

Antoni Kidybiński

GEOTECHNICZNE ASPEKTY ADAPTACJI WYROBISK LIKWIDOWANYCH KOPALŃ WĘGLA NA PODZIEMNE MAGAZYNY GAZU

Streszczenie

W związku z przewidywanym wzrostem zapotrzebowania na gaz w Europie i w Polsce do 2020 roku, a także zamierzoną likwidacją niektórych kopalń węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym – rozpatruje się możliwość wykorzystania wyrobisk niektórych z nich na podziemne magazyny gazu. Pozytywne doświadczenia w tym zakresie uzyskano w Belgii (byłe kopalnie Anderlues oraz Perennes-lez-Binche), a także USA (kopalnia Leyden k. Denver), gdzie – po adaptacji – kopalnie węgla służą przez wiele lat jako magazyny gazu energetycznego dla pobliskich aglomeracji miejskich. Doświadczenia zdobyte podczas budowy zbiorników gazu w tych kopalniach wskazują, że ważną rolę w powodzeniu tego rodzaju przedsięwzięcia odgrywają następujące czynniki geotechniczne: istnienie nieprzepuszczalnego nadkładu, zapobiegającego ucieczkom gazu ku powierzchni, oddalenie kopalni od kopalń sąsiednich – co zapobiega ucieczkom gazu w kierunku poziomym, nieznaczne dopływy wód podziemnych do kopalni – ze względu na oszczędność kosztów stałego odpompowywania wody ze zbiornika, kontrolowane zasięgi strefy spękania skał nad wyeksploatowanymi pokładami węgla, znaczne ilości węgla pozostawionego w złożu (filary, zroby) – co zwiększa pojemność gazową zbiornika ze względu na znaczną sorbowalność metanu przez węgiel, a także obecność w sąsiedztwie wyrobisk porowatych formacji skalnych – co zwiększa elastyczność zbiornika przez oddziaływanie na gaz ciśnienia wód podziemnych. Wszystkie wymienione czynniki zależą w znacznej mierze od właściwości geotechnicznych górotworu otaczającego wyrobiska takich, jak: wytrzymałość i odkształcalność górotworu otaczającego zbiornik, szczelinowatość skał i drożność gazowa szczelin, a także rozmakalność i porowatość skał. Cechy te mogą być określane metodami laboratoryjnymi lub polowymi, znanymi z zastosowań w geomechanice górniczej oraz budownictwie wodnym i tunelowym. W artykule omówiono szczegółowo następujące metody badań przydatne przy rozpoznawaniu przydatności danej kopalni na podziemny zbiornik gazu oraz projektowaniu i wykonawstwie zbiornika:

- badanie wytrzymałości skał na ściskanie (w laboratorium),
- badanie odkształcalności skał (modułów odkształcenia i sprężystości) w laboratorium,
- badanie rozmakalności skał (przy zanurzeniu jednorazowym oraz wielokrotnym),
- analizę kierunków i zagęszczenia szczelin w górotworze,
- badanie drożności gazowej szczelin metodą aerometryczną,
- badanie połowe odkształcalności górotworu w układzie płaskim,
- badanie połowe odkształcalności górotworu w układzie radialnym

oraz sposób uwzględniania wpływu czynnika skali wielkości na parametry geotechniczne skał i górotworu. Omówiono także krajowe doświadczenia z prac adaptacyjnych części wyrobisk byłej kopalni węgla „Nowa Ruda” (pole „Słupiec”) na podziemny magazyn gazu oraz wynikające z tych doświadczeń wnioski. We wnioskach podkreślono, że wymienione powyżej (i omówione w artykule) metody badawcze mogą być przydatne przede wszystkim przy projektowaniu wysokociśnieniowych podziemnych zbiorników gazu i paliw płynnych, natomiast przy rozpatrywaniu możliwości budowy niskociśnieniowego zbiornika gazu w wyrobiskach likwidowanej kopalni węgla pierwszorzędne znaczenie mają czynniki makrogeotechniczne takie, jak: właściwości nieprzepuszczalnego nadkładu, stosunki hydrogeologiczne i dopływy wody do wyrobisk, tektonika złoża w aspekcie ewentualnych połączeń z sąsiednimi kopalniami lub powierzchnią, łączna objętość pustek (wyrobisk) oraz zrobów

pozostawionych w kopalni, masa węgla pozostawionego w złożu i jego właściwości sorpcyjne (oraz szybkość desorpcji), możliwości oraz spodziewane koszty likwidacji wszystkich szybów i otworów wiertniczych z powierzchni, a także obecność w sąsiedztwie wyrobisk wodonośnych skał porowatych. Niezależnie od zagadnień geotechnicznych, ważnym czynnikiem warunkującym powodzenie przedsięwzięcia jest bezpośrednie zaangażowanie w proces projektowania i budowy zbiornika jego przyszłego właściciela i użytkownika.

Geotechnical aspects of adapting openings of a closed coal mine into underground gas storage facility (UGSF)

Abstract

In connection with expected growth of gas consumption both in Europe and in Poland up to the year 2020, as well as closing foreseen of several coal mines in Upper Silesian Coal Basin – it is considered to utilize underground openings of some of these mines as UGSFs. Successful experiences in this area are known from Belgium (former coal mines Anderlues and Perennes-lez-Binche) and the USA (mine Leyden near Denver), where – after adaptation works – these mines are used since many years as the UGSFs, serving local municipal agglomerations. Experience coming from adaptation of these mines into gas storage facilities show the importance of such geotechnical factors as existence of non-permeable overburden which prevents leaking of gas to the surface, far distance from adjacent mines (if they exist) – which prevents horizontal leakages, limited water inflow to the mine – to constrain the costs of permanent water pumping, controlled vertical range of roof failure over coal seams mined, volume and methane sorption/desorption capacity of coal left in a mine (pillars, goabs) – to increase storage volume and porosity of rocks surrounding excavations – which decides about flexibility of a reservoir. All elements mentioned depend on geotechnical features of rock masses surrounding excavations such as the strength and deformability, jointing of rocks and gas conductivity through fractures as well as slakeability and porosity of rocks. These properties may be investigated with both laboratory and field methods known from mining geomechanics practice as well as hydro-engineering and tunneling. Following methods applicable in assessing of coal mine usefulness as a potential UGSF and designing process, are discussed in a paper:

- uniaxial compressive strength test of rock in the laboratory,
- deformability of rock (moduli of elasticity and deformation) in the laboratory,
- slakeability of rocks (both in single and multiple submerging),
- rock jointing analysis (both directions and density of joints),
- gas conductivity of fractures tested with an aerometric probe,
- field testing of deformability of rock mass in a flat system,
- field testing of deformability of rock mass in a radial system,

as well as the role of scale effect on geotechnical parameters of rocks and rock masses.

The Polish experiences were also discussed coming from adaptation works of part of former Nowa Ruda coal mine (section Słupiec) into UGSF and conclusions are drawn from these experiences.

In final conclusions it was pointed out that methods mentioned above and described in a paper are useful primarily in designing high pressure reservoirs while with low pressure ones macro-geotechnical features of rock masses seem to be of prime significance, such as properties of non-permeable overburden, hydro-geological relations and water inflow to the mine, tectonics and its linkage aspect to adjacent mines and to the surface, masses of coal left in a mine, its sorption capacity and desorption rate, costs expected of shafts closure and old boreholes sealing as well as porous aquifers presence close to the openings. Apart from geotechnical problems a direct engagement in mine transforming into UGSF of its future owner or/and operator is considered to be very important condition for the success of the enterprise.

WSTĘP

Rola gazu w gospodarce energetycznej Europy ciągle wzrasta i w zachodniej Europie pokrywa on obecnie około 25% ogólnego zapotrzebowania na energię. Główną przyczyną tego wzrostu jest łatwość użytkowania gazu zarówno w gospodarstwach domowych, jak i w przemyśle oraz jego przewaga ekologiczna nad konkurencyjnymi źródłami energii. Również w przyszłości przewiduje się szybszy wzrost zapotrzebowania na gaz w porównaniu z zapotrzebowaniem na produkty ropopochodne oraz węgiel. Mając to na uwadze podejmowane są strategiczne decyzje odnośnie do infrastruktury składowania i przesyłowej gazu. O ile bowiem w krótkich okresach czasu bezpieczeństwo dostaw zależy głównie od zdolności przesyłowych systemu dystrybucyjnego (rurociągów), o tyle w dłuższych okresach czasu – jest ono funkcją zasobów rynkowych i planowanego wzrostu pojemności składowania.

Podziemne składowanie gazu pozwala na zrównoważenie fluktuacji rynkowego zapotrzebowania na ten surowiec energetyczny z możliwością zaspokajania tego zapotrzebowania przez system dostawczy. Fluktuacja jest spowodowana zmiennym zapotrzebowaniem w skali rocznej, sezonowej (lato – zima) oraz dziennej. Dążenie do zbilansowania możliwości dostawczych z chwilowym zapotrzebowaniem jest szczególnie ważne w krajach importujących gaz, do których zalicza się Polska – w tym przypadku regularność dostaw zależy bowiem nie tylko od sytuacji gospodarczej i politycznej lecz również od problemów technicznych związanych z długością rurociągów, zmianami pogodowymi itp. Duża pojemność zbiorników na gaz pozwala ponadto wykorzystywać je w pełnym zakresie w okresach niższych cen gazu, tworząc rezerwę na okresy dużego zapotrzebowania.

Do podziemnego składowania gazu wykorzystuje się:

- wyeksploatowane złoża gazu i ropy naftowej,
- poziomy wodonośne w skałach porowatych,
- kawerny w złożach soli oraz
- wydrążone wyrobiska i opuszczone kopalnie.

Według danych z 2002 roku (Stamataki 2002) ogólna liczba podziemnych zbiorników gazu w świecie wynosiła 559, zaś ich łączna pojemność – około $290 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Szacuje się, że 76% ogólnej liczby zbiorników stanowią wyeksploatowane złoża ropy i gazu, 15% – wodonośce, 8% – kawerny solne i 1% – inne, w tym stare kopalnie. W Europie i Azji Centralnej jest używanych 135 zbiorników o ogólnej pojemności $175 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Przewidywane zapotrzebowanie na gaz w Europie – które do 2020 roku przypuszczalnie wzrośnie o około 85% – w przypadku niektórych krajów będzie oznaczało uzależnienie się od importu, tym bardziej, jeśli źródłem zaopatrzenia będzie jeden wielki dostawca. Tworzenie przeto podziemnych zbiorników gazu w Europie ma duże znaczenie nie tylko dla kraju, który je buduje, lecz również dla krajów sąsiednich, które nie mają własnej infrastruktury składowania.

W przypadku składowania gazu w wyrobiskach **dawnych kopalń węgla kamiennego**, istnieje możliwość znacznego powiększenia objętości gazu ponad sumaryczną objętość wyrobisk podziemnych – przez wykorzystanie sorpcyjno-desorpcyjnej zdolności węgla pozostawionego w filarach, niewyeksploatowanych partiach złoża oraz zrobach. Absorbowanych może być 7–8 m^3 metanu na 1 Mg czystej substancji węglowej.

1. KRAJOWE DOŚWIADCZENIA W ZAKRESIE WYKORZYSTYWANIA WYROBISK GÓRNICZYCH LIKWIDOWANYCH KOPALŃ WĘGLA NA PODZIEMNE MAGAZYNY GAZU (PMG)

Próby bezzbiornikowego magazynowania metanu w wygradzonych nieczynnych wyrobiskach czynnych kopalń węglowych podjęto w związku z małym i nierównomiernym wykorzystywaniem metanu otrzymywanego z procesu odmetanowania pokładów węglowych dla zwalczania zagrożenia metanowego – w kopalniach „Pniówek”, „Zofiówka” (Berger, Nawrat 2003), „Brzeszcze” i „Krupiński”. Otomowanie przeznaczonych do składowania metanu wyrobisk pozwoliło na uzyskanie jedynie bardzo niskiego ciśnienia składowania – rzędu 0,03 MPa. W kopalni „Morcinek” próba składowania metanu w nieczynnym szybie zakończyła się wybuchem gazu.

Kompleksowy program przystosowania całej likwidowanej kopalni węglowej na podziemny magazyn gazu opracowano i częściowo zrealizowano w latach 1995–2000 w kopalni „Nowa Ruda” i dotyczył on wyrobisk wykonanych w oddzielnym polu „Słupiec” (Cisek, Dybciak, Landsberg 2001).

Pole górnicze „Słupiec” stanowiło oddzielny ruch byłej kopalni „Nowa Ruda”, niełączący się wyrobiskami z macierzystą kopalnią, co było czynnikiem sprzyjającym dla wykonania w nim PMG. Zaprojektowano dwa warianty magazynu, a mianowicie magazyn wysokociśnieniowy (1,0–4,0 MPa) i niskociśnieniowy (0,2–1,0 MPa). Na magazyn wysokociśnieniowy wybrano chodniki wydrążone w skałach podłoża krystalicznego (gabra i diabazy), co gwarantowało jego szczelność ze względu na dużą wytrzymałość i bardzo małą porowatość tych skał. Musiałyby one zostać jednak szczelnie odizolowane od strefy eksploatacyjnej oraz szybów za pomocą wysokociśnieniowych tam gazoszczelnych. Pojemność geometryczna wyrobisk wynosiła około 220 tys. m³, co przy ciśnieniu roboczym 4,0 MPa umożliwiałyby zmagazynowanie 8,8 mln m³ gazu.

Magazyn niskociśnieniowy zgodnie z projektem, miał obejmować wszystkie wyrobiska korytarzowe pola górniczego „Słupiec”, zroby poeksploatacyjne oraz pozostawione w złożu resztki węgla. Objętość geometryczną wszystkich wyrobisk oszacowano na 7,6–12,5 mln m³, co przy ciśnieniu 1,0 MPa pozwoliłoby na zmagazynowanie 76–125 mln m³ gazu (bez sorpcji w węglu), zaś łącznie z sorpcją w 17 mln Mg węgla – od 190 do 240 mln m³ gazu.

Do głównych zadań geotechnicznych, związanych z omawianym projektem zbiornika niskociśnieniowego, należało:

- trwałe uszczelnienie warstwy wodonośnej w górotworze, wynikającej ze spiętrzenia wód podziemnych na wysokość 170 m ponad planowany strop PMG (teoretycznie słup wody o tej wysokości tworzy ciśnienie 1,7 MPa, co zapewnia szczelność magazynu przy planowanym zakresie ciśnień roboczych 0,2–0,6 MPa),
- doszczelnienie zrobów w górotworze nierozmakającym (koło szybu „Jan”),
- wyeliminowanie połączeń między wyrobiskami PMG a powierzchnią przez stare (70-letnie) wyrobiska przecinające warstwę wodonośną,

- zaprojektowanie i wykonanie statecznych tam ciśnieniowych w wyrobiskach wychodzących na zewnątrz PMG, w tym – korków w szybach,
- zaprojektowanie i wykonanie systemu monitorowania ruchu gazu oraz górotworu poza obszarem PMG,
- przeprowadzenie likwidacji szybów w sposób zapewniający szczelność i umożliwiający odwadnianie PMG (szyby „Nowy I”, „Nowy II” i „Jan”) w ilości 2,7–4,4 m³/min.

Do ważnych zadań poznawczych, które mogły być zrealizowane dopiero na gotowym obiekcie należało między innymi odzyskiwanie gazu zasorbowanego w węglu oraz zakres spadku ciśnienia roboczego dla uruchomienia procesu desorpcji.

Wszystkie wymienione zadania wymagają znajomości właściwości geomechanicznych i hydrogeologicznych górotworu takich, jak odkształcalność, wytrzymałość oraz przepuszczalność. Szczegółowego rozpracowania wymaga ponadto magazyn wysokociśnieniowy, który – ze względu na duży zakres ciśnień roboczych – wymaga iniekcyjnego wzmocnienia górotworu w strefie zabudowy tam ciśnieniowych, szczelin i uskoków oraz zabudowy uszczelniającej wyrobisk na wymagany zakres ciśnień.

2. ZAGRANICZNE DOŚWIADCZENIA W ZAKRESIE WYKORZYSTYWANIA WYROBISK PODZIEMNYCH NA ZBIORNIKI CIŚNIENIOWE GAZU

Ważniejsze doświadczenia zagraniczne dotyczą wykorzystania na zbiorniki gazu:

- specjalnie wydrążonych komór podziemnych o umocnionych ścianach (*lined rock caverns*, LRC) w skałach magmowych (Szwecja) lub komór wypłukanych w wysadach solnych – bez dodatkowych zabezpieczeń (Niemcy, USA),
- wyrobisk próbnych o umocnionych ścianach w skałach karbonu węglonośnego (Japonia),
- całych zaniechanych kopalń węgla (USA, Belgia).

W wymienionych trzech przypadkach różne są objętości gazu nieodzyskiwalnego (wypełniającego zbiornik), gazu buforowego („poduszka gazowa”) oraz gazu roboczego, będącego przedmiotem obrotu handlowego. W przypadku kopalń węgla kamiennego występuje także czwarty typ gazu (pod względem jego roli w zbiorniku), a mianowicie gaz zasorbowany w węglu pozostawionym w kopalni.

2.1. Zbiorniki gazu w specjalnie wydrążonych komorach

Zbiorniki gazu w specjalnie wydrążonych komorach w skałach magmowych zaczęto budować w południowej Szwecji we wczesnych latach dziewięćdziesiątych (Stille, Johansson, Stark 1994). Największy zbiornik o objętości 40 tys. m³ wydrążono na głębokości 115 m pod powierzchnią terenu, nadając mu kształt pionowo ustawionego walca (o wysokości 50 m i średnicy 28 m) udostępnionego w części zarówno dolnej, jak i górnej nachylonymi tunelami wychodzącymi na powierzchnię. Odsłonięte ściany zbiornika wyrównano betonem, na którym umieszczono nieprzepuszczalny pancerz stalowy przewidziany na ciśnienie gazu do 20 MPa. Do problemów geotech-

nicznych, które napotkano przy budowie należały odkształcenia skalnego otoczenia zbiornika oraz zmiany odkształceń w czasie cyklicznych obciążeń. W celu ich rozwiązania wykonano próbne badania w tunelu o średnicy 4,4 m, w którym przy ciśnieniu do 52 MPa, deformacja ścianki skalnej wyniosła 6 mm. Przy ciśnieniu przekraczającym 40 MPa w skałach podczas obciążania występowały trzaski. Testy w zbiorniku próbnym wykorzystano do zmodyfikowania metody oceny skał, której podstawę stanowi aktualny system klasyfikacji masywów skalnych. Do zaprojektowania zbiornika zastosowano modelowanie deformacji metodą elementów skończonych oraz rachunek prawdopodobieństwa do analizy zniszczeniowej. W ścianach zbiornika zamontowano czujniki deformacji skał umożliwiające śledzenie pracy masywu skalnego w czasie wzrostu i spadku ciśnienia gazu w zbiorniku.

Podobne próby zostały podjęte w USA w 1997 roku przez firmę Sofregaz US Inc. z zamiarem budowy podziemnych komorowych zbiorników gazu w tych częściach kraju, gdzie ich dotychczas nie było – a mianowicie na północnym wschodzie, północnym zachodzie (wybrzeże Pacyfiku) i na południu (wybrzeże Atlantyku). W rejonach tych stwierdzono występowanie w podłożu silnie związłych skał przydatnych do budowy ciśnieniowych zbiorników gazu. Rozwój sieci gazowej w USA spowodował, że w związku z dalszym planowaniem podziemnych zbiorników sporządzono mapę, na której wykazano występowanie różnych formacji związłych skał w podłożu, główne linie przesyłowe gazu (rurociągi) oraz główne skupiska konsumentów gazu takie, jak Boston, N. York i Atlanta (SCNG Project, internet).

Tam, gdzie w podłożu nie występują skały mocne i niespękane, szuka się możliwości budowy podziemnych zbiorników gazu w rejonach występowania wysadów (diapirów) solnych lub innych nagromadzeń soli o dużej grubości. W takich przypadkach komory mogą być drażnione metodą wypłukiwania przez otwory wiertnicze, co nie wymaga prowadzenia robót górniczych pod ziemią, zaś służyć mogą do podziemnego magazynowania zarówno ropy naftowej, jak i gazu. W 2002 roku, na przykład w stanie Nowy York były czynne 23 zbiorniki podziemne gazu naturalnego oraz trzy zbiorniki gazu płynnego (LPG – *liquefied petroleum gas*) o łącznej objętości 2 mld m³ gazu naturalnego i 670 tys. m³ gazu płynnego (wg danych NYS Department of Environmental Conservation – internet).

W licznych wysadach solnych w Niemczech wypłukane w złożu solnym kawerny są używane nie tylko do składowania produktów ropopochodnych oraz gazu naturalnego, lecz także jako szczytowe magazyny czystej energii w postaci sprężonego powietrza. Historię budowy i eksploatacji takich dwóch zbiorników w rejonie Neuenhutorf opisał H.G. Haddenhorst (1989).

2.2. Zbiorniki gazu w skałach karbonu węglonośnego w wyrobiskach o umocnionych ścianach

Przykładem specjalnie wydrażonego zbiornika testowego w skałach karbonu węglonośnego (jednak z dala od czynnych kopalń węgla) jest zbiornik ciśnieniowy na sprężone powietrze zbudowany na wyspie Hokkaido w Japonii (Ishihata 1997). Zbiornik ten o objętości 1600 m³ miał kształt poziomego walca o średnicy zewnętrznej 3,3 m, wewnętrznej 2,5 m i długości całkowitej 27 m (w tym część robocza 16 m,

korek wewnętrzny 2,0 m i korek zewnętrzny 9,0 m) i usytuowany został w piaskowcach przewarstwionych mułowcami piaszczystymi o wytrzymałości na ściskanie 20–50 MPa, na głębokości 450 m.

Powierzchnię skał po wydrążeniu wyrobiska wyrównano betonem, na który położono tubingi segmentowe oraz warstwę uszczelniającą złącza tubingów wraz z ich wypełnieniem. Skały w masywie miały moduł odkształcenia w partiach niespękanych 5–10 GPa, zaś w partiach spękanych 1–5 GPa. Ciśnienie prób wynosiło w przybliżeniu 10 MPa z tym, że początkowo zadawano ciśnienie wodą do 8 MPa, następnie zaś – w celu sprawdzenia szczelności – powietrzem (0,9 MPa). Moduł odkształcenia obliczony z testów wynosił 4 GPa, zaś ucieczki powietrza po 150 godz. zatłoczenia wynosiły do 3,5%.

Stwierdzono niesymetryczną deformację przekroju poprzecznego wyrobiska z największym ugięciem w partii spągowej, wynoszącym 23 mm, pozostałe deformacje radialne wynosiły 1–5 mm, zaś rozsuniecie się segmentów tubingów wynosiło 1–13 mm. Na podstawie omawianych testów zaprojektowano zbiornik roboczy długości całkowitej 73,5 m, średnicy zewnętrznej 7,4 m, długości korków 3,0 m (wewnętrznego) i 13,5 m (zewnętrznego).

2.3. Zbiorniki gazu w nieczynnych kopalniach

Zbiornik gazu, który jest wykorzystywany od 40 lat, został zbudowany w nieczynnej kopalni Leyden (Colorado, USA).

Kopalnia Leyden jest położona około 22 km na północny zachód od centrum Denver (koło miejscowości Arvada) i jest – jak dotąd – jedyną byłą kopalnią węgla w Stanach Zjednoczonych, w której magazynuje się gaz. W latach 1903–1950 w kopalni tej eksploatacja była prowadzona systemem filarowo-komorowym dwóch blisko siebie zalegających pokładów węgla (o grubości 2,4–3,0 m każdy). Wyeksploatowano w tym czasie około 5,44 mln Mg, przy stopniu wykorzystania złoża około 35%. Szacuje się przeto (EPA) pozostawione resztki węgla na około 10 mln Mg, a ich zdolność sorpcyjną na 85–119 mln m³ gazu.

Nadkład złoża stanowią piaskowce gęsto przewarstwione ilowcami oraz 20 m mułowca ponad formacją węglową Laramie (wieku kredowego) – co przy braku objawów osiadania powierzchni uznaje się za dowód szczelności warstw nadkładowych. W spągu wyeksploatowanych pokładów występują porowate zawodnione piaskowce. Wymiary pola górniczego kopalni Leyden wynoszą 5×3 km. Kopalnia miała cztery szyby, w tym jeden wentylacyjny, który jako jedyny łączył wyrobiska w obu pokładach. Po zakończeniu eksploatacji kopalnia została zatopiona, co spowodowało częściowe zapadnięcie się stropu komór (do 20 m wysokości), a za źródło wód uważa się warstwy wodonośnego piaskowca zalegające poniżej serii kredowej, gdzie wody znajdują się pod ciśnieniem hydrostatycznym.

W 1959 roku kopalnia – jako jedna z 16 analizowanych w okolicy – została wybrana jako najbardziej nadająca się na podziemny magazyn gazu. Wypompowano z niej wodę, uszczelniono szyby i odwiercono dwa otwory z powierzchni służące do stałego odwadniania (ok. 6 m³/godz.). Uszczelniające wypełnienie szybów obejmowało (od dołu) 7 m cementacji, zasypkę żwirową i 7 m ubijanej gliny (na górze). W ramach testów wtłoczono

kompresorami do wyrobisk 280 tys. m³ powietrza i mierząc jego ciśnienie w miarę upływu czasu stwierdzono, że nie ma istotnych ucieczek.

W listopadzie 1960 roku zatłoczono do PMG 21 mln m³ gazu do ciśnienia 1,4 MPa i przez ponad miesiąc utrzymywano gaz w zbiorniku nie odnotowując istotnych strat. Następnie rozpoczęto eksploatację zbiornika, przy maksymalnym ciśnieniu składowania wynoszącym 1,7 MPa, bowiem przy próbach podwyższania go ponad tę wartość stwierdzono przecieki przez uszczelnienia szybów. Całkowita pojemność zbiornika wynosi 85 mln m³ włączając wody stojące i wolne przestrzenie, zaś robocza pojemność wynosi 62 mln m³ gazu.

Do 1990 roku PMG (którego operatorem był Public Service Company Colorado, PSCo) był używany tylko w okresie szczytowego zapotrzebowania w zimie – 2–3 razy w roku. Obecnie gaz jest przesyłany do odbiorców przez ponad 100 dni w roku, uzupełniając dobowe fluktuacje zapotrzebowania metropolii Denver i obsługując 20% jej ogólnego zużycia gazu. Zasilanie odbiorców gazem w zimne dni okresu zimowego osiąga szczytowo ponad 30 mln m³/dobę. Do zbiornika – mimo, że ma on trzy własne stacje kompresorów – gaz jest dostarczany bezpośrednio z rurociągu tranzytowego o ciśnieniu 2,2–4,8 MPa – co eliminuje potrzebę użycia kompresorów. Gaz jest wyprowadzany i odprowadzany ze zbiornika przez 14 uzbrojonych otworów wiertniczych z powierzchni, o przepływie do 2 mln m³ gazu na dobę. Podczas eksploatacji zbiornika jego operator stara się utrzymywać ciśnienie składowania na poziomie bliskim ciśnieniu pobliskich warstw wodonośnych, co minimalizuje objętość wody dopływającej do zbiornika – która musi być odpompowywana.

Objętość pustek powstałych po filarowej eksploatacji węgla szacuje się na 3,1–3,7 mln m³, przy pierwotnej objętości wyeksploatowanego węgla wynoszącej 4,2 mln m³.

Korzystnie przedstawiają się sprawy ekonomiczne dotyczące omawianego zbiornika Leyden. Operatorska firma zainwestowała w niego bowiem ogółem 18 mln USD, zaś zbiornik osiągnął obecnie wartość około 100 mln USD. Na samej różnicy cen gazu w okresach szczytu i niskiego zapotrzebowania, uzyskuje się rocznie 14 mln USD. Była to więc dla PSCo inwestycja w pełni opłacalna, zaś sukces kopalni Leyden można przypisać nieprzepuszczalnemu nadkładowi, co mimo małej głębokości pozwoliło na minimalizację ucieczek gazu przez nadkład. Zaletą zbiornika jest także duża powierzchnia składowania wynikająca z rozległego zasięgu poziomego eksploatacji węgla oraz leżąca pod pokładami seria porowatych piaskowców, które prawdopodobnie stanowią dodatkowy zbiornik w warstwie wodonośnej. Duża objętość pozostawionego w złożu węgla (ok. 65% zasobów) tworzy także możliwość sorbowania i desorbowania składowanego gazu.

Monitorująca eksploatację zbiornika Agencja Ochrony Środowiska (EPA) uważa, że w likwidowanych kopalniach węgla, znajdujących się w pobliżu czynnych kopalń eksploatujących pokłady metanowe, są duże szanse na składowanie metanu z pokładów węgla (CBM) z tych kopalń. Poprawi to ich bilans energetyczny, obniżając koszty eksploatacji węgla i zwiększając bezpieczeństwo pracy w czynnych kopalniach. Składowanie metanu może się odbywać łącznie z gazem naturalnym (ziemnym) lub oddzielnie.

Po ustawowym wprowadzeniu w Belgii rozdziału między dystrybutorami a składownikami i transporterami gazu dotychczasowy właściciel zbiorników podziemnych (Distrigaz) zajmuje się obecnie wyłącznie dystrybucją gazu; instalacje zaś składowania i przesyłowe przejęła firma FLUXYS. Dysponuje ona obecnie dwoma zbiornikami utworzonymi w byłych kopalniach węgla, a mianowicie: „Anderlues” (położonym na terenie byłej kopalni węgla „Anderlues”) oraz „Peronnes-lez Binche” (na zachód od poprzedniej). Oba zbiorniki leżą około 70 km na południowy zachód od Brukseli i mają po około 8 mln m³ objętości pustek podziemnych. Ciśnienie składowania jest efektywnie niskie i wynosi od 1,8 do 3,5 bar (0,18–0,35 MPa). Każdy ze zbiorników obejmuje kompleks wyrobisk podziemnych, na głębokości około 600 i 1000 m, poprzednio eksploatowanych w tym rejonie połączonych 6–7 małych kopalń. Każdy z wymienionych zbiorników udostępniony jest dwoma szybami, z których jeden służy do wprowadzania gazu do zbiornika, drugi zaś do wyprowadzania gazu do rurociągu odbiorczego.

Eksploatacja węgla w tych kopalniach została zakończona w latach 1969–1985.

W kończących eksploatację kopalniach najpierw zaczęto lokalnie, w wygradzonych wyrobiskach składować metan wydzielający się z pozostawionego w kopalniach węgla (metanonośność węgla wynosiła 25 m³/Mg cz.s.w.) oraz produkować gaz koksowniczy – składując go razem z metanem, a następnie rozprowadzając do odbiorców z pomocą stale rozbudowywanego systemu rurociągów.

Pierwsze próby produkcji gazu w kopalniach węgla koksowych miały miejsce już 80 lat temu. Gaz dostarczano głównie do elektrowni, a jego wartość kaloryczna wahała się od 3000–4000 kcal (gaz koksowniczy lub gaz kopalniany) do 9000 kcal (czysty metan). Przy kopalni Anderlues pracowała koksownia, zaś łączna produkcja gazu koksowniczego razem z gazem kopalnianym wynosiła około 100 tys. m³/godz. Rozbudowywana stale sieć rurociągów zaczęła się od 10 km, a obecnie jej długość wynosi ponad 3000 km. Ciśnienie gazu w rurociągach wynosiło 8 i 15 bar, obecnie dochodzi do 66 bar, zaś średnice rurociągów osiągają 900 mm. Od 1969 roku, poza rozprowadzaniem gazu z kopalń węglowych, zaczęto dodatkowo sprowadzać gaz z Holandii (Groningen), a następnie z Algerii oraz z platform na Morzu Północnym.

Przy wyborze najodpowiedniejszych kopalń węglowych na przyszłe podziemne zbiorniki gazu kierowano się głównie stopniem zawodnienia kopalń oraz grubością i szczelnością nadkładu złoża. Rejon Anderlues został wybrany głównie ze względu na małe zawodnienie (do 8 m³/dobe) – co jest korzystne z następujących względów:

- niskich kosztów energii na pompowanie wody oraz wymiany skorodowanych pomp oraz rur w systemie odwadniającym – ze względu na słone wody kopalniane,
- niewielką redukcję objętości pustek służących do składowania gazu,
- niewielki stopień zawilgocenia składowanego gazu (który wymaga osuszania przed wysłaniem do odbiorców).

Charakterystyczną cechą podziemnych zbiorników gazu w wyrobiskach kopalń węgla w Belgii (rejon Anderlues-Binche) jest znaczne wykorzystanie sorpcji –

desorpcji gazu w węglu w ogólnej objętości składowanego gazu. Stopień wyeksploatowania węgla w pokładach uprzednio wybieranych przez kopalnie podziemne tego rejonu wynosi około 40%, co oznacza, że 60% zasobów pozostało w złożach. Na podstawie wieloletnich doświadczeń składowania gazu w kopalniach ocenia się, że udział gazu sorbowanego w węglu przewyższa 4–10-krotnie objętość gazu zawartego w pustkach podziemnych w poszczególnych zbiornikach. Przy podanym wyżej przedziale ciśnień składowania gazu w zbiorniku Anderlues całkowita jego objętość wynosi 180–200 mln m³, z czego zaledwie około 10% w pustkach pogórnich, reszta zaś zasorbowana jest w węglu. Okres napełniania zbiornika trwa do 3 miesięcy (20 tys. m³/godz.).

Najistotniejsze dla szczelności zbiornika jest uszczelnienie zarówno likwidowanych, jak i przewidzianych do użytkowania w zbiorniku szybów kopalnianych. W kopalni Anderlues było to wykonywane niezwykle starannie, przy zastosowaniu szczegółowych, wcześniej opracowanych procedur. Podstawę uszczelniania stanowiło etapowe wypełnianie szybów betonem (z pozostawieniem w nim wielkośrednicowych rurociągów złożonych ze skręcanych segmentów, z badaniem szczelności ich połączeń przed zacementowaniem – w przypadku gdy szyb miał służyć do użytkowania zbiornika). Niezależnie natomiast od tego czy szyb był likwidowany ostatecznie, czy też nie, uszczelniano kontakt obudowy (betonowej lub murowej) z górotworem przez ułożenie w pionie pierścieni uszczelniających, w pionowych odległościach wynoszących w szybach 60 m. Pierścień taki wykonywano, wierząc poziome otwory małosśrednicowe przez obudowę szybową do górotworu i zamrażając górotwór w celu umożliwienia usunięcia segmentu obudowy i przyległych skał na pewien czas, a następnie wypełnienia pierścienia wokół szybu betonem.

Szczelność zbiorników kopalnianych jest na bieżąco monitorowana w czasie ich pracy przez system czujników rozmieszczonych w specjalnie wykonanych płytkich otworach wiertniczych z powierzchni do zwierciadła wód gruntowych (na całym obszarze składowania), jak również czujników wokół szybów. Poza bezpośrednimi pomiarami, z otworów tych regularnie pobiera się do analizy próbki wody i gazów.

Maksymalne ciśnienie składowania gazu w zbiornikach zbudowanych w dawnych kopalniach węgla zależy od grubości nieprzepuszczalnego nadkładu, która w przypadku kopalni Anderlues wynosi minimalnie 15 m (stąd niskie ciśnienie składowania przyjęte w tym zbiorniku).

Dodatkowym elementem jest budowa geologiczna. W przypadku omawianego zbiornika wychodnie pokładów węglowych wychodzą bezpośrednio pod cienką warstwę nieprzepuszczalną na niewielkiej głębokości 70–100 m, gdzie znajdują się najpłycej położone stare wyrobiska górnicze. Przy pierwszym zatłaczaniu gazu do zbiornika ciśnienie zwiększano stopniowo:

- ciśnienie 0–2 bar utrzymywano przez 1 miesiąc,
- przyrosty ciśnienia o 0,5 bar (co 2 tygodnie),
- ciśnienie 5 bar – utrzymywano przez 3 miesiące.

Był to ostateczny test sprawności i przydatności zbiornika w wyrobiskach górniczych.

Na podstawie doświadczeń uzyskanych w kopalni Anderlues można przyjąć następujące racjonalne kryteria wyboru likwidowanej kopalni węgla na podziemny zbiornik gazu:

- znaczna odległość od pracujących podziemnych kopalń – w celu uniemożliwienia przebicia się gazu do czynnej kopalni,
- szczelne przykrycie zbiornika (odpowiedniej grubości warstwą wodonośną lub nieprzepuszczalną np. ilastą),
- preferencja dla kopalń suchych lub o małym dopływie wody oraz mała mineralizacja wód podziemnych.

Podsumowując zagraniczne doświadczenia w zakresie wykorzystania wyrobisk byłych kopalń węgla na podziemne magazyny gazu, można stwierdzić co następuje:

1. Skuteczne cykliczne magazynowanie gazu w byłej kopalni węgla wymaga dobrania najbardziej do tego sprzyjających warunków, a w szczególności: nieprzepuszczalnego nadkładu, optymalnie – średniego zawodnienia kopalni, możliwie dużej objętości udostępnionego, a niewyeksplotowanego węgla, niewielkiej liczby wyrobisk udostępniających złożę z powierzchni – wymagających szczelnego podsadzenia oraz usytuowania obiektu w pobliżu dużego kręgu odbiorców gazu o znacznych sezonowych i dobowych wahaniami zapotrzebowania.
2. Próby i badania zbiornika – po uszczelnieniu szybów – są realizowane za pomocą powietrza wtłaczanego kompresorami, a następnie obserwacji – w ciągu 1–2 miesięcy spadku ciśnienia powietrza w układzie. Z oczywistych względów ekonomicznych nadciśnienie wtłoczonego powietrza w stosunku do ciśnienia atmosferycznego może być stosunkowo niewielkie.
3. Składowanie gazu w kopalni może wymagać jego obróbki przed iniekcją lub przed wysłaniem go do odbiorców, na przykład oddzielenia pary wodnej (za pomocą obiegu glikolu), wzbogacenia propanem w celu wyeliminowania adsorpcji wyższych węglowodorów na powierzchni węgla, a także wstępnego oszacowania potencjalnych strat gazu na wypełnienie PMG i „poduszkę gazową” (gaz buforowy).
4. Opłacalność usytuowania PMG w byłej kopalni węgla – przy trafnym doborze i wyposażeniu – szacuje się według okresu zwrotu nakładów na około 6 lat, przy kosztach operacyjnych wynoszących 0,019–0,043 USD na 1 m³ sprzedawanego gazu, co jest porównywalne z konwencjonalnymi zbiornikami o krótkim cyklu przechowywania (Anon. 1998).

3. OGÓLNY ZAKRES BADAŃ GEOMECHANICZNYCH

Każdy zbiornik ciśnieniowy usytuowany w obrębie skorupy ziemskiej, niezależnie od zakresu ciśnień składowanego medium gazowego (naturalny gaz ziemny, metan itp.) bądź płynnego (skroplony gaz ziemny – ropa naftowa itp.), stwarza dwa potencjalne zagrożenia, a mianowicie:

- utraty istotnej części składowanego medium wskutek nieszczelności zbiornika,
- uszkodzenia lub zniszczenia bezpośredniego otoczenia zbiornika wskutek niedostatecznego oporu skał na ciśnienie wewnętrzne w zbiorniku.

W badaniach cech naturalnego środowiska skalnego, w którym usytuowany ma być zbiornik, powinny być brane pod uwagę wymienione zagrożenia – dlatego powinny być oceniane następujące parametry: szczelinowatość, przepuszczalność, wytrzymałość i odkształcalność bezpośredniego otoczenia zbiornika. Badania te mają szczególnie duże znaczenie w przypadku zbiorników wysokociśnieniowych (2–10 MPa), które wymagają uszczelnienia konkretnego wyrobiska podziemnego wykładką cementową, tubingami i powłoką uszczelniającą.

Zbyt duża – a zwłaszcza nierównomierna – odkształcalność ścianki skalnej spowodować może nadmierną deformację i rozszczelnienie obudowy zbiornika. Przed wyborem wyrobiska na PMG zbadane powinno być jego najbliższe otoczenie pod kątem ewentualnego występowania w nim pustek spowodowanych eksploatacją węgla lub nieciągłymi przemieszczeniami górotworu wskutek jego osiadania, a także obecność skał słabych i rozmakających w strefie możliwego oddziaływania wody, zaś następnie – po wykluczeniu wymienionych zjawisk – zbadana powinna być szczelinowatość, odkształcalność i wytrzymałość poszczególnych skał tworzących otoczenie zbiornika.

Zbiorniki wysokociśnieniowe pozwalają na magazynowanie większych objętości gazu wskutek wysokiego ciśnienia jego sprężenia, jednak własna objętość zbiorników może osiągać najwyżej kilkadziesiąt tysięcy metrów sześciennych. Praca tych zbiorników w dłuższym okresie czasu jest bardziej przewidywalna, a skład magazynowanego gazu nie ulega większym zmianom podczas składowania.

W przypadku zbiorników niskociśnieniowych (<2 MPa) ich objętość jest na ogół znacznie większa. W skład ich wchodzi bowiem wszystkie wyrobiska głębinowe likwidowanej kopalni łącznie ze zrobami, a ponadto pojemność sorpcyjna pozostawionego w kopalni węgla i – ewentualnie – część pojemności porowej przyległych wodonosów. Ewentualne zmiany właściwości tak wielkiego i różnorodnego zbiornika są trudniej przewidywalne, większa jest objętość strat gazu wypełniającego i buforowego, zaś skład magazynowanego gazu może w nim ulegać zmianom wskutek reakcji z otoczeniem.

Badania otoczenia zbiornika niskociśnieniowego mają głównie charakter makroskopowy i dotyczą przybliżonej objętości sumarycznej pustki, sytuacji hydrogeologicznej, liczby i średnicy szybów oraz ich stanu utrzymania, ewentualnych innych połączeń z powierzchnią (upadowe, sztolnie, otwory wiertnicze), masy węgla pozostawionego w filarach, zrobach i resztkach poeksploatacyjnych, przede wszystkim zaś – obecności i szczelności nieprzepuszczalnego pokrycia w nadkładzie.

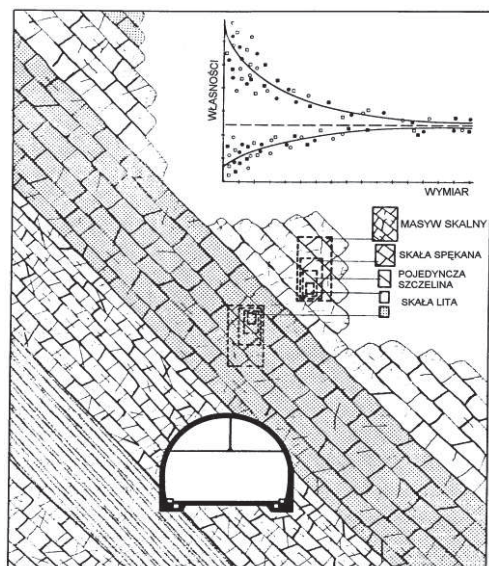
Właściwości górotworu, które powinny być przedmiotem badań, to przede wszystkim ocena pionowego zasięgu strefy zawału chaotycznego – w nawiązaniu do profilu wytrzymałościowego skał stropowych poszczególnych pokładów węgla, ocena stopnia rekonsolidacji rumowisk zawałowych (na podstawie profili litologicznych stropów i badania rozmakalności skał) oraz ocena stanu obudowy szybów i ewentualnych pustek występujących za tą obudową – co jest podstawą projektów uszczelniającej likwidacji szybów. Ze względu na to, że szyby i niewłaściwie zlikwidowane otwory wiertnicze z powierzchni stanowią największe zagrożenie dla szczelności przyszłego zbiornika gazu, należy im poświęcić szczególną uwagę podczas prowadzenia badań w kopalni węgla, która ma stanowić PMG.

Mając na uwadze szybkość odzyskiwania zmagazynowanego gazu należy przy wyborze preferować kopalnie, w których udział w sumarycznej objętości magazynowej bezpośrednich pustek (wyróbisk) jest duży w stosunku do objętości adsorpcyjnej i porowej. Są to zwykle kopalnie o rozwiniętej sieci wyróbisk kamiennych, w których jest prowadzona przede wszystkim eksploatacja filarowa bądź krótkofrontowa, z dużą liczbą pozostawionych resztek poeksploatacyjnych. Decydującą w ocenie przydatności zbiornika niskociśnieniowego (w postaci kompleksu wyróbisk i zrobów likwidowanej kopalni węgla) jest „próba makro”, która polega na zatłaczaniu powietrza kompresorami i pomiarze prędkości spadku jego ciśnienia z upływem czasu. Wykonywanie tej próby jednocześnie w całym zbiorniku – jak to zrealizowano w kopalni Leyden – ma sens tylko w przypadku wcześniejszego całkowitego uszczelnienia szybów – co jest inwestycją wymagającą poważnych nakładów finansowych oraz czasu. Nakłady te zostałyby jednoznacznie i nieodwracalnie utracone w przypadku negatywnej oceny zbiornika. Mając jednak na uwadze stosunkowo niewielki gradient ciśnienia możliwy do uzyskania omawianym sposobem, a co za tym idzie – ograniczony koszt lokalnych tam uszczelniających poszczególne partie kopalni, nieobejmujące rejonów gdzie są zlokalizowane szyby – można zalecić przeprowadzanie „próby makro” oddzielnie w poszczególnych, odizolowanych od siebie tamami partiach kopalni. Badanie takie można realizować stosując zarówno nadciśnienia (tłoczenia), jak i depresję (odciągania) powietrza, zaś lokalne tamy – po odpowiednim przygotowaniu dla nich gniazd w wyróbiskach kopalnianych – mogą być gumowe, nadmuchiwane pneumatycznie. Działanie tego rodzaju może znacznie przyspieszyć i ograniczyć koszty badania przydatności zbiornika PMG w byłej kopalni węgla, wskazując stopień szczelności gazowej poszczególnych jej części i umożliwiając w ten sposób ewentualną eliminację partii nieprzydatnych. Koszty inwestycyjne związane ze specjalistyczną likwidacją szybów byłyby ponoszone dopiero po upewnieniu się o przydatności poszczególnych partii zbiornika na PMG.

4. CZYNNIK SKALI WIELKOŚCI W BADANIACH GEOTECHNICZNYCH I JEGO ZNACZENIE W PROJEKTOWANIU PMG

Przy rozwiązywaniu zagadnień geoinżynierskich, do których niewątpliwie należy budowa PMG w likwidowanej kopalni węgla, istotną rolę w procesie oceny skał otaczających wyróbiska odgrywa znajomość wpływu czynnika skali wielkości na właściwości masywów skalnych. Podobnie bowiem jak w przypadku długotrwałych obciążeń, skały przejawiają odchylenia swoich cech w stosunku do określonych w badaniach chwilowych (szybkich) – co oceniane jest na podstawie zasad reologii – tak w przypadku dużych partii skalnych cechy fizyczne skał różnią się znacznie od cech próbek laboratoryjnych, co jest przedmiotem nauki o wpływie skali (Cunha 1990). Wpływ skali dotyczy takich istotnych cech, jak: wytrzymałość, odkształcalność, tarcie szczelinowe, właściwości hydrauliczne (przepuszczalność, rozmakalność) oraz procesy wietrzeniowe w skałach (Pistone 1990, Carlssoni i inni 1990).

Na rysunku 1 symbolicznie pokazano wpływ czynnika skali wielkości na właściwości maszywów skalnych.



Rys. 1. Symboliczna ilustracja wpływu skali na właściwości skał (Cunha 1990)

Fig. 1. Symbolic illustration of scale effect on properties of rocks (Cunha 1990)

Najogólniej i zarazem najprościej wpływ czynnika skali na górotwór ujmuje statystyczna teoria wytrzymałości materiałów W. Weibulla (Kidybiński 1982). Zgodnie z nią wytrzymałość umownego bloku skalnego o kształcie sześciangu jest zależna od objętości tego bloku, przy założeniu, że wraz ze wzrostem objętości w materiale skalnym proporcjonalnie zwiększa się liczba defektów strukturalnych osłabiających masyw. Można to wyrazić równaniem

$$\frac{R_{c(1)}}{R_{c(2)}} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1/m} \quad (1)$$

gdzie:

- $R_{c(1)}$ – wytrzymałość na ściskanie małej próbki, MPa;
- $R_{c(2)}$ – wytrzymałość na ściskanie dużej próbki, MPa;
- v_1 – objętość małej próbki, m^3 ;
- v_2 – objętość dużej próbki, m^3 ;
- m – współczynnik empiryczny (5,2–5,8).

Porównując próbki skalne o boku 5 cm z masywem o objętości $100 m^3$ otrzymuje się – przy średniej wielkości $m = 5,5$ – współczynnik skali w_s o wartości 0,084, co oznacza, że wytrzymałość masywu wynosi w tym przypadku zaledwie 8,4% wytrzymałości próbek laboratoryjnych. W przypadku próbki laboratoryjnej o boku 5 cm i bloku o objętości $1 m^3$ współczynnik ten wynosi 19,5%.

Prostym sposobem określania współczynnika skali według stopnia spękania masywu skalnego jest wykorzystanie wskaźnika spękalności rdzenia wiertniczego (RQD – wg Deere'a)

$$w_s = \frac{RQD}{100} \quad (2)$$

co oznacza, że dla skał bardzo silnie spękanych (RQD = 10%) współczynnik $w_s = 0,1$, dla skał średnio spękanych (RQD = 50%) $w_s = 0,5$, zaś dla skał litych, całkowicie niespękanych (RQD = 100%) współczynnik $w_s = 1,0$ czyli masyw ma wytrzymałość identyczną jak próbki laboratoryjne.

Generalny wniosek z naszkicowanej jedynie fragmentarycznie problematyki wpływu skali jest taki, że w każdych okolicznościach rozpatrywanie dużego obiektu geoinżynierskiego wymaga, o ile to możliwe, badań prowadzonych na dużych elementach masywu skalnego, najlepiej *in situ*. Badania te są jednak na ogół kosztowne i długotrwałe. Stąd też istnieje możliwość wykorzystania tańszej i szybszej metody przybliżonej, która polega na wykonaniu badań na próbkach laboratoryjnych, a następnie zastosowaniu parametrów skali (odrębnych dla wytrzymałości, odkształcalności i przepuszczalności) – do oceny odpowiednich właściwości masywu skalnego.

5. BADANIA GEOTECHNICZNE DO OCENY PRZYDATNOŚCI WYROBISK NA PMG

W ogólnym celu badań geotechnicznych do oceny przydatności wyrobisk podziemnych likwidowanych kopalń węgla na podziemne magazyny gazu (PMG) wydzielić można cele szczegółowe, odrębnie dla zbiorników wysokociśnieniowych i niskociśnieniowych.

Zbiorniki wysokociśnieniowe:

- wstępna ocena podatności ścianki skalnej zbiornika na podstawie badania odkształcalności skał w laboratorium,
- szczegółowa ocena podatności ścianki skalnej zbiornika na podstawie badań płytowych *in situ* lub badań radialnych w wyrobisku próbnym o małej średnicy,
- ocena zmian odkształcalności skał na długości zbiornika – na podstawie badań szczelinowatości i układu litostratygraficznego warstw,
- ocena oporów ścinania skał wzdłuż szczelin w celu zaprojektowania korków ciśnieniowych na zbiorniku – na podstawie badań szczelinowatości oraz wytrzymałości skał w laboratorium,
- ocena przewodności szczelinowej skalnych ścian zbiornika – na podstawie badań przeprowadzonych metodą aerometryczną,
- ocena czasowych zmian podatności skał na ciśnienie – na podstawie analizy petrologicznej i badań rozmakalności.

Zbiorniki niskociśnieniowe:

- ocena pionowego zasięgu strefy chaotycznego zawału w stropie – na podstawie badań wytrzymałościowych profilu skał stropowych,

- ocena stopnia zrekonolidowania zrobów wyeksploatowanych pokładów węgla – na podstawie analizy okresu eksploatacji oraz badań rozmakalności skał strefy zawałowej,
- ocena lokalnych surowców ilastych pod względem ich przydatności do uszczelniającej likwidacji szybów – na podstawie badań ich wytrzymałości i rozmakalności,
- ocena drożności szczelinowej (dla gazów) stref odprężonych górotworu wokół wyrobisk – na podstawie pomiarów metodą aerometryczną.

Zadania badawczo-projektowe z zakresu geotechniki, dotyczące budowy zbiorników gazu w przeznaczonych do likwidacji podziemnych kopalniach węgla są w Polsce nowością, wynikającą z regresu górnictwa węglowego oraz potrzeby powiększenia zdolności magazynowej gazu – w związku z prognozowanym wzrostem jego krajowego zużycia. Do ich realizacji można z powodzeniem zastosować wybrane metody geomechaniki górniczej, jak również budownictwa hydrotechnicznego i tunelowego, które pozwalają na ocenę parametrów zarówno materiału skalnego w rejonie projektowanego zbiornika, jak i właściwości masywu skalnego, z uwzględnieniem czynnika skali wielkości.

6. BADANIE LABORATORYJNE WYTRZYMAŁOŚCI SKAŁ NA ŚCISKANIE (R_c)

Oznaczanie wytrzymałości skał na ściskanie jest najbardziej rozpowszechnionym sposobem badania parametrów wytrzymałościowych skał, służącym rozlicznym celom ich oceny.

Ze względu na to, że wytrzymałość na ściskanie wykazuje związki z innymi cechami fizycznymi skał takimi na przykład, jak: moduł odkształcenia i sprężystości, wskaźniki urabialności, wrażliwość na działanie wody – jest ona najczęściej stosowana do oceny mechanicznej odporności skał, a ponadto oznacza się ją stosunkowo prostym sposobem (PN-G-04303).

Według wspomnianej normy R_c [MPa] oznacza się na próbkach o smukłości 2,0, seriami po sześć próbek walcowych lub prostopadłościennych. Próbkę ściska się w prasie jednoosiowo wzdłuż jej osi podłużnej, odnotowując maksymalną wartość siły ścisnącej P [MN], przy zalecanej prędkości obciążenia wynoszącej 100 N/s oraz wymiarze podstawy próbki w granicach 42–54 mm. Wytrzymałość na ściskanie wyznacza się ze wzoru

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

gdzie A – powierzchnia poprzecznego przekroju próbki, m^2 .

W przypadku konieczności badania próbek o smukłości 1,0 obliczony wynik należy pomnożyć przez 0,888.

Za wynik badania przyjmuje się średnią arytmetyczną wyników otrzymanych podczas badania, co najmniej sześciu próbek o jednakowych wymiarach, przygotowanych z tej samej próbki pierwotnej i obciążanych w tym samym kierunku w stosunku do uwarstwienia, łupności lub kłiważu.

7. BADANIE LABORATORYJNE ODKSZTAŁCALNOŚCI SKAŁ

Sposób laboratoryjnego badania odkształcalności skał ujęty jest w wytycznych ISRM (Brown 1981). Celem badania jest określenie przebiegu krzywej naprężenie-odkształcenie oraz modułu odkształcenia, modułu sprężystości i współczynnika Poissona w teście jednoosiowego ściskania próbki skalnej o regularnym kształcie. Procedura eksperymentu jest identyczna jak przy próbie wyznaczania R_c z tym, że dodatkowo mierzy się odkształcenia podłużne i poprzeczne próbki w poszczególnych stadiach jej obciążenia. Urządzenia do pomiaru przemieszczeń punktów materialnych próbki w czasie jej ściskania mogą być czujnikami mechanicznymi, optycznymi, magnetycznymi lub elektrooporowymi pod warunkiem, że zapewniają dokładność pomiaru nie mniejszą niż 2% odczytu lub 0,2% pełnej skali wartości.

Próbka powinna być obciążana w sposób ciągły z prędkością 0,5–1,0 MPa/s (5–10 minut obciążenia przed zniszczeniem próbki).

Jeśli głównym celem pomiaru jest określenie modułu sprężystości, zalecić można prowadzenie kilku cykli obciążania i odciążania (w granicach do ok. 80% R_c) i obliczanie modułu z krzywych nawrotu sprężystego. Moduł odkształcenia oblicza się z nachylenia krzywej obciążenia – jako stosunek przyrostu naprężenia do odpowiedniego przyrostu odkształcenia podłużnego w środkowej (prostoliniowej) części krzywej naprężenie-odkształcenie.

Odkształcenie podłużne (osiowe) oblicza się według równania

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta}{l_0} \quad (4)$$

gdzie:

Δ – skrócenie pionowego wymiaru próbki, m;

l_0 – początkowa wielkość pionowego wymiaru próbki, m;

zaś odkształcenie poprzeczne – według równania

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta}{d_0} \quad (5)$$

gdzie:

Δ – zmiana średnicy próbki, m;

d_0 – początkowa średnica próbki.

Odkształcenie objętościowe oblicza się z równania

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{\parallel} + 2\varepsilon_d \quad (6)$$

W przypadku potrzeby obliczenia dodatkowo współczynnika Poissona, dokonuje się tego przez podzielenie miary nachylenia krzywej $\sigma - \varepsilon$ dla odkształceń poprzecznych przez odpowiednią wartość dla odkształceń osiowych.

8. BADANIE LABORATORYJNE ROZMAKALNOŚCI SKAŁ

W zależności od potrzeb do oceny jakościowego wpływu wody na spójność skał w procesie jednorazowego lub wielokrotnego zamoczenia stosuje się odpowiednio metodę Skutty (Skutta 1962) lub metodę testu trzydobowego.

Metoda Skutty

Badanie skały polega na umieszczeniu trzech jej nieforemnych bryłek o wymiarach około 10×10×10 cm w naczyniu wypełnionym wodą kopalnianą oraz na odnotowaniu form ich rozpadu po czasie moczenia ½, 4 oraz 48 h. Formę rozpadu po każdym okresie czasu oznacza się literowo (od A do H), według poniższego opisu:

- A – próbka nie zmienia postaci,
- B – próbka dzieli się na warstwy wzdłuż płaszczyzn uławicenia (przy lekkim ostukaniu, na przykład końcem ołówka),
- C – próbka dzieli się samoczynnie na warstwy wzdłuż płaszczyzn uławicenia,
- D – próbka rozpada się na kawałki o długości krawędzi ponad 3 cm (przy ostukaniu),
- E – próbka rozpada się samoczynnie na kawałki o długości krawędzi ponad 3 cm,
- F – próbka rozpada się na kawałki o długości krawędzi poniżej 3 cm (przy ostukaniu),
- G – próbka rozpada się samoczynnie na kawałki o długości krawędzi poniżej 3 cm,
- H – próbka rozpada się samoczynnie na grysik albo muł.

Wynik badania określa się za pomocą trzech kolejnych symboli literowych, oznaczających stadia rozpadu w trzech wymienionych przedziałach czasu (np. AAA, ABH, GGG itp.).

Test trzydobowy (Kidybiński 1979, 1985)

Oznaczenie rozmakalności skał (wskaźnika r) należy wykonać, pobierając 3–5 próbek z każdego metra rdzenia wiertniczego, o stosunku wymiarów (h/d) około 1,0, umieścić próbki (zawieszane na podstawkach) w wodzie na 24 h, a następnie ostrożnie je wynurzyć i pozostawić przez 24 h na powietrzu. Z kolei ponownie zanurzyć próbki na 24 h, zaś po ich upływie określić wartość r według następującej skali (tabl. 1).

Test trzydobowy wykonuje się w temperaturze pokojowej, przy użyciu czystej wody pitnej.

Tablica 1. Oznaczenie wskaźnika rozmakalności skał (r) według testu trzydobowego

Wskaźnik rozmakalności r	Stan próbek po teście trzydobowym
1,0	próbka nie zmienia formy ani konsystencji
0,8	próbka pęka wzdłuż powierzchni uwarstwienia
0,6	próbka pęka wzdłuż powierzchni uwarstwienia oraz rzadko – w kierunkach prostopadłych do powierzchni uwarstwienia
0,4	próbka pęka gęsto, w wielu kierunkach
0,2	próbka rozkłada się na rumosz ze szlamem
0,1	próbka rozkłada się całkowicie na szlam

9. RODZAJE I ROZKŁAD PRZESTRZENNY SZCZELIN W GÓROTWORZE

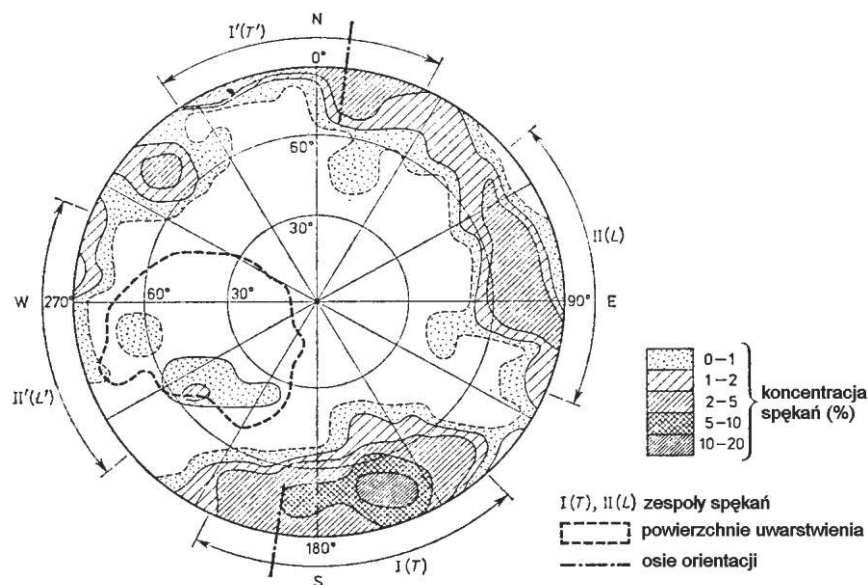
Podstawowym zagrożeniem dla zachowania szczelności dużego zbiornika gazowego w wyrobiskach górniczych kopalni węgla, na równi z szybami i niezlikwidowanymi otworami wiertniczymi z powierzchni, jest szczelinowatość skał otaczających wyrobiska. Zagrożenia powodują zarówno szczeliny pochodzące od spękań pierwotnych, jak i szczeliny wtórne – związane z procesem pęknięcia skał wskutek osiadania.

W zakresie szczelinowatości zbadania wymagają układu i zagęszczenia szczelin oraz przepuszczalność (drożność) szczelin.

Istnieje kilka metod pomiarowych układu i zagęszczenia szczelin (Liszkowski i Stochlak 1976) prowadzących do uzyskania tak zwanej róży spękań skał. Są to na przykład:

- pomiary geometryczne,
- pomiary magnetyczne (kompasowe),
- identyfikacja spękań na rdzeniach wiertniczych,
- endoskopia ścianek otworów wiertniczych.

Celem pomiarów jest opracowanie zestawienia kierunków i nachylenia powierzchni spękań – najkorzystniej – w projekcji sferycznej (rys. 2) obejmującej również procentowe zagęszczenie spękań. Należy również na podstawie dostępnych danych pomiarowych ocenić zasięg występowania (długość) szczelin, zwłaszcza w kierunku prostopadłym do uławicenia, ten bowiem czynnik może okazać się decydujący o szczelności bądź nieszczelności zbiornika.

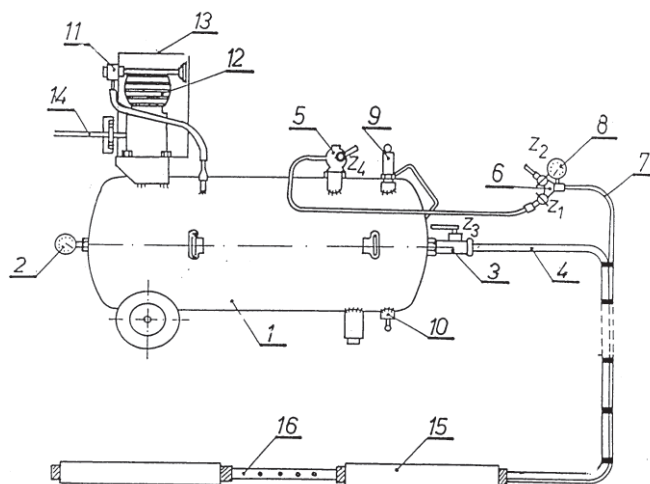


Rys. 2. Sferyczna prezentacja kierunków i koncentracji spękań w skałach

Fig. 2. Spherical representation of directions and concentration of joints in rocks

10. DROŻNOŚĆ SZCZELIN DLA GAZÓW (METODA AEROMETRYCZNA)

Drożność szczelinową górotworu określa się metodą aerometryczną polegającą na wpuszczaniu sprężonego powietrza o stałym ciśnieniu początkowym do wygradzonych kolejnych, krótkich odcinków małego średnicowego otworu wiertniczego wykonanego w górotworze otaczającym wyrobisko. Schemat stosowanej do pomiarów sondy aerometrycznej pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Sonda aerometryczna do badania drożności szczelin: 1 – zbiornik ciśnieniowy na powietrze, 2 – manometr do kontroli ciśnienia w zbiorniku, 3 – zawór wypustowy zbiornika, 4 – wąż doprowadzający powietrze do sondy otworowej, 5 – zawór trójpołożeniowy do obniżania ciśnienia w zbiorniku, 6 – dwójnik, 7 – wąż doprowadzający powietrze do kołnierzy uszczelniających sondy, 8 – manometr kontrolny kołnierzy, 9 – zawór bezpieczeństwa, 10 – zawór odwadniający, 11 – zawór zwrotny, 12 – sprężarka (kompresor), 13 – osłona sprężarki, 14 – sprzęgło napędu sprężarki (z wiertarki górniczej), 15 – kołnierze uszczelniające, 16 – perforowany odcinek roboczy sondy otworowej (długości 25 cm)

Fig. 3. A set of aerometric probe for testing of conductivity of fractures: 1 – pressure tank for air, 2 – pressure gauge for air control in a tank, 3 – outlet valve of tank, 4 – air conducting hose to borehole head, 5 – three directional valve for reduction of tank pressure, 6 – double bypass, 7 – air conducting hose to tightening collars of a head, 8 – pressure gauge for collars, 9 – safety valve, 10 – dewatering valve, 11 – check valve, 12 – compressor, 13 – casing of a compressor, 14 – coupling of compressor's drive, 15 – tightening collars, 16 – perforated section of borehole head (25 cm long)

Po uszczelnianiu sondy w kolejnych odcinkach otworu, obserwuje się spadek ciśnienia powietrza w wygradzonym odcinku otworu – po otwarciu dopływu do sondy ze zbiornika ciśnieniowego. Otwór badawczy ma średnicę 46 mm, zaś stałe ciśnienie pierwotne w zbiorniku wynosi na ogół 0,5 MPa.

Współczynnik szczelności górotworu na danym odcinku otworu oblicza się z równania (Kidybiński 1982)

$$k = \frac{\Delta \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)}{\Delta t} \quad (7)$$

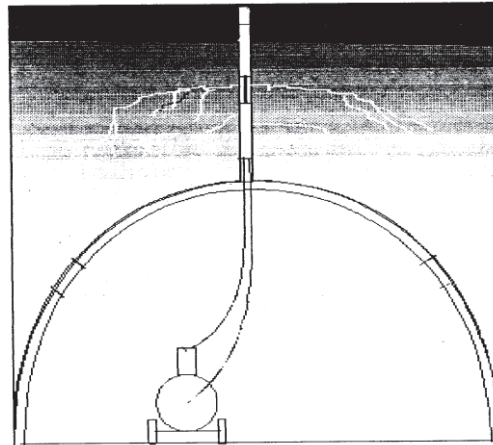
gdzie:

p – ciśnienie w danej chwili, MPa;

p_0 – ciśnienie pierwotne, MPa;

t – czas, s.

Na rysunku 4 pokazano sposób prowadzenia pomiarów w skałach stropowych wyrobiska korytarzowego – w celu ustalenia pionowego zasięgu strefy spękań nad wyrobiskiem. W miejscach położenia drożnych szczelin w obrębie odcinka pomiarowego otrzymuje się wyraźny skokowy wzrost prędkości spadku ciśnienia powietrza, co sygnalizuje jego odpływ przez szczelinę, a więc brak szczelności warstwy stropowej.



Rys. 4. Sposób badania stropu sondą aerometryczną

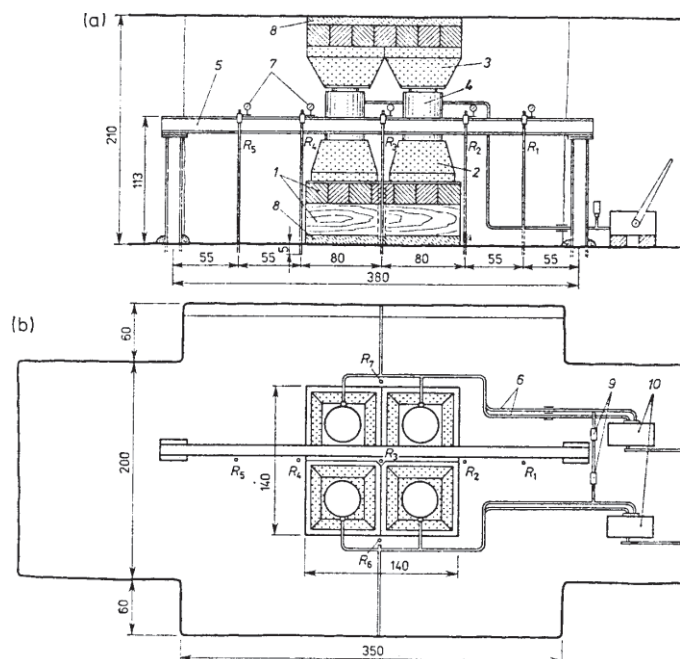
Fig. 4. Roof strata investigation with aerometric probe

11. ODKSZTAŁCALNOŚĆ GÓROTWORU W UKŁADZIE PŁASKIM (BN-79/8950-11)

Metoda ta jest stosowana głównie w budownictwie wodnym i tunelowym w celu określenia odkształcalności ścianek tunelu przy płaskim układzie obciążającym. Szkic urządzenia służącego do badań pokazano na rysunku 5.

Ze względu na dużą powierzchnię nacisku na górotwór ($2,56 \text{ m}^2$) badanie odkształcalności omawianym urządzeniem daje wyniki bezpośrednio przydatne do projektowania obudowy zbiornika, bez potrzeby stosowania współczynnika skali. Wykonywanie badań polega na cyklicznym obciążaniu, a następnie odciążaniu spągu

wyrobiska przy stałym pomiarze odkształceń we wszystkich punktach pomiarowych. Pomiar cykliczny wykonuje się przy różnym obciążeniu maksymalnym, rozpoczynając od obciążeń mniejszych, a kończąc na większych (Thiel 1989). Maksymalne możliwe obciążenie jednostkowe wywierane przez układ czterech dźwigarów hydraulicznych wynosi 3,12 MPa, każdorazowo jednak maksymalne obciążenie w cyklu dobierane jest w dostosowaniu do spodziewanych obciążeń skał, przy pracy projektowanego zbiornika.



Rys. 5. Instalacja do badania odkształcalności górotworu w układzie płaskim: 1 – belki drewniane, 2 – wykładka betonowa, 3 – bloki granitowe, 4 – cylindryczne dźwigary hydrauliczne (po 2 MN), 5 – belka bazy pomiarowej, 6 – rurki wysokociśnieniowe, 7 – czujniki pomiaru odkształcenia, 8 – bazowa płyta betonowa, 9 – manometry, 10 – pompy hydrauliczne, R_1 – R_7 – punkty pomiaru odkształcenia

Fig. 5. An installation for deformability testing of rock strata – flat system: 1 – wooden bars, 2 – concrete lining, 3 – granite blocks, 4 – hydraulic jacks (2 MN each), 5 – measurements base bar, 6 – high pressure pipes, 7 – deformation gauges, 8 – base concrete plate, 9 – pressure gauges, 10 – hydraulic pump, R_1 – R_7 – points of deformation measurements

Sposób obliczania modułu odkształcenia (z wykresu σ – ϵ dla obciążenia) i modułu sprężystości (z wykresu σ – ϵ dla odciążenia) odbywa się na tej samej zasadzie co w przypadku jednoosiowego ściskania próbek skalnych. W obliczeniach wykorzystuje się równanie Boussinesq'a dla jednorodnej półprzestrzeni sprężystej, a mianowicie wyznacza się:

$$\text{– moduł odkształcenia} \quad D = \frac{B\sigma \cdot (1 - \nu^2)}{\mu}, \text{ Pa} \quad (8)$$

$$- \text{ moduł sprężystości} \quad E_s = \frac{B\sigma \cdot (1 - \nu^2)}{\mu \cdot m}, \text{ Pa} \quad (9)$$

gdzie:

- σ – naprężenie normalne działające na powierzchni obciążanej, Pa;
- B – szerokość powierzchni obciążającej, m;
- w – współczynnik (1,12 dla punktu centralnego, 0,56 dla punktów na brzegu płyty obciążającej);
- ν – współczynnik Poissona (0,2–0,3);
- μ_d – wielkość przemieszczenia pod obciążeniem;
- μ_s – przemieszczenie nawrotu podczas odciążenia.

Prędkość obciążenia i odciążenia badanego podłoża skalnego powinna być dostosowana do projektowanego trybu pracy zbiornika ciśnieniowego.

12. ODKSZTAŁCALNOŚĆ GÓROTWORU W UKŁADZIE RADIALNYM

Wysokociśnieniowe zbiorniki gazu wykonywane są niekiedy w specjalnie wydrążonych wyrobiskach tunelowych o przekroju kołowym, odpowiednio uszczelnionych (Ishihata 1997). Można również w tym celu wykorzystać konkretne wydzielone wyrobiska kopalni węgla pod warunkiem, że wokół wyrobiska nie ma strefy odspojenia skał – co dotyczy na ogół tak zwanych wyrobisk kamiennych, czyli wydrążonych w skałach zwięzłych o dużej wytrzymałości.

Rozkład naprężeń w skałach wokół wyrobiska o przekroju kołowym wymaga odpowiedniej geometrii badania odkształcalności górotworu, dlatego badania prowadzi się w układzie radialnym (Thiel 1989). W celu ich wykonania drąży się krótki odcinek wyrobiska o przekroju kołowym, o mniejszej średnicy w stosunku do zamierzonego zbiornika.

Na rysunku 6 (ISRM 1977) pokazano instalację do radialnego badania odkształcalności górotworu wokół wyrobiska za pomocą płaskich poduszek hydraulicznych.

Sposób określania parametrów odkształcalności górotworu na podstawie uzyskanych z badań wykresów obciążenie – ugięcie przedstawiono na rysunku 7.

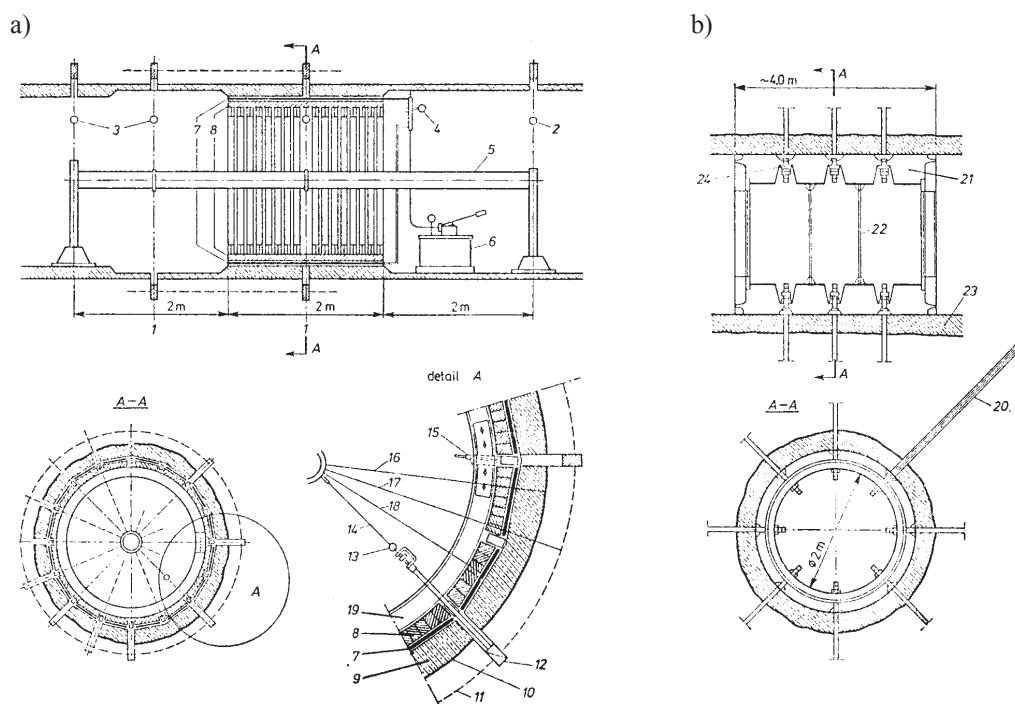
Moduł sprężystości (E_s) i odkształcenia (D) oblicza się według poniżej podanych równań wyprowadzonych z teorii sprężystości:

$$E_s = \frac{\sigma_{r2}(m+1)}{\mu \cdot m}, \text{ Pa} \quad (10)$$

$$D = \frac{\sigma_{r2}(m+1)}{\mu \cdot m}, \text{ Pa} \quad (11)$$

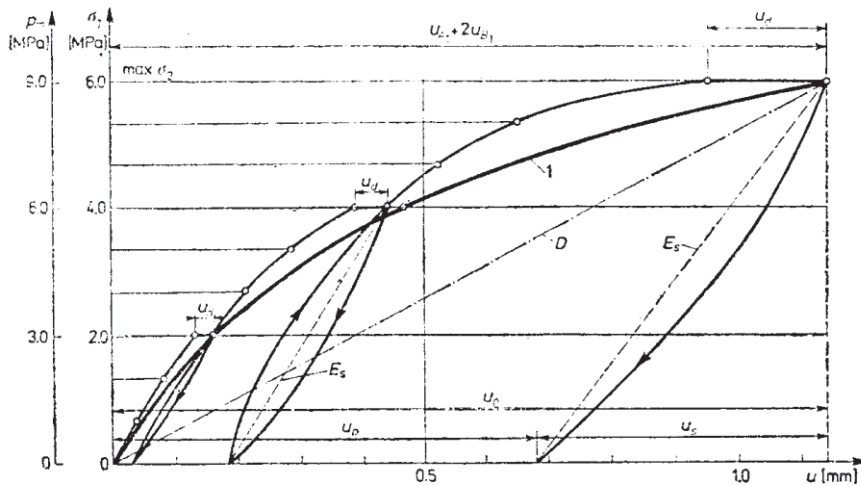
gdzie:

- σ_{r2} – maksymalne naprężenie w czasie badań, Pa;
- m – współczynnik Poissona.



Rys. 6. Instalacja do badania odkształcalności górotworu w układzie radialnym (ISRM 1977): 1 – przekroje pomiarowe, 2, 3 – tensometry mechaniczne, 4 – manometr, 5 – belka bazowa do pomiarów, 6 – ręczna pompa wysokociśnieniowa oleju, 7 – poduszki hydrauliczne (z blachy), 8 – wykładka z twardego drewna, 9 – warstwa betonu miotanego, 10 – średnica wyrobiska badawczego, 11 – granica (linia) pomiaru odkształcenia w skale, 12 – otwory do zamocowania końcówek tensometrów, 13 – czujniki zegarowe do pomiaru zmiany długości (o dokładności 0,001 mm), 14 – pręty stalowe, 15 – kliny ekspansywne, 16 – promień przekroju wyrobiska, 17 – promień strefy naruszenia skały, 18 – wewnętrzny promień strefy wykładki (betonu), 19 – pierścienie oporowe (łuki stalowe), 20 – kotew pomiarowa, 21 – zbiorniki wodne pod ciśnieniem, 22 – pierścień oporowy, 23 – wykładka betonowa, 24 – uszczelki

Fig. 6. An installation for deformability testing of rock strata – radial system (ISRM 1977): 1 – measurements located cross-sections, 2 and 3 – mechanical extensometers, 4 – pressure gauge, 5 – reference bar for measurements, 6 – high pressure hand driven oil pump, 7 – flat hydraulic jacks, 8 – hard wood lining, 9 – shotcrete layer, 10 – diameter of test tunnel, 11 – boundary of deformation measurements in rock, 12 – holes for fixing deformation gauges' ends, 13 – clocklike differential length gauges (0,001 mm accuracy), 14 – steel rods, 15 – expansive edges, 16 – radius of tunnel cross-section, 17 – radius of disturbed rock zone, 18 – internal radius of concrete lining zone, 19 – resistance rings (steel casing), 20 – measurement bolt, 21 – water pressure tanks, 22 – resistance ring, 23 – concrete lining, 24 – seals



Rys. 7. Przykład krzywej wynikowej w badaniach radialnych odkształcalności skał: μ_p – nieodwracalne przemieszczenie plastyczne, u_s – przemieszczenie sprężyste (odwracalne), u_d – przyrost przemieszczenia przy stałym obciążeniu (pełzanie), μ_0 – całkowite przemieszczenie, E_s – moduł sprężystości, D – moduł odkształcenia, 1 – odkształcenie masywu skalnego (Thiel 1989)

Fig. 7. Example of a curve resulting from radial testing of rock masses deformability: μ_p – non-reversible (plastic) displacements, u_s – reversible (elastic) displacements, u_d – displacement increment by steady load (creeping), μ_0 – entire displacement, E_s – modulus of elasticity, D – modulus of deformation, 1 – deformation of a rock mass (Thiel 1989)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opisane w niniejszym artykule metody badawcze, jakkolwiek nie były dotychczas stosowane do oceny wyrobisk kopalń węgla pod kątem ich przydatności na podziemne magazyny gazu (PMG), to jednak zostały wypróbowane w ciągu wielu lat praktyki górniczej oraz geomechanicznej – w inżynierii lądowej.

Pozwalają one na ilościowe określenie odkształcalności, wytrzymałości i szczelności masywu skalnego, których znajomość jest niezbędna przy projektowaniu wysokociśnieniowych PMG. W projektowaniu mogą być także wykorzystywane dotychczasowe doświadczenia nauk górniczych, geoinżynierii wodnej i budownictwa tunelowego.

W przypadku oceny całych kompleksów wyrobisk podziemnej kopalni węgla pod kątem możliwości zbudowania niskociśnieniowego PMG, opisane metody mogą być stosowane lokalnie do celów pomocniczych – w pojedynczych wyrobiskach – do oceny ich przydatności oraz oszacowania spodziewanych strat (ucieczek) magazynowanej substancji w zbiorniku.

Pierwszorzędne natomiast znaczenie w takim przypadku mają wyniki oceny geologiczno-inżynierskiej całego zbiornika oraz wyniki makropróby jego szczelności. Można wymienić następujące najważniejsze kryteria tej oceny:

- obecność w nadkładzie jednolitej grubej warstwy gazoszczelnej pokrywającej cały zbiornik,
- brak połączeń gazowych z sąsiednimi czynnymi kopalniami (jeśli istnieją),
- objętość pustek i zdolności sorpcyjne (oraz szybkość desorpcji) pozostawionych w kopalni resztek węgla,
- możliwości i spodziewane koszty uszczelniającej likwidacji wszystkich szybów kopalni oraz niecałkowicie zlikwidowanych otworów wiertniczych z powierzchni,
- obecność w zbiorniku lub jego bliskim sąsiedztwie wodonośnych skał porowatych – mogących poprawić pojemność i zdolności oddawcze zbiornika,
- pozytywne wyniki makropróby nadciśnienia powietrza całego zbiornika (po likwidacji szybów) lub jego otamowanych istotnych części (przy niezlikwidowanych szybach) – PN-EN 1918-4,
- ekonomiczna kalkulacja opłacalności całości budowy PMG, z uwzględnieniem spodziewanego czasu jego eksploatacji oraz czasu zwrotu poniesionych na budowę nakładów finansowych.

Jest niezmiernie istotne, aby decyzja o budowie zbiornika była przynajmniej wiążąco uzgodniona z jego potencjalnym użytkownikiem (operatorem) lub właścicielem. Stanowić to będzie gwarancję gospodarczego wykorzystania PMG w przypadku zainwestowania funduszy publicznych w całkowite lub częściowe przystosowanie zbiornika oraz jego wyposażenie.

* * *

Niniejszy artykuł jest streszczeniem pracy studialno-badawczej zrealizowanej przez autora w Głównym Instytucie Górnictwa (G4. Zalecany zakres i metodyka badań geomechanicznych dla oceny przydatności wyrobiska górniczego jako potencjalnego PMG, Dokum. GIG 33100012-121, marzec 2003 r.), stanowiącej część szerszego problemu „Ocena możliwości wykorzystania wyrobisk likwidowanych kopalń węgla kamiennego na podziemne magazyny gazu i paliw płynnych” – zleconego Instytutowi przez Ministerstwo Środowiska i finansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Literatura

1. Anon. (1998): *Storage of coal mine methane in abandoned/closed mines increases profits*. Engng.&Mining Journ., Sept, 32F.
2. Berger J., Nawrat St. (2003): *Retencyjny magazyn metanu w kopalni podziemnej*. Mater. Konf. Szkoła Eksploat. Podziemnej. Kraków, IGSMiE PAN.
3. Brown E.T. ed. (1981): *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. ISRM Suggested Methods, Oxford Pergamon Press.
4. BN-79/8950-11 (1979): *Badanie wytrzymałości skał. Polowe wyznaczanie odkształcalności skał. Metoda jednoosiowych obciążeń*.
5. Carlsson A., Gustafson G., Lindblom U., Olsson T. (1990): *Scale Effects in the Determination of Hydraulic Properties of Rock Masses*, vide Cunha 1990.
6. Cisek W., Dybczak A., Landsberg W. (2001): *Przebieg i doświadczenia z likwidacji kopalni „Nowa Ruda” w aspekcie przekształcenia wyrobisk dołowych na potrzeby podziemnego magazynu gazu*. Przegląd Górniczy nr 7–8.

7. Cunha A.P. (ed.) (1990): *Scale Effects in Rock Masses*, Mat. ISRM Commission on Scale Effects in Rock Mechanics, Rotterdam, Balkema.
8. EPA (1998): *Gas Storage at the Abandoned Leyden Coal Mine near Denver*, Colorado (internet).
9. Haddenhorst H.G. (1989): *Compressed Air Energy Storage (Peak Shaving Plant Neuhun-
torf)*, Underground Storage of Natural Gas (ed. M.R. Tek). Kluwer Academic Publishers, s. 205–216.
10. Ishihata T. (1997): *Underground Compressed Air Storage Facility for CAES-G/T Power
Plant Utilizing an Airtight Lining*, ISRM News Journal Vol. 5 nr 1, s. 17–21.
11. ISRM (1977): *Suggested Methods for Deformability Determination Using a Plate Test
(Surficial Loading)*, January.
12. Kidybiński A. (1979): *Metodyka wyznaczania cech geologiczno-inżynierskich skał serii
złożowej – niezbędnych dla projektowania podziemnej eksploatacji górniczej*. Przegląd
Geologiczny nr 1.
13. Kidybiński A. (1982): *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
14. Kidybiński A. (1985): *Instrukcja uproszczonego klasyfikowania skał dla potrzeb górnictwa
podziemnego w geologiczno-inżynierskich dokumentacjach złóż węgla kamiennego*.
Katowice, GIG.
15. Liszkowski J., Stochlak J. (1976): *Szczelinowatość masywów skalnych*. Warszawa, Wy-
daw. Geologiczne.
16. Pistone R.S. (1990): *Scale effect in shear strength of rock joints*. vide Cunha.
17. PN-EN 1918-4 (6/2001): *Systemy dostaw gazu. Podziemne magazynowanie gazu. Zalece-
nia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wyrobiskach górniczych*.
18. PN-G-04303 (1997): *Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie z użyciem
próbek foremnych*.
19. Skutta E. (1962): *Einfache gesteinsmechanische Untersuchungen als Grundlage der
Ausbauplanung*. Glückauf nr 25.
20. Stamataki S. (2002): *Underground gas storage – development of strategic reserves*,
Mineral Wealth, q23, April-June, s. 21–34.
21. Stille H., Johansson J., Sturk R. (1994): *High pressure storage of gas in lined shallow rock
caverns – Results from field tests* Proc. EUROCK '94, Balkema, s. 689–696.
22. Thiel K. (1989): *Rock Mechanics in Hydroengineering*, Warszawa-Amsterdam-Oxford-
N. York-Toronto, PWN-Elsevier.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz