

## GEOMECHANICZNA OCENA MASYWU SKALNEGO DLA POTRZEB BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA GAZU ZIEMNEGO NA PRZYKŁADZIE PMG SWARZÓW

### GEOMECHANICAL EVALUATION OF ROCK FORMATION FOR DEPLETED GAS RESERVOIRS – EXAMPLE FROM THE SWARZÓW UNDERGROUND GAS STORAGE

HENRYK WOŹNIAK<sup>1</sup>, LUDWIK ZAWISZA<sup>2</sup>

**Abstrakt.** Złoże gazu ziemnego Swarzów położone jest w obrębie zapadliska przedkarpackiego. Uwarunkowania lokalizacyjne, struktura i budowa geologiczna złoży umożliwiły utworzenie w obrębie sčerpanego horyzontu mezozoicznego tego złoży podziemnego magazynu gazu o wymaganych parametrach. W artykule przedstawiono warunki geologiczno-inżynierskie w obrębie serii złożowej (chłonnej), nadzłożowej i podzłożowej PMG Swarzów. Badania laboratoryjne wykonano dla próbek skalnych pobranych z otworów wiertniczych Swarzów-24, Oleśnica-2 i Oleśnica-3. Ocena mechanicznych właściwości skał, niezbędna do geomechanicznej charakterystyki masywu skalnego w rozpatrywanym obszarze złoży do magazynowania gazu ziemnego, obejmowała: oznaczenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie metodą badania próbek foremnych i metodą punktowego obciążania próbek nieforemnych oraz badania wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania. Powyższe parametry zostały następnie wykorzystane do obliczeń ciśnień szczelinowania dla poziomu magazynowego oraz dla serii uszczelniających poziom magazynowy od góry i od dołu w trakcie zatłaczania i odbioru gazu ziemnego w celu wykazania, czy eksploatacja magazynu nie zagraża rozszczelnieniem ośrodka skalnego.

**Słowa kluczowe:** podziemne magazyny gazu, zatłaczanie gazu, ciśnienie szczelinowania, PMG Swarzów.

**Abstract.** The Swarzów natural gas deposit is located in the Carpathian Foredeep. Its localization and geological structure facilitated the development of underground gas storage with desired parameters within the exhausted Mesozoic natural gas reservoir. The paper presents the results of engineering-geological studies on the rocks, forming the storage horizon, as well as the supra-storage and sub-storage horizons in the Swarzów underground gas storage. The samples for laboratory analyses were collected from the Swarzów-24, Oleśnica-2 and Oleśnica-3 wells. Evaluation of mechanical properties of rocks necessary for geomechanical characterization of rock formations in the gas deposit included: measurements of uniaxial compressive strength on regular samples and point load methods, and tensile strength with the compression method. These parameters were then used for calculations of fracturing pressures for the storage, supra-storage and sub-storage horizons during injection and withdrawal of gas. The calculations aimed to determine if the exploitation of underground gas storage does not cause the fracturing of rock formations.

**Key words:** underground gas storage, gas injection, fracturing pressure, UGS Swarzów.

---

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;  
hwozniak@geolog.geol.agh.edu.pl

<sup>2</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;  
zawisza@uci.agh.edu.pl

## WSTĘP

Budowa i eksploatacja podziemnych magazynów gazu (PMG) wymaga dokonania geomechanicznej oceny masywu skalnego w obszarze złoża. Istotnym elementem takiej oceny jest wykazanie, czy eksploatacja magazynu nie spowoduje zagrożenia rozszczelnieniem ośrodka skalnego. W tym celu niezbędne jest wyznaczenie ciśnień szczelinowania dla poziomu magazynowego oraz dla serii uszczelniających poziom magazynowy od góry i od dołu w trakcie zatłaczania i odbioru gazu ziemnego.

Geomechaniczna ocena masywu skalnego i procedura dokonywania obliczeń ciśnień szczelinowania wymaga wykonania oznaczeń odpowiednich parametrów fizycznych oraz wytrzymałościowych i deformacyjnych tak dla skał serii złożowej, jak i serii uszczelniających na próbkach w stanie ich pełnego nasycenia.

## DOTYCHCZASOWE DOŚWIADCZENIA W ZAKRESIE MAGAZYNOWANIA GAZU W POLSCE

Podziemne magazyny gazu buduje się: w szcerpanych złożach węglowodorów, w warstwach wodonośnych (w strukturach zawodnionych), w kawernach solnych, w opuszczonych kopalniach węgla kamiennego.

Pierwszy podziemny magazyn gazu na świecie utworzono w szcerpanym złożu gazu ziemnego Zoar w Buffalo (New York) w 1916 r. Pierwszy podziemny magazyn gazu w warstwie wodonośnej powstał w 1946 r. w Kentucky (USA), a w Europie – w Engelbostel, Niemcy w 1954 r. (Reinisch, 2000; Kidybiński i in., 2006). Występowanie pod-

ziemnych magazynów gazu w różnych strukturach geologicznych na świecie przedstawiono w tabeli 1.

Na całkowitą zatłoczoną do magazynu ilość gazu składa się gaz buforowy i gaz aktywny. W praktyce gaz buforowy zajmuje pojemność buforową, a gaz aktywny pojemność czynną (aktywną lub roboczą) (Reinisch, 2000; Kidybiński i in., 2006). Najbardziej efektywnym stosunkiem ilości gazu roboczego do gazu buforowego w magazynie jest stosunek 1:1, bardzo często są to wielkości zbliżone do 1:1, z wyjątkiem magazynów kawernowych, w których ilość gazu bufo-

**Tabela 1**

### Występowanie podziemnych magazynów gazu (PMG) na świecie (Reinisch, 2000)

Occurrence of the underground gas storage in the world (Reinisch, 2000)

Kraj	Szcerpane złoża węglowodorów	Warstwy wodonośne	Kawerny solne	Opuszczone kopalnie	Ogółem
Ameryka Północna	351	47	25	1	424
Kanada	31	–	7	–	38
USA	320	47	18	1	386
Europa Zachodnia	22	22	16	2	62
Niemcy	8	7	11	1	27
Austria	5	–	–	–	5
Belgia	–	1	–	1	2
Dania	–	–	1	–	1
Hiszpania	–	2	–	–	2
Francja	–	12	3	–	15
Włochy	8	–	–	–	8
Anglia	1	–	1	–	2
Europa Wschodnia	51	14	2	–	67
Bułgaria	1	–	–	–	1
WN	32	13	1	–	46
PWęgry	3	–	–	–	3
Polska	7	–	1	–	8
Rumunia	3	–	–	–	3
Słowacja	1	–	–	–	1
Czechy	3	1	–	–	4
Była Jugosławia	1	–	–	–	1
Australia	1	–	–	–	1
<b>Świat ogółem</b>	<b>425</b>	<b>83</b>	<b>43</b>	<b>3</b>	<b>554</b>

rowego jest niewielka, a w sztucznych zbiornikach praktycznie zupełnie nie występuje. W podziemnych magazynach gazu typu porowego gaz buforowy spełnia ważną rolę i zadania technologiczne: wytwarza określone ciśnienie powstrzymując postępowanie wody oraz spełnia rolę ochronną dla gazu aktywnego, który jest cyklicznie zatłaczany i odbierany (Reinisch, 2000).

Proces eksploatacji podziemnych magazynów gazu ziemnego składa się z cykli zatłaczania i odbioru gazu. Gaz zatłoczony sprężarkami do złoża w lecie odbierany jest zimą, a przed oddaniem do sieci krajowej poddawany jest procesom osuszania i pomiarów rozliczeniowych.

Istotnym czynnikiem przy ustalaniu zakresu ciśnień roboczych przyszłego magazynu gazu (ciśnienie zatłaczania i ciśnienie odbioru gazu) jest ciśnienie złożowe. Najczęściej maksymalne ciśnienie robocze PMG (ciśnienie zatłaczania) jest co najmniej zbliżone lub równe pierwotnemu ciśnieniu złożowemu (Kidybiński i in., 2006).

W magazynach wytworzonych w szcerpanych złożach gazu ziemnego ciśnienie robocze jest nieco wyższe od pierwotnego ciśnienia złożowego, zwykle od 1,1 do 1,2 razy. Natomiast w strukturach zawodnionych ciśnienie robocze jest znacznie wyższe od pierwotnego ciśnienia złożowego, zazwyczaj ponad 1,3–1,5 razy. Najwyższe przekroczenie ciśnienia złożowego ma miejsce w PMG Połtorackoje (Rosja), gdzie ciśnienie robocze jest 1,8 razy wyższe od ciśnienia pierwotnego. Maksymalne ciśnienia robocze stosowane w PMG powinny być wyższe od pierwotnych ciśnień złożowych, w przeciwnym bowiem przypadku obserwuje się stopniowe, powolne i systematyczne „wdzieranie się” wody w złożo. W konsekwencji magazyn traci stopniowo i systematycznie swoją pojemność magazynową. Wynika z tego, że dobór ciśnień roboczych w PMG, zwłaszcza ciśnienia maksymalnego, jest zagadnieniem niezwykle ważnym przy analizie i doborze optymalnych parametrów PMG.

We wszystkich magazynach gazu, w tym również w PMG Wierzchowice, gdzie przewiduje się maksymalne ciśnienia robocze wyższe od pierwotnego ciśnienia złożowego, konieczna jest analiza szczelności geologicznej i szczelności technicznej na przewyższone ciśnienie. Podnosząc ciśnienie złożowe, można także uzyskać zwiększenie mocy PMG, ale wymaga to dokładnej analizy nie tylko szczelności „geologicznej”, ale głównie tzw. szczelności „technicznej”, zwłaszcza gdy na obszarze magazynu występują „stare” otwory.

#### FUNKCJA PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW GAZU W SYSTEMIE GAZOWNICZYM

Podziemne magazyny gazu spełniają następujące funkcje:

- umożliwiają pokrywanie sezonowych nierównomierności poborów gazu w systemie krajowym,
- zapewniają niezawodność i bezpieczeństwo dostaw gazu do odbiorców,
- zapewniają wyrównanie zdolności wydobywczych gazu ze złóż i pozwalają na racjonalną i ekonomiczną eksploatację złóż gazu,

– umożliwiają tworzenie handlowych i strategicznych rezerw gazu ziemnego.

Obecnie, przy niewystarczającej pojemności magazynowej istniejących zbiorników, sezonowe nierównomierności zapotrzebowania na gaz pokrywane są pojemnościami dzierżawionymi w zbiornikach gazu na Ukrainie i Białorusi oraz nierównomiernością wydobycia gazu ze złóż krajowych (spadek wydobycia w sezonie letnim). W wyniku takiej pracy złóż krajowych wykorzystywane jest nie więcej niż 85% ich zdolności wydobywczych w ciągu roku, przy równoczesnym maksymalnym oddaniu gazu w szczycie. Sukcesywne tworzenie pojemności czynnej PMG, pokrywającej potrzeby regulacji nierównomierności poborów z systemu, pozwoli na pełniejsze wykorzystanie zdolności wydobywczych złóż krajowych oraz rezygnację z dzierżawionych pojemności czynnych w zbiornikach zagranicznych.

Uzyskanie w dalszej kolejności pojemności czynnych przekraczających potrzeby ruchowe umożliwi utrzymanie wymaganych 90-dniowych zapasów, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 20 kwietnia 1998 r.

Szybko zachodzące zmiany w strukturze użytkowania gazu, wynikające ze zwiększonych dostaw gazu dla potrzeb ogrzewania (odbiorcy indywidualni, kotłownie lokalne), oraz planowane podłączenia odbiorców z sektora energetycznego (elektrociepłownie, elektrownie) spowodowały wzrost potrzeb magazynowych systemu przesyłowego. W związku z tym realizowany jest program rozbudowy PMG w Polsce, zakładający ciągłe powiększanie krajowych pojemności magazynowych dla pokrywania potrzeb regulacyjnych oraz zabezpieczenia zapasów gazu wystarczających na pokrycie 90-dniowego zużycia gazu.

#### PODZIEMNE MAGAZYNY GAZU W POLSCE

Podziemne magazyny gazu w Polsce buduje się w wyeksploatowanych złożach gazu lub w kawernach solnych. Prowadzone też są badania nad możliwością wykorzystania do magazynowania gazu warstw wodonośnych. PMG w wyeksploatowanych złożach gazu wykorzystywane są do pokrywania sezonowej nierównomierności zapotrzebowania na gaz, wykorzystania zdolności wydobywczych gazu ze złóż oraz do magazynowania rezerw strategicznych. Ich budowa nie wymaga nakładów na tworzenie komór, bowiem wykorzystuje się istniejące struktury porowate, w których znajdował się wcześniej gaz. Wymagana jest natomiast budowa odwiertów eksploatacyjnych. Zbiorniki tego typu napełniane są w sezonie letnim, a odbiór gazu następuje w okresie szczytowego poboru gazu przez odbiorców.

Zbiorniki w kawernach solnych przewidziane są do pokrywania krótkotrwałych, dużych deficytów dobowych gazu, występujących w sytuacjach szczytowych i awaryjnych. Ich budowa jest jednak dość skomplikowana. W pokładach solnych tworzy się, poprzez ługowanie, specjalne komory, w których będzie magazynowany gaz. Proces wyplukiwania soli oraz pierwszego zatłaczania gazu jest technicznie zło-

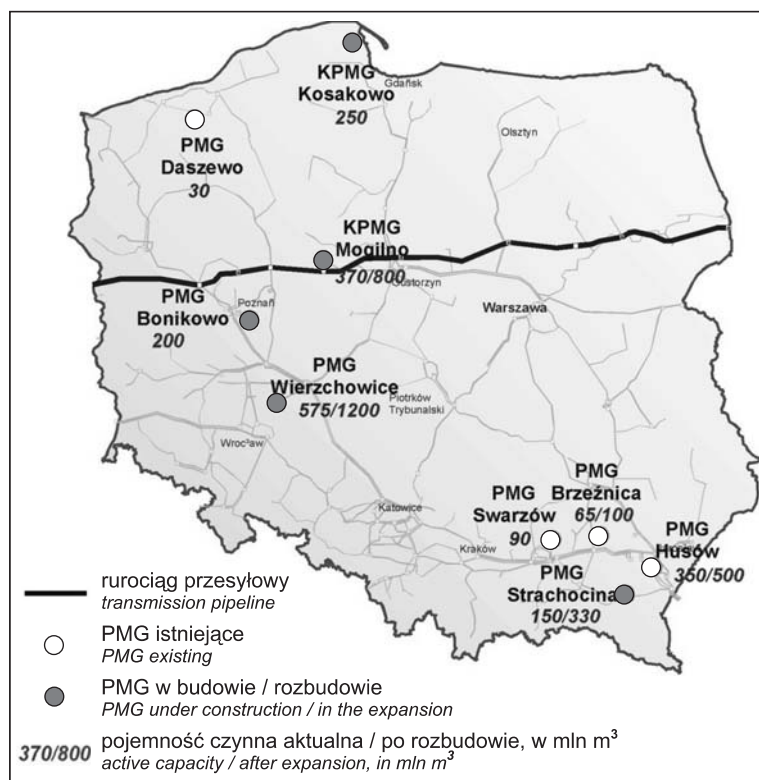


Fig. 1. Lokalizacja podziemnych magazynów gazu w Polsce

Underground gas storage in Poland

żony. Parametry techniczne zbiorników tego typu umożliwiają napełnianie oraz odbiór gazu w ilościach niezbędnych do niezawodnego funkcjonowania systemu przesyłowego. Część naziemna obydwu typów zbiorników jest podobnie zbudowana. Składa się z szeregu obiektów przeznaczonych

do zatłaczania i pobierania gazu, jego oczyszczania, osuszenia oraz rozdziłu i pomiaru.

Obecnie w Polsce funkcjonuje osiem podziemnych magazynów gazu (fig. 1, tab. 2), siedem w wyeksploatowanych złożach i jeden w kawernach solnych. Cztery podziemne ma-

Tabela 2

Podziemne magazyny gazu w Polsce (Przybycin i in., 2011)

Underground gas storage in Poland (Przybycin *et al.*, 2011)

Nazwa magazynu	Typ magazynu	Pojemność robocza [mln m <sup>3</sup> ]	Maksymalna wydajność odbioru [mln m <sup>3</sup> /d]
Istniejące			
Bonikowo	sczerpane złożo gazu	200	2,4
Brzeźnica	sczerpane złożo gazu wysokometanowego	65	0,9
Daszewo	sczerpane złożo gazu	30	0,4
Husów	sczerpane złożo gazu wysokometanowego	350	5,8
Swarzów	sczerpane złożo gazu wysokometanowego	90	1,0
Istniejące, w rozbudowie			
Mogilno	kawerny solne	378	20,6
Strachocina	sczerpane złożo gazu wysokometanowego	150	1,5
Wierzchowice	sczerpane złożo gazu zaazotanowego	575	4,8
Razem		1 838	37,4
W budowie			
Kosakowo	kawerny solne	250	9,6
Razem		250	9,6

gazyny gazu (PMG): Husów, Strachocina, Brzeźnica i Swarzędów znajdują się w południowo-wschodniej Polsce. Magazyn Wierzchowice zlokalizowany jest na Dolnym Śląsku, kawernowy podziemny magazyn gazu (KPMG) Mogilno w pobliżu Inowrocławia, PMG Bonikowo w Wielkopolsce,

PMG Maszewo w województwie zachodniopomorskim. W celu uzyskania większej pojemności magazynowej prowadzona jest rozbudowa podziemnych magazynów gazu (Mogilno, Strachocina, Wierzchowice) oraz budowa nowych (KPMG Kosakowo).

## DOTYCHCZASOWE ROZPOZNANIE I EKSPLOATACJA ZŁOŻA ORAZ PODZIEMNEGO MAGAZYNU GAZU SWARZÓW

Złoże gazu ziemnego Swarzędów położone jest w obrębie zapadliska przedkarpackiego. Związane jest z morfologicznym garbem utworów jurajskich. Skały zbiornikowe (warstwa chłonna) reprezentowane są przez osady jury górnej (kimeryd) oraz kredy górnej. Poniżej tych utworów występują starsze ogniwa jury górnej i środkowej, triasu oraz dolnego karbonu i górnego dewonu. Warstwa chłonna uszczelniona jest od góry kolejno przez: margle kredowe (senon) oraz mioceńskie osady ilasto-mułowcowe (baden dolny), anhydrytowe (baden środkowy) i molasowe (baden górny-sarmat) o miąższości 580–630 m.

Warunki geologiczne złoża gazu Swarzędów są dobrze rozpoznane za pomocą 28 otworów złożowych, zlokalizowanych w granicach złoża i jego najbliższym sąsiedztwie (otwory Swarzędów 1–24 i Oleśnica 1–4), o głębokości do 1920 m, oraz poprzez dotychczasowe wyniki eksploatacji złoża, prowadzonej w latach: 1959–1963 i 1974–1978.

Uwarunkowania lokalizacyjne, struktura i budowa geologiczna złoża gazu ziemnego Swarzędów umożliwiły utworzenie w obrębie szczytowego horyzontu mezozoicznego tego złoża podziemnego magazynu gazu (PMG) o wymaganych parametrach.

Gaz ziemny rodzimy złoża Swarzędów jest gazem wysokometanowym, nie zawierającym siarkowodoru. Zawiera średnio 95,7% węglowodorów (w tym 93,4%  $\text{CH}_4$ ) oraz 3,95% azotu. Do podziemnego magazynu gazu dostarczany jest z zewnątrz gaz ziemny grupy E (wg PN-C-04753). Analizy gazu zatłaczanego do złoża wykazały, że różni się on nieznacznie składem od gazu rodzimego, głównie zawartością metanu (do 97,4% obj.) oraz ilością azotu, która w gazie zatłaczanym dochodzi do 1%.

Działalność polegająca na magazynowaniu gazu ziemnego w wyeksploatowanym horyzoncie mezozoicznym złoża Swarzędów jest prowadzona przez PGNiG S.A. od lipca 1979 r. do chwili obecnej. Eksploatacja PMG Swarzędów służy głównie do wyrównywania nierównomierności poborów sezonowo-szczytowych gazu ziemnego.

Podstawowe parametry PMG Swarzędów przedstawiają się następująco:

- pojemność czynna: 90 mln  $\text{m}_n^3$
- pojemność buforowa: 111 mln  $\text{m}_n^3$

- pojemność całkowita: 201 mln  $\text{m}_n^3$
- zakres ciśnień pracy magazynu:
  - minimalne ciśnienie odbioru: 4,55 MPa
  - maksymalne ciśnienie zatłaczania: 7,80 MPa
- Podstawowe parametry formacji chłonnej PMG Swarzędów przedstawiają się następująco:
  - powierzchnia pierwotna horyzontu:
    - wapień kimerydu 0,326  $\text{km}^2$
    - piaskowce cenomanu 0,383  $\text{km}^2$
    - wapień turonu 0,387  $\text{km}^2$
  - rzędna zalegania stropu horyzontu: od –437,0 do –500,0 m
  - rzędna zalegania spągu (poziom wody podścielającej): pierwotnie na rzędnej –500,0 m, aktualnie na rzędnej –465,0 m
  - pierwotne ciśnienie złożowe: 7,65 MPa
  - temperatura złoża: 301,15 K (28°C)
  - miąższość efektywna dla poszczególnych poziomów:
    - wapień kimerydu: od 2,0 do 25,0 m, średnio 15,9 m
    - piaskowce cenomanu: od 4,0 do 11,2 m, średnio 8,1 m
    - wapień turonu: od 2,5 do 5,0 m, średnio 3,5 m.

W okresie prowadzenia eksploatacji złoża, tj. od 1959 do 1963 r. oraz od 1974 do 1978 r. wydobyto 234,15 mln  $\text{m}_n^3$  gazu ziemnego, co stanowiło ok. 89% jego pierwotnych zasobów wydobywalnych. Po zatrzymaniu produkcji w złożu pozostały zasoby geologiczne w ilości 85,85 mln  $\text{m}_n^3$ , w tym zasoby wydobywalne gazu w ilości 28,8 mln  $\text{m}_n^3$ , które stanowią bufor dla podziemnego magazynu gazu. Wraz z gazem ziemnym wydobyto 1897 ton wody złożowej. Pierwotne ciśnienie złożowe wynosiło 7,65 MPa, a po zakończenia wydobycia kopaliny nastąpił jego spadek do ok. 4,67 MPa (pomiar z 1979 r. przed rozpoczęciem pracy PMG).

Napełnianie magazynu prowadzone jest obecnie z wydajnością do  $V = 700 \text{ m}_n^3/\text{min}$ , tj. ok. 1 mln  $\text{m}_n^3/\text{d}$ , przez ok. 100–120 dni, przy ciśnieniu tłoczenia do 7,80 MPa. Cykl odbioru gazu z PMG odbywa się z wydajnością do  $V = 700 \text{ m}_n^3/\text{min}$ , przez 90–100 dni, przy ciśnieniu odbioru do 4,55 MPa.

## BADANIA FIZYCZNO-MECHANICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ

Badania fizyczno-mechanicznych właściwości skał poziomu magazynowego oraz serii uszczelniających wykonano w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN (Zawisza i in., 2011). Badania laboratoryjne wykonano na próbkach skalnych o wymiarach zgodnych z wymaganiami norm PN-G-04302 oraz PN-G-04303, wyciętych z rdzeni wiertniczych pobranych z otworów: Swarzędz-24 z interwału głębokościowego 649,5–670,5 m, Oleśnica-2 z interwału 546,0–761,0 m i Oleśnica-3 z interwału 384,5–892,0 m. Zakres oznaczeń fizyczno-mechanicznych właściwości skał obejmował następujące stałe materiałowe:

- gęstość skały (objętościowa  $\rho$  i właściwa  $\rho_s$ ) oraz porowatość całkowita  $n$ ,
- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie pełnego nasycenia wodą  $R_{Cw}$ ,
- wytrzymałość na rozciąganie w stanie pełnego nasycenia wodą  $\sigma_{Tw}$ .

Wykonano następujący zestaw badań laboratoryjnych:

- badania piknometryczne: wyznaczenie gęstości w stanie powietrznosuchym oraz porowatości,

- testy jednoosiowego ściskania: wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie z wykorzystaniem próbek foremnych,
- testy punktowego obciążania: wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie z wykorzystaniem próbek nieforemnych,
- testy poprzecznego ściskania (tzw. testy brazylijskie): wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie.

Wszystkie testy wytrzymałościowe wykonywano ze stałą prędkością obciążania ( $d\sigma/dt$ ), która dla poszczególnych badań wynosiła:

- dla testów jednoosiowego ściskania – 1,0 MPa/s ( $\pm 0,5$  MPa/s),
- dla testów brazylijskich – 0,1–0,5 MPa/s,
- dla testów punktowego obciążania – dobierana tak, aby czas trwania obciążenia do zniszczenia zawierał się między 10 a 60 s.

Szczegółowy opis wykonania poszczególnych testów wraz z całością otrzymanych wyników znajduje się w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej złoża gazu ziemnego Swarzędz (Zawisza i in., 2011).

## GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA CHARAKTERYSTYKA ZŁOŻA GAZU ZIEMNEGO SWARZÓW I JEGO NADKŁADU

### CHARAKTERYSTYKA FORMACJI CHŁONNEJ (POZIOMU MAGAZYNOWEGO)

Formacja chłonna, która jest wykorzystywana do zbiornikowego magazynowania gazu ziemnego w szcerpanym horyzoncie złoża Swarzędz, składa się z trzech mezozoicznych skał zbiornikowych, wapieni kimerydu, piaskowców cenomanu i wapieni turonu. Miąższość całej magazynowej warstwy chłonnej waha się od 4 do prawie 70 m.

Podstawowe parametry hydrauliczne formacji chłonnej PMG Swarzędz przedstawiają się następująco:

- porowatość efektywna skały zbiornikowej wg badań laboratoryjnych

- wapień kimerydu – 1,8–27,0%, średnio 9,8%,
- piaskowce cenomanu – 2,7–34,7%, średnio 21,4%,
- wapień turonu – 0,3–15,8%, średnio 6,1%.

- przepuszczalność skały zbiornikowej wg badań laboratoryjnych

- wapień kimerydu – 0–5,0 mD, średnio 1,2 mD
- piaskowce cenomanu – 5–6917 mD, średnio 1240 mD
- wapień turonu – 0–1,1 mD, średnio 0,2 mD.

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek wynosi od 7,8 do 145,5 MPa, przy wartości średniej równej 99,6 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie wynosi od 0,5 do 10,8 MPa, przy średniej 6,45 MPa.

### CHARAKTERYSTYKA POZIOMÓW IZOLUJĄCYCH

Bezpośrednimi warstwami uszczelniającymi od góry (ponad wapieniami turonu) są margle kredy górnej (koniak–mastycht) o miąższości od 0 do 150 m, w konturze złoża – 20 m. Wyżej zalegają osady miocenne: ilasto-mułowcowe badenu dolnego o miąższości do 40 m (średnio 20 m), a ponad nimi utwory anhydrytowe badenu środkowego o miąższości do 20 m. Pełny nadkład utworów miocenu powyżej horyzontu gazonośnego Swarzędz wynosi 600–700 m, a utworów czwartorzędowych od 10 do 30 m.

Natomiast bezpośrednim uszczelnieniem od dołu dla spękanych i skawernowanych wapieni jurajskich są również skały węglanowe, ale w postaci zbitych wapieni krystalicznych.

Wartości parametrów mechanicznych poziomów izolujących przedstawiają się następująco:

- seria nadzłożowa:
  - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – od 11,5 do 34,4 MPa, przy wartości średniej 22,65 MPa,
  - wytrzymałość na rozciąganie – od 0,7 do 2,1 MPa, przy wartości średniej 1,37 MPa,
- seria podłożowa:
  - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – od 55,1 do 120,2 MPa, przy wartości średniej 90,03 MPa,
  - wytrzymałość na rozciąganie – od 4,3 do 17,1 MPa, przy wartości średniej 8,35 MPa.

O skuteczności izolacji warstw nadkładu i serii podłożowej świadczy akumulacja gazu o ciśnieniu pierwotnym osiągającym wartość ponad 7 MPa, występująca na głębokości ok. 650 m.

Przytoczone dane wskazują, że szczelność pakietu skał zalegających bezpośrednio ponad horyzontem PMG Swarzów jest spełniona i prowadzenie bezzbiornikowego magazynu gazu nie stanowi zagrożenia dla niekontrolowanego przemieszczenia gazu podczas kolejnych cykli pracy magazynu.

#### CIŚNIENIE ZŁOŻOWE I CIŚNIENIE ZATŁACZANIA

Eksploatacja złoża Swarzów spowodowała spadek ciśnienia złożowego z pierwotnej wielkości 7,65 MPa do wielkości około 4,67 MPa po zakończeniu eksploatacji w 1979 r., a także przemieszczenie się wód złożowych w kierunku jego części gazonośnej.

Eksploatacja PMG Swarzów prowadzona jest od lipca 1979 r. za pomocą ośmiu odwiertów magazynowych: Swarzów-13, Swarzów-14, Swarzów-15, Swarzów-17, Swarzów-18, Swarzów-20, Swarzów-21 i Swarzów-22. Obecnie zakres ciśnień pracy magazynu przedstawia się następująco:

- maksymalne ciśnienie zatłaczania: 7,80 MPa,
- minimalne ciśnienie odbioru: 4,55 MPa.

#### CIŚNIENIA PANUJĄCE W GÓROTWORZE

Pierwotny stan napięcia w górotworze jest efektem ciśnienia pionowego. Ciężar skał nadkładu występujących powyżej rozpatrywanego poziomu powoduje, że obok naprężenia pionowego powstaje również, na skutek braku możliwości rozszerzania się skał w poziomie, naprężenie poziome (Economides, Nolte, 1998).

Wielkość naprężenia pionowego  $\sigma_V$  na głębokości  $H$  określa równanie:

$$\sigma_V = \int_0^H \rho(h) g dh \quad [\text{MPa}] \quad [1]$$

gdzie:

- $P$  – gęstość objętościowa skał występujących w nadkładzie,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,
- $g$  – stała grawitacji,
- $H$  – głębokość,  $[\text{m}]$ .

Jeżeli przyjmiemy stałą wartość gęstości objętościowej skał nadkładu, wzór [1] przyjmie postać:

$$\sigma_V = \rho g H \quad [\text{MPa}] \quad [2]$$

Naprężenie poziome, będące wynikiem dążenia pojedynczej, elementarnej cząstki skały do rozszerzania się w kierunku poziomym, można obliczyć według wzoru:

$$\sigma_{H, \min} = \frac{V}{1-\nu} (\sigma_V - \alpha p) + \alpha p \quad [\text{MPa}] \quad [3]$$

gdzie:

- $\sigma_{H, \min}$  – minimalne naprężenie poziome,  $[\text{MPa}]$ ,
- $\nu$  – współczynnik Poissona,  $[-]$ ,
- $p$  – ciśnienie porowe,  $[\text{MPa}]$ ,
- $\alpha$  – stała Biota,  $[-]$ .

Dla skał zbiornikowych złóż węglowodorów zwykle przyjmuje się  $\alpha = 0,7$  oraz  $\nu = 0,25$ .

Naprężenie pionowe i poziome wewnątrz masywu skalnego poziomu magazynowego tworzącego złożo obliczono dla głębokości 627 m (głębokość zalegania stropu serii chłonnej).

Obliczenie naprężenia pionowego:

- dane do obliczeń:  $H = 627 \text{ m}$ ,  $\rho = 2,65 \text{ g}/\text{cm}^3 = 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  
 $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ .

– po podstawieniu do wzoru [2] otrzymamy:

$$\sigma_V = 2650 \times 9,81 \times 627 = 16\,299\,805,5 \text{ Pa}$$

$$\sigma_V = \mathbf{16,30 \text{ MPa}}$$

Obliczenie naprężenia poziomego:

- dane do obliczeń:  $\sigma_V = 16,30 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 0,7$ ,  
 $p = 4,55 \text{ MPa}$

– po podstawieniu do wzoru [3] otrzymamy:

$$\sigma_{H, \min} = \frac{0,25}{(1-0,25)} [16,30 - (0,7)(4,55)] - (0,7)(4,55)$$

$$\sigma_{H, \min} = \mathbf{7,56 \text{ MPa}}$$

#### CIŚNIENIE SZCZELINOWANIA

Ciśnienie szczelinowania można określić na podstawie równań (Economides, Nolte, 1998; Carnegie i in., 2002):

$$\sigma_{f, \max} = 3\sigma_{H, \min} - \sigma_{H, \max} - p + \sigma_{Tw} \quad [\text{MPa}] \quad [4]$$

$$\sigma_{f, \min} = \frac{3\sigma_{H, \min} - \sigma_{H, \max} - 2\eta p + \sigma_{Tw}}{2(1-\eta)} \quad [\text{MPa}] \quad [5]$$

gdzie:

- $\sigma_{f, \max}$  – maksymalna wartość ciśnienia szczelinowania (górną granicą),  $[\text{MPa}]$ ,
- $\sigma_{f, \min}$  – minimalna wartość ciśnienia szczelinowania (dolną granicą),  $[\text{MPa}]$ ,
- $\sigma_{H, \min}$  – minimalne naprężenie poziome,  $[\text{MPa}]$ ,
- $\sigma_{H, \max}$  – maksymalne naprężenie poziome,  $[\text{MPa}]$ ,
- $\sigma_{Tw}$  – wytrzymałość na rozciąganie,  $[\text{MPa}]$ ,
- $p$  – ciśnienie porowe,  $[\text{MPa}]$ ,
- $\eta$  – współczynnik określony wzorem:

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad [6]$$

Minimalne naprężenia poziome  $\sigma_{H, \min}$  to naprężenia spowodowane wyłącznie przez naprężenia geostatyczne (grawitacyjne). Natomiast maksymalne naprężenie poziome  $\sigma_{H, \max}$  stanowi sumę naprężeń geostatycznych i tektonicznych (Economides, Nolte, 1998).

Obliczenie ciśnienia szczelinowania dla poziomu magazynowego (serii chłonnej):

– dane do obliczeń:  $\sigma_{H,min} = \sigma_{H,max} = 7,56$  MPa,  $\sigma_{Tw} = 6,45$  MPa (wartość średnia ze wszystkich oznaczeń wykonanych dla poziomu magazynowego),  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 0,7$ ,  $p = 4,55$  MPa

– po podstawieniu do wzorów [4, 5, 6] otrzymamy:

$$\eta = \frac{0,7(1-2 \times 0,25)}{2(1-0,25)}$$

$$\eta = 0,23$$

$$\sigma_{f,max} = 2 \times 7,56 - 4,55 + 6,45$$

$$\sigma_{f,max} = 17,02 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,min} = 12,65 \text{ MPa.}$$

Obliczenie ciśnienia szczelinowania dla nadkładu PMG, tj. serii uszczelniającej poziom magazynowy od góry:

– dane do obliczeń:  $\sigma_{H,min} = \sigma_{H,max} = 7,56$  MPa,  $\sigma_{Tw} = 1,37$  MPa (wartość średnia ze wszystkich oznaczeń wykonanych dla serii uszczelniającej poziom magazynowy od góry),  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 0,7$ ,  $p = 4,55$  MPa

– po podstawieniu do wzorów [4, 5, 6] otrzymamy:

$$\eta = \frac{0,7(1-2 \times 0,25)}{2(1-0,25)}$$

$$\eta = 0,23$$

$$\sigma_{f,max} = 2 \times 7,56 - 4,55 + 1,37$$

$$\sigma_{f,max} = 11,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,min} = \frac{2 \times 7,56 - 2 \times 0,23 \times 4,55 + 1,37}{2(1-0,23)}$$

$$\sigma_{f,min} = 9,35 \text{ MPa.}$$

Obliczenie ciśnienia szczelinowania dla serii uszczelniającej poziom magazynowy od dołu:

– dane do obliczeń:  $\sigma_{H,min} = \sigma_{H,max} = 7,56$  MPa,  $\sigma_{Tw} = 8,35$  MPa (wartość średnia ze wszystkich oznaczeń wykonanych dla serii uszczelniającej poziom magazynowy od dołu),  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 0,7$ ,  $p = 4,55$  MPa

– po podstawieniu do wzorów [4, 5, 6] otrzymamy:

$$\eta = \frac{0,7(1-2 \times 0,25)}{2(1-0,25)}$$

$$\eta = 0,23$$

$$\sigma_{f,max} = 2 \times 7,56 - 4,55 + 8,35$$

$$\sigma_{f,max} = 18,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,min} = \frac{2 \times 7,56 - 2 \times 0,23 \times 4,55 + 8,35}{2(1-0,23)}$$

$$\sigma_{f,min} = 13,88 \text{ MPa.}$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wyliczone ciśnienie szczelinowania dla poziomu magazynowego przyjmuje wartości 12,65–17,02 MPa, dla nadkładu poziomu magazynowego 9,35–11,94 MPa, a dla serii uszczelniającej poziom magazynowy od dołu 13,88–18,92 MPa. Wyliczone ciśnienia szczelinowania zarówno dla poziomu magazynowego, jak i dla serii uszczelniających poziom magazynowy są zatem wyższe od maksymalnej wartości ciśnienia dennego w fazie zatłaczania gazu ziemnego do złoża (PMG), tj. 7,8 MPa, co z kolei pozwala przyjąć, że ciśnienie robocze  $P_{max} = 7,8$  MPa, założone w projekcie rozbudowy PMG, nie zagraża rozszczelnieniem ośrodka skalnego.

## WNIOSKI

1. Budowa podziemnych magazynów gazu w wyeksploatowanych złożach wymaga, oprócz dokładnego rozpoznania budowy geologicznej, również geomechanicznej oceny masywu skalnego ze szczególnym uwzględnieniem skał serii magazynowej i serii uszczelniających.

2. Istotnym elementem geomechanicznej oceny masywu skalnego, w obrębie którego projektowany jest podziemny magazyn gazu, jest wyznaczenie ciśnień szczelinowania w celu wykazania, czy eksploatacja magazynu nie spowoduje zagrożenia rozszczelnieniem ośrodka skalnego w trakcie zatłaczania i odbioru gazu ziemnego.

3. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wskazują, że skały w badanym interwale złoża Swarzędz charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i stosunkowo niewielką zmiennością wartości wszystkich oznaczanych parametrów.

4. Ciśnienia szczelinowania dla poziomu magazynowego, jego nadkładu oraz serii uszczelniającej poziom magazynowy od dołu są wyższe od maksymalnej wartości ciśnienia dennego w fazie zatłaczania gazu ziemnego do złoża. Pozwala to przyjąć, że ciśnienie robocze założone w projekcie rozbudowy PMG nie zagraża rozszczelnieniem ośrodka skalnego.

5. Obliczenia przedstawione w artykule dotyczą części głębszej PMG Swarzędz. W przypadku lokalizacji obiektów towarzyszących, związanych z projektowaną rozbudową magazynu, tj. instalacji napowierzchniowych, do oceny ich warunków posadowienia należy wykonać odrębne opracowanie geologiczno-inżynierskie.

*Praca wykonana w ramach badań statutowych w roku 2011.*



## LITERATURA

- CARNEGIE A., THOMAS M., HAMAWI M., AKBAR M., BURTON M., 2002 — An advanced method of determining insitu reservoir stresses: wireline conveyed micro-fracturing. SPE Paper 78486. 10th Abu Dhabi International Petroleum Conference.
- ECONOMIDES M.J., NOLTE K.G., 1998 — Reservoir stimulation. Schlumberger Educational Services, Houston.
- KIDYBIŃSKI A., SIEMEK J., ZAWISZA L. i inni, 2006 — Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- PN-G-04302:1997 — Skąły zwięzłe. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania.
- PN-G-04303:1997. Skąły zwięzłe. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie przy użyciu próbek foremnych.
- PRZYBYCIN A., ELIASZ-MISIAK B., ZAWISZA L., 2011 — Sposoby użytkowania górotworu na świecie i Polsce. *Prz. Geol.*, **59**, 5: 417–425.
- REINISCH R., 2000 — Wybrane istotne aspekty podziemnych magazynów gazu. Wyd. PLJ, Warszawa.
- ZAWISZA L., WĄTOR L., WOŹNIAK H., 2011 — Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki dla potrzeb bezziornikowego magazynowania gazu ziemnego w horyzoncie cenomanu złoza gazu ziemnego Swarzędów. Ośrodek Szkolenia i Rzecznawstwa SNTIiTPNiG, Kraków.

## SUMMARY

The quick changes in gas consumption structure caused by increasing demand for space heating and power generation forced the needs for gas storage capacity. The state development program for underground gas storages envisages permanently increasing storage capacity, sufficient both for the current control of gas supply and the storage of 90-days reserve.

One of storage methods is the accumulation of gas in reservoir horizons of exhausted gas deposits. Development and exploitation of such storages requires both the detailed knowledge of geological structure and geomechanical evaluation of rock formations. Such evaluation aims to prove that gas injection and withdrawal will not result in an unsealing of cap rocks. Thus, it is necessary to determine the fracturing pressure of reservoir rocks as well as the cap rocks and the underlying strata.

Geomechanical evaluation of rock formations and calculation procedure of fracturing pressure, both require the measurements of relevant physical, strength and deformation parameters of reservoir and sealing rocks, all at full saturation state.

For the studied example of the Swarzędów underground gas storage, the following measurements of rock samples were made: density, bulk density, total porosity, permeability, uniaxial compressive strength on regular samples and point load methods, and tensile strength with the application of compression method.

Three rock formations were analyzed:

– storage series, which includes Kimmeridgian limestones, Cenomanian sandstones and Turonian limestones,

– supra-storage series, which forms reservoir cap rock: Senonian marls, Lower Badenian claystones-mudstones and Middle Badenian anhydrites,

– sub-storage series, which provides bottom sealing of the reservoir, these are compact, crystalline limestones.

The values of hydraulic parameters of reservoir rocks depend on their lithology and vary significantly: effective porosity – from average 6.1% in Turonian limestones to 21.4% in Cenomanian sandstones and permeability – from 0.2 to 1.240 mD in the same rocks, respectively. The values of mechanical parameters of both the supra- and sub-storage series are similar: average compressive strength – 99.6 MPa for storage series and 90.03 MPa for sub-storage series, and tensile strength – 6.45 and 8.35 MPa, respectively. The lower values were measured for supra-reservoir series: average compressive strength – 22.65 MPa and average tensile strength – 1.37 MPa.

The calculated fracturing pressures (Economides, Nolte, 1998; Carnegie *et al.*, 2002) revealed: for reservoir series – from 12.65 to 17.02 MPa, for supra-reservoir series – from 9.35 to 11.94 MPa and for sub-reservoir series – from 13.88 to 18.92 MPa. These data indicate that fracturing pressures in both the reservoir horizon and its cap rocks are higher than maximum value of well-bottom pressure during gas injection to the storage, i.e. 7.8 MPa. Hence, the results prove that working pressure  $P_{\max} = 7.8$  MPa designed for the Swarzędów gas storage will not cause fracturing of the rock formations.

