

Jarosław ŚLIZOWSKI*, Monika WIŚNIEWSKA**, Karolina WOJTUSZEWSKA***

Pojemność komór magazynowych gazu w pokładzie soli na monoklinie przedsudeckiej

Streszczenie: W pracy określono teoretyczną pojemność jaką mogłyby mieć komory magazynowe gazu wykonane w złożach soli na monoklinie przedsudeckiej. Określone zostały pojemności początkowe komór oraz pojemności długotrwałe uwzględniające ich konwergencję.

Konwergencje zostały opisane formułami będącymi iloczynem funkcji potęgowej, której argumentem jest: różnica ciśnienia pierwotnego górotworu i ciśnieniem gazu w komorze oraz wykładniczej funkcji temperatury, analogicznie jak w prawie pełzania Nortona.

Stwierdzono, że głównymi czynnikami wpływającymi na pojemność komór magazynowych gazu są: miąższość wpływająca na rozmiary komory oraz głębokość złoża wpływająca na ciśnienie magazynowania i konwergencję. Zgodnie z wynikami przedstawionych obliczeń długotrwała pojemność magazynowa jaką można uzyskać na poszczególnych złożach waha się od 18,1–59,8 mln Nm³.

Słowa kluczowe: sól kamienna, magazynowanie gazu, długotrwała pojemność, monoklina przedsudecka

Gas storage cavern capacity in salt deposit of the Foresudetic Monocline

Abstract: Theoretical capacity of gas storage caverns that could be located in salt deposits of the Foresudetic Monocline was discussed in the paper. The initial capacity and the long-term capacity related to the convergence have been defined.

The convergence of each cavern was described by formulas, which have the same shape as Norton creep law, i.e. power function of pressure difference (primary pressure in rock massif minus gas pressure in the cavern), multiplied the exponential function of temperature.

It was found, that main factors affecting capacity of gas storage caverns are: thickness, which affects the size of the cavern, and depth of deposits which affects gas storage pressure and convergence.

According to the calculations, the long-term storage capacity of selected areas varies from 18.1–59.8 mln Sm³.

Key words: rock salt, gas storage, long-term capacity, foresudetic monocline

* Dr hab. inż., *** Mgr inż., Zakład Podziemnego Magazynowania i Składowania, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

** Mgr inż., OBRGSCHEM „Chemkop” Sp. z o.o., Kraków.

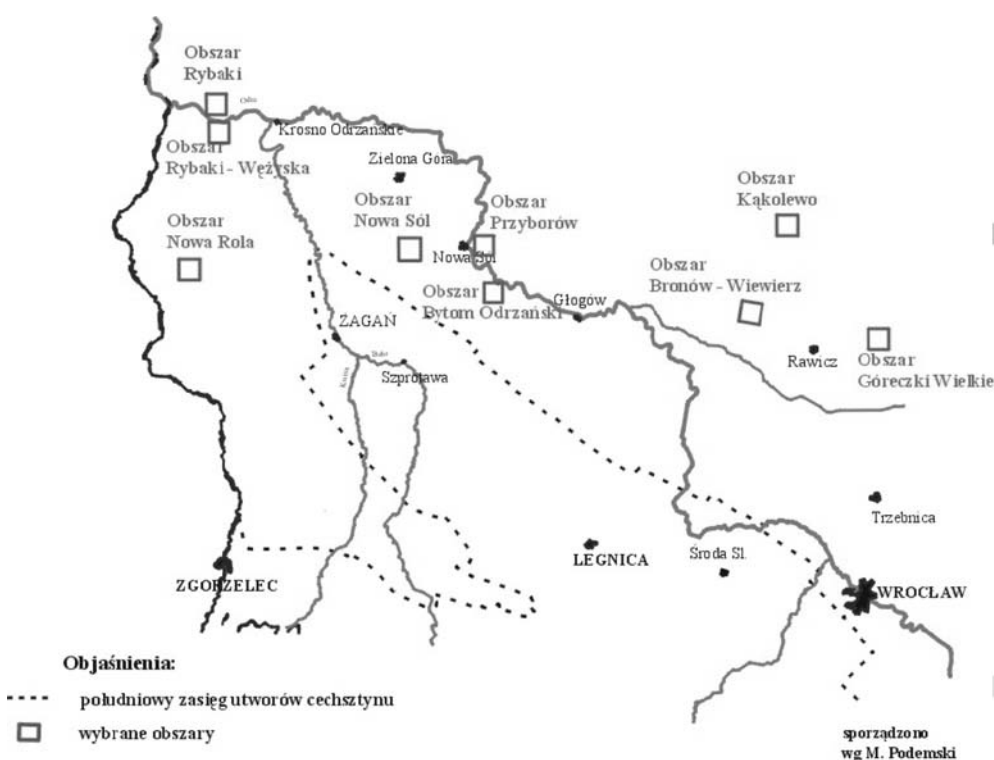
Wprowadzenie

W pracy przeanalizowane zostaną pojemności pojedynczych komór magazynowych gazu, jakie można wykonać, przy uwzględnieniu uwarunkowań geomechanicznych i ługowniczych, w wybranych złożach soli na monoklinie przedsudeckiej.

Jedyny polski magazyn gazu ziemnego w złożu soli kamiennej funkcjonuje w wydzie solnym Mogilno, a o jego budowie zdecydował głównie fakt istnienia kopalni otworowej, co umożliwiło zagospodarowanie solanki. W bieżącym roku rozpoczęto również budowę magazynu na złożu Mechelinki w rejonie Zatoki Puckiej, w przypadku którego przewidywany jest zrzut solanki do Bałtyku.

Innym perspektywicznym rejonem do budowy magazynów jest pokład soli cechsztyńskich na monoklinie przedsudeckiej. Problemem pozostaje tu sposób utylizacji solanki, której zrzut do cieków wodnych jest niezgodny z aktualnymi przepisami dotyczącymi ochrony środowiska oraz prawem wodnym. Z punktu widzenia wpływu warunków geologicznych jest to rejon bardzo interesujący, choć zróżnicowany.

Pojemność efektywna komory magazynowej gazu jest – pomijając efekty termodynamiczne – iloczynem jej objętości i zakresu roboczego ciśnienia magazynowania. Parametry te uzależnione są głównie od miąższości i głębokości złoża oraz jego jednorodności.



Rys. 1. Lokalizacja wybranych obszarów w strefie przedsudeckiej

Fig. 1. Localization of selected areas in foresudetic region

1. Budowa geologiczna złożeń i lokalizacja wybranych obszarów

Złoże soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej występuje w ułożeniu pierwotnym, choć jego północna część jest zaburzona tektonicznie. Cechsztyń wykształcony jest w cyklotemach Werra – Z1, Strassfurt – Z2, Leine – Z3 i Aller – Z4. Najstarszą sól kamienną reprezentuje szereg odmian soli od drobnokrystalicznej do występującej sporadycznie kryształowej o barwie białej, jasnoszarej, szarej, ciemnoszarej, szarozółtej lub bezbarwnej. Wyróżnić w niej można przerosty anhydrytu oraz substancję ilastą. Warstwy anhydrytu o większych miąższościach częściej pojawiają się w spągu niż w stropie soli.

Spąg pokładu soli zapada generalnie w kierunku NE od głębokości około 600 m. Miąższość najstarszej soli jest bardzo zróżnicowana i waha się w przedziale od kilku metrów do stu kilkudziesięciu metrów, lokalnie przekraczając nawet około 300 m (okolice Brzegu Dolnego), przeciętnie wynosi około 100 m.

Z punktu widzenia potrzeb magazynowych rozpatrywać można obszary, w których występuje choć jedna warstwa soli (Z1, Z2, Z3 lub Z4) o miąższości przekraczającej 150 m (Ślizowski K. i in. 2006). W niniejszej pracy przeanalizowano 9 obszarów zaznaczonych na rysunku 1, w których warstwa soli cyklotemu Z1 spełnia to kryterium.

2. Zależność pomiędzy miąższością złożeń a maksymalną objętością komory

Schematyczny obraz komory magazynowej przedstawia rysunek 2.

Dla zapewnienia regularnego kształtu komory i jej długotrwałej stateczności spełnionych musi być szereg warunków, wynikających z zasad technologii ługowania i wymagań geomechanicznych. Przyjmuje się najczęściej następujące warunki ograniczające:

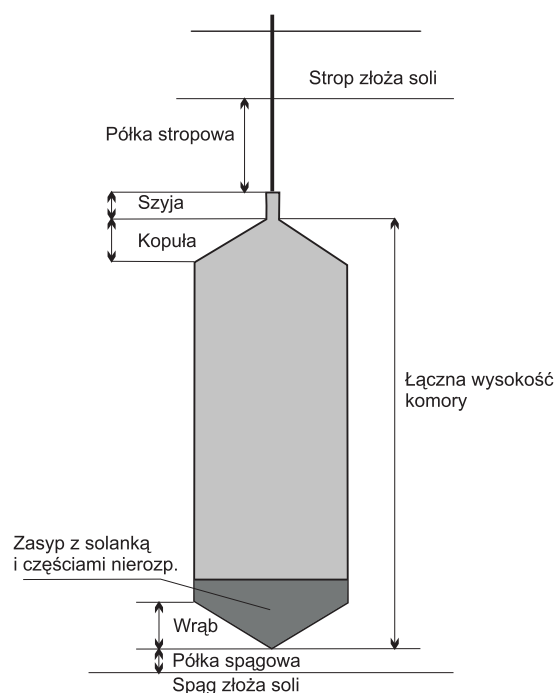
- na półkę stropową, półkę spągową i szyję komory (otwór poszerzony krótkotrwałym ługowaniem do średnicy rzędu 2 m w celu ochrony cementacji) pozostawić należy odpowiednio 30, 5 i 15 m (łącznie minimum 50 m) (Guarascio 1998),
- dla zachowania regularnego kształtu komory jej średnica nie powinna przekraczać 2/3 wysokości,
- wysokość kopuły zabezpieczającej przed wystąpieniem naprężeń rozciągających powinna wynosić około 1/3 średnicy,
- wysokość wrębu, w którym gromadzą się części nierozpuszczalne wynosi około 1/6 średnicy,
- efektywna objętość magazynowa komory, pomniejszona o wielkość zasypu wraz z solanką rezydualną, stanowi 90% objętości geometrycznej.

Przy tych założeniach objętość magazynowa komory wyraża się wzorem:

$$V_{M1} = 0,9V = 0,9 \frac{7\pi}{81} (M - 50)^3 \quad (1)$$

gdzie:

- V_{M1} – objętość magazynowa,
- M – miąższość złożeń,
- V – objętość wyługowana.



Rys. 2. Schematyczny obraz komory magazynowej na gaz ziemny

Fig. 2. Sketch of typical gas storage cavern

W przypadku większych miąższości – a tym samym większych dopuszczalnych (z punktu widzenia technologii ługowania) średnic – istotną rolę odgrywa jednorodność złoża.

Wraz ze wzrostem średnicy znacznie zwiększa się ryzyko uzyskania nieregularnych kształtów komory, które powodują, że efektywność wykorzystania złoża będzie mniejsza. Konieczne mogą być bowiem większe odległości pomiędzy komorami i wyższe wartości minimalnego ciśnienia magazynowania.

Z tych powodów projektując pole komór magazynowych narzuca się, dla złóż o dużej miąższości, pewną średnicę maksymalną. W takim przypadku objętość komory magazynowej spełniającej przedstawione warunki a–e wyraża wzór (Ślizowski K. i in. 2006):

$$V_{M2} = 0,9V = \frac{9\pi}{120} D_{\max}^2 (3H - D_{\max}) \quad (2)$$

gdzie:

- D_{\max} – maksymalna średnica (w złożu idealnie jednorodnym),
- $H = M - 50$ – wysokość komory bez szyi.

3. Wpływ głębokości zalegania złoża na pojemność komór magazynowych gazu

Pojemność komór magazynowych jest iloczynem objętości magazynowej i ciśnienia magazynowania:

$$P_0 = (p_{\max} - p_{\min}) \cdot V_M \quad (3)$$

gdzie:

- P_0 – początkowa pojemność w normalnych m^3 , tzn. przy ciśnieniu atmosferycznym [Nm^3],
- $p_{\max} = g_{\text{szczel}} \cdot h$ – maksymalne ciśnienia magazynowania [atm.],
- g_{szczel} – spoczynkowy gradient mikroszczelinowania osiągający wartość w granicach 0,017–0,019 MPa/m,
- h – głębokość początku szyi komory,
- p_{\min} – minimalne ciśnienia magazynowania [atm.],
- V_M – mniejsza z wartości V_{M1} i V_{M2} .

Wartość minimalnego ciśnienia magazynowania zależy od głębokości, właściwości mechanicznych górotworu oraz wymiarów komory magazynowej. Z pewnym przybliżeniem można jednak przyjąć, że przeciętna wartość p_{\min} również zmienia się z głębokością w sposób liniowy (Ślizowski J., Lankof, Wojtuszevska 2007):

$$p_{\min} = g_{\text{wytrz}} \cdot h + p_0 \quad (4)$$

gdzie:

- g_{wytrz}, p_0 – stałe współczynniki przyjmowane na podstawie doświadczeń projektowych,
- h – głębokość sklepienia komory.

W przeprowadzonych dalej szacunkach przyjęto następujące założenia:

- wysokość komory może wynosić maksymalnie 250 m, tzn. w rozpatrywanych pokładach powyżej miąższości 300 m objętość komór już się nie zwiększa,
- za maksymalną dopuszczalną średnicę przyjęto wartość $D_{\max} = 60$ m,
- $g_{\text{szczel}} = 0,018$ MPa/m, przy czym maksymalne ciśnienie magazynowania jest ograniczone również wytrzymałością zarurowania do 24 MPa,
- $g_{\text{wytrz}} = 0,007$ MPa/m,
- $p_0 = -2,35$ MPa.

Obliczone powyższymi wzorami pojemności są pojemnościami początkowymi, które z biegiem czasu ulegają zmniejszeniu w skutek zjawiska pełzania. Określenie intensywności tego procesu należy do jednego z najtrudniejszych zagadnień geomechaniki, gdyż wymaga rozpoznania ruchu górotworu w całym zakresie oddziaływania komory.

W niniejszej pracy konwergencję komór – tzn. zmianę ich objętości w stosunku do objętości początkowej – oszacowano według następującego wzoru, opisanego szczegółowo w pracy statutowej IGSMiE (Ślizowski J., Wojtuszevska 2009) i w referacie wygłoszonym

na wiosennej konferencji SMRI (*Solution Mining Research Institute*) w Krakowie (Ślizowski J., Urbańczyk, Wojtuszevska 2009a):

$$\frac{dV_M}{dt} \frac{1}{V} = A(p_z - p_k)^n e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (5)$$

gdzie:

- V – objętość komory,
- p_z – ciśnienie pierwotne górotworu,
- p_k – ciśnienie gazu w komorze,
- $A, n, Q/R$ – współczynniki,
- $T = 0,03h + 285$ – temperatura górotworu.

Wartości współczynników A , n i Q/R oszacowano na podstawie studium parametrycznego, w którym analizowano konwergencję komór w zależności od głębokości i ciśnienia gazu w komorze dla ośmiu różnych głębokości posadowienia środka komory w przedziale 750–1800 m p.p.t.: $A = 0,6846$, $n = 4,089$, $Q/R = 2867,9$ (Ślizowski J., Urbańczyk, Wojtuszevska 2009b).

Ze względu na to, że okres eksploatacji komór przewidziany jest na około 30 lat, można przyjąć, że przeciętne pojemności komór będą odpowiadać pojemnościom osiągniętym po 15 latach zamieszczono je w tabeli 1.

TABELA 1. Początkowa i długotrwała (po 15 latach) pojemność komór magazynowych w analizowanych złożach

TABLE 1. Initial and long-term (capacity after 15 years of operation) of storage caverns placed in analyzed areas

Lp.	Obszary w rejonie monokliny przedsudeckiej	Strop śr. [m p.p.t.]	Miąższość [m]	Temp. [K]	Objętość komory [m ³]	Pojemność komory [mln Nm ³]	Konw. względna [%/rok]	Pojemność po 15 latach [mln Nm ³]	Ubytek objętości [%]
1.	Nowa Sól	847,7	264,0	305,0	493 638,7	53,8	1,9	52,3	2,8
2.	Bronów-Wiewierz	1 300,8	199,4	317,6	329 304,5	52,8	9,6	45,7	13,4
3.	Nowa Rola	1 192,0	210,0	314,5	356234,1	52,8	6,7	47,8	9,5
4.	Kąkolewo	1 724,0	247,5	331,0	451653,9	59,1	47,1	28,7	51,5
5.	Rybaki-Wężyska	1 729,3	172,3	330,1	260 178,1	34,6	42,2	18,1	47,6
6.	Połęcko	1 771,5	300,0	333,2	585 241,7	73,6	60,3	29,0	60,7
7.	Przyborów	1 215,0	182,5	314,8	286 259,5	43,4	6,9	39,2	9,8
8.	Góreczki Wielkie	1 567,5	180,5	325,3	281 170,5	40,5	24,4	28,0	30,9
9.	Bytom Odrzański	1 012,5	266,25	310,0	499 363,9	63,3	3,8	59,8	5,6

Podsumowanie

1. Głównymi czynnikami wpływającymi na pojemność komór magazynowych gazu są: miąższość wpływająca na rozmiary komory oraz głębokość złoża wpływająca na ciśnienie magazynowania i konwergencję.
2. W pracy potwierdzono możliwość magazynowania gazu w złożach na monoklinie przedsudeckiej, charakteryzujących się dużym zróżnicowaniem rozważanych parametrów.
3. Zgodnie z wynikami obliczeń długotrwała pojemność magazynowa pojedynczej komory jaką można uzyskać na poszczególnych złożach waha się od 18,1–59,8 mln Nm³ (patrz tab. 1 kolumna 9). Jej maksymalna wartość występuje na innych złożach niż w przypadku pojemności początkowej.
4. Dalszy postęp w prezentowanych badaniach uzależniony jest od opracowania termomechanicznego modelu komory magazynowej gazu.

Literatura

- Guarascio M., red., 1998 – Guidelines for Safety Assessment of Salt Caverns. SMRI Fall Meeting 1998, Rome-Italy.
- Ślizowski J., Lankof L., Wojtuszevska K., 2007 – Geomechaniczna ocena optymalnej głębokości komór magazynowych gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej. Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie. WUG nr 6(154)2007.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Wojtuszevska K., 2009a – Convergence estimation for gas storage caverns field. SMRI Spring Meeting 2009, Kraków.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Wojtuszevska K., 2009b – Ocena konwergencji pola komór magazynowych gazu w wysadzie solnym. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, w druku.
- Ślizowski J., Wojtuszevska K., 2009 – Opracowanie ilościowych kryteriów oceny warunków magazynowania płynnych węglowodorów w złożach soli (praca statutowa IGSMiE – niepublik.).
- Ślizowski K. i in., 2006 – Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej. Archiwum IGSMiE PAN (praca niepublik.).

