

Drugie życie betonu

Zastosowanie gruzu budowlanego jako substytutu kruszywa naturalnego w mieszankach betonowych znajduje coraz szersze grono zwolenników. Przyczynami tak dużego zainteresowania tym tematem są względy ekonomiczno-ekologiczne. Wykorzystując gruz budowlany do betonu możemy ograniczyć zużycie coraz droższych kruszyw naturalnych, co jest równoznaczne z ograniczeniem negatywnego wpływu wywieranego przez eksploatację złóż naturalnych na środowisko.



foto: Archiwum

W Belgii, będącej europejskim liderem w tym obszarze, przetwarzane jest około 90% gruzu budowlanego, z czego 75% wykorzystywane jest jako niwelacje terenu, podbudowy oraz stabilizacje, natomiast 25% jako kruszywo do betonu. Również w Polsce zmiana obowiązujących norm dotyczących betonu (wdrożenie normy betonowej PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność) oraz kruszywo do betonu (PN-EN 12620 Kruszywo do betonu) spowodowała wzrost zainteresowania gruzem budowlanym jako substytutem kruszywa naturalnego.

Właściwości kruszywa z recyklingu

W krajach Unii Europejskiej prowadzone są prace nad ujednoczeniem wytycznych co do właściwości oraz obszaru zastosowania kruszywa z recyklingu. Wraz z wydaniem normy EN 933-11 „Test for geometrical properties of aggregates, Part 11: Classification test for constituents of coarse recycled aggregates” ujednoczony zostanie system oceny właściwości kruszywa z recyklingu. Obecnie kraje Unii Europejskiej posługują się wciąż własnymi wytycznymi wykorzystania przedmiotowych kruszyw. Na szczególną uwagę zasługują wytyczne RILEM (tabela 1) (International Union of Testing and Reserch Laboratories for Materials and Structures) oraz wytyczne niemieckie (tabela 2), które oprócz właściwości samych kruszyw podają także ich obszar zastosowania.

Według wytycznych RILEM, kruszywa z recyklingu można podzielić na trzy kategorie:

- RCAC I – materiał pochodzący z elementów murowych
- RCAC II – materiał pochodzący z elementów betonowych
- RCAC III – materiał stanowiący mieszaninę co najmniej 80% kruszywa naturalnego oraz maksymalnie 20% kruszywa z recyklingu.

Wytyczne niemieckie, jak również RILEM, ograniczają zastosowanie frakcji drobnych kruszyw pochodzących z recyklingu. Główną przyczyną tych ograniczeń jest wysoka wodożądność i nasiąkliwość drobnych frakcji, niska gęstość oraz znaczna ilość wprowadzanego wraz z nimi starego zaczynu cementowego. Badania kruszyw pochodzących z rozbiórki obiektu przemysłowego po ponad 30-letniej eksploatacji wykazały wartości gęstości oraz nasiąkliwości przedstawione w tabeli 3.

Nasiąkliwość kruszyw z recyklingu w znacznym stopniu przekracza średnie nasiąkliwości kruszyw naturalnych wynoszące ok. 1%. Różnice pomiędzy parametrami poszczególnych frakcji związane są m.in. z różną zawartością stwardniałego zaczynu cementowego, którego ilość jest uzależniona od granulacji gruzu betonowego (tabela 4).

Analizując przedstawione dane można stwierdzić, że najbardziej korzystne jest zastąpienie kruszywem z recyklingu frakcji grubych. Niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na właściwości betonu jest ilość oraz rodzaj zanieczyszczeń zawartych w kruszywie z recyklingu. Wpływ na wytrzymałość najbardziej szkodliwych zanieczyszczeń kruszywa wg badań przeprowadzonych w Japonii [4] został podany w tabeli 5.

Bardzo istotnym problemem jest zanieczyszczenie gruzu budowlanego szkłem.

Ze względu na swoją budowę krystalograficzną – brak uporządkowania dalekiego zasięgu – szkło łatwo wchodzi w reakcje z alkaliowymi pochodzącymi np. z cementu. W wyniku reakcji w obecności wilgoci tworzą się łatwo rozpuszczalne uwodnione krzemiany, które zwiększają swoją objętość. Jeżeli proces taki ma miejsce w stwardniałym betonie, prowadzi do rozsadzania struktury betonu i ostatecznie do destrukcji. Jednym z rozwiązań ograniczających ewentualne wystąpienie reakcji alkalicznej jest zastosowanie cementów z grupy NA oraz ograniczenie ilości cementu w 1 m³ mieszanki betonowej.

W przypadku zastosowania kruszyw z recyklingu należy pamiętać, iż cement nie jest jedynym podstawowym źródłem alkaliów w betonie, znaczne ilości alkaliów wprowadzane są wraz z gruzem pochodzącym z elementów betonowych. Z tego powodu najskuteczniejszą metodą uniknięcia wystąpienia szkodliwej reakcji jest zredukowanie do minimum zawartości szkła w gruzie budowlanym. Nie istnieje jednak wystarczająco skuteczna metoda separowania szkła z kruszywa, dlatego należy przed rozbiórką konstrukcji usuwać wszystkie elementy szklane.

Tabela 1. Wymagania stawiane kruszywom z recyklingu stosowanym do produkcji betonu wg RILEM [1]

Cecha kruszywa	RCAC I	RCAC II	RCAC III
Minimalna gęstość w stanie suchym [kg/dm ³]	1,500	2,000	2,400
Maksymalna nasiąkliwość wagowa [%]	20	10	3
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <2,200 kg/dm ³ [%]	-	10	10
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <1,800 kg/dm ³ [%]	10	1	1
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <1,000 kg/dm ³ [%]	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość materiałów obcych [%]	5	1	1
Maksymalna zawartość metali [%]	1	1	1
Maksymalna zawartość zanieczyszczeń organicznych [%]	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość ziaren <0,063mm [%]	3	2	2
Maksymalna zawartość ziaren <4mm [%]	5	5	5
Maksymalna zawartość siarczanów rozpuszczalnych wyrażona jako SO ₃ [%]	1	1	1

Mieszanka betonowa

Na etapie projektowania składu mieszanki betonowej konieczne jest uwzględnienie podwyższonej wodozgodności kruszywa z recyklingu. Ilość wody wynikająca ze wskaźnika w/s należy powiększyć o ilość wody, która zostanie zaabsorbowana w porach kruszywa i nie będzie brała udziału w reakcji hydratacji cementu. Stosując suche kruszywa należy liczyć się z dużą utratą konsystencji mieszanki betonowej w pierwszym 10 min od kontaktu wody z kruszywem (rysunek 1). Ze względu na dużą absorpcję składników płynnych mieszanki betonowej przez kruszywo podczas produkcji należy:

- wydłużyć czas mieszania
- uwzględnić dodatkową ilość wody zarobowej
- maksymalnie wydłużyć czas między dozowaniem wody zarobowej a dodaniem domieszki chemicznej, co pozwoli na ograniczenie absorpcji domieszki chemicznej na powierzchni kruszywa
- stosować kruszywo z recyklingu w stanie nasycyonym (wcześniejsze namoczenie wodą), uwzględniając techniczne możliwości produkcyjne

Niewystarczającą mrozoodporność kruszyw z recyklingu (wykonane w Laboratorium Materiałów Budowlanych Górażdże Cement SA w Strzelcach Opolskich badania mrozoodporności wykazały ubytek masy po badaniu wg PN-EN 1367-1 na poziomie 16%) do produkcji betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, powoduje konieczność stosowania domieszek napowietrzających, które zwiększają mrozoodporność betonu oraz stabilizują konsystencję mieszanki betonowej.

Stwardniały beton

Do niedawna uważano, że stosowanie kruszyw z recyklingu możliwe jest tylko w betonach niezbrojonych, osłoniętych przed oddziaływaniem środowiska w klasach wytrzymałościowych do C12/15. Prowadzone badania dowodzą, że kruszywa z odzysku można stosować również w betonach zbrojonych wysokich klas wytrzymałościowych, narażonych na bezpośrednie oddziaływanie środowiska. Kruszywa z recyklingu powodują zmiany właściwości stwardniałego betonu, które należy uwzględnić na etapie projektowania mieszanki betonowej. Ze względu na różne pochodzenie kruszyw z recyklingu nie istnieje precyzyjne określenie zależności między jego ilością a zmianami parametrów stwardniałego betonu. Ogólne trendy zmian spowodowanych wprowadzeniem kruszyw z recyklingu w odpowiednio zaprojektowanych mieszankach betonowych przedstawione zostały w tabeli 6.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych betonu, przeprowadzone w Laboratoriach Betotech Sp. z o.o. oraz Laboratorium Materiałów Budowlanych Górażdże Cement SA w Strzelcach Opolskich, ze zmienną zawartością kruszywa z recyklingu.

Duża ilość zączynu cementowego wprowadzanego wraz z kruszywem powoduje zwiększenie niebezpieczeństwa wystąpienia korozji betonu. Niebezpiecznymi rodzajami korozji są:

- korozja chlorkowa
- korozja siarczanowa
- reakcja alkaliczna.

Gruz betonowy ze względu na powszechne jeszcze kilka lat temu stosowane rodzaje domieszek przyspieszających wiązanie może stanowić źródło chlorków będących zagrożeniem dla stwardnia-

Tabela 2. Parametry oraz zawartości kruszywa z recyklingu wg wytycznych niemieckich [2]

Rodzaj kruszywa	Zawartość [%]						Maksymalna zawartość rozpuszczalnych chlorków [%] masy	Minimalna gęstość w stanie suchym kg/dm ³	Maksymalna nasiąkliwość masowa [%]	Maksymalna zawartość frakcji grubych kruszyw z recyklingu w [%] zawartości całkowitej kruszywa		
	Beton, naturalne kruszywo	Cegła	Tynk	Inne mineralne składniki ¹	Asfalt	Zanieczyszczenia ²				Beton zbrojony		Podbudowy stabilizacje ³
										Elementy wewnętrzne	Elementy zewnętrzne	
TYP I Kruszywo z betonu	≥90	≤10	≤10	≤2	≤1	≤0,2	≤0,4	2,000	10	50	40	100
TYP II Kruszywo z elementów budowlanych	≥70	≤30	≤30	≤3	≤1	≤0,5		2,000	15	40	-	100
TYP III Kruszywo z elementów murowych	≥20	≤80	≤5	≤5	≤1	≤0,5		1,800	20	40	-	100
TYP IV Kruszywo mieszane	≥80			≤20	≤1	≤0,15		1,500	-	-	-	100

¹ Na przykład beton lekki zaprawa budowlana, pumeks, beton komórkowy

² Na przykład szkło, ceramika, papier, gips, plastik, metal, drewno

³ Obejmuje również frakcje drobne

Tabela 3. Wartość nasiąkliwości kruszywa z recyklingu pochodzącego z rozbiórki obiektu przemysłowego

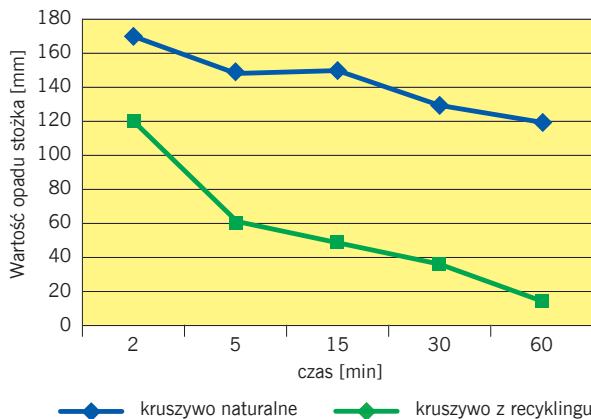
Fracja	Gęstość w stanie wysuszonym [kg/dm ³]	Nasiąkliwość [%mas.]
2/4	2,224	10,2
4/16	2,360	6,9

Tabela 4. Zawartość zączynu oraz zaprawy w poszczególnych frakcjach kruszywa z recyklingu [3]

Fracja	Zwartość w [%] masy kruszywa
0/0,3	65% – masa zączynu
0/4	20% – masa zączynu
4/8	60% – masa zaprawy
8/16	40% – masa zaprawy
16/31,5	20% – masa zaprawy

Tabela 5. Wpływ zanieczyszczeń na wytrzymałość betonu [4]

Składnik	Zawartość w mieszance kruszywowej [%]	Wpływ na wytrzymałość na ściskanie
tynk wapienny	7	Redukcja wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do betonu opartego na mieszance mineralnej pozbawionej zanieczyszczeń 15%
grunt	5	
drewno	4	
gips	3	
asfalt	2	
farby na bazie octanu winylu	0,2	



Rys. 1. Zmiana konsystencji w czasie mieszanki opartej na suchych kruszywach z recyklingu

tego zaczynu cementowego, jak również dla stali znajdującej się w żelbecie. Chlorki powodują powstawanie ekspansywnych zasadowych soli, rozkład fazy C-S-H, powstawanie opóźnionego etryngitu, a w przypadku obecności zbrojenia stwarzają warunki dla powstawania mikroogniw korozyjnych.

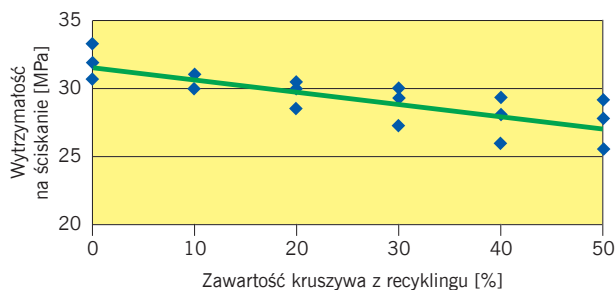
Zanieczyszczenie kruszywa gipsem może doprowadzić do wywołania reakcji składników betonu z jonami SO_4^{3-} , co powoduje powstawanie zwiększających na skutek przyłączenia cząstek wody produktów. W pierwszej fazie korozji powstawanie gipsu dwuwodnego, następnie monosiarczanoglinianu i siarczanoglinianu trójwapniowego.

Na chwilę obecną nie ma jednak odpowiednio udokumentowanych zależności między właściwościami oraz ilością zastosowanych kruszyw z recyklingu a odpornością korozyjną betonu.

Aspekty środowiskowe stosowania kruszyw z recyklingu

Poza oceną właściwości fizyko-mechanicznych wyrobów uzyskanych na bazie kruszywa pochodzącego z recyklingu betonu istnieje potrzeba oceny wpływu tak uzyskanego materiału na jakość środowiska naturalnego. Beton oparty na kruszywie z recyklingu wprowadzony do środowiska pozostaje w kontakcie z wszystkimi jego komponentami, a w szczególności z glebą oraz wodami powierzchniowymi. Jest to istotne, zwłaszcza kiedy kruszywo z recyklingu pochodzi z obiektów przemysłowych i stosowane jest do rekultywacji lub niwelacji terenu, stabilizacji w budownictwie drogowym itp.

Rosnące wymagania dla produktów konstrukcyjnych odnośnie określania ich wpływu na środowisko naturalne mają swoje odzwierciedlenie w pracach Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego [5-7]. Szczególny nacisk kładzie się w nich na ustalanie poziomu wymywania metali ciężkich z wyrobów betonowych. W przygotowaniu są także normy zawierające procedurę wy-



Rys. 2. Zmiana wytrzymałości betonów z kruszywem z recyklingu

konywania wyciągów wodnych z materiałów konstrukcyjnych, a także określające dopuszczalny poziom wymywalności z nich metali ciężkich.

Beton po kilkudziesięciu latach eksploatacji może być nośnikiem metali ciężkich. Należy więc przed przystąpieniem do wykorzystania gruzu betonowego określić, jak duża jest zawartość metali ciężkich i jaki jest ich poziom wymywania do środowiska naturalnego.

W celu oceny zawartości metali ciężkich w wyciągu wodnym z gruzu betonowego, a także z betonu wykonanego z kruszywa w części zastąpionego kruszywem z tego gruzu, przygotowano wyciągi wodne według procedury zawartej w normie 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 10 l/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 10 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości)*. Wybrana procedura badawcza oparta jest na wymywaniu metali ciężkich z odpadowego materiału, rozkruszonego do wymiarów ziaren poniżej 10 mm. Ciecz wymywająca kontaktuje się z dużą powierzchnią materiału. Metoda ta jest więc także właściwa do oceny wymywalności metali ciężkich po zakończeniu cyklu życia kompozytu betonowego.

Ilość metali ciężkich uwalnianych z gruzu betonowego przedstawiono w tabeli 7.

Oceniono także wymywalność metali ciężkich z betonu C16/20, w którym kruszywo naturalne frakcji 8/16 zostało zastąpione w 30% kruszywem z recyklingu. Po rozformowaniu próbki betonu przechowywano w warunkach laboratoryjnych, w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Jedną z próbek, po 28 dniach dojrzewania, poddano badaniu mrozoodporności (F 150 – 150 cykli zamrażania i rozmrażania). Po zakończonym badaniu mrozoodporności wykonano wyciągi wodne zarówno z próbki poddawanej zamrażaniu i rozmrażaniu oraz z próby „świadka”. Uzyskane ilości metali ciężkich wymywanych do wyciągu wodnego, w przeliczeniu na suchą masę materiału poddanego badaniu, przedstawiono w tabeli 8.

Ilość metali ciężkich uwalnianych z gruzu betonowego (tabela 7)

Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł Younga	Skurcz betonu	Penetracja wody pod ciśnieniem	Mrozoodporność ²⁾
↓	↓	↓	↑	↑	↔
Legenda: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> – zmiana 10-20% </div> <div style="text-align: center;"> – zmiana 20-50% </div> <div style="text-align: center;"> – brak zmian </div> </div> <p>1) w porównaniu do mieszanek betonowych opartych na kruszywie naturalnym 2) beton napowietrzony</p>					

Tabela 6. Ogólne trendy zmian w betonach z kruszywem z recyklingu¹⁾

oraz betonu wykonanego w oparciu o kruszywa z recyklingu (tabela 8) porównano do dopuszczalnych wartości wymywania metali ciężkich dla odpadów przeznaczonych do składowania na składowiskach odpadów obojętnych [8]. Należy podkreślić, że żadna z dopuszczalnych wartości wymywalności metali ciężkich nie została przekroczona w obydwu rozważanych przypadkach. Wprowadzenie gruzu betonowego jako kruszywa do betonu powoduje ponadto obniżenie poziomu wymywania metali ciężkich, co ma związek z właściwościami immobilizacyjnymi matrycy betonowych [9-11].

Poddanie działaniu niskich temperatur próbek betonu z kruszywem z recyklingu nie wpływa na znaczny wzrost wymywalności jonów metali ciężkich (tabela 8). Jest to ważne w przypadku aplikacji takiego betonu w obiektach inżynierskich pracujących w naturalnych warunkach środowiskowych, w których występują częste spadki temperatury poniżej 0°C. Mimo zmiennych warunków temperaturowych matryca betonowa na kruszywie z recyklingu pozostaje również bezpieczna pod względem wymywalności metali ciężkich do środowiska naturalnego.

Gruz betonowy, niemal w całości powstającej masy, trafia jednak na składowiska odpadów i tam jest często wykorzystywany jako materiał do wykonywania warstw przesypanych lub do budowy dróg dojazdowych na poszczególne kwatery. Takie wykorzystanie gruzu ma także korzystny wpływ na jakość odcieków powstających na składowiskach. Mineralne składniki gruzu, w środowisku wodnym, wykazują odczyn zasadowy, co znacznie utrudnia wymywanie metali ciężkich z masy pozostałych odpadów. Zasadowość odcieków przyczynia się bowiem do wytrącania trudno rozpuszczalnych wodorotlenków metali ciężkich. To oddziaływanie gruzu na składowisko będzie tym korzystniejsze, im większe będzie jego rozdrobnienie [12].

Podsumowanie

Stosowanie kruszywa z recyklingu do produkcji betonów towarowych, w związku z rosnącym naciskiem na aspekty ekologiczne, będzie stawać się coraz bardziej powszechne. Obserwowana zmienność właściwości fizyko-chemicznych tego kruszywa wymaga zwiększenia marginesu bezpieczeństwa podczas projektowania receptur mieszanek betonowych. Wyprodukowany w oparciu o kruszywa z recyklingu beton spełnia wszystkie wymagania związane z trwałością, jak również z oddziaływaniem na środowisko.

**mgr inż. Artur Gołda, Betotech Sp. z o.o.
dr inż. Anna Król, Politechnika Opolska**

Literatura

- 1 C. F. Hendricks and H. S. Pieterse, *Sustainable Raw Materials – Construction and Demolition Waste*, RILEM Report 22, RILEM Publication Series, F-94235 Cachan Cedex, France 1998
- 2 DIN 4226-100: *Aggregates for Concrete and Mortar*, February, 2002
- 3 Cz. Wolska-Kotańska: *Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu*, *Magazyn „Autostrady”*, nr 3/2005, s. 18-22

Tabela 7. Ilość uwalnianych metali ciężkich z gruzu betonowego

Metal ciężki	Uwalniana ilość, mg/kg s.m.	Dopuszczalne graniczne wartości wymywania dla odpadów przeznaczonych do składowania na składowiskach odpadów obojętnych [8], mg/kg s.m.
Miedź Cu	0,1	2,0
Nikiel Ni	0,3	0,4
Cynk Zn	0,1	4,0
Chrom Cr	0,27	0,5
Kadm Cd	0,03	0,04
Ołów Pb	0,45	0,5
Mangan Mn	<0,01	-
Kobalt Co	<0,01	-
Arsen As	0,43	0,5
Rtęć Hg	0,007	0,01

- 4 S. Nagasaki, A. Gokce, T. Saeki, *Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance of recycled Aggregate Concrete*, *CAN-MET/ACI International Conference Durability of Concrete*, pp. 51-62, Spain
- 5 Council Directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products (89/106/EEC)
- 6 CEN/TC 51 /WG12/TG6 *Release of substances (from hardened concrete and mortar) – Main procedural elements of draft testing schemes for release from reference concretes (new/unapproved constituents) or production concretes and mortars*
- 7 J. J. Dijkstra, H. A. van der Sloot, G. Spanka, G. Thielen: *How to judge release of dangerous substances from construction products to soil and groundwater*. ECN-C-05-045
- 8 Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu. Dz.U. nr 186/2005, poz. 1553
- 9 B. Batchelor: *Overview of waste stabilization with cement*. *Waste Management* 26 (2006), s. 689-698
- 10 F. P. Glasser: *Immobilization Potential of Cementitious Materials*. *Proceeding of the International Conference on Environmental Implication of Construction Materials and Technology Developments*, Maastricht 1994, s. 77-86
- 11 A. Król, W. Więcek, Z. Giergiczyński: *Społwa mineralne przeznaczone do immobilizacji metali ciężkich w popiołach ze spalania odpadów medycznych*, „Cement, Wapno, Beton”, nr 3/2005, s. 154-162
- 12 J. Rzechuła, J. Hupka, D. Sylwestrzak: *Gruz budowlany – wybrane właściwości i możliwości wykorzystania*. „Recykling”, nr 11/2004, s. 42-47

Tabela 8. Ilość metali ciężkich uwalniana do wyciągu wodnego z betonu na kruszywie z recyklingu

Metal ciężki	Beton C16/20 z kruszywem z recyklingu		Dopuszczalne graniczne wartości wymywania dla odpadów przeznaczonych do składowania na składowiskach odpadów obojętnych [8], mg/kg s.m.
	próba „świadek”	próba po badaniu mrozoodporności	
	ilość, mg/kg s.m.	ilość, mg/kg s.m.	
Miedź Cu	0,01	0,01	2,0
Nikiel Ni	0,07	0,12	0,4
Cynk Zn	0,01	0,01	4,0
Chrom Cr	0,13	0,19	0,5
Kadm Cd	0,025	0,028	0,04
Ołów Pb	0,24	0,35	0,5
Mangan Mn	<0,001	<0,001	-
Kobalt Co	0,009	0,004	-
Arsen As	0,065	0,085	0,5
Rtęć Hg	0,002	0,006	0,01



foto: Archiwum