

## ZAGROŻENIE I OCHRONA WÓD PODZIEMNYCH W REJONIE SKŁADOWISKA ŻELAZNY MOST – MODEL KRAŻENIA WÓD W SKŁADOWISKU I PODŁOŻU

### Groundwater hazard and protection in the Żelazny Most tailings dam area – conceptual model of groundwater flow in tailings dam and its bedrock

Stanisław WITCZAK & Robert DUDA

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,  
Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej;  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;  
e-mail: witzczak@agh.edu.pl, duda@agh.edu.pl*

**Abstract:** Seepage of saline water into the flotation tailings dam bedrock through the flotation tailings disposed into the dam is one of the conceptual model elements. Seepage is more intensive close to the embankment where the hydraulic conductivity of tailings is the highest. Water flow within the dam foregrounds through shallow and lower lying aquifers.

**Key words:** groundwater, pollution, conceptual model, flotation tailings dam, Żelazny Most

**Słowa kluczowe:** wody podziemne, zanieczyszczenie, model konceptualny, składowisko odpadów po-flotacyjnych, Żelazny Most

### WSTĘP

Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie jest związana z ochroną wód podziemnych w rejonie składowiska Żelazny Most już od jego fazy projektowej (Krajewski *et al.* 1976), a nawet jeszcze wcześniej, ponieważ związana była także z eksploatacją sąsiedniego składowiska Gilów (Witczak *et al.* 1978a, b). Badania realizowano w oparciu o sukcesywnie uszczegóławiany i kalibrowany model numeryczny przepływu wód podziemnych (Witczak *et al.* 1986, Duda & Witczak 1993), później rozbudowany o trójwymiarowy (3D) model migracji masy zanieczyszczeń (Witczak *et al.* 2002, Duda & Witczak 2003, Duda 2004). Na podstawie modelu cyklicznie opracowywano oceny oddziaływania składowiska Żelazny Most na wody podziemne, co około 4 lata do 2002 roku.

Podstawą dopasowania i weryfikacji modeli oraz aktualizacji ocen były wyniki rozpoznania i monitoringu hydrogeologicznego oraz jakości wód podziemnych, monitoringu geofizycznego, własne kontrolne badania jakości wód podziemnych, dokumentacje technologii składowania odpadów i drenaży składowiska, badań przepuszczalności odpadów oraz części badań hydrologicznych cieków powierzchniowych.

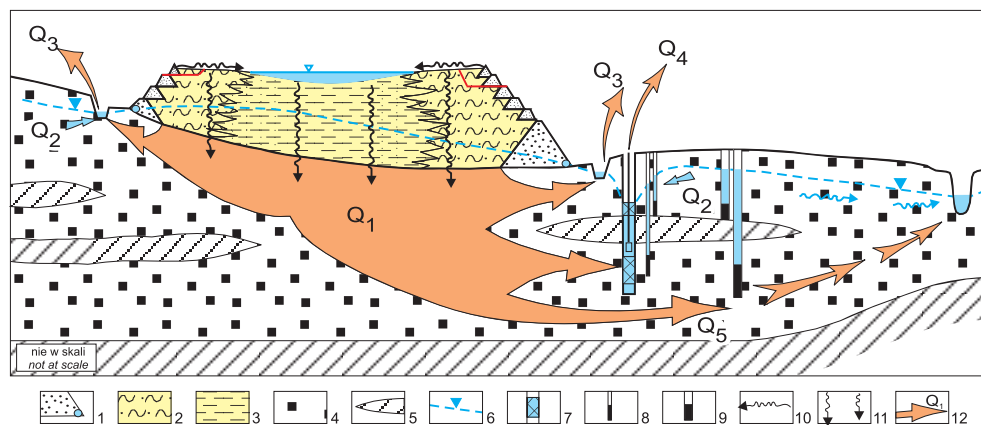
Rezultaty analizy tych obszernych danych odwzorowywano na modelu numerycznym, na którego podstawie wariantowo uaktualniano koncepcję ochrony wód w otoczeniu składowiska. Koncepcja zakłada utrzymanie, w czasie eksploatacji składowiska, pierwotnego układu hydrodynamicznego wód podziemnych w rejonie zapór, co zamknie hydraulicznie składowisko i ograniczy rozptył wód zasolonych na przedpolach (Witczak *et al.* 1986, Witczak 1995). Podstawą koncepcji jest fakt, że składowisko jest zlokalizowane w obrębie naturalnej zlewni, w której kierunki spływu wód podziemnych były pierwotnie skierowane ku składowisku lub równoległe do jego zapór, poza małym obszarem SW części przedpola składowiska. Sposobem realizacji tej koncepcji jest bariera drenażu pionowego w postaci studni głębinowych.

Problemem przy ocenie oddziaływania składowiska na wody podziemne, są bardzo skomplikowane warunki geologiczne, wynikające z zaburzeń glacytektonicznych podłoża. Mogą tu występować słabo rozpoznane, wąskie uprzywilejowane drogi filtracji, którymi wody zasolone przepływają w sposób niekontrolowany na dalsze przedpola, do ich ostatecznych odbiorników, czyli cieków powierzchniowych, które z tego terenu odpływają (Duda & Witczak 2003).

## SKŁADOWISKO JAKO OGNISKO ZANIECZYSZCZENIA WÓD

Składowisko o powierzchni około 1400 ha gromadzi aktualnie ponad 315 mln m<sup>3</sup> odpadów poflotacyjnych rud miedzi. Odkryte składowisko pracuje w technologii osadzania odpadów na mokro, realizowanej za pomocą namywów zawiesiny wodnej. Odpady poflotacyjne wprowadzane są na całym obwodzie składowiska w kierunku od zapór do wnętrza czaszy (Lewiński & Wolski 1996). W ten sposób umożliwia się uformowanie regularnej plaży z osadów gruboziarnistych, częściowe odsączenie się wód oraz utworzenie się akwenu wodnego nad słaboprzepuszczalnymi odpadami drobnoziarnistymi (Fig. 1). Zagrożenie środowiska wodnego ze strony składowiska wynika z użycia do hydrotransportu odpadów poflotacyjnych wysoko zasolonych wód kopalnianych LGOM. Są to wody o mineralizacji ogólnej rzędu 20 000 mg/l oraz wysokiej zawartości chlorków, około 8000÷9000 mgCl/l i siarczanów, około 3000 mgSO<sub>4</sub>/l (Czaban *et al.* 2001).

Konstrukcja składowiska godzi dwie funkcje: geotechniczną, związaną z budową stałocieków oraz hydrologiczną, związaną z obiegiem i ochroną wód. Jednak kompromis połączenia obu funkcji powoduje, że nie jest możliwe całkowite uniknięcie przesączania słonych wód nadosadowych poprzez odpady do podłoża. Dotyczy to szczególnie przesączania przez gruboziarniste odpady w pasie plaży składowiska w okresach namywu odpadów. Przesiąkanie ułatwia także fakt, że podłoże składowiska jest w dużej części przepuszczalne. W wyniku tego procesu wody słone przepływają do podłoża, a później rozprzeczają się na przedpolach składowiska. Dlatego też całkowite uszczelnienie składowiska jest nierealne.



**Fig. 1.** Uproszczony model konceptualny krążenia wód w składowisku i jego podłożu; 1 – drenaż zapory, 2 – odpady poflotacyjne gruboziarniste, 3 – odpady drobnoziarniste, 4 – piaszczysto-żwirowe podłoże, 5 – utwory półprzepuszczalne w podłożu (np. gliny zwałowe), 6 – zwierciadło wód podziemnych, 7 – studnie odwadniające, 8 – piezometry przystudzienne, 9 – otwory obserwacyjne, 10 – kierunek namywu odpadów, 11 – przesączanie wód słonych przez odpady, 12 – przepływ/wydatek wydzielonych strumieni wód,  $Q_1$  – przesączanie wód słonych do podłoża,  $Q_2$  – dopływ wód podziemnych z przedpola,  $Q_3$  – drenaż wód słonych rowami opaskowymi,  $Q_4$  – drenaż wód słonych studniami,  $Q_5$  – odpływ wód zasolonych na przedpola

**Fig. 1.** Simplified conceptual model of groundwater flow in the tailings dam and its bedrock; 1 – embankment drainage, 2 – coarse grain size flotation tailings, 3 – fine grain size flotation tailings, 4 – sands and gravels in the dam bedrock, 5 – semi-permeable strata in the dam bedrock (i.e. sandy boulder clays), 6 – groundwater head, 7 – discharging wells, 8 – wells piezometers, 9 – observation boreholes, 10 – slurry discharge direction, 11 – saline water seepage through tailings, 12 – flux/discharge selected groundwater streams,  $Q_1$  – seepage of saline water into the dam bedrock,  $Q_2$  – groundwater flux from a dam foregrounds,  $Q_3$  – saline water drainage by girdling ditches,  $Q_4$  – saline water drainage by wells,  $Q_5$  – saline water runoff to a foregrounds

## MODEL KRĄŻENIA WÓD W SKŁADOWISKU I W PODŁOŻU

Sposobem zastosowanym w celu ograniczenia wypływu wód zasolonych na przedpola są drenaże, z których najważniejszą rolę odgrywa drenaż poziomy w postaci rowów opaskowych, drenaż stopy zapory, drenaż pierścieniowy na plaży po wewnętrznej stronie nadbudowywanych zapór, a także od 1991 roku wspomagający drenaż pionowy w postaci bariery studni drenażowych. Koncepcja bariery studni drenażowych jest stopniowo realizowana, jednak w strefach, gdzie drenaż przy zaporze jest jeszcze niewystarczający, część wód zanieczyszczonych ciągle wypływa na przedpola składowiska. Efektywność szczególnie drenażu pionowego jest uwarunkowana wyjątkowo skomplikowanymi drogami przepływu wód podziemnych, zwłaszcza w obszarach zaburzeń glacitektonicznych.

Model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń jest dodatkowo modyfikowany przez zabiegi technologiczne ograniczające ilość wód wypływających na przedpola. Ilość wód infiltrujących w podłoże składowiska jest częściowo ograniczona przez izolowanie drobnoziarnistymi odpadami poflotacyjnymi centrum składowiska.

Opracowany na podstawie badań właściwości odpadów, rozkładu ciśnień w ich profilu i modelowania (Werno *et al.* 2001) model konceptualny określa, że wymiana wody zawartej w odpadach poflotacyjnych zgromadzonych w czaszy składowiska jest wolna i posiada według aktualnego stanu rozpoznania następujący mechanizm:

- W okresie namywu odpadów, wody hydrotransportu spływają po plaży od zapór do akwenu, a średni łączny czas namywu pojedynczej sekcji obejmuje około 11% roku, czyli około 40 dni. W czasie namywu wody infiltrują w podłoże w ilości zależnej od współczynnika filtracji odpadów. Infiltracja maleje od zapór w kierunku centrum składowiska zgodnie ze zmniejszaniem się granulacji odpadów i ich przepuszczalności. W pasie plaży zmianę współczynnika filtracji przyjmuje się zgodnie z wzorem Werno *et al.* (1996).
- W okresach między namywami następuje proces odsączania wody z odpadów. Ze względu na ogromną ilość wód znajdujących się w odpadach, występuje znaczne opóźnienie procesu odsączania, który trwa dłużej niż przerwy między kolejnymi namywami. Powoduje to nałożenie się skutków kolejnych namywów i wyrównanie wydatku wód przesączających się do podłoża.
- Wyługowywanie przez infiltrujące wody atmosferyczne substancji chemicznych zawartych w odpadach poflotacyjnych, ma znaczenie marginalne w fazie eksploatacji składowiska. Wynika to stąd, że ilość wód atmosferycznych infiltrujących przez plaże i górne części zapór jest niewielka, w porównaniu z ilością przesączających się słonych wód pochodzących z namywów odpadów.
- Pod akwenem infiltracja wody trwa cały czas, ale niski współczynnik filtracji odpadów ogranicza ilość wód przesiąkających w głąb, do niewielkich ilości.
- Czas wymiany wód porowych zawartych w odpadach poflotacyjnych rośnie ku centrum składowiska. W pasie plaży przy zaporze czas ten zmienia się zależnie od miąższości odpadów od około pół roku do roku, poprzez około 30 lat w pasie w pobliżu akwenu, aż do 80 lat w obszarze pod akwenem. Czasy te oznaczają, że w obszarze odległym ponad 100 m od zapór, przesiąkanie jest wolniejsze od przyrostu miąższości odpadów, co oznacza zwiększanie ilości wód porowych zmagazynowanych w odpadach. W konsekwencji, tylko z tej przyczyny, wody te będą się odsączać jeszcze przez wiele lat po zamknięciu składowiska.
- Wymiana wód w warstwach piaszczysto-żwirowych podłoża składowiska jest stosunkowo powolna. Przeciętna szybkość przepływu wód zasolonych, które przesiąkają do podłoża i dążą do wypływu na przedpolach, zależy od gradientu hydraulicznego oraz współczynnika filtracji utworów podłoża. Pod składowiskiem przepływ odbywa się z szybkością od kilkudziesięciu do kilkuset metrów na rok, dlatego przepływ od centrum składowiska do wypływu na przedpolu trwa od kilku do kilkunastu lat. Wyjaśnia to przyczynę długotrwałego wypływu najpierw starszych wód niezanieczyszczonych, za którymi napływają wypierające je młodsze wody zasolone pochodzące ze składowiska.
- System krążenia wód podziemnych zarówno w składowisku, jak i w podłożu należy traktować jako przestrzeń trójwymiarową ciągłą (3D), ze strukturami litologicznymi o różnej przepuszczalności. Prawidłowe zrozumienie obrazu izol linii ekwipotencjalnych wysokości hydraulicznej wody pokazuje kierunek przepływu wód podziemnych, który w odpadach składowiska jest pionowy, a w podłożu składowiska jest lateralny lub zbli-

żony do niego (Witczak *et al.* 2002). Tam gdzie występują nierozładowane ciśnienia wód wynikające z geostatycznego obciążenia nadkładem i składowiskiem, kierunki przepływu są zróżnicowane, a ciśnienia hydrostatyczne dużo wyższe od występujących w otoczeniu.

## MODEL KRĄŻENIA WÓD PODZIEMNYCH W REJONIE SKŁADOWISKA

Krążenie wód podziemnych w rejonie składowiska posiada według aktualnego stanu rozpoznania następujący mechanizm:

- Ostatecznym odbiornikiem wód przenikających na przedpolu są rzeki. Zanieczyszczenia mogą zostać tam zaobserwowane nawet wtedy, kiedy monitoring stacjonarny ich nie rejestruje. To pośrednie oddziaływanie na wody powierzchniowe występuje z opóźnieniem wynikającym z czasu niezbędnego na przepływ wód podziemnych od składowiska do danego ciek. Są to czasy od kilku do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu lat. Tak długo będzie też trwało odpłynięcie wód zasolonych ze zlewni.
- Przepływ zanieczyszczeń konserwatywnych w wodach podziemnych na przedpolach składowiska wynika z szybkości przepływu wód podziemnych, która w utworach piaszczysto-żwirowych przy niewielkich gradientach hydraulicznych generalnie jest mała. Są to zazwyczaj szybkości  $50 \div 150$  m/rok.
- Bariere studni drenażowych budowano powoli, od czasu kiedy na dalszym przedpolu składowiska pojawiły się wody zasolone. W wyniku tego część wód zanieczyszczonych zdążyła odpłynąć na tyle, że ich zawrócenie studniami jest już niemożliwe. Wody te dopływają do swych naturalnych odbiorników, jakimi są cieki.

## DYSKUSJA I WNIOSKI

Całkowite uszczelnienie składowiska Żelazny Most jest nierealne, ponieważ jego konstrukcja sprawia, że nie można uniknąć przesiąkania słonych wód nadosadowych do podłoża. Dotyczy to szczególnie przesączania przez gruboziarniste odpady zgromadzone w pasie plaży. Składowisko jest i będzie w przyszłości trwałym ogniskiem zanieczyszczenia wód podziemnych, a pośrednio również powierzchniowych. Pomimo tego, że zagrożenia nie da się wyeliminować całkowicie, można je skutecznie ograniczać. Składowisko może być obiektem o zamkniętym obiegu wód technologicznych, ze względu na potencjalną możliwość odtworzenia okolicznych działów wodnych w ich kształcie sprzed budowy składowiska. Przywróci to spływ wód podziemnych ku zaporom lub równoległe do nich. Drenaż studniami pracującymi optymalnie, powinien utrzymać wody podziemne w rejonie zapór na poziomie zbliżonym do naturalnego, pierwotnego poziomu, co umożliwi jego hydrauliczne zamknięcie.

W tej sytuacji podstawową kwestią w koncepcji ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniem jest skuteczność bariery studni drenażowych. Bariera jest rozbudowywana do stopnia zbliżonego do optymalnego. Jednak, żeby w rzeczywistości uzyskać oczekiwane rezultaty, przedstawione w prognozie wykonanej na szczegółowym modelu numerycznym (Witczak *et al.* 2002), wymagane jest właściwe obniżenie zwierciadła wody, nie tylko w samej studni odwadniającej, ale przede wszystkim w jej otoczeniu. Istotne są obserwacje i ana-

lize poziomu wody w piezometrach zlokalizowanych w rejonie studni, bo w samych studniach obniżenie jest większe niż w ich rejonie, np. w wyniku zjawiska zeskoku na filtrze oraz kolmatacji filtra. Niestety, analiza skuteczności wykazała, że w 2000 roku wystarczająco efektywnych było tylko 30% studni. Oznacza to konieczność doprowadzenia do właściwej efektywności bariery odwadniającej, poprzez dokończenie budowy systemu studni drenażu pionowego, włączenie ich do ciągłej eksploatacji i niezbędną okresową renowację.

Dla zwiększenia skuteczności ochrony środowiska wodnego w rejonie składowiska, należy rozważyć wykonanie na przedpolach składowiska studni wierconych kierunkowo z filtrem poziomym. Na odcinkach cieków powierzchniowych o szczególnie intensywnym wpływie zanieczyszczonych wód podziemnych, można te ostatnie ująć drenażem powierzchniowym i przepompować do obiegu technologicznego składowiska.

Dalsza nadbudowa składowiska nie zmieni obecnego mechanizmu infiltracji wód porowych oraz nadosadowych ze składowiska. Docelowe położenie i wysokość zapór wskazują, że może zmniejszyć się powierzchnia plaż. Może to spowodować zmniejszenie infiltracji wody, ale jedynie podczas namywów. Nie zmieniają się zasadniczo gradienty hydrauliczne, bo wraz ze wzrostem rzędnej piętrzenia rośnie miąższość odpadów i tym samym wydłuży się droga dla filtracji pionowej wody. Większą rolę w systemie drenażowym składowiska mogą zacząć odgrywać drenaże pierścieniowe.

*Praca została częściowo zrealizowana i sfinansowana w ramach prowadzonych w Katedrze Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie badań statutowych (umowa 11.11.140.139) i badań własnych (umowa 10.10.140.585).*

*Autorzy dziękują KGHM Polska Miedź S.A. o. Zakład Hydrotechniczny za umożliwienie realizacji pracy.*

## LITERATURA

- Czaban S., Fijałkiewicz W. & Kaługa P., 2001. Bilans wodny i hydrochemiczny składowiska Żelazny Most. Instytut Inżynierii Środowiska, Akademia Rolnicza, Wrocław (niepubl.).
- Duda R. & Witczak S., 1993. Stały model hydrogeologiczny rejonu zbiornika Żelazny Most jako podstawowe narzędzie do oceny oddziaływania na środowisko i sposobów ochrony wód podziemnych. W: Poprawski L. & Bocheńska T. (red.), *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, Wydawnictwo Sudety, Wrocław, VI, 197–204.
- Duda R. & Witczak S., 2003. Modeling of the transport of contaminants from the Żelazny Most flotation tailings dam. *Gospodarowanie Surowcami Mineralnymi*, 19, 4, 69–88.
- Duda R., 2004. Regional prediction of the transport of contaminants from the flotation tailings dam: a case study. W: Twardowska I., Allen H.E. & Kettrup A.A.F. (eds), *Solid waste: assessment, monitoring and remediation*, *Waste Management*, Elsevier, Amsterdam, 4, 693–715.
- Krajewski R. et al., 1976. *Prognoza rozprzestrzeniania się wód skażonych na przedpolu składowiska Żelazny Most i koncepcje ochrony terenów wokół składowiska przed niekorzystnymi skutkami oddziaływania wód przenikających ze składowiska w podłoże*. Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, AGH, Kraków (niepubl.).
- Lewiński J. & Wolski W., 1996. Składowiska odpadów. W: Piestrzyński A. (red.), *Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*, Wydawnictwo CBPM Cuprum, Wrocław, 787–912.

- Werno *et al.*, 1996. *Badania i analiza stopnia wykorzystania odpadów poflotacyjnych ZG Polkowice deponowanych w składowisku Żelazny Most do minimalizacji oddziaływania składowiska na otaczające środowisko*. Instytut Morski, Gdańsk (niepubl.).
- Werno *et al.*, 2001. *Badania skuteczności procesu uszczelniania dna składowiska Żelazny Most. Raport roczny, 4*, Instytut Morski, Gdańsk (niepubl.).
- Witczak S., Hubert J., Pietras J. & Witczak K., 1978a. *Prognozowanie ruchu zanieczyszczeń w zmiennym polu hydrodynamicznym na przykładzie dużego zbiornika odpadów poflotacyjnych. Cz. 1 – Wyniki dziesięcioletnich obserwacji. Zeszyty Naukowe AGH, Sesje Naukowe, 221–237*.
- Witczak S., Hubert J., Pietras J. & Witczak K., 1978b. *Prognozowanie ruchu zanieczyszczeń w zmiennym polu hydrodynamicznym na przykładzie dużego zbiornika odpadów poflotacyjnych. Cz. 3 – Model numeryczny dwuwymiarowego pola hydrodynamicznego. Zeszyty Naukowe AGH, Sesje Naukowe, 251–259*.
- Witczak S., Szczepański A., Bury W. & Szklarczyk T., 1986. *Prognoza rozprzestrzeniania się wód infiltracyjnych ze składowiska Żelazny Most przy piętrzeniu do rzędnej 156.0 m n.p.m. oraz ochrony wód przed skażeniem*. Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, AGH, Kraków (niepubl.).
- Witczak S., 1995. *Koncepcja drenażu wód słonych przenikających na przedpole składowiska „Żelazny Most” jako podstawa ochrony wód podziemnych i powierzchniowych*. W: Paulo A. (red.), *Materiały VII Konferencji Sozologicznej Problemy ochrony środowiska wokół składowiska odpadów poflotacyjnych Żelazny Most*, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków, 41–48.
- Witczak S., Duda R. & Szklarczyk T., 2002. *Kompleksowa ocena oddziaływania składowiska Żelazny Most na wody podziemne i powierzchniowe do 2000 r. wraz z uaktualnioną koncepcją ochrony wód*. Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, AGH, Kraków (niepubl.)