

Ocena oddziaływania autoklawizowanego betonu komórkowego na środowisko naturalne – uwalnianie substancji szkodliwych

Evaluation of the impact of autoclaved aerated concrete on the natural environment based on leaching of harmful substances

1. Wstęp

Troska o środowisko naturalne powoduje, że przy podejmowaniu decyzji o zmianach metod produkcji oraz zmianach surowców stosowanych w technologii materiałów budowlanych należy dokonać dogłębnej i krytycznej analizy ich wpływu na potencjalnie zagrożone ekosystemy, z którymi materiały te pozostają w długotrwałym kontakcie. Zagadnienie to dotyczy również autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), zwłaszcza wtedy, gdy znacznym zmianom ulega skład surowców stosowanych do jego produkcji.

Celem pracy było określenie wymywalności z ABK metali toksycznych, a mianowicie Cd, Ni, Pb, Zn, Cu, Cr, As [półmetal], Hg oraz jonów siarczanowych, gdyż substancje te migrując z konstrukcji budowlanych wykonanych z ABK lub z jego gruzu zdeponowanego na składowisku odpadów, do środowiska wodnego oraz gleby, w wyniku kontaktu z wodami opadowymi bądź gruntowymi, mogą stanowić zagrożenie dla środowiska naturalnego. Trzeba podkreślić, że wymienione metale oraz arsen stanowią poważne zagrożenie środowiska ze względu na ich toksyczne oddziaływanie, nie tylko na poszczególne elementy środowiska, ale również na bioakumulację w łańcuchu pokarmowym ludzi i zwierząt (1). Są one czynnikami mutagennymi i kancerogennymi. W kontakcie z otoczeniem ulegają zwykle związaniu z cząstkami fazy stałej, stanowiącymi zarówno organizmy żywe, jak i gleby oraz roślinność, a ich usunięcie bądź zmniejszenie ich zawartości może być bardzo trudne, lub praktycznie niewykonalne (2). Europejski system norm nie określa dopuszczalnych stężeń metali ciężkich w cementach i ich pochodnych. Wyjątkiem jest jedynie chrom Cr⁶⁺, którego zawartość w cementach nie powinna przekraczać 2 ppm. (3, 4). Metalom ciężkim przypisuje się rolę stymulatorów lub czynników hamujących procesy życiowe. W zależności od stężenia, stopnia utlenienia i łatwości tworzenia kompleksów, metale mogą stać się czynnikami toksycznymi dla wszystkich organizmów żywych (drobnoustroje, rośliny, zwierzęta, ludzie). Toksyczność tych metali wynika nie tylko ze stopnia skażenia środowiska, ale także z ich biochemicznej roli, jaką spełniają w procesach metabolicznych oraz

1. Introduction

It is essential to evaluate the environmental consequences of the changes in production and /or the modification of the raw materials used in the manufacture of building materials. This is especially important because leaching of toxic materials can have substantial long-term effects on ecosystems. In the present study, the focus is on the possible environmental consequences resulting from changes in the composition of the raw materials used to manufacture autoclaved aerated concrete (AAC).

This study focuses on the leaching of toxic metals such as Cd, Ni, Pb, Zn, Cu, Cr, As, Hg as well as sulphate ions from AAC. These species can be hazardous to the natural environment while migrating from building structures made of AAC or from concrete debris disposed in landfills into aqueous medium and soil, as a result of contact with rainwater or groundwater. It is worth to stress that the above metals make a considerable hazard to the natural environment not only because of their toxic effect on particular components of the environment, but also due to their accumulation in the food chain of people and animals (1). Heavy metals are often mutagenic or carcinogenic agents. While in contact with their environment, they usually combine with solids such as living organisms, soil and plants which makes their removal from the environment, or even their reduction in concentration very difficult, if not infeasible (2). The system of European Standards does not specify permissible concentrations of heavy metals in cements or their derivatives. The only exception is the concentration of Cr⁶⁺, which must not exceed 2 ppm for cements in common use (3, 4). Heavy metals are recognized as stimulators or retardants of living processes. Depending on their concentration, oxidation state and ability to form complexes, these species may affect many metabolic processes, when they are absorbed by living organisms. Thus, they have detrimental effects on organisms ranging from microorganisms to plants, animals and people. The toxicity of these metals results not only from the extent of environmental pollution, but also from their biochemical role played in metabolic processes and from

ze stopnia wchłaniania i wydalania ich przez organizmy żywe. Rośliny są głównym odbiorcą składników mineralnych z gleby, wód, w tym niebezpiecznych metali a jednocześnie głównym ich źródłem w pożywieniu dla ludzi i zwierząt.

Wykazano, iż poziom uwalniania toksyn z betonu jest bardzo niski. Można wyróżnić szereg czynników fizycznych i chemicznych mających wpływ na poziom wymywalności metali ciężkich z betonu. Szczególnie ważną rolę w procesie ich wiązania w strukturze betonu przypisuje się fazie C-S-H, która jest podstawowym składnikiem stwardniałego zaczynu cementowego. Czynniki, które decydują o immobilizacji metali ciężkich w C-S-H są przede wszystkim: mała przepuszczalność tego żelu utrudniająca migrację zaadsorbowanych substancji, duża zdolność adsorpcji jonów oraz obecność porów żelowych (5, 6).

Poza właściwościami stwardniałych betonów na poziom uwalniania metali ciężkich wpływają także warunki ekspozycji, jakim jest poddawany ten materiał oraz kształt i wielkość elementów budowlanych. Określenie postaci, w jakiej będzie stosowany beton i warunków środowiskowych, jakim będzie poddany w czasie eksploatacji, jest ważne ze względu na wytypowanie właściwej metody przeprowadzenia badań wymywalności. Uwalnianie metali ciężkich z betonu może bowiem być spowodowane wymywaniem z powierzchni, jak i rozpuszczaniem, perkolacją czy też dyfuzją. Inny będzie poziom wymywania dla metali ciężkich w przypadku form monolitycznych pozostających w ciągłym kontakcie z wodą, a inny dla tych samych form, ale będących w nieustannym kontakcie z glebą.

2. Materiały

Autoklawizowane betony komórkowe, które poddane zostały badaniom pochodziły z 4 polskich zakładów należących do jednego koncernu i dostarczone zostały w postaci sześciennych bloczków o wymiarach 10x10x10 cm, każdy. Dla poszczególnych zakładów były to:

- zakład „A”- beton wyprodukowany w technologii bezprzemiałowej (SW), w której spoiwem była mieszanina wapna i cementu, zaś kruszywem był piasek, a oprócz tych składników dodawano gips; zbadanych zostało 7 odmian (klasyfikacja w zależności od gęstości objętościowej) tego materiału: 300, 350, 400, 500, 550, 600 i 700;
- zakład „B”- beton otrzymany w technologii PGS, w której spoiwo składało się z mieszaniny popiołu lotnego i wapna, oraz dodatek gipsu, a kruszywem był popiół lotny; odmiany: 400, 500 i 600;
- zakład „C”- beton wywarzany zgodnie z technologią UNIPOL, w której spoiwo stanowiły cement i wapno, a kruszywem był piasek; odmiany: 500 i 600;
- zakład „D”- beton komórkowy produkowany według technologii bezprzemiałowej (SW), w której spoiwem była mieszanina cementu i wapna, natomiast kruszywem był piasek; odmiany: 500 i 600.

the degree of their absorption and expelling by living organisms. Plants are the main consumers of mineral components (including hazardous metals) from soil and water, and at the same time their main source in food consumed by people and animals.

It was proved that the level of the release of toxic substances from concrete is very low. There are several physical and chemical factors that determine the level of leaching of heavy metals from concrete materials. A particularly important factor in the binding of the metals into the concrete structures is ascribed to the C-S-H phase, which is the basic component of hardened cement paste. The main factors that cause the heavy metals to be immobilised in the C-S-H are: low permeability which retards migration of adsorbed substances, high capability of adsorbing ions and the presence of gel pores (5, 6).

In addition to inherent properties of the concrete itself, the level of the release of heavy metals is also influenced by the conditions to which the concrete is exposed and the size and shape of the building structure. The determination of the form in which the concrete will be used and the environmental conditions to which it will be exposed are crucial in designing the leaching experiments. The reason is that the release of heavy metals from concrete may be a result of several factors including leaching from the surface of the concrete, dissolving, percolation or diffusion. Furthermore the extent of release of heavy metals will be quite different for monoliths that are constantly in contact with water as opposed to those which are constantly in contact with the soil.

2. Materials

The materials studied were AAC originating from four factories belonging to one company. All of the samples were supplied as cubes (10 cm x 10 cm x 10 cm). The AAC composition is as follows:

- Factory “A” – concrete manufactured using non-grinding technology (SW) in which the binder is a mixture of lime and cement, with sand as an aggregate and with gypsum addition. Seven different volume densities were investigated: 300, 350, 400, 500, 550, 600 and 700.
- Factory “B”- employing PGS technology in which the binder consisted of a mixture of fly ash, lime, with fly ash as the aggregate and with gypsum addition. The varieties studied were: 400, 500 and 600.
- Factory “C” – employing UNIPOL technology in which the concrete was prepared using cement and lime as the binder and sand as the aggregate. The varieties studied were: 500 and 600.
- Factory “D” – employing SW technology. The binder is a mixture of cement and lime with sand as the aggregate. The varieties studied were: 500 and 600.

2. Metody badań

Przygotowanie próbek było zgodne z wymaganiami norm: PN-EN 12457-2:2006 „Charakteryzowanie odpadów - Wymywanie - Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów - Część 2: Jednostopniowe badanie porcjowe przy stosunku cieczy do fazy stałej 10 l/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 4 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości)” oraz PN-EN 13657:2006 „Charakteryzowanie odpadów. Roztworzenie do dalszego oznaczania części pierwiastków rozpuszczalnych w wodzie królewskiej”.

Ługowanie przeprowadzono na 100 gramach rozdrobnionego materiału, o uziarnieniu mieszczącym się w przedziale od 1 do 4 mm, (frakcje 1-2 mm i 2-4 mm zostały wymieszane w stosunku 1:1). Powstałe w czasie rozdrabniania części pylaste (mniejsze od 0,063 mm) po roztworzeniu wykorzystano do określenia całkowitej zawartości metali ciężkich.

3. Wyniki badań

Oznaczenie stężenia jonów metali ciężkich oraz arsenu, wykonywano spektrometrem masowym Perkin Elmer ICP-MS ELAN DRC-e oraz spektrometrem emisyjnym Perkin Elmer ICP-OES Optima 2100DV. Rodzaj stosowanego spektrometru był dobrany do poziomu stężeń analitu w próbce. Anality, których stężenia sięgały mg/l oznaczono za pomocą metody ICP-OES (atomowa spektrometria emisyjna z indukcyjnie sprzężoną plazmą), a niższe stężenia za pomocą metody ICP-MS (spektrometria mas z indukcyjnie sprzężoną plazmą). Zawartość siarczanów (VI) oznaczono metodą grawimetryczną z wykorzystaniem chlorku baru (wg normy PN-ISO 9280).

Tablica 1 / Table 1

ZAWARTOŚĆ PIERWIASTKÓW TOKSYCZNYCH W ELUATACH PRÓBEK ABK W MG/L OZNACZONE METODĄ ICP-MS

CONCENTRATIONS OF TOXIC METALS AND ARSENIC IN ELUATES FROM AAC SAMPLES AS DETERMINED BY ICP-MS TECHNIQUE

Próbka / Sample	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
A 300	30,0	<1,5	<1,5	14	0,2	<0,03	0,20	<0,3
A 350	4,3	25,5	5,0	<6	1,1	<0,03	0,18	<0,3
A 400	0,6	12,5	4,0	<6	1,0	<0,03	0,13	<0,3
A 500	15,5	18,5	4,1	<6	2,0	<0,03	0,07	<0,3
A 550	0,7	16,2	5,0	<6	1,5	<0,03	0,27	<0,3
A 600	0,5	9,6	4,0	<6	0,7	<0,03	0,10	<0,3
A 700	<0,3	<1,5	<1,5	<6	0,2	<0,03	0,2	<0,3
B 400	61,3	10,2	3,1	8	4,6	0,14	<0,03	<0,3
B 500	39,5	10,3	3,1	8	3,4	0,11	0,04	<0,3
B 600	<0,3	<1,5	<1,5	9	0,2	<0,03	0,2	<0,3
C 500	17,6	2,1	<1,5	<6	2,0	<0,03	1,86	<0,3
C 600	5,0	2,2	<1,5	10	4,3	<0,03	0,18	<0,3
D 500	7,2	3,2	<1,5	<6	1,2	<0,03	0,06	<0,3
D 600	<0,3	<1,5	<1,5	<6	0,2	<0,03	0,2	<0,3

3. Methods

The procedure for sample preparation conformed to standards PN-EN 12457-2:2006 “Characterisation of waste – Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 2: One-stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction)” and PN-EN 13657:2006 “Characterization of waste. Digestion for subsequent determination of water soluble portion of elements”.

In each case, leaching was performed on 100 grams of ground material of particle size in the range from 1 to 4 mm (fractions 1–2 mm and 2–4 mm were mixed in the ratio of 1:1). Dust particles (below 0.063 mm) that were formed during grinding, were used for the determination of total content of heavy metals after their dissolution.

4. Results

The determination of heavy metals as well as arsenic was carried out on an ICP mass spectrometer Perkin Elmer ICP-MS ELAN DRC-e and an ICP optical emission spectrometer Perkin Elmer ICP-OES Optima 2100 DV. The type of spectrometer was chosen according to the elements concentration level in a sample. The elements with concentration of order of mg/l were measured by means of ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry) and those of lower concentration by means of ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry). Sulphate(VI) content was determined gravimetrically using barium chloride in compliance with the standard PN-ISO 9280.

Results of the determination of toxic metal content present in the eluates from samples of autoclaved aerated concrete are shown in Table 1.

Oznaczenia zawartości metali toksycznych obecnych w eluatach z próbek autoklawizowanego betonu komórkowego podano w tabelicy 1.

Wśród pierwiastków toksycznych wylugowanych z betonu dominowały nikiel, chrom, cynk i arsen. Próbki betonu komórkowego pochodzące z tego samego zakładu, w zależności od gęstości objętościowej wyrobu, uwalniały różne ilości metali ciężkich. Przeważnie lżejsze odmiany uwalniały minimalnie większe ilości toksyn, ale nie jest to ustaloną regułą.

Głównymi kryteriami, według których oceniano szkodliwość badanych próbek betonu było Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 w sprawie kryteriów oraz zasad dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz. U. z dnia 28 września 2005) oraz Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 roku, które dotyczy warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego.

W tabelicy 2 zestawiono wartości wymywalności metali ciężkich z betonów komórkowych z granicznymi dopuszczalnymi wartościami wymywania dla odpadów przeznaczonych do deponowania na składowiskach odpadów różnego typu.

Wymywalność chromu z próbki B 400 oraz rtęci z próbki C 500 nie spełniły wymogów dopuszczenia do kierowania gruzu tych ABK na składowiska odpadów obojętnych. W celu określenia możliwości kierowania gruzu z pozostałych ABK na wspomniane wcześniej składowisko, konieczne było zbadanie wymywalności siarczanów.

From the studied elements nickel, chromium, zinc and arsenic were the most abundant. Different cellular concrete samples from the same factory released different amounts of heavy metals, depending on volume density of a product. Less dense varieties usually released greater quantities of toxic components, however, it was not a general rule.

The main criteria for the evaluation of harmfulness of the concrete samples investigated were based upon the Directive of the Minister of Economy and Labour of September 7, 2005 on criteria and procedures for waste disposal in a waste landfill of a particular type (Journal of Laws of the Republic of Poland, September 28, 2005) and the Directive of the Minister of Environment of July 24, 2006, which concerns the conditions to be met while dumping sewage into waters and the ground as well as toxic substances of particular harmfulness to aqueous environment.

In Table 2, the values of leaching of heavy metals from cellular concretes were compared with the maximum permissible values of leaching for waste intended for disposal in waste landfills of different types.

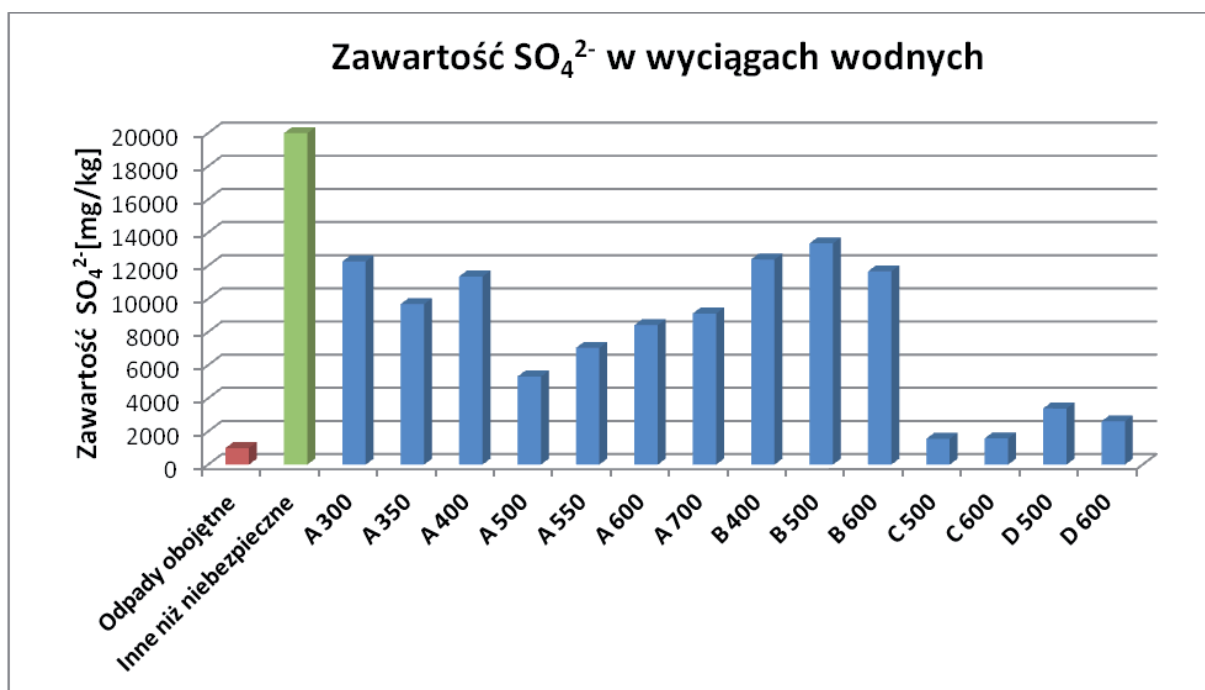
The quantities of chromium leached from the sample B 400 and mercury leached from the sample C 500 did not meet requirements for their disposal in inert waste landfills. In order to determine the possibility for disposal of other samples, it was necessary to evaluate sulphate concentrations in the eluates. Concentrations of sulphates(VI) in eluates are presented in Fig. 1. The obtained values were compared with the maximum permissible values for inert waste and waste other than hazardous.

Comparison of leachable sulphates (VI) with the maximum permissible values given in the Directive of the Minister of Economy and

Tablica 2 / Table 2

WYMYWALNOŚĆ PIERWIASTKÓW TOKSYCZNYCH W PORÓWNANIU Z WARTOŚCIAMI GRANICZNYMI DLA SKŁADOWISK ODPADÓW
LEACHING OF TOXIC METALS COMPARED TO MAXIMUM PERMISSIBLE VALUES FOR WASTE LANDFILLS

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
Odpady inne niż obojętne i niebezpieczne Waste other than inert and hazardous	10	10	50	50	2	1	0,02	10
Odpady obojętne / Inert waste	0,5	0,4	2	4	0,5	0,04	0,01	0,5
A 300	0,3	<0,015	<0,015	0,14	0,002	<0,0003	0,002	<0,003
A 350	0,043	0,255	0,05	<0,06	0,011	<0,0003	0,0018	<0,003
A 400	0,006	0,125	0,04	<0,06	0,01	<0,0003	0,0013	<0,003
A 500	0,155	0,185	0,041	<0,06	0,02	<0,0003	0,0007	<0,003
A 550	0,007	0,162	0,05	<0,06	0,015	<0,0003	0,0027	<0,003
A 600	0,005	0,096	0,04	<0,06	0,007	<0,0003	0,001	<0,003
A 700	<0,003	<0,015	<0,015	<0,06	0,002	<0,0003	0,002	<0,003
B 400	0,613	0,102	0,031	0,08	0,046	0,0014	<0,0003	<0,003
B 500	0,395	0,103	0,031	0,08	0,034	0,0011	0,0004	<0,003
B 600	<0,003	<0,015	<0,015	0,09	0,002	<0,0003	0,002	<0,003
C 500	0,176	0,021	<0,015	<0,06	0,02	<0,0003	0,0186	<0,003
C 600	0,05	0,022	<0,015	0,1	0,043	<0,0003	0,0018	<0,003
D 500	0,072	0,032	<0,015	<0,06	0,012	<0,0003	0,0006	<0,003
D 600	<0,003	<0,015	<0,015	<0,06	0,002	<0,0003	0,002	<0,003



Rys. 1. Zawartość siarczanów (VI) w próbkach ABK w zestawieniu z wartościami granicznymi wymywania klasyfikującymi odpady na składowiska odpadów obojętnych lub innych niż niebezpieczne i obojętne

Fig. 1. Sulphate (VI) content in AAC compared to the maximum permissible values of leaching for waste classified as an inert waste and waste other than hazardous

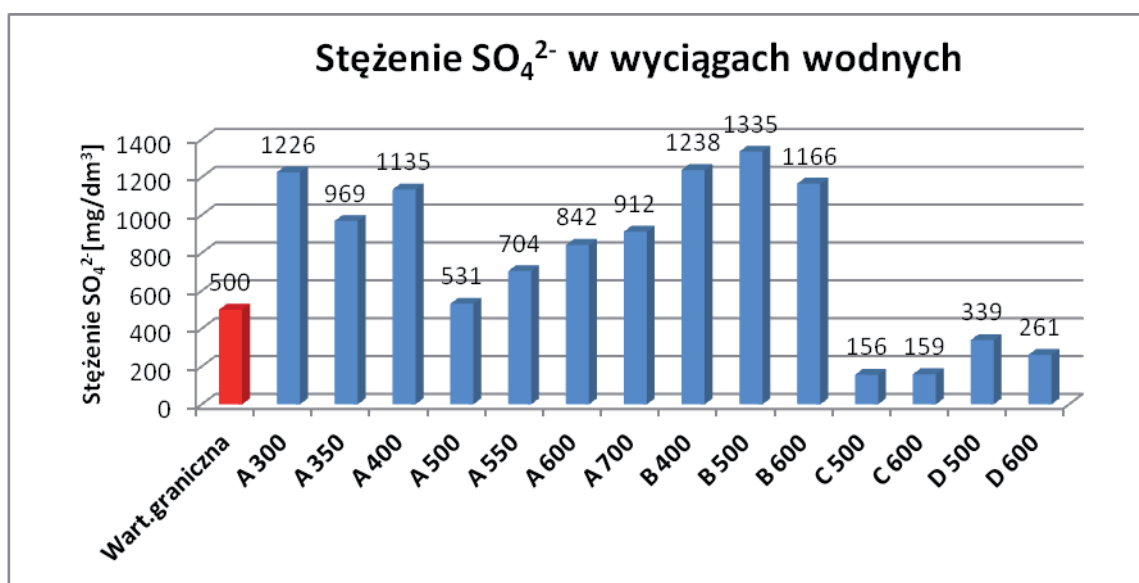
Stężenie siarczanów (VI) w eluatach przedstawiono na rysunku 1. Otrzymane wartości zestawiono z wartościami granicznymi dla odpadów obojętnych i inne niż niebezpieczne.

Porównanie zawartości wymywalnych siarczanów(VI) z umieszczonymi na rysunku 1 wartościami granicznymi, zaczerpniętymi z Rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 klasyfikującego odpady, pozwala stwierdzić, że wszystkie odmiany ABK nie spełniły kryterium dopuszczenia ich do składowania na składowisku odpadów obojętnych, ponieważ przekroczone zostały dopuszczalne wartości wymywania dla odpadu obojętnego. Natomiast nieprzekroczone zostało kryterium dopuszczenia do składowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

Porównanie wyników badań z kryteriami podanymi w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 w sprawie warunków, jakie są wy-

Labour of September 7, 2005 (Fig. 1) revealed that that none of AAC varieties met the criterion for disposal in inert waste landfill. In each case, the sulphate content exceeded the maximum permissible values for inert waste landfills. However, the criterion for the disposal in a landfill for waste other than hazardous and inert was not exceeded.

A comparison of results obtained in this study with the criteria presented in the Directive of the Minister of Environment (issued



Rys. 2. Stężenie siarczanów w ekstraktach wodnych próbek ABK w porównaniu z wartością graniczną w przypadku wprowadzania zanieczyszczeń do środowiska wodnego

Fig. 2. Concentration of sulphates in water extracts from AAC samples compared to the maximum permissible value for aquatic environment pollution

Tablica 3 / Table 3

WYMYWALNOŚCI PIERWIĄTKÓW TOKSYCZNYCH W PORÓWNIANIU Z DOPUSZCZALNYMI WARTOŚCIAMI WSKAŹNIKÓW ZANIECZYSZCZEŃ DLA SUBSTANCJI SZKODLIWYCH DLA ŚRODOWISKA WODNEGO

LEACHING OF TOXIC METALS COMPARED WITH THE MAXIMUM PERMISSIBLE VALUES FOR SUBSTANCES HARMFUL TO AQUEOUS ENVIRONMENT

Pierwiastek	Próbki ABK												Wartość graniczna		
	A 300	A350	A400	A500	A550	A600	A700	B 400	B 500	B 600	C 500	C 600		D 500	D 600
Cr	0,03	0,004	0,001	0,016	0,001	0,001	<0,0003	0,061	0,039	<0,0003	0,018	0,005	0,007	<0,0003	0,5
Ni	<0,0015	0,025	0,013	0,019	0,016	0,010	<0,0015	0,010	0,010	<0,0015	0,002	0,002	0,003	<0,0015	0,5
Cu	<0,0015	0,005	0,004	0,004	0,005	0,004	<0,0015	0,003	0,003	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	0,5
Zn	0,014	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	0,0078	0,0077	0,009	<0,006	0,0098	<0,006	<0,006	2
As	0,0002	0,0011	0,0010	0,0020	0,0015	0,0007	0,0002	0,0046	0,0034	0,0002	0,0020	0,0043	0,0012	0,0002	0,1
Cd	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00014	0,00011	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,2
Hg	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0002	<0,00003	0,000	0,0002	0,0019	0,0002	0,0001	0,0002	0,05
Pb	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,5
pH	10,74	10,38	11,4	10,75	11,12	10,89	10,26	11,18	11,50	10,43	10,76	10,93	10,15	9,77	6,5-12,5

Stężenie pierwiastka w eluacie, mg/dm³

on July 24, 2006) on the conditions to be fulfilled during sewage disposal to waters or ground as well as for substances particularly harmful to aqueous environment was given in Table 3.

Concentrations of toxic metals shown in Table 3 did not exceed the permissible values given in the Directive.

The sulphate (VI) contents from 1 kg of the sample dry mass are presented in Fig. 2. The values were compared with the maximum permissible value of sulphate (VI) concentration for sewage disposal to waters or the ground.

In ten of the eluates from samples of the "A" and "B" factories the permissible concentration of sulphates (VI) was exceeded. However, the sulphate contents for samples from factories "C" and "D" were within the permissible values for disposal.

5. The degree of toxic metal immobilisation as exemplified on the variety 500

The determination of total content of toxic metals in cellular concrete was carried out for 4 samples of variety 500 from each factory. The results are presented in Table 4 (metal concentration) and Table 5 (metal content in relation to sample dry mass).

The degree of toxic metal immobilisation in concrete block is shown in Table 6.

Arsenic and the metals present in AAC samples are effectively immobilised inside a concrete matrix. The results for the determination of the total mercury content may be underestimated because of the possible loss of volatile mercury during dissolution in water in an open system. For this reason, the data for mercury were omitted in the calculation to determine the extent of immobilisation of metals in AAC block. The most weakly immobilised metals was chromium.

6. Summary

The results of this study proves that leaching of toxic metals from autoclaved aerated concrete does not present a serious environmental hazard. The cellular concretes investigated can be disposed of in a landfill for waste other than hazardous and inert waste. (Classification according to criteria given in the Directive of the Minister of Economy and Labour of September 7, 2005). In the case of AAC debris, the disposal in inert waste landfills is unlawful because its leachability is too high compared to be appropriate for inert waste. The highest leaching of sulphates(VI) was found in concrete samples manufac-

magane przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego przedstawiono w tabeli 3.

Stężenia metali toksycznych przedstawione w tabeli 3 nie przekroczyły dopuszczalnych wskaźników podanych w rozporządzeniu.

Zawartości siarczanów (VI) przeliczone na 1kg suchej masy próbki pokazano na rysunku 2. Otrzymane stężenia porównano z wartością graniczną najwyższego dopuszczalnego stężenia siarczanów (VI), obowiązującego przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi.

Dopuszczalne stężenie siarczanów(VI) zostało przekroczone w przypadku dziesięciu eluatów (próbki z zakładów „A” i „B”). Stężenia niższe niż dopuszczalne uzyskano w próbkach pochodzących z zakładów „C” i „D”.

5. Stopień immobilizacji metali toksycznych na przykładzie odmiany 500

Całkowitą zawartość metali toksycznych w betonie komórkowym oznaczono w czterech próbkach odmiany 500, dla każdego zakładu. Wyniki oznaczeń przedstawiono w tabelach 4 (stężenia) i 5 (zawartości w przeliczeniu na suchą masę próbki).

Stopień unieruchomienia metali toksycznych w matrycy betonowej przedstawiono w tabeli 6.

Pierwiastki toksyczne zawarte w próbkach ABK są skutecznie związane w matrycy betonowej. Wyniki oznaczenia całkowitej zawartości rtęci w próbkach roztworzonych w wodzie królewskiej mogą być za niskie w związku z ulatnianiem się rtęci w czasie roztwarzania próbki w układzie otwartym, dlatego nie zostały uwzględnione w obliczeniach stopnia immobilizacji. Obliczony na ich podstawie stopień immobilizacji rtęci nie odpowiadałby rzeczywistemu poziomowi unieruchomienia tego pierwiastka w matrycy ABK. Najstabilniej związanym metalem był chrom.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wymywalności składników toksycznych z próbek ABK wykazały, że nie jest on materiałem niebezpiecz-

Tablica 4 / Table 4

STĘŻENIE PIERWIASTKÓW TOKSYCZNYCH W ROZTWORZONYCH PRÓBKACH ABK W µg/l
CONCENTRATIONS OF TOXIC METALS AND ARSENIC IN AAC SAMPLES

Próbka	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
A 500	470	270	760	1470	336	1,21	29,3	120
B 500	1010	1410	1600	3340	501	4,13	<0,2	1150
C 500	160	200	470	1040	609	1,97	<0,2	460
D 500	240	180	330	1540	634	1,83	<0,2	420

Tablica 5 / Table 5

ZAWARTOŚĆ PIERWIASTKÓW TOKSYCZNYCH W PRÓBKACH ABK W mg/kg, W PRZELICZENIU NA SUCHĄ MASĘ

CONTENTS OF TOXIC METALS AND ARSENIC IN AAC SAMPLES IN RELATION TO DRY MASS

Próbka	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
A 500	16	9	25	49	11	0,04	0,976	4
B 500	34	47	53	111	17	0,14	0,007	38
C 500	5	7	16	35	20	0,07	0,007	15
D 500	8	6	11	51	21	0,06	0,007	14

Tablica 6 / Table 6

STOPIEŃ IMMOBILIZACJI PIERWIASTKÓW TOKSYCZNYCH W ABK

THE DEGREE OF TOXIC METAL IMMOBILISATION IN AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

Pierwiastek Element	Próbki/Origin of samples			
	A 500	B 500	C 500	D 500
Immobilizacja / Immobilisation, %				
Cr	99,0	98,8	96,7	99,1
Ni	97,9	98,8	99,7	99,5
Cu	99,8	99,9	100,0	99,9
Zn	99,9	99,9	99,9	100,0
As*	99,8	99,8	99,9	99,9
Cd*	99,8	99,2	99,9	100,0
Hg*	-	-	-	-
Pb	99,9	99,9	99,9	99,9

* As, Cd i Hg oznaczono metodą ICP-MS, pozostałe metale za pomocą aparatury do ICP-OES

*As, Cd and Hg were determined by ICP-MS, whereas other metals by ICP-OES

tured with gypsum addition (from factories “A” and “B”). Moreover, in two cases (chromium for sample B-400 and mercury for sample C-500) the permissible values of heavy metal leachability for inert waste landfills were exceeded. In general, the examined samples released small amounts of harmful substances (in total, from 4.25 mg/kg in the case of C-600 to 48.48 mg/kg in that of A-350).

Comparison of toxic element concentrations in water extracts from AAC samples with those permissible by for aqueous environment pollution regulations (according to the Directive of the Minister Environment of July 24, 2006) has shown that concentrations of toxic metals and arsenic were within the permitted limits for all the AAC samples studied. Concentrations of sulphates exceeded

nym. Badane betony spełniały warunki dopuszczenia do magazynowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne (klasyfikacja według kryteriów zawartych w Rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy z 7 września 2005). W przypadku składowania ABK w postaci gruzu jest niedozwolone korzystanie ze składowiska odpadów obojętnych, ze względu na zbyt wysoką ługowalność siarczanów w odniesieniu do odpadu obojętnego. Największą wymywalność siarczanów(VI) wykazały próbki betonu zawierające dodatek gipsu (zakłady „A” i „B”). Ponadto, w dwóch przypadkach przekroczone zostały dopuszczalne wartości wymywalności chromu (próbka B-400) oraz rtęci [próbki C-500] dla odpadu obojętnego. Na ogół, zbadane próbki uwalniały niewielkie ilości substancji szkodliwych (łącznie od 0,19 mg/kg dla C-600 do 0,41 mg/kg dla A-350).

Porównanie stężeń pierwiastków toksycznych w ekstraktach wodnych z próbek ABK z wartościami dopuszczalnymi dla wskaźników zanieczyszczeń w przypadku środowiska wodnego (wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006) stwierdzono, że dla żadnej z próbek ABK stężenia pierwiastków toksycznych nie przekroczyły wartości dopuszczalnych. W dziesięciu próbkach ABK stężenia siarczanów przekroczyły poziom dopuszczalny, jedynie w przypadku próbek z zakładów „C” i „D” były niższe od dopuszczalnej wartości granicznej. Obliczony stopień immobilizacji metali toksycznych wynoszący średnio 99,53% okazał się bardzo wysoki.

Literatura / References

1. J. M. Pacyna, E. G. Pacyna, Metale ciężkie w środowisku jako problem ogólnoeuropejski. Metale ciężkie w środowisku: prace Instytutu Ekologii Terenów Uprzemysłowionych. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko. Białystok 2008.
2. J. Małolepszy, B. Kopia, Metody badań immobilizacji metali ciężkich w materiałach budowlanych, *Cement Wapno Beton*, **61**, s. 150-153 (1994).
3. M. Gawlicki, Beton a środowisko naturalne, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, **3**, s. 42-45 (2010).
4. W. Kurdowski, *Chemia cementu i betonu*, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
5. A. Król, D. Jagoda, Metody oceny oddziaływania betonu na środowisko, s. 245-254, *Dni betonu* 2008.
6. M. L. D. Gougar, B. E. Scheetz, D. M. Roy, Ettringite and C-S-H Portland Cement phases for waste ion immobilization: A Review, *Waste Management*, **16**, pp. 295-303 (1996).

permissible level in the case of ten AAC samples and were within the permissible values only for the samples from factories “C” and “D”. The calculated toxic metal immobilisation degree was equal to 99.53% on average.