Współczesne konstrukcje z betonu lekkiego, *XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk 2019, Tom II, str. 453-554.
- [8] Domagała L. Durability of Structural Lightweight Concrete with Sintered Fly Ash Aggregate, *Materials* 2020, 13(20), 4565; <https://doi.org/10.3390/ma13204565>.
- [9] Lewiński P., Fedorczyk Z., Zacharski Ł., Rogowska A., Właściwości reologiczne betonu lekkiego na kruszywie spiekany, *Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone KS2021*, Kraków 12-13 maja 2022, s. 107-110.
- [10] Lewiński P., Fedorczyk Z., Zacharski Ł., Rogowska A. Właściwości reologiczne betonu lekkiego na kruszywie spiekany, *Przegląd Budowlany* 5-6/2022, t. 93, s. 70-75
- [11] A. Michalik, F. Chyliński, J. Bobrowicz, W. Pichór: Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres, *Materials* 2022, 15, 2444. <https://doi.org/10.3390/ma15072444>,
- [12] A. Michalik, F. Chyliński, A. Piekarczyk, W. Pichór: Evaluation of recycled tyre steel fibres adhesion to cement matrix, *Journal of Building Engineering* 68 (2023) 106146, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106146>,
- [13] Domagała, L., Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 17(1), 36-44. <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.553923>.
- [14] Mahmoud Hassanpour, Payam Shafigh, Hilmi Bin Mahmud. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials* 37 (2012) 452–461, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071>.
- [15] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka, 2019.
- [16] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe, 2019.
- [17] PN- EN 12350-6:2019 Test Badania mieszanki betonowej -- Część 6: Gęstość, 2019
- [18] PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- [19] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [20] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [21] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu -- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [22] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [23] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
- [24] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym -- Pomiar

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Ścieranie betonów w konstrukcjach hydrotechnicznych - modele predykcji uszkodzeń i metody badań

Concrete abrasion in hydraulic structures - damage prediction models and test methods

Streszczenie

Uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem będącym wynikiem erozyjnego oddziaływania osadów transportowanych przez wodę stanowią poważny problem związany z trwałością konstrukcji hydrotechnicznych. Ze względu na złożoność oddziaływań na te konstrukcje wiele aspektów jest nadal przedmiotem debaty, pomimo ogromnych wysiłków, które zostały podjęte w tym temacie od wielu lat. Należy podkreślić, że w normach europejskich nadal nie ma normy dedykowanej do badań ścieralności betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych, a wytyczne w zakresie projektowania konstrukcji betonowych w klasie XM dopiero w 2023 r. znalazły się w głównej normie EN 1992-1-1. Niniejsza praca ma na celu przedstawienie modeli stosowanych do predykcji uszkodzeń wywołanych ścieraniem na skutek hydroabrazji. Dokonano również przeglądu i oceny metod badań ścieralności betonu pod kątem ich wykorzystania w projektowaniu.

Abstract

Damage to concrete due to abrasion resulting from the erosive action of sediments transported by water is a serious problem related to the durability of hydraulic structures. Due to the complexity of the impacts on these structures, many aspects are still under debate, despite the great efforts that have been made on this topic for many years. It should be noted that there is still no standard in European standards dedicated to the abrasion testing of concrete in hydro-engineered structures, and guidelines for the design of concrete structures in the XM class have only been included in the main standard EN 1992-1-1 in 2023. This thesis aims to present the models used to predict abrasion damage due to hydroabrasion. It also reviews and evaluates concrete abrasion test methods for their use in design.

1. Wprowadzenie

Duża liczba betonowych konstrukcji hydrotechnicznych takich jak rurociągi, tunele transportujące wodę czy zapory jest narażona na poważne uszkodzenia spowodowane ścieraniem. Uszkodzenia betonu konstrukcji hydrotechnicznych spowodowane ścieraniem to proces fizyczny polegający na ciągłej utracie materiału na powierzchni wywołany głównie obciążeniami hydrodynamicznymi. Nadmierna wielkość uszkodzeń wywołana ścieraniem zagraża prawidłowej eksploatacji obiektów hydrotechnicznych i prowadzi do wysokich kosztów napraw [1]. Uszkodzenia spowodowane ścieraniem nagromadzone w długim okresie lub spowodowane znacznymi klęskami powodziowymi stanowią krytyczny problem dla betonowych konstrukcji hydrotechnicznych. Dlatego na początkowym etapie projektowania należy przeprowadzić kompleksową analizę w celu poprawy odporności takich konstrukcji na ścieranie, w szczególności w przypadku infrastruktury wymagających długiego okresu użytkowania. Zoptymalizowany system projektowania konstrukcji hydrotechnicznych wraz z doбором materiałów, może znacznie zmniejszyć uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem, a co za tym idzie, późniejsze koszty konserwacji i renowacji.

Zjawisko ścierania w odniesieniu do betonowych konstrukcji hydrotechnicznych jest zjawiskiem złożonym fizycznie. Najczęstszym oddziaływaniem jest tzw. hydroabrazja, czyli zużycie ściernie konstrukcji betonowej w wyniku oddziaływania rumowiska (morskiego lub rzeczno transportowanego przez wodę [2]). Hydroabrazja jest przedmiotem badań naukowców od dziesięcioleci, a większość badań opiera się o testy laboratoryjne [3-7]. Jednak w wielu przypadkach uzyskane wyniki eksperymentalne różnią się znacznie między sobą ze względu na brak znormalizowanych warunków i procedur badań. Ponadto stwierdzono, że w większości uzyskanych wyników badań brakuje oceny uszkodzeń spowodowanych ścieraniem betonu, zazwyczaj w wyniku ograniczonych danych dotyczących rzeczywistych warunków pracy konstrukcji [8]. Rozwiązania materiałowe w kierunku poprawy odporności betonu na hydro- abrazję, tak aby można było zapewnić ich trwałość nawet wtedy, gdy konstrukcje hydrotechniczne są narażone na trudne warunki, np. dużą prędkość przepływu wody czy wysoki strumień osadów koncentrują się głównie na wzmocnieniu matrycy cementowej. W tym zakresie zaproponowano różne metody, w tym m.in. zastosowanie włókien nieciągłych, uzupełniających, dodatków mineralnych, cząstek gumy ciągliwej oraz materiałów powłokowych [2, 9, 10].

Na odporność betonu na ścieranie ma wpływ szereg czynników, w szczególności warunki hydrauliczne i właściwości betonu. Ważnymi parametrami są m.in. prędkość przepływu, kąt uderzenia przepływu, zawartość osadów, właściwości cząstek ściernych, czas ekspozycji, wytrzymałość betonu i struktura porów betonu. Istnieją jednak duże różnice w wynikach badań dotyczących wpływu poszczególnych parametrów, co wskazuje na złożoność zjawiska ścieralności.

Podstawowe mechanizmy stojące za uszkodzeniami betonu spowodowanymi ogólnie rozumianym ścieraniem w tym hydroabrazją nie w sposób kompleksowy opisane, a długotrwałe, pewne zabezpieczenie trwałości betonowych konstrukcji hydrotechnicznych przed uszkodzeniami na skutek ścierania. W pracy przedstawiono podstawowy teoretyczne będące podstawą modeli prognostycznych opisujących mechanizmy zużycia są jeszcze dalekie od rozwiązania. W związku z tym wysoce pożądany jest przegląd stanu wiedzy na temat ścieralności betonu w konstrukcjach hydraulicznych. Aby wypełnić tę lukę, niniejszy przegląd koncentruje się na modelach

przewidywania ścierania i przeglądzie metod badań do pomiaru i oceny uszkodzeń spowodowanych ścieraniem. Praca ta ma na celu rzucenie światła na ważne aspekty uszkodzeń betonu konstrukcji hydrotechnicznych spowodowanych ścieraniem.

2. Modele predykcyjne ścierania

Obliczenia trwałości konstrukcji hydrotechnicznych oparte są na ogół na modelach przewidywania ścieralności betonu. Modele do badania i przewidywania uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem możemy podzielić na cztery główne grupy: modele empiryczne, modele półempiryczne, modele statystyczne oparte na prawdopodobieństwie oraz modele oparte na metodologiach uczenia maszynowego.

2.1. Modele empiryczne

Najczęściej stosowane modele wykazują proporcjonalną zależność między głębokością ścierania betonu D a jego wytrzymałością na ściskanie f_c [11-14]. Do przewidywania głębokości ścierania zastosowano funkcje liniowe, wielomianowe, logarytmiczne i potęgowe (patrz Tabela 1).

Tabela 1. Przykłady modeli empirycznych ścierania betonu

Model empiryczny	Format	Relacja
Liniowy	$W_{ar}=af_c+b$	Zależność między szybkością ścierania W_{ar} i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [15]
	$D=at$	Zależność między głębokością zużycia D i czasem ścierania t [16]
Wielomianowy	$D=a_1+a_2f_c+a_3f_c^2$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [17]
	$M_1=a_1+a_2f_{ft}+a_3f_{ft}^2$	Związek między ubytkiem masy M_1 i wytrzymałością betonu na zginanie f_f lub rozciąganie f_t [18]
Wykładniczy	$M_1=e^{afc}$	Związek między ubytkiem masy M_1 i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [16]
Logarytmiczny	$D=a+b\ln f_c$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [14]
Potęgowy	$D=af_c^b$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [17]
	$W_{ar}=av^b$	Zależność między szybkością ścierania W_{ar} i prędkością przepływu v [19, 20]

2.2. Modele półempiryczne

Dokładność modeli predykcyjnych można poprawić za pomocą bardziej zaawansowanych metod, np. modeli półempirycznych, opracowanych w oparciu o połączenie pomiarów eksperymentalnych i teorii matematycznych. Bitter [21] zaproponował zależność wyrażającą ścieranie jako funkcję energii kinetycznej:

$$W_D = \frac{1}{2} \frac{M(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

W modelu tym uwzględnił tylko zużycie wywołane tylko odkształceniami uderowymi, co nie uwzględnia faktu, że w podczas procesu ścierania mogą istnieć jednocześnie dwie formy mechanicznych odkształceń: zużycie udarnośćciowe i zużycie tnące. Zaproponowano zmodyfikowany model, który uwzględnia oba te oddziaływania: obciążenie udarnośćciowe i obciążenie tnące wywołane cząstkami ścierającymi powierzchnie materiału [22, 23]:

$$W = W_D + W_C = \frac{\frac{1}{2} M(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{\frac{1}{2} M V^2 \cos^2 \alpha \sin 2\alpha}{\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

W - całkowita utrata objętości spowodowaną zużyciem ściernym przy kącie uderzenia α i prędkość przepływu V,

W_D i W_C - zużycie ściernie spowodowane normalnym odkształceniem uderowym i stycznym działaniem skrawania,

ε i φ - czynniki wpływające na energię kinetyczną związaną z odkształceniem uderowym i zużyciem skrawania

M - całkowita masa uderzających cząstek,

K - składowa prędkości krytycznej prostopadła do powierzchni betonu, poniżej której nie występuje ścieranie.

Niektórzy badacze wykazali, marginalny wpływ zużycia w wyniku skrawania w przypadku badań materiałów kruchych np. beton czy podłoże skalne, zwłaszcza gdy są one narażone na działanie strumienia cząstek o zaokrąglonych ziarnach, co ma miejsce w systemach rzecznych [23].

W związku z tym Sklar i Dietrich [24] zaproponowali model skupiający się głównie na zużyciu uderowym. Podstawowa forma modelu jest zdefiniowana w następujący sposób:

$$E = V_i I_r F_e \quad (3)$$

gdzie: E to szybkość ścierania podłoża skalnego, V_i oznacza średnią objętość skały oderwanej przez uderzenie, I_r oznacza częstotliwość uderzeń cząstek na jednostkę powierzchni w jednostce czasu, oraz F_e to część koryta rzeki wystawiona na działanie prądu.

2.3. Modele statystyczne oparte na prawdopodobieństwie

Przykładem modelu statystycznego opartego na prawdopodobieństwie może być model do przewidywania zużycia ściernego betonu opracowany przez Dandapata i

Deba [8]. W modelu tym przepływ osadów ścierający beton definiuje się jako ciągłe warstwy sedymentacyjne docierające do powierzchni betonu. Opierając się na takim założeniu, całkowity ubytek masy ścierania można obliczyć, kumulując uszkodzenia ze wszystkich warstw. Założenia modelu opierają się głównie na wpływie geometrii kruszywa wchodzącego w skład rumowiska na uszkodzenia betonu wywołane ścieraniem. Główne założenia modelu opisano zależnością:

$$M_{eroded}(t) = \sum_{i=1}^{n_g} \left(M_{exposed}^{total} \right)^i \times \rho_i \quad (4)$$

gdzie: M_{eroded} - starta masa betonu wywołana działaniem jednej warstwy kruszywa w jednostce czasu t ,

$\left(M_{exposed}^{total} \right)^i$ – oznacza całkowitą masę kruszywa ściernego na narażonym obszarze betonu,

ρ_i – jest rozkładem prawdopodobieństwa warunkowego kruszywa,

i – liczba warstw sedymentacyjnych.

Model nie uwzględnia wpływu innych kluczowych parametrów takich jak warunki przepływu czy właściwości betonu.

2.4. Modele oparte na uczeniu maszynowym

Modele predykcyjne ustanowione w oparciu o metodologię uczenia maszynowego mogą znacznie poprawić dokładność prognozowania i zapewnić możliwość zastosowania w bardziej ogólnych warunkach. Gencel i in. [25] opracowali model uwzględniający wpływ składu betonu (zawartość kruszywa, zawartości cementu) i warunków obciążenia zewnętrznego na zachowanie betonu podczas ścierania. Uzyskane przez nich wyniki pokazały, że modele stworzone w oparciu o metodyki uczenia maszynowego wykazywały lepszą wydajność predykcyjną w porównaniu z ogólnymi modelami liniowymi. Ghafoori i in. [26] zbudowali modele predykcyjne oparte na metodologiach uczenia maszynowego przy użyciu zbioru danych uzyskanych z testów ASTM C779. Podobnie Malazdrewicz i Sadowski [27] opracowali modele oparte na eksperymentalnych zapisach testów ASTM C944. W pracy [28] przyjęto dwie metodologie uczenia maszynowego, tj. lasy losowe (RFs) i sztuczne sieci neuronowe (ANN), do przewidywania głębokości ścierania betonu na podstawie 690 punktów danych eksperymentalnych, w których uwzględniono 12 parametrów wpływających na złożoność uszkodzeń spowodowanych ścieraniem konstrukcji hydrotechnicznych. W przypadku modeli opartych na niewielkim zbiorze danych pochodzących z konkretnego studium przypadku ich zastosowanie w innych warunkach pracy konstrukcji może nie być właściwe, dlatego pożądany jest jak największy zbiór danych eksperymentalnych.

3. Test ścieralności i metody kwantyfikacji uszkodzeń

Metod badań ścieralności betonu jest bardzo wiele, część z nich została znormalizowana, jednak tylko niewielka ilość jest adresowana do badania ścieralności betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych. Główne, powszechnie stosowane metody badania ścieralności wymieniono w tabeli 2.

Tabela 2. Analiza porównawcza różnych metod badań ścieralności.

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
Norma ASTM C418 [29]	Piaskowanie próbek	Stosunek utraty objętości do powierzchni ścierania	Symuluje działanie piasków ściernych. Możliwość kontroli pod kątem stopnia uszkodzenia wywołanego ścieraniem	Ścierniwo w postaci piasku jest niewielkich rozmiarów i jest transportowane przez powietrze pod wysokim ciśnieniem, a nie przez wodę.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Norma ASTM C779 [30]	Procedura A - głowice ścierające Procedura B – głowice z kołami zębatymi Procedura C- głowice z łożyskiem kulkowym	Głębokość ścierania	Procedury testowe różnią się rodzajem i stopniem siły ściernej. Skracają czas badania	Procedury testowe są wykonywane bez użycia wody. Można symulować tylko mechanizmy tarcia suchego. Wystarczające ścieranie może nie zostać osiągnięte z uwagi na słabe obciążenie.	Pomiar odporności betonu na ścieranie chodników i podłóg
Norma ASTM C944 [31]	Obracający się trzpień z kołami zębatymi	Głębokość ścierania lub ubytek masy	Skuteczny do szacowania uszkodzeń spowodowanych ścieraniem betonu drogowego i mostowego, poddanego głównie obciążeniom ściskającym.	Można symulować tylko rowkowanie spowodowane tarciem na sucho. Nie jest reprezentatywna dla hydroabrazji.	Szacowanie odporności betonu na ścieranie autostrad i mostów
Norma ASTM C1138 [32]	Kule stalowe wprowadzane w ruch wirowy w wodzie	Utrata masy lub szybkość utraty masy	Nadaje się do badania ścierania wywołanego toczeniem się, ślizganiem i uderzaniem. Zmniejsza koszty eksperymentów.	Wyraźne różnice w kształcie między stalowymi kulkami a cząstkami przenoszonymi przez wodę. Długi czas badania (72 h) dla pojedynczej próby.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
Tarcze obrotowe [3, 33]	1. Metoda tarczy Böhmego 2. Metoda szerokiej tarczy	Ubytek masy, ubytek objętości, głębokość ścierania	Nadaje się do badania ścierania wywołanego szlifowaniem	Procedura testowa nie jest reprezentatywna dla hydroabrazji. Długi czas badań.	Szacowanie odporności betonu na ścieranie dróg i autostrad
Uderzenie piasku transportowanego przez wodę [15], [34], [35], [36]		Utrata masy, utrata objętości, głębokość ścierania lub szybkość ścierania	Duże podobieństwo do przepływu rumowiska rzeczno-ego. Można modelować wiele mechanizmów ścierania, w tym deformację uderzeniową, zużycie tnące i zarysowania ślizgowe.	Trudno jest osiągnąć pożądany skład osadu i zapewnić jednorodność przepływu. Modelowanie różnych warunków przepływu (np. prędkość przepływu, kształt ścierniwa i zawartość osadów) są ograniczone.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Wysokociśnieniowy strumień hydro-ścierny [4, 37, 38]		Utrata masy, utrata objętości, głębokość ścierania lub szybkość ścierania	Przyspiesza proces ścierania dzięki szybkiemu przepływowi. Stosowana przy dużych prędkościach przepływu. Skuteczny w testowaniu względnej odporności na ścieranie różnych betonów, w tym BWW.	Koncentracja naprężeń może wystąpić z powodu strumienia wody o wysokim ciśnieniu działającego na małą powierzchnię. Prędkość przepływu pod wysokim ciśnieniem jest większa niż w warunkach naturalnych	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Skalowany model fizyczny w postaci kanału [39], [40], [41], [42]		Głębokość ścierania	Duże podobieństwo do warunków polowych. Zaawansowany system rejestracji danych.	Możliwość przeniesienia wyników uzyskanych ze skalowanych testów modeli fizycznych do zastosowań	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
				terenowych jest trudna ze względu na potencjalne efekty skali.	
Ścieranie in-situ [6, 43]		Głębokość ścierania	Dokładne dane dotyczące uszkodzeń spowodowanych ścieraniem.	Pomiar terenowy konstrukcji hydraulicznych jest trudny. Testy in-situ są kosztowne.	

Na rysunku 1 przedstawiono najbardziej typowe metody badań ścieralności betonu. Normowa metoda badawcza ASTM C1138 [32] zwana również „metodą podwodną” (Rys. 1 a) jest reprezentatywna dla oceny względnej odporności betonu na ścieranie betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych i stosowana przez bardzo wielu badaczy na całym świecie. W krajach UE bardziej popularne są metody badania ścieralności betonu z wykorzystaniem tarcz, w Polsce od dziesięcioleci stosowana jest metoda tarczy Böhmego [33]. Metoda ta nie nadaje się do oceny ścieralności betonu dla konstrukcji hydrotechnicznych, podobnie jak wprowadzona w ramach norm europejskich metoda szerokiej tarczy [33], która nie przyjęła się w Polsce do oceny ścieralności betonu. Metody testowe oparte na modelu fizycznym, w postaci specjalnych kanałów zapewniają bliskie podobieństwo do warunków terenowych [39]. Powyższe metody badawcze odtwarzają typowy przepływ rumowiska dla istniejących lub projektowanych konstrukcji, z różnym powodzeniem, aby symulować uszkodzenia spowodowane ścieraniem betonu. Jednak ze względu na złożoność i różnorodność warunków hydraulicznych, wyniki uzyskane z testów laboratoryjnych wydają się znacznie różnić, a zatem przydatność uzyskanych wyników laboratoryjnych jest ograniczona możliwościami technicznymi tuneli. Wykonuje się również badania ścieralności in-situ, które dostarczają wyników bezpośrednio z terenu [43] jednak są one nieliczne i bardzo kosztowne.



Rys. 1. Typowe metody badań ścieralności betonu: a) schemat urządzenia wg metody ASTM C1138 [32], (b) próbka po zakończeniu badania wg STM C1138, c) Metoda tarczy Böhme [33], d) badanie próbki wg metody ASTM C944 [31] e) kanał do badania przepływów i ścieralności betonu

4. Podsumowanie

Podsumowując, należy zauważyć, że nie ma pojedynczych testów, które mogłyby odpowiednio ocenić odporność betonu na ścieranie w konstrukcjach hydrotechnicznych we wszystkich możliwych warunkach. Inną ważną kwestią jest to, że podobieństwo między badaniami laboratoryjnymi a warunkami polowymi jest niewielkie, ponieważ naturalne warunki polowe są złożone i wiążą się z dużymi obciążeniami. Wiarygodność i reprezentatywność metod laboratoryjnych do badania złożonych zjawisk ścierania zależy w dużej mierze od ich zdolności do odpowiedniego symulowania rzeczywistych warunków.

Uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem są spowodowane głównie działaniami mechanicznymi, w tym cięciem, ścieraniem i uderzeniami, podczas gdy w warunkach polowych beton może być również narażony na procesy chemiczne i fizykochemiczne, np. zamarzanie i rozmrażanie oraz korozję chemiczną. W większości przypadków badania ścieralności przeprowadza się bez jednoczesnego uwzględnienia innych mechanizmów degradacji. Aby odzwierciedlić przypadki terenowe, ważne jest badanie efektów sprzęgania kilku mechanizmów degradacji, co również wydaje się istotną luką badawczą do wypełnienia.

Badania nad uszkodzeniami wywołanymi ścieraniem betonu dla konstrukcji hydrotechnicznych pod wpływem różnych obciążeń środowiskowych lub mechanizmów degradacji mają dużą wartość, ponieważ mogą być bardziej reprezentatywne w warunkach polowych.

Przewidywanie uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem jest bardzo ważnym tematem. Modele empiryczne można stosować w celu ustalenia związku między uszkodzeniami spowodowanymi ścieraniem betonu a parametrem wpływającym. Nie można za ich pomocą skutecznie odzwierciedlić wpływu innych czynników wpływających na uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem. Modele opracowane w oparciu o metodologię uczenia maszynowego są najbardziej obiecujące w przewidywaniu uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem. Tego rodzaju modele uwzględniają większość istotnych parametrów wpływających zgodnie z uzyskanym zbiorem danych, dzięki czemu można je wykorzystać do kompleksowej oceny betonu narażonego na złożone warunki środowiska.

Na koniec należy podkreślić, że obecne przepisy projektowe i zalecenia dotyczące projektowania betonu odpornego na ścieranie (o ile w ogóle występują) zawierają bardzo ograniczone informacje. Współpraca i przepływ informacji pomiędzy potrzebami przemysłu a badaniami naukowymi jest tu kluczowym zagadnieniem. Trwałe i zrównoważone betonowe konstrukcje hydrotechniczne o doskonałej odporności na ścieranie można osiągnąć tylko dzięki wspólnym wysiłkom zarówno środowiska akademickiego, jak i przemysłu.

Literatura

- [1] M. Müller-Hagmann, I. Albayrak, C. Auel, R.M. Boes: Field investigation on hydroabrasion in high-speed sediment-laden flows at sediment bypass tunnels. Water., Vol.12 (2020), pp. 10-16.
- [2] E.K. Horszczaruk. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete Wear, 267 (2009), pp. 110-115.
- [3] E. Horszczaruk, P. Brzozowski: Effects of fluidal fly ash on abrasion resistance of underwater repair concrete. Wear, Vol. 376-377 (2017), pp. 15-21.

- [4] A.W. Momber: Effects of erodent flow energy and local exposure time on the erosion of cement-based composites at high-speed hydro-abrasive flow. *Wear*, Vol. 378–379 (2017), pp. 145-154.
- [5] Y.W. Liu: Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 972-977.
- [6] F. Jacobs, W. Winkeler, F. Hinkeler, P. Volkart: *Beton Im Wasserbau*. *Beton*, 1 (2003), pp. 16-23
- [7] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Construction and Building Materials*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [8] R. Dandapat, A. Deb: A probability based model for the erosive wear of concrete by sediment bearing water. *Wear*, Vol. 350–351 (2016), pp. 166-181.
- [9] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Construction and Building Materials*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [10] Z. Sun, Q. Xu: Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2009), pp. 198-204.
- [11] A.F.H. Sherwani, R. Faraj, K.H. Younis, A. Daraei: Strength, abrasion resistance and permeability of artificial fly-ash aggregate pervious concrete. *Case Study in Construction Materials*, 14 (2021), e00502.
- [12] E. Horszczaruk: Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures *Wear*, 259 (2005), pp. 62-69.
- [13] T. Yen, T.H. Hsu, Y.W. Liu, S.H. Chen: Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 458-463.
- [14] R. Siddique, K. Kapoor, E.H. Kadri, R. Bennacer: Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. *Construction and Building Materials*, 29 (2012), pp. 270-278.
- [15] Y.W. Liu, T. Yen, T.H. Hsu: Abrasion erosion of concrete by water-borne sand *Cement and Concrete Research*, 36 (2006), pp. 1814-1820.
- [16] S. Pyo, S.Y. Abate, H.K. Kim: Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate. *Construction and Building Materials*, 165 (2018), pp. 11-16.
- [17] E. Horszczaruk: Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures, *Wear*, 259 (2005), pp. 62-69.
- [18] Q. Deng, R. Zhang, C. Liu, Z. Duan, J. Xiao: Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete: Length, volume fraction, and types of fibers. *Construction and Building Materials*, 362 (2023), Article 129750.
- [19] X.G. Hu, A.W. Momber, Y. Yin, H. Wang, D.M. Cui: High-speed hydrodynamic wear of steel-fibre reinforced hydraulic concrete. *Wear*, 257 (2004), pp. 441-450.
- [20] X. Hu, A.W. Momber, Y. Yin: Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete. *Wear*, 253 (2002), pp. 848-854.
- [21] J.G.A. Bitter: A Study of Erosion Phenomena Part I. *Wear*, 6 (1963), pp. 169-190.
- [22] T. Ishibashi: A hydraulic study on protection for erosion of sediment flush equipments of dams. *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, 334 (1983), pp. 103-112.

- [23] W.J. Head, M.E. Harr: The development of a model to predict the erosion of materials by natural contaminants. *Wear*, 15 (1970), pp. 1-46.
- [24] L.S. Sklar, W.E. Dietrich: The role of sediment in controlling steady-state bedrock channel slope: Implications of the saltation–abrasion incision model. *Geomorphology*, 82 (2006), pp. 58-83.
- [25] O. Gencel, F. Kocabas, M.S. Gok, F. Koksai: Comparison of artificial neural networks and general linear model approaches for the analysis of abrasive wear of concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 3486-3494.
- [26] N. Ghafoori, M. Najimi, J. Sobhani: Modelling the abrasion resistance of self-consolidating concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015), pp. 938-953.
- [27] S. Malazdrewicz, Ł. Sadowski: An intelligent model for the prediction of the depth of the wear of cementitious composite modified with high-calcium fly ash *Composites Structures*, 259 (2021), Article 113234.
- [28] S. Malazdrewicz, Ł. Sadowski: Neural modelling of the depth of wear determined using the rotating-cutter method for concrete with a high volume of high-calcium fly ash. *Wear*, 477 (2021), Article 203791.
- [29] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting, ASTM C418-98. (1999) 1–3.
- [30] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, ASTM C 779/C 779M - 05. (2002) 1–6.
- [31] The American Society for Testing and Materials, Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method, ASTM C944-99. (1999) 1–4.
- [32] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method), ASTM C1138-97. (1997) 1–4.
- [33] *PN-EN 14157:2017-11*. Metody badań kamienia naturalnego -- Oznaczanie odporności na ścieranie.
- [34] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Constr. Build. Mater. J.*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [35] N. Zarrabi, M.N. Moghim, M.R. Eftekhari: Effect of hydraulic parameters on abrasion erosion of fiber reinforced concrete in hydraulic structures. *Constr. Build. Mater.*, 267 (2021), Article 120996.
- [36] Z.J. Grdic, G.A.T. Curcic, N.S. Ristic, I.M. Despotovic: Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater.*, 27 (2012), pp. 305-312.
- [37] H. Hocheng, C.H. Weng: Hydraulic erosion of concrete by a submerged jet *J. Mater. Eng. Perform.*, 11 (2002), pp. 256-261.
- [38] J. Liu, S. Du, Y. Xue: Study on the breaking process and damage characteristics of abrasive water jet impacting concrete based on acoustic emission. *Constr. Build. Mater.*, 262 (2020), Article 120085.
- [39] C. Auel, *Flow Characteristics, Particle Motion And Invert Abrasion In Sediment Bypass Tunnels*, ETH Zurich, 2014.
- [40] M. Facchini, *Hydroabrasion in high speed flow at sediment bypass tunnels*, ETH Zürich, 2017.

- [41] T. Inoue, N. Izumi, Y. Shimizu, G. Parker: Interaction among alluvial cover, bed roughness, and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119 (2014), pp. 2123-2146
- [42] M.P. Lamb, N.J. Finnegan, J.S. Scheingross, L.S. Sklar: New insights into the mechanics of fluvial bedrock erosion through flume experiments and theory. *Geomorphology*, 244 (2015), pp. 33-55.
- [43] A. Kryżanowski, M. Mikoš, J. Šušteršič, V. Ukrainczyk, I. Planinc: Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the Lower Sava River. *Journal of Mechanical Engineering* 58(2012)4, 245-25.

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



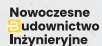
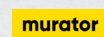
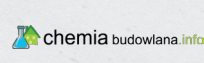
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3