

# Geotechniczne aspekty składowania niebezpiecznych odpadów w wyrobiskach podziemnych

Henryk Marczak\*, Zenon Pilecki\*\*

*W artykule omówiono sposób geotechnicznej oceny górotworu rozważanego dla składowania odpadów niebezpiecznych. W szczególności propozycja dotyczy odpadów promieniotwórczych i silnie toksycznych dla których warunek długotrwałej stateczności i szczelności układu masyw skalny-wyrobisko jest warunkiem podstawowym. Autorzy przedstawiają zagadnienia koncepcyjne oceny geotechnicznej nie wnikając w szczegółowe rozwiązania metodyczne. Podkreślono, że w fazie planowania składowiska należałoby wyróżnić trzy etapy badań: analizy właściwości fizycznych górotworu, modelowania zachowania się układu górotwór - wyrobisko oraz obserwacji i badań in-situ dla potwierdzenia przeprowadzonych analiz i modelowania. Wskazano na konieczność podjęcia tego typu badań we współpracy specjalistów z dziedzin geomechaniki, hydrogeologii, geologii, geofizyki, geochemii itp.*

**Słowa kluczowe:** składowanie odpadów, odpady przemysłowe, odpady promieniotwórcze, wyrobiska górnicze, badania geotechniczne, warunki geologiczno-górniczne, ochrona środowiska

Jeden z możliwych podziałów odpadów składowanych w wyrobiskach podziemnych wyróżnia odpady nieszkodliwe i szkodliwe dla zdrowia ludzkiego. Do tych drugich należy zaliczyć odpady toksyczne i promieniotwórcze nazywane również niebezpiecznymi. Ustawa o odpadach z dnia 27 czerwca 1997 r. definiuje odpady niebezpieczne jako odpady, które ze względu na swoje pochodzenie, skład chemiczny, biologiczny, inne właściwości i okoliczności stanowią zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzi albo dla środowiska.

Składowania odpadów nieszkodliwych odbywa się na ogół przez ich bezpośrednie lokowanie w wyrobiskach,

puszkach poeksploatacyjnych bądź innego rodzaju przestrzeni w masywie skalnym. Natomiast odpady niebezpieczne, składowane są w taki sposób by je możliwie skutecznie izolować od masywu skalnego otaczającego składowisko. Umieszcza się je w pojemnikach i w zależności od stopnia szkodliwości odpadów stosuje się nawet kilka barier ochronnych. W przypadku takiego składowania niezwykle istotnym jest przeprowadzenie specjalistycznych ocen geotechnicznych przydatności wyrobiska do składowania.

## Znaczenie badań geotechnicznych w podejmowaniu decyzji o składowaniu odpadów niebezpiecznych

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie propozycji sposobu przeprowadzenia badań geotechnicznych w celu oceny stateczności i szczelności wyrobiska przeznaczonego dla składowania odpadów niebezpiecznych. Jest ona oparta na szerokim studium literaturowym bazującym

\*Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

\*\*Polska Akademia Nauk Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, ul. Wybickiego 7, 30-950 Kraków

w głównej mierze na doświadczeniach krajów zachodnich. W szczególności wykorzystano doświadczenia z realizacji międzynarodowego projektu w kopalni Stripa w Szwecji (np. Push, 1994; Barton i in., 1994; Dormuth & Whitaker, 1994). Podjęcie decyzji o składowaniu jest procesem złożonym i wymaga przeprowadzenia odpowiednich analiz i badań. W ogólności w takim systemie decyzyjnym można wyróżnić następujące elementy (ryc. 1):

— uzgodnienia administracyjne obejmujące określone przepisami prawnymi ustalenia pomiędzy inwestorem a administracją państwową (samorządową),

— regionalna długoterminowa analiza warunków geologicznych w aspekcie ruchów neotektonicznych, warunków klimatycznych i hydrologicznych oraz regionalnej budowy geologicznej, techniczne możliwości budowy składowiska w aspekcie istniejącej infrastruktury technicznej i stanu budownictwa podziemnego w wyeksploatowanych kopalniach,

— techniczne możliwości transportu związane z bezpiecznym dowozem odpadów do składowiska,

— analiza decyzyjna kosztów i zagrożeń uwzględniająca aspekty ekonomiczne i ekologiczne budowy i eksploatacji składowiska,

— analiza warunków górniczych i geologicznych górotworu, przez co należy rozumieć przeprowadzenie analiz i badań geologicznych, hydrogeologicznych, geomechanicznych, geofizycznych i geochemicznych, w celu określenia możliwości długotrwałej stateczności i szczelności wyrobiska z uwzględnieniem zjawisk ruchów górotworu, zaciskania wyrobisk, opadów skał, oddziaływań sejsmicznych, zmian chemicznych i temperaturowych (w przypadku odpadów radioaktywnych) i sposobu przepływu wody.

Ocena geotechniczna jest jednym z elementów analizy warunków geologiczno-górniczych w schemacie systemu decyzyjnego o składowaniu odpadów niebezpiecznych.

Należy podkreślić, że celem oceny geotechnicznej nie jest określenie przydatności rodzaju skał lub formacji skalnych. Zakłada się, że budowa statecznego i szczelnego wyrobiska jest możliwa również w trudnych warunkach geologiczno-górniczych. Natomiast główną przeszkodą w realizacji przedsięwzięcia mogą być koszty wykonania takiego składowiska, które z kolei mogą być optymalizowane na podstawie rozeznania warunków geologiczno-górniczych oraz oceny długotrwałego zachowania się układu masywu skalny-składowisko.

Jeżeli przyjmujemy, że ryzyko składowania jest funkcją prawdopodobieństwa uwolnienia się niebezpiecznej substancji i zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego, to największym ryzykiem jest pojawienie się tych substancji np. w wodzie pitnej.

Wynikają stąd też podstawowe wymogi składowania do których należałoby zaliczyć:

— odpowiednią techniczną izolację odpadów, która w pewnych przypadkach jest trzystopniowa: wewnątrz pojemnika, zabezpieczenie pojemnika i uszczelnienie wyrobiska,

— dobór warunków górniczo-geologicznych, który stanowi dodatkową barierę izolacyjną.

O ile problem właściwej izolacji odpadów jest związany z technologią budowy składowiska, to dobór warunków górniczo-geologicznych jest jednym z głównych elementów decyzji o składowaniu odpadów realizowanym przed jej podjęciem.

Interesujące omówienie zagadnienia lokowania odpadów w wyrobiskach górniczych, wraz z szeroko cytowaną literaturą, można znaleźć w pracy Mazurkiewicza i in. (1997).

Problematykę oceny warunków górniczo-geologicz-

nych, a w tym ocen geotechnicznych podejmowano w literaturze zagranicznej bardzo szeroko i nie sposób jej w tym miejscu przytoczyć. Natomiast w literaturze krajowej omawianym zagadnieniem zajmowali się między innymi: Barcchański (1992, 1995, 1996), Brańka i in. (1978), Flisiak i Kłeczek (1994), Garlicki (1984, 1987), Goschutz (1995), Goszcz (1997), Krywult (1997), Krywult i Mateja (1992, 1996), Palarski (1992, 1995), Poborska-Młynarska (1997), Szczepański (1994) czy Ślizowski (1997).

W niniejszym opracowaniu autorzy również podejmują próbę ustosunkowania się do zagadnienia podziemnego składowania odpadów podkreślając znaczenie badań geotechnicznych.

### Cel i przedmiot oceny geotechnicznej masywu skalnego dla składowania odpadów niebezpiecznych w podziemnych wyrobiskach

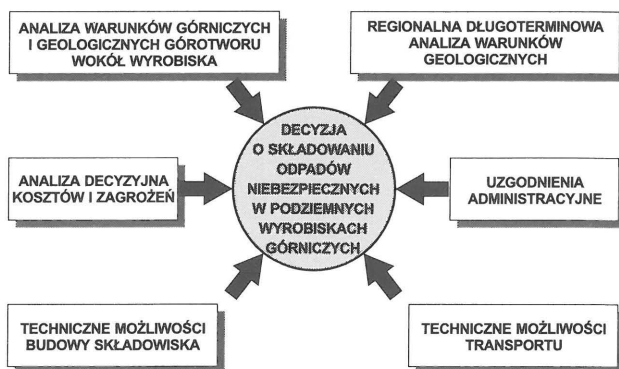
Podstawowym celem oceny geotechnicznej przy składowaniu odpadów niebezpiecznych jest wskazanie czy stateczność wyrobiska-składowiska uwarunkowana zachowaniem się górotworu wokół tego wyrobiska i rodzajem deponowanych odpadów nie spowoduje przeniknięcia niebezpiecznych substancji do poziomów wodonośnych, a dalej do wody pitnej w perspektywie długiego okresu czasu.

Na ogół rozważa się również możliwość wydobycia składowanych odpadów celem ich przetworzenia, w przypadku rozwoju odpowiednich technologii. Przy takim założeniu, utrzymanie stateczności i szczelności układu masyw skalny-wyrobisko jest wręcz konieczne. Aby ryzyko utraty stateczności było wystarczająco małe trzeba przeprowadzić odpowiednie pomiary i obliczenia geotechniczne przy planowaniu i projektowaniu składowiska.

Długotrwała stateczność wyrobisk przeznaczonych do składowania zależy głównie od właściwości fizyczno-mechanicznych masywu skalnego, a w szczególności zmian ich wartości z czasem. Takie zachowanie zależy przede wszystkim od charakterystyki naprężeniowo-deformacyjnej masywu skalnego otaczającego wyrobisko.

Przewidywanie niestabilnych zachowań górotworu w czasie bieżącym może być istotnym powodem do rezygnacji z wykonania składowiska. Występowanie niejednorodności w budowie geologicznej, w połączeniu z postępującym procesem destrukcji skały, stwierdzonym pomiarem, świadczą o możliwości dalszego tworzenia się stref spekań.

Stan fizyczny masywu skalnego wokół planowanego składowiska powinien zatem gwarantować długotrwałą stateczność i szczelność wyrobiska. Przy projektowaniu składowiska należy uwzględnić możliwe zmiany właściwości



Ryc. 1. Schemat systemu decyzyjnego dla składowania odpadów niebezpiecznych w wyrobiskach podziemnych

masywu skalnego spowodowane sposobem wykonania wyrobiska, oddziaływaniem wody, temperatury, reakcjami chemicznymi wywołanymi substancjami zawartymi w wodzie, bądź wreszcie sposobem składowania odpadów. Ogólnie rzecz ujmując, wyrobisko przeznaczone do składowania odpadów niebezpiecznych, powinno zachować długoterminową stateczność i szczelność nawet jeżeli jest ono narażone na skutki przebiegu procesów geomechanicznych, geochemicznych i termicznych (w przypadku odpadów promieniotwórczych wysokoaktywnych), które zwiększają prawdopodobieństwo zmiany jego własności fizycznych. Jest to zatem zadanie niezwykle złożone i wymagające indywidualnej oceny dla konkretnych warunków geologiczno-górnictwowych.

W literaturze niezwykle trudno jest znaleźć opis długoterminowego zachowania się masywu skalnego. Szczególnie opis komplikuje się dla skał kruchych, jeżeli na ich stateczność mają wpływ dynamiczne procesy fizyczne.

Zachowanie ośrodka skalnego pod wpływem długotrwałego oddziaływania naprężeń zależy od jego struktury i właściwości fizyczno-mechanicznych. Najczęściej skały zachowują się krucho z dużym udziałem odkształcenia plastycznego. Udział pęknięć w deformacji ośrodka powoduje, że istnieją duże trudności w opisie matematycznym rozwoju deformacji takiego ośrodka, co jest wyrazem niejednoznaczności rozwoju tego procesu, w takim sensie, że niewielkie zmiany warunków naprężeniowych w jakich następuje deformacja, powodują istotne zmiany w rozwoju procesu pęknięcia. Podstawowym pojęciem, którego używa się do opisu przyczyny zmian procesu pęknięcia jest intensywność naprężeń  $K$ , zdefiniowana jako:

$$K = Y\sigma_a(2C)^{1/2}$$

gdzie:

$Y$  — jest współczynnikiem geometrycznym,

$\sigma_a$  — naprężenie powodujące pęknięcie,

$2C$  — długość pęknięcia.

Jeżeli naprężenia przekroczą wartość krytyczną, to następuje propagacja pęknięć, a więc rozwój odkształceń niesprężystych. W ośrodku spękanym, który ma moduł Younga  $E$ , rozwój pęknięcia nastąpi po przekroczeniu naprężenia krytycznego  $\sigma_t$  (Atkinson & Avdis, 1980):

$$\sigma_t = \left(\frac{E\sigma_c}{\pi C}\right)^{1/2}$$

gdzie:

$$\sigma_t = K^2 \frac{(1-\nu^2)}{E}$$

$\nu$  — współczynnik Poissona.

Jeżeli ośrodek nie jest spękany to rolę czynnika rozpoczynającego pęknięcie może spełniać granica ziarna i wówczas wartość krytyczna może być zdefiniowana jako (Atkinson & Avdis, 1980):

$$\sigma_t = \left(\frac{E\sigma_c}{\pi d}\right)^{1/2}$$

gdzie:

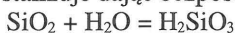
$d$  — średnica ziarna.

W rzeczywistości pęknięcie może rozwijać się znacznie wcześniej niż po przekroczeniu wartości krytycznych. Na propagację pęknięć wpływają zmiany plastyczne w szczytach pęknięć, spowodowane zmianą wytrzymałości ośrodka skalnego w czasie. Do czynników, które mają wpływ na

rozwój procesu spękania należą (Gandhi & Ashby, 1979; Atkinson & Avoris, 1980; Krouzas, 1975):

— wielkość naprężeń  $\sigma_a$ , których duże wartości powodują przyspieszenie tworzenia się stref odkształceń plastycznych. Dla jednorodnego materiału istnieje liniowa zależność pomiędzy logarytmem prędkości propagacji pęknięć a logarytmem intensywności naprężeń,

— obecność wody w porach jest istotnym elementem wpływającym na zmianę wytrzymałości skały na pęknięcie. Z jednej strony, przyczyną zmiany prędkości propagacji pęknięć może być ciśnienie hydrauliczne. Z drugiej natomiast można spodziewać się zmiany w składzie mineralogicznym skały w wyniku procesów fizykochemicznych, które zachodzą w wyniku tzw. korozji naprężeń. Do takich procesów należy np. reakcja kwarcu z wodą prowadząca m.in. do powstania słabego kwasu ortokrzemowego, który niekiedy krystalizuje dając bezpostaciowe krzemiany:



— temperatura skał, której zmiany przyspieszają proces pęknięcia.

— wtórne pola naprężeń związane ze strefami zaburzeń tektonicznych (w szczególności w strefie uskoków) i litologicznych, które powodują zaburzenia w procesie rozwoju pęknięć i mogą być przyczyną zmian w rozkładzie i prędkości tworzenia odkształceń niesprężystych.

W szczególności jeżeli strefa uskokowa jest zawodniona, stanowi ona obszar intensywniejszego przepływu cieczy, a więc wymywania, sufozji, przyspieszonej degradacji środowiska skalnego. Dopływająca woda również obniża wytrzymałość skał na ściskanie. Przyjmuje się, że średnia wytrzymałość skały zawodnionej wynosi 50% wytrzymałości skały suchej.

Z punktu widzenia termodynamiki prędkość propagacji pęknięć może być przybliżona wyrażeniem (Widerhorn & Bolz, 1970):

$$v = v_0 \exp[-\Delta H + 2V^*K / (\pi\rho)^{1/2}] / RT$$

gdzie:

$v_0$  — jest parametrem zależnym od rodzaju skały,

$\Delta H$  — entalpia aktywacji propagacji pęknięć,

$V^*$  — objętość obszaru intensywnych zmian termodynamicznych związanych z pęknięciami,

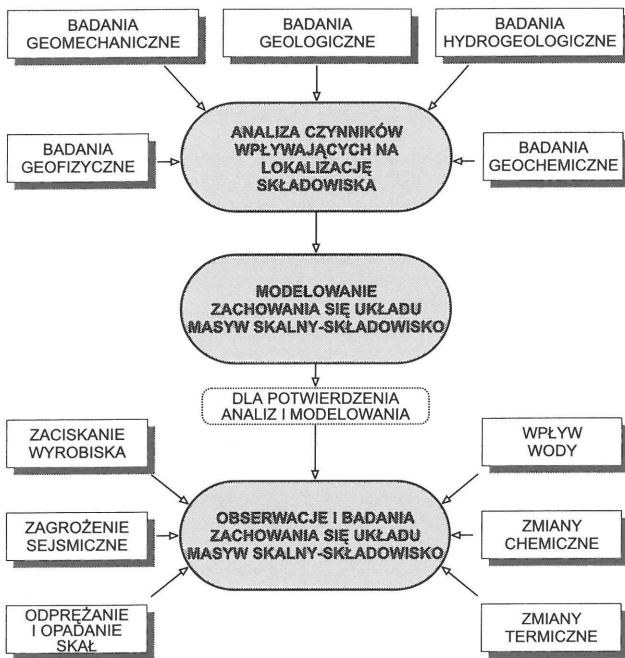
$\rho$  — krzywizna szczytów pęknięć,

$R$  — stała gazowa,

$T$  — temperatura w K.

Równanie to, które zostało sprawdzone dla takich materiałów jak szkło i porcelana, może tylko częściowo być stosowane do takich złożonych ośrodków jak skały. Pokazuje ono jednak bardzo istotne elementy wpływające na prędkość deformacji niesprężystej. Należą do nich: intensywność naprężeń  $K$ , obecność elementów uaktywniających pęknięcie takie jak woda i zawarte w niej roztwory ( $\Delta H$ ), stan spękania początkowego  $V^*$ , wpływ plastyczności  $\rho$  i temperatury  $T$ . Niemniej, te elementy oddziaływania na rozwój spękania nie mogą być w całości opisane w sposób modelowy i przewidywanie ich rozwoju w czasie jest zawodne. Dlatego do sprawdzenia rozwoju strefy spękań należy wykorzystywać metody empiryczne — na przykład metody geofizyczne.

W celu właściwego określenia charakterystyk naprężeniowo-deformacyjnych należy poznać procesy rządzące zachowaniem się masywu skalnego w perspektywie długiego czasu. Efekt działania tych procesów można symulować modelowaniami analitycznymi i numerycznymi. W literaturze jest znanych



Ryc. 2. Schemat oceny geotechnicznej zachowania się układu masyw skalny-składowisko (Pilecki, 1995)

wiele kryteriów wytrzymałościowych, którymi można opisać warunki stanu naprężeniowo-deformacyjnego. Kryteria te mogą być podzielone na kryteria jednoparametrowe takie jak: Griffitha lub dwuparametrowe takie jak: Coulomba-Mohra, Hoeka i Browna i kryteria wyższego rzędu które definiują wielkości inwariantów tensora naprężeń. Mają one charakter empiryczny i uogólniający w związku z tym nie uwzględniają szeregu mechanizmów mających wpływ na proces zniszczenia. Przykładowo nie uwzględniają zmian temperatury, warunków górniczo-geologicznych i różnych form zniszczenia takich jak rozstąpienie i odpajanie się skał, spękań wywołanych dynamicznym oddziaływaniem czy relaksacją naprężeń. Dla projektowania w konkretnych sytuacjach geologicznych interesującym rozwiązaniem może być symulacja numeryczna. Można modelować numerycznie nie tylko zachowanie się masywu skalnego ale również rozkład ciśnień hydraulicznych czy temperatury.

W przypadku modelowania reologicznych właściwości skał, można się oprzeć na teoriach ośrodka plastycznego lub ośrodka krucho-plastycznego. Alternatywą dla modelowania deformacji niesprężystych może być również mechanika ośrodków ciąglych.

Ogólnie można stwierdzić, że opis procesu zniszczenia masywu skalnego wokół składowiska należałoby przeprowadzić w dwóch etapach:

— analizy rozkładu stref deformacji i zniszczeń dla aktualnego stanu wyęźnienia,

— analizy rozwoju stref deformacji i zniszczeń z czasem, w okresie długoterminowym, z uwzględnieniem procesu reologicznego.

### Propozycja badań geotechnicznych

Mając na uwadze wieloelementowy system decyzyjny dotyczący składowania odpadów niebezpiecznych, w naszej propozycji koncentrujemy się na „ocenie geotechnicznej”. Badania te w fazie planowania inwestycji miałyby na celu dostarczenie podstawowych informacji niezbędnych do

podjęcia decyzji o składowaniu i powinny być realizowane w wybranych miejscach w masywie skalnym. Podobne badania lecz o szerszym zasięgu należałoby przeprowadzić na etapie projektowania i wykonawstwa składowiska.

W fazie planowania inwestycji należałoby wyróżnić trzy etapy badań (patrz ryc. 2):

♦ etap I — analiza czynników wpływających na lokalizację składowiska w oparciu o wstępne badania geologiczne, hydrogeologiczne, geomechaniczne, geofizyczne i geochemiczne;

♦ etap II — modelowanie zachowania się górotworu wokół wyrobisk górniczych na podstawie danych zebranych w etapie I, w aspekcie długotrwałej stateczności układu masyw skalny-wyrobisko (w perspektywie np. 10 000 lat);

♦ etap III — monitorowanie zachowania się górotworu w aspekcie wykonanych badań modelowych w etapie I i II. Obserwacje te prowadzone w dłuższym odcinku czasu stanowią dodatkowy element potwierdzający prawidłowość przeprowadzonych badań.

Możliwy jest również wariant, w którym w korzystnych warunkach górniczo-geologicznych, analiza mogłaby się zakończyć na etapie II, natomiast kosztowne badania z etapu III można by przeprowadzić w fazie projektowania.

Ocena geotechniczna powinna być wykonana w bezpośrednim otoczeniu wyrobisk przeznaczonych do składowania.

Do podstawowych zadań w I etapie badań należałoby zaliczyć:

— badania geologiczne: rozpoznanie rodzaju skał, struktury, litologii, tektoniki górotworu, charakteru spękań wokół wyrobisk, (nie uwzględnia się tu analizy geologicznej regionalnej, długoterminowej, która jest przedmiotem odrębnych badań),

— badania hydrogeologiczne: sposób dopływu wody, przepuszczalność górotworu, zagrożenia dopływem ze zbiorników wodnych i poziomów wodonośnych, warunki hydrologiczne,

— badania geomechaniczne: pomiary naprężeń głównych, badania właściwości mechanicznych skał i masywu skalnego, ocena stateczności układu masyw skalny-wyrobisko, analiza zmian temperatury i zmian wywołanych reakcjami chemicznymi na stateczność wyrobiska,

— badania geofizyczne: rozpoznanie charakteru strefy spękań wokół wyrobisk, pomiar właściwości fizyczno-mechanicznych skał, ocena oddziaływań dynamicznych na stateczność wyrobiska,

— badania geochemiczne: pomiar właściwości wody, ocena możliwych reakcji chemicznych płynów ze skałami i ich skutki.

W etapie II przewiduje się przede wszystkim obliczenia analityczne i numeryczne, które mają na celu ocenę długoterminową stateczności i szczelności wyrobiska z uwzględnieniem procesów reologicznych w górotworze, sposobu przepływu płynów w górotworze i zmian termicznych.

W etapie III przewiduje się monitorowanie deformacji i ciśnień w górotworze, zmian ciśnienia płynów porowych oraz jej składu chemicznego, oddziaływań sejsmicznych i zmian temperaturowych. Badania te powinny być prowadzone przez dłuższy nawet kilkuletni okres w celu potwierdzenia przeprowadzonych we wcześniejszym etapie analiz i modeli. Należałoby je rozszerzyć w trakcie budowy składowiska, a w razie potrzeby w czasie jego użytkowania np. w celu kontroli stanu barier izolacyjnych.

Wpływ na stateczność i szczelność wykonanego wyrobiska mają również występujące w masywie skalnym nieciągłości geologiczne. W określonych warunkach obciążeń mogą mieć znaczący wpływ na zachowanie się masywu skalnego. W ogólności dla ograniczenia wpływu nieciągłości

ści na zmniejszenie wytrzymałości masywu skalnego wyrobiska należałoby sytuować:

- w możliwie związłym górotworze,
- w oddaleniu od większych nieciągłości takich jak: uskoki, strefy intensywnego i nieregularnego uławicenia itp.,
- w skałach o mniejszej związłości należy zredukować wymiary wyrobiska,
- unikać warunków wysokiej koncentracji naprężeń wokół wyrobiska.

Wykonanie wyrobiska powinno uwzględniać położenie głównych płaszczyzn nieciągłości. Należy wyeliminować sytuacje tworzenia się niestabilnych bloków skalnych na obrysie wyrobiska.

Szczególnie pomocnym „narzędziem” w ocenie geomechanicznej masywu skalnego otaczającego wyrobisko mogą być klasyfikacje geomechaniczne. Do najpowszechniej stosowanych klasyfikacji należą: system Q Bartona i in. (1974) oraz system RMR opracowany przez Bieniawskiego (1979) z późniejszymi modyfikacjami (Bieniawski, 1989).

### Podsumowanie

Składowanie niebezpiecznych odpadów toksycznych czy promieniotwórczych w podziemnych wyrobiskach górniczych jest związane z mniejszym ryzykiem, niż na powierzchni ziemi. Podjęcie decyzji o lokalizacji takiego składowiska jest procesem wydłużonym w czasie i złożonym ze względu na specjalistyczne badania górotworu. Niektóre kraje poświęciły ponad 10 lat badań, aby dokonać rozeznania możliwości takiego składowania (Witherspoon, 1996).

Istnieją dwa sposoby podziemnego składowania odpadów: wydrążenie nowych wyrobisk, co jest bardzo kosztownym przedsięwzięciem lub wykorzystanie wyrobisk starych, a w razie potrzeby ich modernizacja.

W Polsce istnieją stare kopalnie stojące przed problemem likwidacji. Warunkiem ich wykorzystania jest m.in. przeprowadzenie wstępnych badań scharakteryzowanych powyżej. Przedstawiony w sposób schematyczny projekt badań kreśli również skalę i wagę zagadnień. Badania mające na celu przygotowanie wyrobiska, które w stanie praktycznie nienaruszonym ma przetrwać nawet kilka tysięcy lat rozbudzają emocje, ale zarazem mówią o ogromnej odpowiedzialności i rozważde jakie należy przedsięwziąć.

Tego typu badania były i są prowadzone w wielu krajach świata. Mając na uwadze narastający problem gromadzących się odpadów niebezpiecznych, a z drugiej strony istnienia infrastruktury budownictwa podziemnego, widzimy konieczność podjęcie scharakteryzowanych w niniejszej pracy badań.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr 7T07G03812

### Literatura

- ATKINSON B.K. & AVDIS V. 1980 — Fracture mechanics parameters for some rock-forming minerals determined using an indentation technique. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. and Geomech. Abstr.*, 17: 383–386.
- BARCHAŃSKI B. 1992 — Stan wykorzystania w Europie Zachodniej budownictwa podziemnego do deponowania odpadów specjalnych. *Prace Komisji Górnictwo-Geodezyjnej PAN, Górnictwo*, 29.
- BARCHAŃSKI B. 1995 — Kryteria determinujące dopuszczenie podziemnych wyrobisk do składowania odpadów specjalnych na przykładzie Multideponie Herfa-Neurode. *Gospod. Surow. Miner.*, 11: 95–109.
- BARCHAŃSKI B. 1996 — Możliwości wykorzystania podziemnych wyro-

- bisk górniczych do składowania niektórych odpadów specjalnych. *Mat. Konf. nt. Ochrona środowiska terenów górniczych. Krynica 1996*: 139–156.
- BARTON N.R., LIEN R. & LUNDE J. 1974 — Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6: 189–239.
- BARTON N., MAKURAT A., MONSEN K., VIK G. & TUNBRIDGE L. 1994 — Geotechnical Predictions of the Excavation Disturbed Zone at Stripa, In situ experiments at the Stripa Mine. *Proc. 4th Int. NEA/SKB Symp., Stockholm, 1992*: 77–96.
- BIENIAWSKI Z.T. 1979 — The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. *Proc. 4th Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Montreux, Balkema, Rotterdam, 2*: 41–48.
- BIENIAWSKI Z.T. 1989 — *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York.
- BRĄŃKA S., CHARYSZ W., GARLICKI A., WERNER Z. & ZIĄBKA Z. 1978 — Podziemne magazynowanie węglowodorów oraz innych substancji w złożach soli w Polsce jako nowy kierunek ich wykorzystania dla gospodarki narodowej. *Prz. Geol.*, 26: 90–96.
- DORMUTH K.W. & WHITAKER S.H. 1994 — Relevance of the International Stripa Project to the National Nuclear Waste Management Programme, in situ experiments at the Stripa Mine. *Proc. 4th Int. NEA/SKB Symp., Stockholm, 1992*: 33–43.
- GANDHI C. & ASHBY H.F. 1979 — Fracture mechanism maps for materials which cleave F.C.C., B.C.C. and H.C.P. metals and ceramics. *Acta Metallurgica*, 27: 1565–1602.
- GARLICKI A. 1984 — Przechowywanie odpadów radioaktywnych w wysadach solnych Republiki Federalnej Niemiec. *Mat. Konf. nt. Górnictwo surowców chemicznych, Kraków 8–10 XI 1984*: 90–96.
- GARLICKI A. 1997 — Możliwości podziemnego magazynowania odpadów w polskich złożach soli. *Mat. Konf. nt. Tektonika solna regionu kujawskiego. Uniejów, 23–25 X 1997*: 13–14.
- GOSCHUTZ R. A. 1995 — Od wydobywania rudy do składowiska odpadów radioaktywnych. *Aura*, 7: 25–28.
- GOSZCZ A. 1997 — Problemy zabezpieczenia składowisk odpadów na terenach eksploatacji górniczej. *Mat. Konf. nt. Budowa bezpiecznych składowisk odpadów*: 75–91.
- FLISIAK D. & KŁECZEK Z. 1994 — Geomechanical Research of the Rock Salt in Aspect of Its Utilisations for Building Underground Storages. *Rozprawy i monografie*, 19. Wyd. AGH, Kraków.
- KROUSZ A.S. 1978 — The deformation and fracture kinetics of stress corrosion cracking. *Int. J. Fracture*, 14: 5–15.
- KRYWULT J. 1997 — Składowisko odpadów niebezpiecznych w złożu soli w LGOM. *Mat. Szkoły Gospodarki Odpadami, Rytyro, AGH– PAN CPPGSMiE*.
- KRYWULT J. & MATEJA J. 1992 — Podziemne składowanie odpadów. *Prz. Gór.*, 8: 20–22.
- KRYWULT J. & MATEJA J. 1996 — Zasady wyboru lokalizacji podziemnych składowisk odpadów niebezpiecznych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 2: 23–28.
- MAZURKIEWICZ M., PIOTROWSKI Z. & TAJDUŚ A. 1997 — Lokowanie odpadów w pustkach podziemnych. *Cz. I i II. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, PAN CPPGSMiE*.
- PALARSKI J. 1992 — Kryteria zagospodarowania odpadów przemysłowych w kopalniach. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 3–4: 8–15.
- PALARSKI J. 1995 — Możliwości wykorzystania podziemnych wyrobisk górniczych do składowania odpadów. *Wiad. Gór.*, 10: 446–450.
- PILECKI Z. 1995 — Rock mass behavior around underground excavation and a case study. *Swedish Institute, Report no 200*.
- PUSH R. 1994 — *Waste Disposal in Rock*. Elsevier.
- POBORSKA-MŁYŃNARSKA K. 1997 — Zasady lokalizacji i funkcjonowania składowisk odpadów promieniotwórczych w głębokich formacjach skalnych. *Mat. Szkoły Gospodarki Odpadami, Rytyro, AGH — PAN CPPGSMiE*.
- SZCZEPAŃSKI A. 1994 — Hydrochemiczne i hydromechaniczne uwarunkowania w górotworze dla składowania odpadów. *Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje*, 10: 63–71.
- ŚLIZOWSKI K. 1997 — Koncepcja głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych w Polsce. *Mat. Szkoły Gospodarki Odpadami, Rytyro, AGH — PAN CPPGSMiE*.
- WITHERSPOON P.A. 1996 — Geological Problems in Radioactive Waste Isolation. *Second Worldwide Review, University of California, Berkeley*.
- WIEDERHORN S.H. & BOLZ L.H., 1970 — Stress corrosion and static fatigue of glass. *J. Am. Ceram., Soc.*, 53: 543–548.