

EFEKTYWNA POJEMNOŚĆ KOMÓR MAGAZYNOWYCH GAZU W POKŁADOWYCH ZŁOŻACH SOLI KAMIENNEJ

Effective capacity of gas storage caverns in rock salt deposits

Jarosław ŚLIZOWSKI¹, Karolina SERBIN¹
& Monika WIŚNIEWSKA²

¹*Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN;
ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; email: slizow2@min-pan.krakow.pl*

²*Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP Sp. z o.o.;
ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków*

Treść: W pracy przeanalizowano możliwości magazynowania gazu w cechsztyńskich złożach soli na monoklinie przedsudeckiej (dziewięć obszarów) i w rejonie wyniesienia Łeby (cztery obszary). Rozważanymi parametrami była miąższość złoża, wpływająca na objętość komór oraz głębokość zalegania złoża, od której zależą minimalne i maksymalne ciśnienie magazynowania, a tym samym pojemność komory. Stwierdzono, że duża początkowa pojemność magazynowa, jaką można uzyskać na złożach położonych najgłębiej ulega szybkiemu spadkowi na skutek zjawiska konwergencji. Najkorzystniejsze warunki do budowy komór magazynowych na monoklinie przedsudeckiej występują w rejonie Bytomia Odrzańskiego, natomiast na wyniesieniu Łeby – w rejonie Kosakowa, gdzie rozpoczęto ich budowę. W artykule przedstawiono szacunkowe pojemności magazynowe pojedynczych komór na analizowanych złożach oraz pojemności przypadające na 1 km² powierzchni złoża.

Słowa kluczowe: złoża soli, magazynowanie gazu, pojemność komory, konwergencja

Abstract: This paper presents the perspectives for gas storage in the Zechstein salt deposits in the Fore-Sudetic Monocline (nine areas) and in the Łeba elevation region (four areas). The parameters taken into account were: the thickness of the deposit, affecting the cavern volume and the depth of the deposit that affects the minimum and maximum storage pressures, hence volume of the gas that could be stored in the cavern. It has been found that large initial storage capacities, that can be obtained from deposits located deeper, decrease rapidly due to the convergence. The most favorable conditions for location of the storage caverns at the Fore-Sudetic Monocline occur in the Bytom Odrzański region. At the Łeba elevation, the most favorable conditions occur in the Kosakowo region, where construction of the storage facility has been started. To summarize the results, the estimated storage capacities of the individual caverns located in the selected regions and the storage capacities per 1 km² of deposits surface are presented in the paper.

Key words: salt deposit, gas storage, cavern capacity, convergence

WPROWADZENIE

Budowa komór magazynowych gazu w złożach soli kamiennej możliwa jest w trzech rejonach występowania formacji cechsztyńskiej: pokładowych złożach soli w rejonie monokliny przedsudeckiej, w pokładowych złożach na wyniesieniu Łeby oraz w strukturach solnych okręgu środkowopolskiego. W pracy przeanalizowane zostaną potencjalne pojemności pojedynczych komór magazynowych gazu, jakie można wykonać w dwóch pierwszych lokalizacjach, przy uwzględnieniu uwarunkowań geomechanicznych i ługowniczych. Przyjęto, że racjonalna budowa magazynu gazu jest możliwa jedynie w warunkach występowania jednorodnego pokładu soli o miąższości co najmniej 150 m i głębokości zalegania stropu nie większej niż 1800 m p.p.t. (Ślizowski 2006).

W Polsce nie funkcjonuje ani jeden magazyn gazu w pokładowym złożu soli kamiennej. W ubiegłym roku rozpoczęto budowę magazynu na złożu Mechelinki w rejonie Zatoki Puckiej. Warunkiem jego budowy było dopuszczenie zrzutu 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 tego też względu lokalizacje te należy traktować jako potencjalne.

Pojemność efektywna komory magazynowej gazu jest, pomijając efekty termodynamiczne, iloczynem jej objętości i zakresu roboczego ciśnienia magazynowania. Wielkości te uzależnione są głównie od: miąższości i głębokości złoża, jego jednorodności oraz właściwości reologicznych soli, wywołujących zjawisko konwergencji komór.

BUDOWA GEOLOGICZNA WYBRANYCH ZŁÓŻ

Budowa złoża soli na monoklinie przedsudeckiej

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 ok. 600 m. Miąższość najstarszej soli jest bardzo zróżnicowana i waha się w przedziale od kilku metrów do stu kilkudziesięciu metrów, lokalnie przekraczając nawet ok. 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 i głębokości zalegania mniejszej niż 1800 m p.p.t. W niniejszej pracy przeanalizowano dziewięć obszarów zlokalizowanych na monoklinie przedsudeckiej (Fig. 1), w których warstwa soli cyklotemu Z1 spełnia to kryterium.

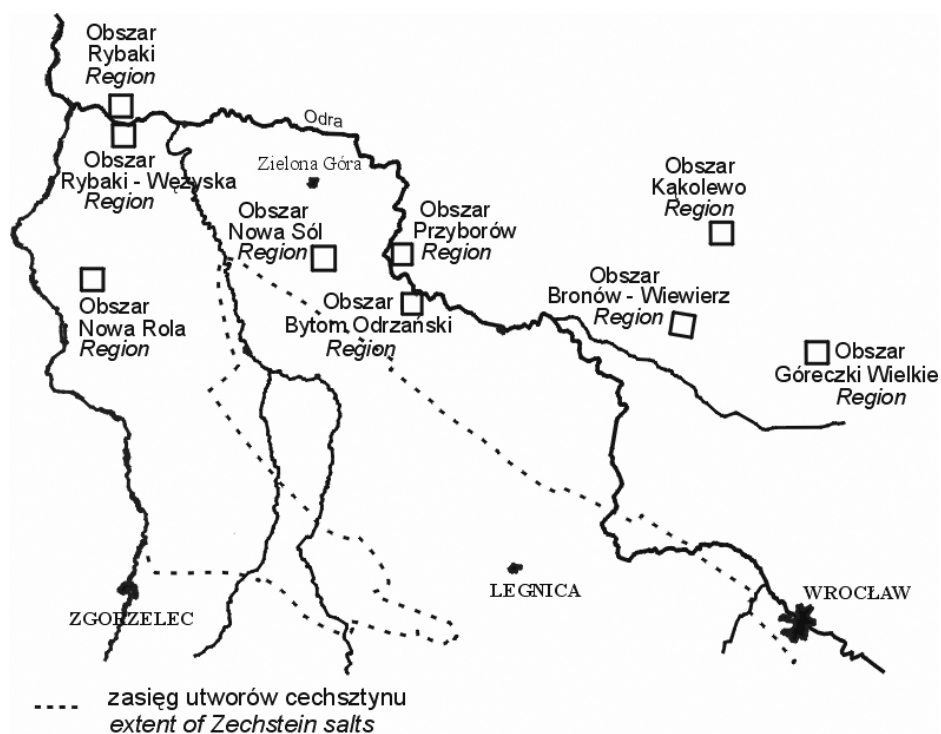


Fig. 1. Lokalizacja wybranych obszarów w strefie przedsudeckiej

Fig. 1. Localization of selected areas in the Fore-Sudetic region

Budowa złoża soli na wyniesieniu Łeby

W nadmorskim rejonie Polski, od Łeby po Hel, występuje cechsztyńska formacja solonośna stanowiąca pod względem strukturalnym część syneklizy perybałtyckiej i zwana jest w tym rejonie wyniesieniem Łeby.

Pokład zalega zgodnie w stosunku do skał otaczających, zapadając monoklinalnie w kierunku południowo-wschodnim. Tworzą go sole powstałe w trzech cyklotemach: Z1, Z2 i Z3. Cyklotemy Z2 i Z3 wykształcone są fragmentarycznie i rozmieszczone nierównomiernie. Z uwagi na możliwość podziemnego magazynowania najważniejsze jest tutaj złożo najstarszej soli kamiennej cyklotemu Z1. Miąższość najstarszej soli kamiennej jest bardzo zróżnicowana: od 0 do około 200 metrów.

Wymienione złoża cechuje stosunkowo prosta budowa, brak istotnego zaangażowania tektonicznego, dość jednorodne wykształcenie i skład mineralny oraz nieliczne, o niewielkim rozprzestrzenieniu i miąższości przewarstwienia soli magnezowo-potasowych. W obrębie pokładu soli kamiennej występują również wkładki anhydrytowe o grubości od 0.1 m do ponad 2.0 m, z których tylko pojedyncze korelują się na większych obszarach (Czapowski & Bukowski 2009).

Biorąc pod uwagę głębokość zalegania stropu złoża (1800 m p.p.t.) oraz miąższość warstw soli (powyżej 150 m) na wyniesieniu Łeby, wytypowano rejon perspektywiczne pod względem możliwości podziemnego magazynowania przedstawione na figurze 2. Są to obszary: Białogarda, Głuszewo, Tupadła oraz Mechelinki.

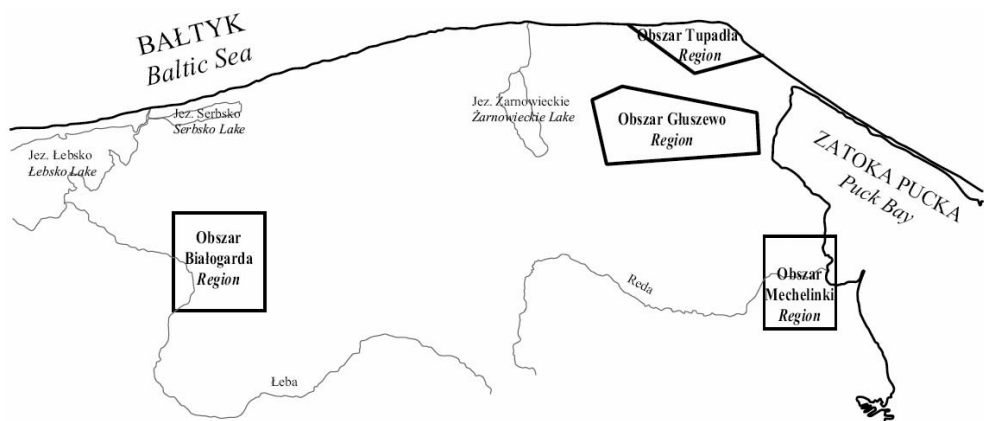


Fig. 2. Lokalizacja wybranych obszarów w na wyniesieniu Łeby

Fig. 2. Localization of selected areas in the Łeba elevation

ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY MIĄŻSZOŚCIĄ ZŁOŻA A MAKSYMALNĄ OBJĘTOŚCIĄ KOMORY

Schematyczny obraz komory magazynowej przedstawia figura 3.

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:

- a) 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 m, 5 m i 15 m (łącznie minimum 50 m) (Guarascio 1998).
- b) Dla zachowania regularnego kształtu komory jej średnica nie powinna przekraczać 2/3 wysokości.
- c) Wysokość kopuły zabezpieczającej przed wystąpieniem naprężeń rozciągających powinna wynosić około 1/3 średnicy.
- d) Wysokość wrębu, w którym gromadzą się części nierozpuszczalne, wynosi około 1/6 średnicy.
- e) Efektywna objętość magazynowa komory, pomniejszona o wielkość zasypu wraz z solanką rezydualną, stanowi 90% objętości geometrycznej.

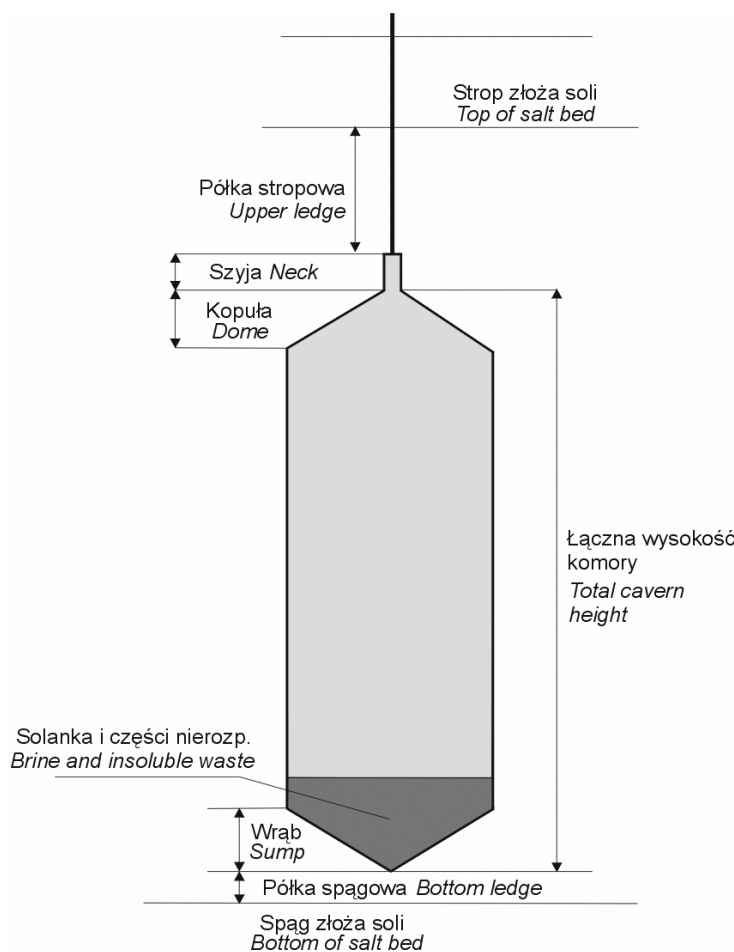


Fig. 3. Schematyczny obraz komory magazynowej na gaz ziemny

Fig. 3. Sketch of typical gas storage cavern

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 złoża,
- V – objętość wyługowana.

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 złoż o dużej miąższości pewną średnicę maksymalną. W takim przypadku objętość komory magazynowej spełniającej przedstawione warunki a)–e) wyraża wzór (Ślizowski 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.

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 [$N \cdot m^3$],
 $p_{\max} = g_{szczel} \cdot h$ – 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 *et al.* 2007):

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

gdzie:

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

W przeprowadzonych dalej szacunkach przyjęto następujące założenia:

- wysokość komory wynosić może 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;
- $g_{szczel} = 0.018$ MPa/m, przy czym maksymalne ciśnienie magazynowania jest ograniczone również wytrzymałością zarurowania do 24 MPa;
- $g_{wytr} = 0.007$ MPa/m;
- $p_0 = -2.35$ MPa.

Obliczone powyższymi wzorami pojemności są pojemnościami początkowymi, które z biegiem czasu ulegają zmniejszeniu wskutek zjawiska pełzania. Określenie intensywności tego procesu należy do jednych 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 *et al.* 2009b) i w referacie wygłoszonym na wiosennej konferencji SMRI (Solution Mining Research Institute) w Krakowie (Ślizowski *et al.* 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 – 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 *et al.* 2009a). Współczynniki te różnią się od parametrów prawa pełzania Nortona, na którego podstawie zostały wyznaczone. We wspomnianym studium obliczenia prowadzono bowiem, wykorzystując prawo pełzania Nortona:

$$\frac{d\varepsilon_{ef}}{dt} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \sigma_{ef}^n \quad (6)$$

ze współczynnikami: $A = 3931.7$, $n = 5$, $Q/R = 5750$ K.

Szybkość konwergencji względnej i szybkość pełzania górotworu przy powyższych parametrach dla dwóch temperatur przedstawia figura 4.

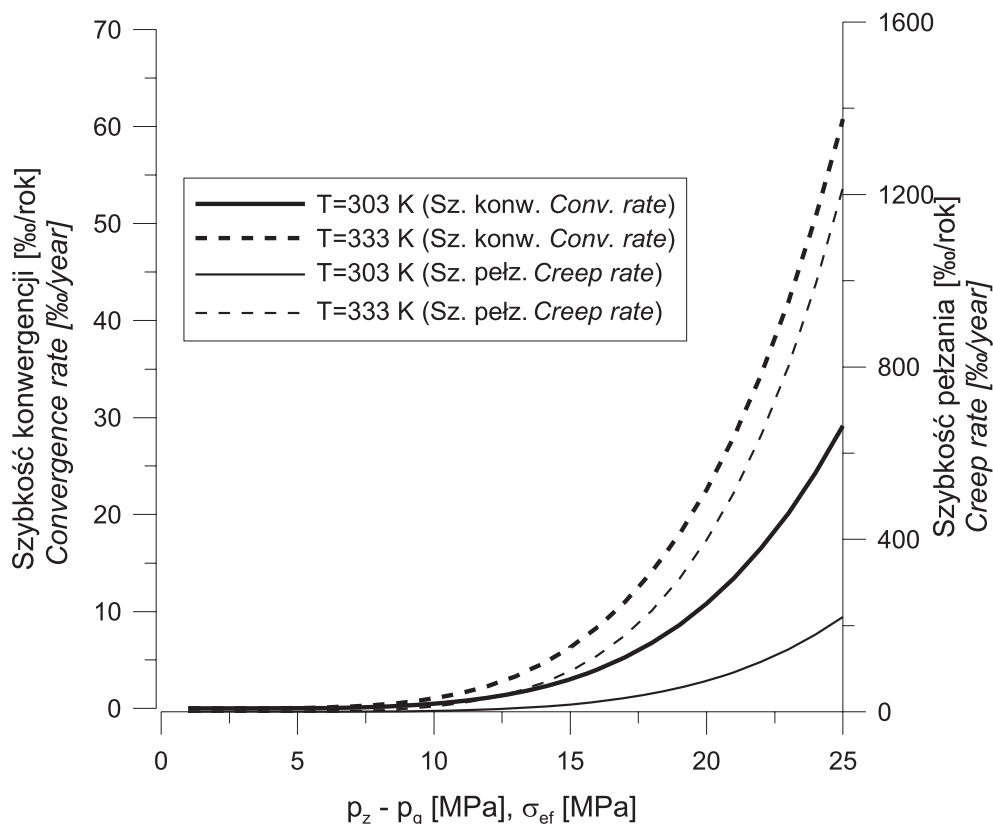


Fig. 4. Zależność szybkości konwergencji od różnicy pomiędzy ciśnieniem gazu a ciśnieniem górotworu i szybkości pelzania od naprężeń efektywnych

Fig. 4. Convergence rate vs. pressure difference between gas pressure and rock massif pressure and creep rate vs. effective stress

Przyjęto, że temperatura górotworu zmienia się liniowo wraz z głębokością:

$$T = 0.01 \cdot H + 283 \text{ w rejonie Zatoki Gdańskiej,}$$

$$T = 0.027 \cdot H + 288 \text{ na monoklinie przedsudeckiej.}$$

Zgodnie z powyższymi wzorami temperatura na głębokości 1000 m p.p.t. w rejonie Zatoki Gdańskiej wynosi 293 K (20°C), a na monoklinie przedsudeckiej 310 K (37°C). Tym samym na podstawie figury 4 można stwierdzić, że zarówno różnice w szybkości pelzania, jak i szybkości konwergencji są kilkukrotne, na korzyść złóż w rejonie Zatoki Gdańskiej.

Ze względu na to, że okres eksploatacji komór przewidziany jest na około 30 lat, można przyjąć że przeciętna pojemność komór będzie odpowiadać pojemności osiągniętej po 15 latach, które zamieszczono w tabeli 1.

Tabela (Table) 1

Początkowa i długotrwała (po 15 latach) pojemność komór magazynowych w analizowanych złożach
Initial and long-term (capacity after 15 years of operation) of storage caverns placed in the analyzed areas

Lp. No.	Wybrane obszary Selected areas	Środek komory Cavern center [m p.p.t.] [m b.g.l.]	Temperatura Temperature [K]	Pojemność początkowa Initial capacity [mln N·m ³] [mln S·m ³]		Konwergencja względna Relative conver- gence [%/rok] [%/year]	Pojemność po 15 latach [mln N·m ³] Capacity after 15 years [mln S·m ³]		Ubytek objętości Loss of volume [%]
				D = 60 m	D = 80 m		D = 60 m	D = 80 m	
1	Nowa Sól	999.7	305.0	53.8	92.4	1.9	52.3	89.7	2.8
2	Bronów – Wiewierz	1420.5	317.6	52.8	89.0	9.6	45.7	77.1	13.4
3	Nowa Rola	1317	314.5	52.8	89.4	6.7	47.8	80.8	9.5
4	Kąkolewo	1867.7	331.0	59.1	101.1	47.1	28.7	49.0	51.5
5	Rybaki – Weżyńska	1835.4	330.1	34.6	57.5	42.2	18.1	30.1	47.6
6	Połęcko	1941.5	333.2	73.6	127.0	60.3	29.0	49.9	60.7
7	Przybórow	1326.3	314.8	43.4	72.6	6.9	39.2	65.5	9.8
8	Góreczki Wielkie	1677.7	325.3	40.5	67.6	24.4	28.0	46.7	30.9
9	Bytom Odrzański	1165.6	310.0	63.3	108.7	3.8	59.8	102.7	5.6
1	Białogarda	766.3	290.7	24.9	41.6	0.5	24.7	41.3	0.7
2	Mechelinki	1079.1	293.8	28.8	47.6	1.8	28.0	46.4	2.6
3	Tupadła	774.1	290.7	23.3	38.9	0.5	23.1	38.6	0.8
4	Głuszewo	854.8	291.5	25.3	42.2	0.7	25.1	41.7	1.1

PODSUMOWANIE

- 1) Maksymalne początkowe pojemności magazynowe uzyskuje się w komorach najgłębszych ze względu na największe różnice pomiędzy dopuszczalnym minimalnym i maksymalnym ciśnieniem magazynowania. Pojemność ta spada jednak bardzo szybko na skutek zjawiska konwergencji, która w analizowanych przypadkach wynosiła maksymalnie ok. 60‰ rocznie.
- 2) Na monoklinie przedsudeckiej można uzyskać generalnie większe pojemności magazynowe niż w złożach na wyniesieniu Łeby. Najlepsze warunki w świetle przeprowadzonych obliczeń występują w rejonie Bytomia Odrzańskiego. W rejonie nadmorskim najkorzystniejsza jest wybrana lokalizacja magazynu na złożu Mechelinki.
- 3) Pojemność magazynowa pojedynczej komory (przeciętna dla 30 lat eksploatacji), którą można uzyskać na poszczególnych złożach, waha się od 18.1 do 59.8 mln $\text{N}\cdot\text{m}^3$, co przy 250-metrowym rozstawie komór daje pojemność 0.35–1.11 mld $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{km}^2$ w przypadku komór o średnicy 60 m i 0.58–2 mld $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{km}^2$ w przypadku komór o średnicy 80 m.
- 4) Dalszy postęp w prezentowanych badaniach uzależniony jest od opracowania termomechanicznego modelu komory magazynowej gazu i modyfikacji formuł na minimalne i maksymalne ciśnienie magazynowania oraz szybkość konwergencji.

LITERATURA

- Czapowski G. & Bukowski K., 2009. Złoża soli w Polsce – stan aktualny i perspektywy zagospodarowania. *Przegląd Geologiczny*, 5, 9, 798–811.
- Guarascio M. (red.), 1998. Guideline for Safety Assessment of Salt Caverns. *SMRI Fall Meeting 1998*, Rome, Italy.
- Ślizowski K. (red.), 2006. *Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej*. Archiwum IGSMiE PAN (praca niepublikowana).
- 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*, 6(154), 50–51.
- Ślizowski J., Urbańczyk K. & Wojtuszevska K., 2009a. Convergence estimation for gas storage caverns field. *SMRI Spring Meeting 2009*, Kraków.
- Ślizowski J., Wojtuszevska K. & Wiśniewska M., 2009b. Pojemność komór magazynowych gazu w pokładzie soli na monoklinie przedsudeckiej. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN*, 5–11.

Summary

Natural gas underground storage in Poland could be located in Zechstein bedded salt deposits in the Łeba elevation and the Fore-Sudetic Monocline as well as salt domes placed in central part of Poland. The preliminary analysis indicates that the storage caverns may be

effectively located in salt deposit where homogeneous layer of salt is at least 150 m thick and the roof of the layer rests at a depth smaller than 1800 m b.g.l. Such conditions are met, i.a. in four areas of the Łeba elevation and nine areas of the Fore-Sudetic Monocline that are analyzed in this article.

Capacity of storage cavern depends on its volume and the range of storage pressure. The temperature of the deposits is also important since it affects the amount of gas stored and the convergence rate (loss of cavern volume with time).

The following estimation assumes that due to leaching factors, the equivalent diameter of the caverns does not exceed 60 m and their height is 50 m smaller than the thickness of the deposit (left for roof pillar, floor pillar and cavern neck). It was also assumed that the minimum and maximum storage pressures are increasing linearly with depth.

The convergence of the caverns was estimated by application of the following formula:

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

where:

- V – cavern volume,
- p_z – rock massif pressure at the depth of cavern center,
- p_k – gas pressure,
- $A, n, Q/R$ – coefficients,
- T – temperature of rock massif.

The parameters of the formula were calculated on the basis of parametric study, where convergence of the caverns at different depths was analyzed using a numerical model based on finite element method. The convergence rate depending on the pressure difference between gas pressure and the primary rock massif pressure for different temperatures is shown in figure 4.

Storage cavern capacities calculated considering the above assumptions (initial and after 15 years, which is a half of the planned operation period) in selected areas are presented in table 1.

Higher primary storage capacities are met in caverns placed in the Fore-Sudetic Monocline, mostly because of the thickness of the deposit. After 15 years the capacities tend to equalize because the convergence rate of the caverns placed in the Łeba elevation is smaller due to the lower primary temperature of rock massif.