

Dagmara JAGODA\*  
Politechnika Opolska

## METODY BADAŃ WPLYWU OBIEKTÓW BETONOWYCH NA ŚRODOWISKO

**Streszczenie.** Beton jest jednym z najważniejszych i najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych w budownictwie. W produkcji betonu towarowego i prefabrykatów betonowych bardzo często stosowane są dodatki stanowiące produkt uboczny z innych procesów. W artykule przedstawiono wybrane metody badań pozwalające na ocenę poziomu uwalniania się metali ciężkich z betonu do środowiska naturalnego. Badania własne przeprowadzono według procedury zawartej w normie holenderskiej EA NEN 7375:2004. Dowiedziono w nich, że poziom uwalniania się metali ciężkich z betonu jest bardzo niski, niezależnie od rodzaju cementu (CEM I, CEM II i CEM III) z jakiego został on wykonany.

## TEST METHODS EVALUATING THE IMPACT OF CONCRETE CONSTRUCTIONS ON ENVIRONMENT

**Summary.** Nowadays, concrete is a very important and most commonly used structural material. Different by-products of various industries are very often used as additives in the production of concrete and precast elements.

This article presents an overview of leaching test methods evaluating heavy metals release from concrete into environment. The research has been conducted according to standard EA NEN 7375:2004. It was found, that the level of heavy metals release from concrete is very low, independently of the kind of cement (CEM I, CEM II, CEM III) used to made this concrete.

### 1. Wprowadzenie

Beton stał się jednym z najważniejszych i najczęściej stosowanych materiałów w budownictwie [6]. Nie budzi to już praktycznie żadnych wątpliwości, gdyż ze względu na swoje właściwości (głównie trwałość) jest on niezastąpionym materiałem konstrukcyjnym

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Zbigniew Giergiczny, prof. Politechniki Opolskiej.

o dużych możliwościach kształtowania form [5, 16]. W produkcji betonu towarowego i prefabrykatów betonowych bardzo często stosowane są dodatki mineralne będące ubocznymi produktami innych procesów przemysłowych. Są to głównie popioły lotne, ale także pył krzemionkowy z produkcji żelazostopów czy mielony granulowany żużel wielkopiecowy z hutnictwa. Także coraz częściej w procesie wypalania klinkieru cementowego stosowane są paliwa alternatywne, których głównymi składnikami są palne składniki odpadów przemysłowych lub komunalnych. Nasuwa się zatem pytanie, czy działanie takie nie pogorszy stanu środowiska naturalnego, w którym umiejscowiony jest obiekt lub konstrukcja betonowa? Jak ocenić poziom uwalnianych do środowiska substancji niebezpiecznych? Problematyka ta jest przedmiotem badań prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych w Europie i świecie [10, 1].

W pracy przedstawiono wybrane metody badań pozwalające na ocenę poziomu wymywalności metali ciężkich z betonu. W ramach realizowanych badań własnych zbadano i oceniono poziom wymywalności metali ciężkich z betonów na podstawie metodyki zawartej w holenderskiej normie [11].

## **2. Metody badań wymywania metali ciężkich z konstrukcji betonowych**

O ilości uwalnianych substancji niebezpiecznych z konstrukcji betonowych do środowiska naturalnego decyduje wiele czynników, do których zaliczyć można postać próbki betonu (monolit, próbka rozkruszona) oraz czynniki środowiskowe (grunt, woda, ścieki, środowiska agresywne chemicznie, zmienna temperatura i wilgotność) [1, 13]. Na poziom wymywania metali ciężkich z betonu ma także wpływ struktura stwardniałego betonu, a zwłaszcza skład mieszanki betonowej (głównie rodzaj i ilość cementu) oraz przy jakim stosunku wodno-cementowym (w/c) beton został wykonany [7]. Duże znaczenie w wiązaniu metali ciężkich przypisuje się tzw. fazie CSH oraz uwodnionym glinianom i siarczanoglinianom wapniowym, czyli fazom powstałym w wyniku procesów hydratacji cementu. W efekcie zmniejsza się porowatość stwardniałego zaczynu, a zatem również mobilność metali [4].

Wiele miejsca w literaturze poświęca się metodom badawczym pozwalającym na ocenę oddziaływania betonu (elementów i konstrukcji betonowych) na środowisko naturalne. Różnorodność stosowanych metod badawczych jest znaczna. W niektórych metodach podjęto próby przewidzenia zachowania się stwardniałego betonu w warunkach statycznych, można

do nich zaliczyć np. grupę metod TANK [3, 11], opierających się głównie na normie holenderskiej [12]. W innych metodach dąży się do wykonywania testów wymywalności w warunkach dynamicznych, jak na przykład procedura zawarta w normie [14], według której rozdrobnioną próbę zalewa się wodą w stosunku ciecz/ciało stałe = 10 i wytrząsa się przez 24 godziny. Podział metod ze względu na odczyn medium ługującego (naturalny bądź kwaśny) znajduje swoje odzwierciedlenie w normie holenderskiej [11] oraz w projekcie normy [15]. W normie [11] stosowana jest ciecz (woda destylowana) o neutralnym pH, obmywająca próbę monolityczną [11], natomiast w projekcie normy europejskiej badaną próbę poddaje się wpływowi ośmiu różnych wartości pH od 4 do 12 [15].

Metody badawcze, ze względu na czas trwania, można podzielić na długoterminowe, do których zaliczamy np. wymienioną wcześniej grupę metod TANK [11, 12] i krótkoterminowe, jak np. procedurę zawartą w normie [14]. W normach holenderskich z grupy TANK do badań wykorzystywane są próby monolityczne umieszczone na określony czas w pojemnikach z cieczą [11, 12]. Natomiast w normie [14] próbkę o masie 100 g rozdrabnia się do wielkości ziaren poniżej 10 mm, a następnie zalewa odpowiednią ilością wody ( $L/S = 10$ ) i wytrząsa przez 24 godziny [14].

Reasumując można stwierdzić, że w dostępnych metodach badawczych, służących do oceny ilości wymywanych metali ciężkich z betonu (konstrukcji betonowych) do środowiska, starano się oddać rzeczywiste warunki pracy konstrukcji betonowej [1].

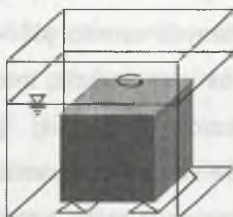
### 3. Badania własne

#### 3.1. Materiały i stosowane procedury badawcze

W prowadzonych badaniach zaprojektowano i wykonano betony stosując: cement portlandzki CEM I 32,5R; cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R-HSR (zawartość popiołu lotnego wynosiła ok. 30%) oraz cement hutniczy CEM III/B 32,5N-LH-HSR/NA (zawartość granulowanego żużla wielkopieczowego wynosiła 75%). Skład mieszanki betonowej był następujący: cement –  $300,0 \text{ kg/m}^3$ , piasek –  $685,2 \text{ kg/m}^3$ , żwir  $2 \div 8 \text{ mm}$  –  $600,4 \text{ kg/m}^3$ , żwir  $8 \div 16 \text{ mm}$  –  $628,6 \text{ kg/m}^3$ , woda –  $180,0 \text{ kg/m}^3$ , współczynnik woda/cement (w/c) we wszystkich mieszankach wynosił 0,6.

Z otrzymanej mieszanki betonowej formowano kostki o wymiarach  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ . Po 24 godzinach próbki zostały rozformowane i poddane testom wymywalności według

procedury podanej w normie [11], zgodnie z którą po jednej próbce betonu umieszcza się w pojemniku wypełnionym odpowiednią ilością cieczy (wody destylowanej) o  $\text{pH} = 7$ . W celu zasymulowania wpływu medium agresywnego na poziom wymywalności metali ciężkich zmodyfikowano procedurę badawczą zawartą w normie [11], umieszczając dodatkowo po jednej próbce betonu w pojemniku z wodą zakwaszoną  $\text{HNO}_3$  do  $\text{pH} = 4$ . Kostki betonowe ustawiano na podporach, umożliwiając tym samym kontakt całej powierzchni badanej próbki betonu z cieczą (rys. 1).



Rys. 1. Zasada umieszczania próbki betonowej w pojemniku wg normy [11]

Fig. 1. Concrete sample scheme placed in the tank according to [11]

Objętość cieczy, którą należy zalać próbkę betonową, nie może być mniejsza niż dwukrotność objętości badanej próbki i należy ją określić według zasad podanych we wzorze (1) [11]:

$$2 \times V_p \leq V \leq 5 \times V_p \quad (1)$$

gdzie:

$V_p$  – objętość próby,

$V$  – objętość cieczy.

W prowadzonych badaniach własnych próbkę betonu umieszczano w pojemniku zawierającym 4 litry wody destylowanej o  $\text{pH} = 7$  oraz w cieczy (wodzie) zakwaszonej do  $\text{pH} = 4$ . Całkowity czas trwania testu wynosił 64 dni i był podzielony na 8 okresów badawczych (0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16; 36; 64 dni). W każdym badanym okresie pobierano z pojemnika próbkę wyciągu wodnego do analizy oraz wymieniano ciecz. W pobranych wyciągach określono zawartość metali ciężkich oraz odczyn ( $\text{pH}$ ).

Zawartość metali ciężkich oznaczano z wykorzystaniem spektrometru emisyjnego z plazmą wzbudzoną indukcyjnie. Odczyn pobranych wyciągów oznaczano z wykorzystaniem pehametru o zakresie minimalnym -2  $\text{pH}$  i maksymalnym 16  $\text{pH}$ .

### 3.2. Wyniki prowadzonych badań własnych

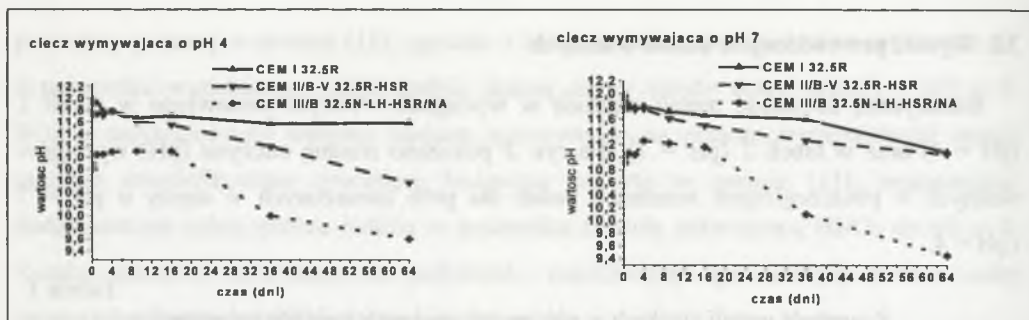
Sumaryczną zawartość metali ciężkich w wyciągach wodnych zestawiono w tabeli 1 (pH = 4) oraz w tabeli 2 (pH = 7). Na rys. 2 pokazano zmianę odczynu (pH) wyciągów wodnych w poszczególnych terminach badań dla prób zanurzonych w cieczy o pH = 7 i pH = 4.

Tabela 1  
Zawartość metali ciężkich w wyciągach wodnych z próbki betonowej  
(ciecz zakwaszona pH = 4)

Metal Ciężki	Stężenie metali ciężkich wyrażone w mg/dm <sup>3</sup>					
	Wyciąg wodny z betonu na cemencie:			Wartość dopuszczalna dla wód pitnych [14]	Wody grupy A1 [15]	
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R	CEM III/B 32,5N		Wartość dopuszczalna	Wartość zalecana
Chrom	0,0158	0,01283	0,00731	0,05	0,05	-
Mangan	0,00022	0,00028	0,00042	0,05	0,05	0,05
Wanad	0,00675	0,01533	0,01994	-	1,0	-
Miedź	0,00827	0,01197	0,01046	2,0	0,05	0,02
Tal	0,00079	0,00115	0,000194	-	-	-
Arsen	0,00134	0,0021	0,00168	0,01	0,05	0,01
Kadm	0,00003	0,00004	0,00005	0,005	0,005	0,001
Kobalt	0,00118	0,00074	0,000459	-	-	-
Nikiel	0,00156	0,00138	0,00165	0,02	0,05	-
Ołów	0,00198	0,00164	0,00042	0,025	0,05	-
Rtęć	0,0003	0,0004	0,0004	0,001	0,001	0,0005
Cynk	0,01173	0,01913	0,01403	-	3	0,5

Tabela 2  
Zawartość metali ciężkich w wyciągach wodnych z próbki betonowej (ciecz pH = 7)

Metal Ciężki	Stężenie metali ciężkich wyrażone w mg/dm <sup>3</sup>					
	Wyciąg wodny z betonu na cemencie:			Wartość dopuszczalna dla wód pitnych [14]	Wody grupy A1 [15]	
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R	CEM III/B 32,5N		Wartość dopuszczalna	Wartość zalecana
Chrom	0,0155	0,01235	0,00729	0,05	0,05	-
Mangan	0,00023	0,00031	0,00041	0,05	0,05	0,05
Wanad	0,00848	0,0143	0,02241	-	1,0	-
Miedź	0,00781	0,00992	0,008714	2,0	0,05	0,02
Tal	0,00073	0,00306	0,00013	-	-	-
Arsen	0,00111	0,00197	0,00186	0,01	0,05	0,01
Kadm	0,00002	0,00003	0,00004	0,005	0,005	0,001
Kobalt	0,00097	0,00072	0,00035	-	-	-
Nikiel	0,00333	0,00136	0,00081	0,02	0,05	-
Ołów	0,00181	0,001452	0,00037	0,025	0,05	-
Rtęć	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,001	0,0005
Cynk	0,01169	0,01558	0,01746	-	3	0,5



Rys. 2. Wartość pH wyciągów wodnych z prób betonowych w czasie 64 dni

Fig. 2. PH value water extract from concrete samples after 64 days

### 3.3. Omówienie wyników badań

Analizując uzyskane wyniki badań stwierdzono, iż ilość uwalnianych metali ciężkich z betonów jest śladowa. Różnice w poziomie wymywalności większości pierwiastków dla prób umieszczonych w wodzie o pH 4 i 7 są podobne (tabela 1 i 2). Uogólnienie to nie dotyczy wymywalności miedzi, chromu i rtęci. Poziom uwalniania się miedzi jest zdecydowanie mniejszy dla prób przygotowanych na CEM II/B-V 32,5R oraz CEM III/B 32,5N i umieszczonych w wodzie o pH = 7 w porównaniu z próbkami znajdującymi się w wodzie zakwaszanej do pH = 4. Natomiast poziom uwalniania się rtęci jest wyższy w wodzie zakwaszonej do pH = 4 w porównaniu do próbek przebywających w wodzie o pH = 7 (niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu). Porównując uzyskane wyniki wymywalności metali ciężkich z betonu w zestawieniu z dopuszczalnymi wartościami stężeń metali ciężkich w wodach grupy A1 (wody powierzchniowe, wymagające prostego uzdatniania fizycznego – głównie filtracji oraz dezynfekcji) oraz dla wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi (tabela 1 i 2) [9, 8], nie obserwuje się żadnych przekroczeń, a wręcz można powiedzieć, że wymywalność metali ciężkich z betonu jest na znacznie niższym poziomie niż dopuszczalna w cytowanych dokumentach.

Bardzo małą zawartość metali ciężkich uwalnianych z betonu należy przede wszystkim wiązać z właściwościami immobilizacyjnymi kompozytów cementowych, dzięki czemu są trwale wiązane przez tworzące się uwodnione krzemiany (faza CSH) i gliniany wapnia [7, 3]. Znaczna część metali ciężkich jest także trwale wbudowana, głównie w fazie szklistej składników głównych cementu (klinkieru portlandzkiego, granulowanego żużla wielkopieczowego oraz popiołu lotnego) [3, 4].

Również wysoka wartość odczynu pH, utrzymująca się w porach stwardniałych kompozytów cementowych (część wodorotlenku wapnia oraz związki sodu i potasu

rozpuszczają się i jest to przyczyną wysokiego pH pobranych wyciągów w trakcie prowadzonych badań), ma znaczący wpływ na ilość uwalnianych z betonu metali ciężkich. Większość metali ciężkich w środowisku zasadowym tworzy trudno rozpuszczalne wodorotlenki [3]. Z rys. 2 wynika, że wyciągi wodne mają różne pH w zależności od rodzaju zastosowanego cementu. Najniższe wartości pH uzyskano w wyciągach wodnych dla cementu hutniczego CEM III/B 32,5N, a najwyższe dla cementu portlandzkiego CEM I. Związane jest to głównie z zawartością klinkieru cementowego w składzie cementu. W trakcie procesów hydratacji faz krzemianowych jednym z produktów jest wodorotlenek wapnia  $\text{Ca(OH)}_2$ . Zmniejszenie ilości klinkieru skutkuje niższą ilością wydzielonego  $\text{Ca(OH)}_2$ . Dodatki mineralne (popiół, żużel) reagują z  $\text{Ca(OH)}_2$ , co również może być przyczyną niższego pH w porach betonu [5]. Szczególnie jest to widoczne w późniejszych okresach twardnienia betonu (rys. 2).

#### 4. Wnioski

Na podstawie wykonanych testów wymywalności metali ciężkich z betonu można stwierdzić, że:

- poziom uwalniania się metali ciężkich z betonu jest na bardzo niskim poziomie, niezależnie od tego z jakiego rodzaju cementu beton został wykonany;
- obniżenie odczynu cieczy wymywającej do poziomu  $\text{pH} = 4$  nie spowodowało znaczących zmian w ilości uwalnianych metali ciężkich z betonu;
- rodzaj zastosowanego cementu ma wpływ na poziom odczynu (pH) uzyskanego wyciągu wodnego.

Reasumując można stwierdzić, że beton jest materiałem przyjaznym dla środowiska naturalnego. Ciągły kontakt elementów betonowych z wodami gruntowymi nie stwarza zagrożenia związanego z pogorszeniem się ich jakości na skutek wymywania się metali ciężkich z jego powierzchni.

**LITERATURA**

1. Dijkstra J. J., Van der Sloot H. A., Spanka G., Thielen G.: How to judge release of dangerous substances from construction products to soil and groundwater. ECN-C-05-045.2005.
2. Greuner M.: Korozja i ochrona betonu. Arkady, Warszawa 1983.
3. Król A.: Immobilizacja metali ciężkich w matrycach wykonanych ze spoiw mieszanych. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2003.
4. Król A., Jagoda D.: Uwalnianie metali ciężkich z konstrukcji betonowych do środowiska naturalnego. V Konferencja MATBUD, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
5. Król A., Giergiczny Z.: Beton a środowisko naturalne. IX Konferencja Naukowo – Techniczna, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2005, s. 132-141.
6. Neville A. M.: Właściwości betonu. Arkady, Warszawa 1977.
7. Peukert S.: Cementy Powszechnego użytku i specjalne – podstawy produkcji, właściwości i zastosowanie. Polski Cement, Kraków 2000.
8. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 listopada 2002 roku w sprawie wymagań jakim powinny odpowiadać wody powierzchniowe wykorzystywane do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia.
9. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 roku w sprawie wymagań dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. DzU nr 61, poz. 417.
10. Umweltbundesamt: Implementation of Health and Environmental Criteria In Technical Specifications for Construction Products. Dessau 2006.
11. EA NEN 7375:2004 „Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test. The Tank Test”.
12. NEN 7345 (1995) „Leaching tests-Determination of the leaching behaviour of inorganic components from building monolithic waste materials with the diffusion test”.
13. PN-EN 206-1:2003 „Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.
14. PN-EN 12457-4:2006 „Charakteryzowanie odpadów. Wymywanie. Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów. Część 4: Jednostopniowe badanie porcjowe przy stosunku cieczy do fazy stałej 10l/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 10 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości)”.
15. PrCEN/TS 14429:2004 „Characterisation of waste – Leaching behaviour tests – Influence of pH on leaching with initial acid/base addition”.
16. [www.polskicement.pl](http://www.polskicement.pl).