



## **Wymywalność metali ciężkich z odpadów wiertniczych górnictwa gazu łupkowego**

*Justyna Kujawska, Wojciech Cel, Henryk Wasąg*  
*Politechnika Lubelska*

### **1. Wprowadzenie**

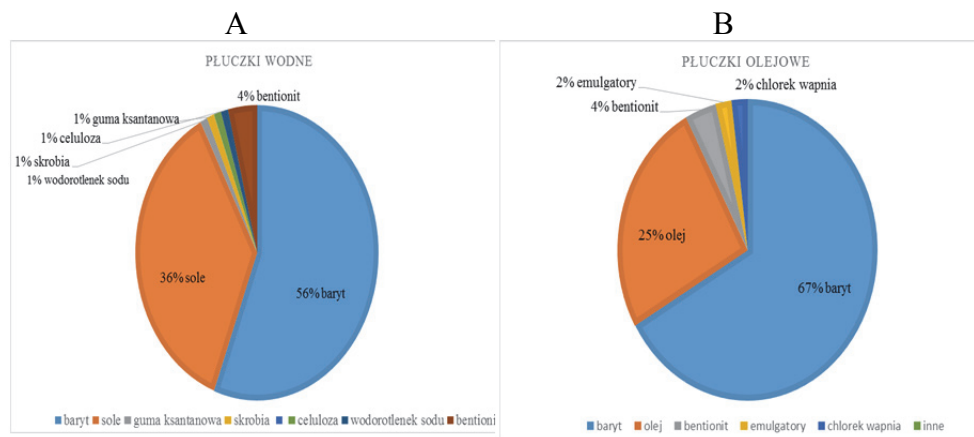
Wyczerpujące się złoża ropy naftowej i gazu ziemnego spowodowały wzrost zainteresowania poszukiwaniem i eksploatacją gazu łupkowego. Obecnie, zakładając, że wielkość popytu na gaz się utrzyma, udokumentowane złoża gazu ziemnego wystarczą na pokrycie tego zapotrzebowania przez następne 60 lat. Zdaniem Międzynarodowej Agencji Energetycznej (MAE), wykorzystanie złóż gazu niekonwencjonalnego wydłużyłoby ten okres do 250 lat (Szyjko 2011). Globalne zasoby gazu łupkowego szacuje się na ponad 200 bln m<sup>3</sup>. W Polsce zasoby te szacowane są na 5 bln m<sup>3</sup> (U.S. EIA). Gaz pozyskiwany z łupków ma olbrzymie możliwości na wprowadzenie trwałych zmian tak w polskim, jak i w europejskim sektorze energetycznym. Nasz kraj ma szansę stać się w pełni niezależny od importu gazu ziemnego z zewnątrz (Marianowski i in. 2013). Dodatkowo gaz łupkowy jest najczystszy z paliw kopalnych. Wzrost wydobywania gazu łupkowego zmniejszyłoby efekt cieplarniany w porównaniu z wydobywaniem konwencjonalnych paliw kopalnych (Duda i in. 2016). Wydobywanie gazu łupkowego to połączenie dwóch procesów wiercenia oraz szczelinowania hydraulicznego. Działania te mogą negatywnie oddziaływać na środowisko, ale rzeczywiste ryzyko nie jest dostatecznie rozpoznane. Problem w tym, że obie technologie wykorzystują znaczne ilości związków chemicznych i generują duże ilości odpadów ciekłych i stałych. Dlatego też metody poszukiwania i wydobywania gazu łupkowego powodują społeczne obawy. Mówi się, że Polska to nie Stany Zjednoczone, których wielkie terytorium i niezaludniona prze-

strzeń umożliwiającą bezkonfliktowe wykonywanie skomplikowanych prac wiertniczych z wykorzystaniem dużej ilości wody i chemikaliów. Odpady z górnictwa gazu łupkowego składają się głównie ze zwiercin, zużytej płuczki wiertniczej, płynu zwrotnego i innych produktów ubocznych (Annevelink i in. 2016).

Tylko w trakcie jednego wiercenia powstaje od 2500 do 6000 Mg odpadów wiertniczych. Jednak ich dokładna ilość i właściwości są zmienne dla każdego odwiertu i zależą od następujących czynników: głębokości i konstrukcji otworu, rodzaju przewiercanych skał, rodzaju płuczki wiertniczej i wykonywanych zabiegów (Macuda 2010). Zwierciny stanowią około 60% odpadów wiertniczych. Zawierają one głównie skały i łupki z rodzimego materiału z którego są wiercone i mogą być połączone z różną ilością zużytej płuczki wiertniczej. Płuczki wiertnicze są to złożone kompozyty drobnodispersyjnych ciał stałych, makromolekuł organicznych i nieorganicznych oraz cieczy. Stanowią one wieloskładnikowe mieszaniny zbudowane z płynnej fazy ciągłej, wodnej lub olejowej, z dodatkiem różnorodnych komponentów modyfikujących. W płuczkiach wiertniczych zawarte są składniki mineralne, syntetyczne związki organiczne, a także nieorganiczne związki chemiczne takie jak wodorotlenki i sole (Molenda & Steczko 2000). Płuczki zawierają znaczne ilości związków zwiększających lepkość (polimery, celuloza, guma ksantanowa i guma guar) oraz środki korekcyjne (baryt, węglany), reduktory (skrobia, celuloza, żywice) i inhibitory (glikol, chlorek potasu) (Fan i in. 2014). Przykładowy skład płuczek wiertniczych przedstawiają rysunki 1-2. Rysunek 1 przedstawia procentowy skład płuczek wiertniczych na bazie wody, natomiast rysunek 2 skład płuczek wiertniczych na bazie olejów.

Obecnie do sporządzania płuczek wiertniczych i cieczy zabiegowych stosowanych jest ponad 2000 różnych związków i substancji chemicznych (Starzycka 2012). Tak bogata gama stosowanych związków chemicznych przy pracach nad poszukiwaniem i eksploatacją gazu łupkowego może stanowić zagrożenie dla środowiska. Związki te mogą być uwalniane do środowiska poprzez wymywanie w trakcie składowania odpadów na składowiskach, magazynowania na ternie wiertni, czy też podczas ponownego wykorzystania. Pomimo, że większość odpadów wiertniczych nie jest zaliczana do grupy odpadów niebezpiecznych, to jednak potencjalnie mogą one stanowić problem środowiskowy ze względu na

wysoką zawartość soli, głównie chlorków i siarczanów. Jako niebezpieczne klasyfikowane są natomiast te odpady, które zawierają substancje ropopochodne oraz metale ciężkie



**Rys. 1.** Typowy skład płuczki wodnej (A), płuczki olejowej (B) (Strachan 2002)

**Fig. 1.** Typical composition of water- (A), and oil-based drilling mud (B) (Strachan 2002)

W Polsce w 2013 roku powstało około 80 000 Mg odpadów wiertniczych. Obecnie są one w większości składowane na składowiskach odpadów. Prowadzone są ciągłe poszukiwania metod zagospodarowania tego rodzaju odpadów zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju. Trwają też prace nad możliwością wprowadzania odpadów ciekłych z górnictwa gazu łupkowego do miejskich oczyszczalni ścieków (Babko 2016). Potrzebę racjonalnego zagospodarowania odpadów wiertniczych popiera fakt, że przy wierceniach na złożach niekonwencjonalnych, obszar górniczy o powierzchni 100 km<sup>2</sup> może być źródłem ponad 55 tys. m<sup>3</sup> zwierecin (Steliga & Uliasz 2012).

W Polsce brak jest ogólnie dostępnych badań i ich wyników nad wpływem na środowisko prac związanych z poszukiwaniem, uwalnianiem i eksploatacją gazu ziemnego z formacji łupkowych. Jedynym z nielicznych wyjątków jest raport PIG dotyczący badań aspektów środowiskowych procesu szczelinowania hydraulicznego wykonanego w Łebieniu. Nie przedstawia on jednak wyników badań odpadów wiert-

nicznych. Celowe więc było przeprowadzenie badań nad określeniem potencjalnej mobilności metali ciężkich z dwóch rodzajów odpadów wiertniczych: zwiercin z płuczką wodną i zwiercin z płuczką olejową.

## **2. Materiały i metody**

Do badań użyte zostały dwa rodzaje odpadów wiertniczych, a mianowicie zwiercina z płuczką wodną oraz zwiercina z płuczką olejową. Odpady zostały pobrane z obiektu unieszkodliwiania odpadów wiertniczych w Luchowie oraz z ternu odwiertu Miłocin. Analizowano wymywalność wybranych metali w jednostopniowym teście porcjowym (zgodnie z normą 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). Wyciągi wodne sporządzono w stosunku fazy stałej do cieczy 1 kg: 10 dm<sup>3</sup>.

Próbki odpadów wiertniczych (po 0,1 g) poddano mineralizacji w mieszaninie kwasów azotowego(V) i solnego (w proporcji HNO<sub>3</sub>:HCl wynoszącej 5:2), zaś próbki wyciągów wodnych (po 10 g) tylko w kwasie azotowym(V). Mineralizację wykonano przy użyciu mineralizatora Multiwave 3000 Solv Anton Paar. Proces mineralizacji trwał 45 minut w temperaturze 180°C i pod ciśnieniem 18 barów.

Analizę zawartości metali w odpadzie wiertniczym oraz w wyciągach wodnych wykonano metodą spektrometrii mas ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej ICP-OES JY 238 Ultrace (Jobin Yvon-Horriba Francja).

## **3. Wyniki badań**

Obecnie odpady wiertnicze są w głównej mierze deponowane na składowiskach odpadów, co może skutkować przenikaniem substancji niebezpiecznych do wód powierzchniowych i podziemnych oraz do gleb. Mając na uwadze pochodzenie i skład tego rodzaju odpadów największe zagrożenie wynika ze strony obecnych w nich metali ciężkich. W tabeli 1 przedstawiono średnie zawartości metali ciężkich w dwóch rodzajach

odpadów wiertniczych w przeliczeniu na kilogram suchej masy. Wyniki podano wraz z odchyleniem standardowym.

Ocenę zawartości metali ciężkich w badanych odpadach wiertniczych oparto na Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz.U. 2002 nr 165 poz. 1359). Rozporządzenie to określa dopuszczalny zakres stężenia metali ciężkich w glebie lub w ziemi. Zawartość baru w obydwu badanych odpadach wiertniczych znacznie przekracza dopuszczalne stężenia określone w Rozporządzeniu. Zwiększone stężenie baru jest wynikiem stosowania barytu jako środka obciążającego w płuczkach wiertniczych, który w płuczce olejowej stanowi około 70%, a w płuczce wodnej około 60%. Bar w płuczkach wiertniczych występuje jako siarczan baru, związek trudno rozpuszczalny i generalnie nie szkodliwy dla organizmów.

**Tabela 1.** Zawartość metali ciężkich w odpadach wiertniczych

**Table 1.** Content of metals in drilling waste

Metal ciężki	Zwierciny + płuczka wodna	Zwierciny + płuczka olejowa	Wartość dopuszczalnych stężeń dla terenów <sup>1</sup>	
			objętych ochroną	rolniczych
[ppm s.m.]				
Ba	1911,33 ± 16,6	43557 ± 11,2	200	200
Cd	< g.o	< g.o	1	4
Cr	65,76 ± 4,40	45,2 ± 3,24	50	150
Cu	104,29 ± 0,32	13 ± 0,27	30	150
Ni	21,75 ± 0,46	25,1 ± 0,26	35	100
Pb	41,92 ± 0,18	7,7 ± 0,26	50	100
Zn	62,1 ± 0,45	44,1 ± 2,61	100	300

<sup>1)</sup> Wartości dopuszczalne stężeń w glebie lub ziemi określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi Dz.U. 2002 nr 165 poz. 1359.

Stężenia chromu, niklu i cynku w obu odpadach są na podobnym poziomie i nie przekraczają wartości dopuszczalnych stężeń tych metali w glebie lub ziemi dla terenów objętych ochroną. Stężenia miedzi

i łożeniu są dużo większe w zwiercinach na osnowie płuczek wodnych niż olejowych, ale mieszczą się w granicach dopuszczalnych stężeń dla terenów rolniczych. Można więc stwierdzić, że stężenia miedzi i niklu w odpadach wiertniczych nie są na tyle wysokie, aby spowodować szkody dla rozwoju roślin czy też stwarzać niebezpieczeństwo migracji do środowiska wodnego.

Analizując zamieszczone w tabeli 1 dane można zauważyć, że odpad wiertniczy na bazie płuczki olejowej zawiera znacznie więcej baru, zaś odpad wiertniczy na bazie płuczki wodnej zawiera więcej miedzi i łożeniu. Wynika to z różnego składu technologicznego stosowanych płuczek wiertniczych. Obserwowane i uzasadnione różnice w składzie odpadów wiertniczych są jednak poważnym problemem w opracowaniu optymalnej metody zagospodarowania tego rodzaju odpadów.

W tabeli 2 przedstawione zostały stężenia metali ciężkich w wyciągach wodnych z odpadów wiertniczych. Stężenia baru dla obydwu rodzajów odpadów były wyraźnie wyższe niż innych metali. Koresponduje to z danymi amerykańskimi, gdzie wydobycie gazu łupkowego jest prowadzone już od ponad 20 lat. W opublikowanych badaniach Neff (Neff 2002) oraz Hartley (Hartley 1996) przedstawiono podobny poziom wymywalności baru z odpadów wiertniczych. Podwyższone stężenia baru są wynikiem powszechnego stosowania barytu we wszystkich rodzajach płuczek, jako środka podwyższającego gęstość. W odniesieniu do pozostałych badanych metali ciężkich (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni i Zn) odnotowano dużą zmienność ich stężenia w wyciągach wodnych dla poszczególnych rodzajów odpadów wiertniczych.

Z odpadu wiertniczego na osnowie płuczki wodnej w największym stopniu wymywany był bar, a następnie  $Zn > Pb > Cu > Ni > Cr$ . Z odpadu wiertniczego na osnowie płuczki olejowej również w największym stopniu wymywany był bar, a następnie  $Zn > Cr > Ni > Pb > Cu$ .

Analizując przedstawione rezultaty można stwierdzić, że z odpadu na osnowie płuczki olejowej bar, chrom, nikiel są w większym stopniu wymywane niż z odpadu na osnowie płuczki wodnej. Poczynione obserwacje są istotne przy składowaniu odpadów wiertniczych bowiem można podejrzewać zwiększenie poziomu wymywalności metali ciężkich podczas ekspozycji odpadu na czynniki atmosferyczne.

Uzyskane wyniki wymywalności metali ciężkich z odpadów wiertniczych porównano z najwyższymi dopuszczalnymi wartościami

zanieczyszczeń określonymi w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014 poz. 1800).

Poziom wymywalności metali z badanych odpadów, za wyjątkiem baru, jest niższy od najwyższych dopuszczalnych wartości tych zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych do wód i gleby. Wymywalność baru znacznie przekracza stężenia dopuszczalne określone w Rozporządzeniu. Mimo to bar wymywany z tego rodzaju odpadów nie powinien powodować skażenia środowiska, jako że przyjęte szkodliwe dla roślin stężenie baru to 500 ppm, a dodatkowo jego toksyczność można ograniczyć przez dodatek soli pierwiastków antagonistycznych np. wapnia czy magnezu (Kabata 2000).

Z uwagi na to, że tylko stężenie baru przekracza wartości dopuszczalne (NDS), można przyjąć, że ryzyko negatywnego oddziaływania metali ciężkich pochodzących z odpadów wiertniczych na środowisko naturalne i na człowieka jest niewielkie. Większe zagrożenie ze strony odpadów wiertniczych mogą stanowić inne substancje szkodliwe do których zalicza się m.in. chlorki i siarczany (Jamrozik et. al. 2010).

Uzyskane w przeprowadzonych badaniach wartości wymywalności metali ciężkich są zbliżone do raportowanych przez Westrlunda wartości wymywalności metali z odpadów wiertniczych przechowywanych w dołach urobowych. Uzyskali oni następujące stężenia metali ciężkich w wyciągach wodnych: Cd = 0,2 ppm; Cr = 0,5 ppm; Cu = 0,1 ppm; Pb = 0,3 ppm; Ni = 0,4 ppm; Zn = 0,3 ppm (Westrlunda et al. 2002).

Badania wymywalności z odpadów, nie tylko w Polsce, są jednym z kryteriów oceny ekologicznej i warunkiem dopuszczenia do składowania odpadu na składowiskach. Spełnienie kryteriów wymywalności zanieczyszczeń określonych w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. 2016 poz. 1277) jest warunkiem dopuszczenia odpadów do składowania na trzech typach składowisk: odpadów niebezpiecznych, obojętnych i innych niż obojętne i niebezpieczne. Z tego względu uzyskane wyniki badań porównano z granicznymi wartościami zawartymi w Rozporządzeniu (tabela 2).

**Tabela 2.** Stężenia metali w wyciągach wodnych z odpadów wiertniczych  
**Table 2.** Content of metals in leaching of drilling waste

Metal	Stężenie w wyciągu wodnym		Dopuszczalne wartości zanieczyszczeń <sup>1</sup>	Graniczne wartości wymywania zanieczyszczeń <sup>2</sup>		
	zwierciny			A	B	C
	+ płuczka wodna	+ płuczka olejowa				
	[ppm]					
Ba	12,98	318	2	20	100	300
Cd	< g.o.	< g.o.	0,4	0,04	1	5
Cr	0,05	0,49	0,5	0,5	10	70
Cu	0,30	0,001	0,5	2	50	100
Pb	0,48	0,11	0,5	0,5	10	50
Ni	0,25	0,46	0,5	0,4	10	40
Zn	2,55	1,66	2,0	4	50	200

<sup>1)</sup> Najwyższe dopuszczalne wartości zanieczyszczeń<sup>1</sup> określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014 poz. 1800)

<sup>2)</sup> Graniczne wartości wymywania określone w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz. U. 2015 poz. 1277) A – składowisko odpadów obojętnych, B – innych niż obojętne i niebezpieczne, C – niebezpieczne.

W odpadzie wiertniczym na osnowie płuczki olejowej bar przekroczył dopuszczalne wartości wymywania dla wszystkich rodzajów składowisk, gdzie jego dopuszczalną wymywalność określono na poziomie 300 ppm. W przypadku niklu otrzymana wartość wymywania nieznacznie przekroczyła wartości wymywalności dla grupy odpadów obojętnych. Dlatego też ten rodzaj odpadu wiertniczego może stanowić zagrożenie dla środowiska.

W przypadku odpadu wiertniczego na osnowie płuczki wodnej bar przekroczył dopuszczalną wartość wymywania, ale tylko dla składo-



wiska odpadów obojętnych. Pozostałe metale ciężkie wymywane są z odpadu w tak niewielkim stopniu, że ich stężenia nie przekraczają wartości granicznych dla składowisk odpadów obojętnych.

Reasumując należy stwierdzić, że przeprowadzone badania i użyte wyniki wskazują na zróżnicowaną wymywalność metali ciężkich z różnych rodzajów odpadów wiertniczych. Uzasadnia to konieczność ciągłego monitorowania zarówno składowisk odpadów wiertniczych, jak i terenów wiertni.

#### 4. Wnioski

Badania nad wymywaniem metali ciężkich z odpadów wiertniczych są ważne w prognozowaniu wpływu na środowisko tego rodzaju odpadów związane z ich składowaniem na terenach wiertni bądź na składowiskach odpadów.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że jedynie bar spośród badanych metali przekracza określone w regulacjach prawnych stężenie, zarówno w samych odpadach, jak i w wyciągach wodnych z odpadów wiertniczych.

Pomimo, że poziomy stężenie wszystkich innych, oprócz baru, metali ciężkich w wyciągach wodnych z odpadów wiertniczych były niższe od dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń w ściekach wprowadzanych do wód lub ziemi, czy też od granicznych wartości wymywania, na terenie wiertni czy miejscach składowania odpadów powinien być prowadzony ciągły monitoring w celu zapewnienia kompleksowej oceny wpływu metali ciężkich na glebę i wody gruntowe.

Wzrastająca ilość odpadów wiertniczych wskazuje na konieczność prowadzenia oceny ekologicznej wytwarzanych odpadów oraz poszukiwania nowych optymalnych metod ich zagospodarowania.

#### Literatura

- Annevelink, M.P.J.A., Meesters, J.A.J., Hendriks, A.J. (2016). Environmental contamination due to shale gas development. *Science of the Total Environment*, 550, 431-438.
- Babko, R., Jaromin-Gleń, K., Łagód, G., Pawłowska, M., Pawłowski, A. (2016). Effect of drilling mud addition on activated sludge and processes in sequencing batch reactors. *Desalination and water treatment*, 57, 1490-1498.

- Duda, A., Żelazna, A., Gołębiowska, J. (2016). Zrównoważony rozwój a poszukiwanie i wydobywanie gazu łupkowego. *Problemy Ekorozwoju – Problems of Sustainable Development*, 11(1), 177-180.
- Fan, Y.-Y., Wang, G.-C., Fu, J.-H., Zheng, X.-H. (2014). The remediation of waste drilling muds by a combined plant-microbe system. *Petroleum Science and Technology*, 32, 2086-2092.
- Hartley, J.P. (1996). Environmental monitoring of offshore oil and gas drilling discharges: a caution on the use of barium as a tracer. *Marine Pollution Bulletin*, 32, 727-73.
- Jamrozik, A., Gonet, A., Stryczek, S., Czekaj, L., (2010). Możliwości i uwarunkowania odsalania odpadów wiertniczych. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 27 (1-2), 183-192.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, 140-141.
- Macuda, J. (2010). Środowiskowe aspekty produkcji gazu ziemnego z niekonwencjonalnych złóż. *Przegląd Geologiczny*, 58 (3), 266-270.
- Marianowski J., Teper W. (2013). Gaz łupkowy? Hydraulika, hydraulika i jeszcze raz hydraulika. *Systemy automatyczne w górnictwie*, 7/8, 116-125.
- Molenda, J., Steczko, K. (2000) *Ochrona środowiska w gazownictwie i wykorzystaniu gazu*, Warszawa.
- Neff, J.M. (2002). *Bioaccumulation in Marine Organisms. Effects of Contaminants from Oil Well Produced Water*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 452.
- Starzycka, A. (2012). *Środowiskowe i prawne aspekty zagospodarowania odpadów powstających w trakcie poszukiwania, rozpoznawania i wydobycia gazu z łupków*. Międzynarodowe Targi Ochrony Środowiska „Poleko”, Poznań, 21.11.2012.
- Strachan, M.M. (2002). Studies on the impact of a water-based drilling mud weighting agent (barite) on some benthic invertebrates. *Submitted for the degree of doctor of philosophy, Heriot-Wat University, School of life Science*.
- Szyjko, T. C. (2011). Społeczno-gospodarcze bariery potencjalnej produkcji gazu łupkowego w Polsce. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin – Polonia, XVIII(2) SECTIO K*.
- U.S. EIA.
- Westerlund, S., Kjeilen, G., Nordtug, T. (2002). Impacts of metals from drill cuttings and mud to the marine water column. *DRAFT report Rf-Sintef. NFR project 152451/720*.

## **Leachability of Heavy Metals from Shale Gas Drilling Waste**

### **Abstract**

Drilling waste constitutes industrial waste produced during mining activities involving drilling holes for exploration and exploitation. In Poland, the growing interest in shale gas, and the necessity of extracting it from significant depths led to the production of approximately 80 thousand tons of drilling waste (in 2013). Only a small part of this waste is utilized in the production of construction materials. Over 80% of produced waste is deposited either at the drilling site or on landfills. Therefore, it is important to assess the environmental risk connected with utilization of this type of waste. Drilling waste from shale gas mining contains various kinds of toxic heavy metals, which may be released into the environment by leaching. The paper describes the performed studies and presented the results of leachability, i.e. potential heavy metal mobility, from two types of drilling waste produced through the use of water- and oil-based drilling muds. Standard 24-hour extraction test was performed in water with solid to liquid phase ratio of 1 kg: 10 dm<sup>3</sup>. It was proven that the susceptibility of heavy metals to leaching from drill cuttings with water-based mud decreases in the order Ba > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr, while in the case of drill cuttings with oil-based mud, it changes in the order Ba > Zn > Cr > Ni > Pb > Cu.

### **Słowa kluczowe:**

gaz łupkowy, odpady wiertnicze, metale ciężkie

### **Keywords:**

shale gas, drilling waste, heavy metals