

**Jarosław Ślizowski\*, Kazimierz Urbańczyk\*\*,  
Leszek Lankof\*\*, Karolina Serbin\***

## **ANALIZA ZMIENNOŚCI POLSKICH POKŁADÓW SOLI KAMIENNEJ W ASPEKCIE MAGAZYNOWANIA GAZU**

### **1. WPROWADZENIE**

Jednym z głównych celów eksploatacji otworowej złóż soli kamiennej jest możliwość wykorzystania powstałych kawern do magazynowania płynnych węglowodorów. Można nawet powiedzieć, że przeważająca część inwestycji realizowana jest wyłącznie pod tym kątem, tzn. wyługowane komory mają określone kształty i zlokalizowane są w odpowiedniej odległości.

Nie wszystkie złoża soli kamiennej nadają się do budowy kawern magazynowych, a o ich przydatności decyduje głównie miąższość i w przypadku magazynowania gazu głębokość. Do chwili obecnej jedynymi mapami geologicznymi wykorzystywanymi przy projektowaniu lokalizacji podziemnych magazynów gazu w pokładach soli kamiennej były mapy miąższościowe i mapy głębokości stropu lub spągu pokładów. Na ich podstawie wytypowano wstępnie kilkanaście obszarów potencjalnej lokalizacji magazynów na monoklinie przedsudeckiej i na wyniesieniu Łeby.

W niniejszym artykule przedstawione zostaną wyniki prac badawczych, których celem było sporządzenie map przydatności wyżej wymienionych złóż soli. Badania realizowane były w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN przy współudziale specjalistów z Państwowego Instytutu Geologicznego oraz Katedry Inżynierii Gazowniczej Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w ramach projektu badawczego nr N N525 363935.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN

## 2. ZASADY BUDOWY KAWERNOWEGO MAGAZYNU GAZU

Ze względu na magazynowanie gazu, atrakcyjność złóż soli nie jest jednakowa, lecz zależy od wielu czynników, głównie od miąższości złoża i głębokości jego zalegania. Od tych bowiem czynników zależy głównie wielkość poszczególnych kawern, ich rozstaw i zakres ciśnienia roboczego. Wspomniane wyżej czynniki można sprowadzić do jednej wielkości, którą w artykule będziemy nazywać zdolnością magazynową. Jest to ilość robocza gazu, jaką można zmagazynować w kawernach wykonanych w jednostkowym obszarze złoża.

W przypadku kawern magazynowych gazu ziemnego na tę zdolność składają się następujące elementy:

- wielkość kawern, jakie można wyługować w danym złożu,
- ilość kawern, jakie można ułożyć w danym obszarze złoża,
- przedział ciśnień, w jakim może pracować kawerna magazynowa.

### 2.1. Wielkość kawern

Wielkość kawern, czyli ich objętość zależy od ich kształtu, wysokości i średnicy.

Wysokość kawern zależy od miąższości złoża. Wysokość ta nie może być większa niż miąższość pomniejszona o odpowiednie półki ochronne:

- 1°  $\Delta h_{ps}$  miąższość półki ochronnej w stropie złoża – musi to być co najmniej **30 m**. Jest to związane (niezależnie od geomechaniki) z możliwością wykonania szczelnej i odpowiednio wytrzymałej cementacji w stropie soli.
- 2°  $\Delta h_{szy}$  długość szyi, czyli bosego otworu poszerzonego krótkotrwałym ługowaniem do średnicy rzędu 2 m. Zostawia się ją, aby dodatkowo chronić cementację przed zmianami naprężeń górotworu, jakie powstają podczas eksploatacji kawerny magazynowej, pomiędzy stropem kawerny a butem ostatniej kolumny cementowanej. Minimalna długość takiej szyi to **ok. 15 m**.
- 3°  $\Delta h_{sp}$  miąższość półki ochronnej w spągu złoża – powinna ona wynosić co najmniej **5 m**.

Ale jest to minimum, w praktyce należy odliczyć więcej, bowiem:

- a) Złoże nie leży idealnie płasko, ale ma pewien niewielki **kąt upadu**. Przykładowo: przy średnicy kawerny 60 m i upadzie złoża 10 stopni, różnica w miąższości półki wyniesie ok. 10 m
- b) Dodatkowo, dla operatora magazynu niedogodnie byłoby mieć zróżnicowane ciśnienia maksymalne w poszczególnych kawernach, więc dla wyrównania ciśnień stosuje się dwa rozwiązania:
  - Cementuje ostatnią kolumnę we wszystkich otworach na tej samej głębokości, czyli w praktyce głębiej niż niezbędne minimum.
  - Dobiera ciśnienie maksymalne do kawerny zacementowanej najpłycej, pozostałe nie wykorzystują swych zdolności do końca.

Tak więc **minimum** 30 m pólki stropowej, dla idealnej cementacji, w praktyce należy powiększyć. Biorąc za przykład KPMG Kosakowo, trzeba szacować miąższość pólki na 40–45 m, zaś razem z szyją minimum 55 m, średnio **60 m**.

Czyli w sumie od miąższości złoża należy odliczyć  $\Delta h_{suma}$  wynoszące minimum 50 m, w praktyce zaś średnio **65 m**.

$$\Delta h_{suma} = \Delta h_{ps} + \Delta h_{szyi} + \Delta h_{sp} \quad (1)$$

W związku z tym, wysokość kawerny  $H$  dla miąższości złoża  $M$  w metrach wyraża zależność:

$$H = M - \Delta h_{ps} - \Delta h_{szyi} - \Delta h_{sp} = M - \Delta h_{suma} = M - 65 \text{ m} \quad (2)$$

Typowy kształt kawerny można opisać następująco (por. rys. 1):

- główną część kawerny stanowi walec średnicy docelowej  $D_{max}$ ,
- dolną część kawerny zajmuje stożkowy wrąb, o wysokości ok.  $1/6 D_{max}$ , docelowej średnicy kawerny, gdzie gromadzą się części nierozpuszczalne zawarte w złożu soli,
- górną część kawerny zajmuje kopuła, którą można przybliżyć stożkiem o wysokości ok.  $1/3 D_{max}$ , docelowej średnicy kawerny.

Objętość takiej komory wyraża wzór:

$$V = \frac{\pi}{12} D_{max}^2 (3H - D_{max}) \quad (3)$$

Średnica cylindrycznej części kawerny związana jest z jej wysokością (a więc wynika z miąższości), ale także z głębokością zalegania złoża i rozstawem kawern w siatce. Ta druga zależność będzie omówiona w podrozdziale 2.2, natomiast pierwsza wiąże się z możliwością wyługowania regularnej kawerny. W praktyce, w złożu w miarę jednorodnym, kawerna ługuje się w przybliżeniu osiowo-symetrycznie do średnicy rzędu dwóch trzecich wysokości kawerny, przy większych średnicach kształt zaczyna odbiegać od regularnego, tak więc:

$$D_{max} \leq \frac{2}{3} H \quad (4)$$

W związku z powyższym średnica komory w złożu o miąższości 200 m mogłaby wynosić 90 m, jednak w praktyce ze względu na nieregularności należy za  $D_{max}$  przyjąć 60–65 m. Przyjmijmy pesymistycznie:  **$D_{max} = 60 \text{ m}$**

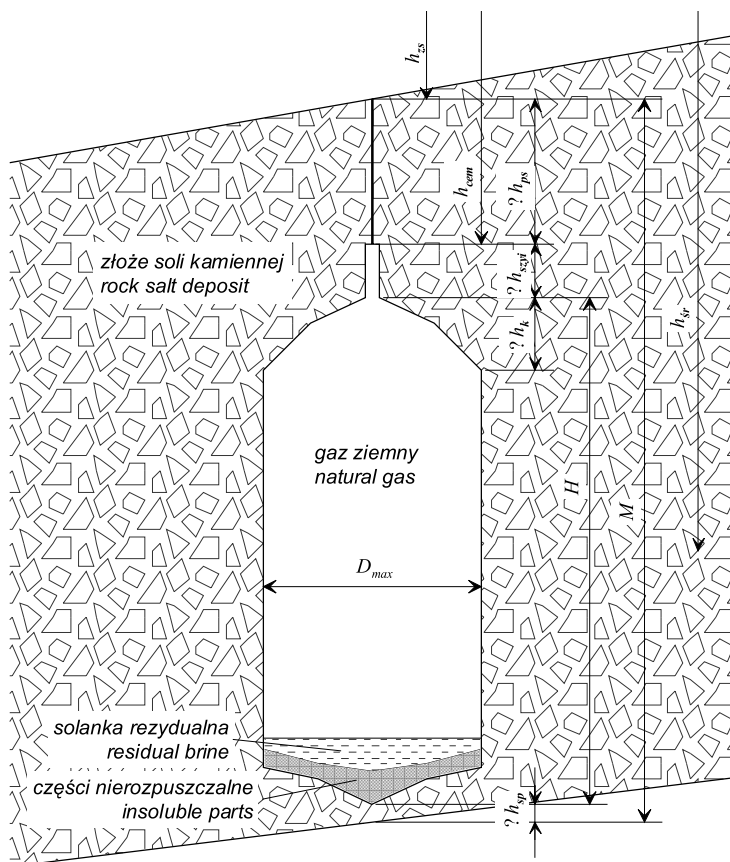
Biorąc pod uwagę (2) wzór (3) można przekształcić do:

$$V = \frac{\pi}{12} D_{max}^2 (3(M - \Delta h_{suma}) - D_{max}) \quad (5)$$

Po podstawieniu  $\Delta h_{suma} = 65 \text{ m}$ ;  $D_{max} = 60 \text{ m}$ , uzyskuje się zależność:

$$V = 942,4778(3(M - 65) - 60) = 2827,433(M - 85) \quad (6a)$$

$$V = 2,8274334M - 240,3318 [\text{tys. m}^3] \quad (6b)$$



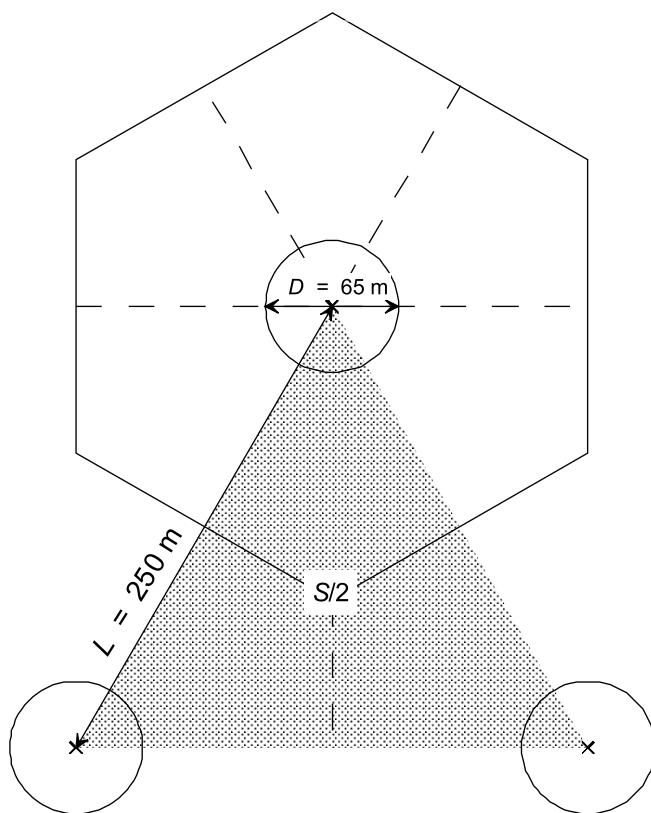
**Rys. 1.** Lokalizacja w złożu i kształt typowej kawerny magazynowej

Biorąc pod uwagę części nierozpuszczalne, a zwłaszcza możliwość występowania w obrębie złoża soli przekładek anhydrytu, na których pozostanie nierozpuszczona warstwa soli, należy uznać, że objętość dla gazu wyniesie co najwyżej **80%** objętości wyługowanej (czyli  $f = 0,8$ ), co w pewnych przypadkach może być nawet optymistycznym założeniem.

## 2.2. Liczba kawern

Można założyć, że siatka otworów będzie w przybliżeniu trójkątna, z rozstawem  $L$ . Przy takiej siatce wykorzystanie złoża jest najlepsze. Powierzchnia przypisana pojedynczej kawernie będzie sześciokątem regularnym, którego powierzchnia  $S$  jest dwukrotnie większa od pola elementarnego trójkąta siatki kawern (zakropkowanego na rys. 2):

$$S = L^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$



Rys. 2. Rozmieszczenie komór w siatce trójkątnej

Dla typowego rozstawu kawern  $L = 250$  m, powierzchnia ta wyniesie:

$$S = 250^2 \frac{\sqrt{3}}{2} = 54126,6 \text{ m}^2 \quad (7a)$$

Rozstaw kawern jednak nie jest całkiem dowolny, rozstaw siatki  $L$  zależy od głębokości złoża i od średnic kawern. Zalecenia SMRI (Solution Mining Research Institute) z 1998 roku [2] roku są następujące:

- dla kawern płytkich (strop na ok. 600 m p.p.t.) – rozstaw powinien być co najmniej  $3,5D_{\max}$ ,
- dla kawern średnio głębokich (strop ok. 1000 m p.p.t.) – co najmniej  $4,0D_{\max}$ ,
- dla kawern głębokich (strop ok. 1400 m p.p.t.) – co najmniej  $4,5D_{\max}$ .

Można to spatrametryzować, jako kryterium:

$$\frac{L}{D_{\max}} = 2,75 + 0,00125h_{str} \quad (8)$$

Obliczenia numeryczne przeprowadzone przez autorów wskazują, że wytyczne SMRI są być może za ostrożne, ale ogólnie słuszne.

W praktyce nie spotyka się raczej kawern magazynowych gazu rozmieszczonych gęściej niż w rozstawie 250 m. Na etapie projektu technicznego, jeśli warunki geologiczno-górnictwa pozwalają i potwierdzi tę możliwość analiza geomechaniczna, można w niektórych przypadkach przyjąć większą średnicę kawern, niż wynikałoby z warunku (8). Częściej zdarza się na odwrót, że z uwagi na niekorzystną sytuację geologiczną nie udaje się umieścić w złożu kawerny o średnicy wynikającej z (8) i poprzestaje się na kawernie mniejszej. W przypadku złóż pokładowych średnicę kawerny może ograniczać miąższość i warunek (4), w przypadku wysadów solnych bliskość warstw soli potasowo-magnezowych lub anhydrytowych, zalegających stromo.

Zwykle rozstaw kawern jest najpierw ustalany i do niego dobierana jest ich średnica. W tej sytuacji równanie (8) należy traktować, jako ograniczenie od góry:

$$D_{\max} \leq \frac{L}{(2,75 + 0,00125h_{str})} \quad (9)$$

### 2.3. Zakres ciśnień

Zakres ciśnień roboczych bardzo wyraźnie zależy od głębokości posadowienia kawerny. Ciśnienie maksymalne  $p_{\max}$  określa się dla głębokości buta kolumny eksploatacyjnej  $h_{cem}$  (ostatniej cementowanej kolumny). Jest ono proporcjonalne, ze współczynnikiem określanym często nazwą „bezpieczny gradient szczelinowania”, gdyż dawniej określano go na podstawie testów szczelinowania, jako pewien procent ciśnienia spoczynkowego, przy którym zeszczelinowanie ulega „zaleczeniu”. Obecnie poglądy na bezpieczne ciśnienie maksymalne uległy zmianie, bierze się pod uwagę możliwość wnikania gazu w górotwór, która jednak zależy od reżimu eksploatacji kawerny, ostatecznie przyjmuje się więc pewien stały procent ciśnienia petrostatycznego.

$$p_{\max} = g_{sz} h_{cem} \quad (10)$$

gdzie, jak wiadomo:

$$h_{ce \max} = h_{zs} - \Delta h_{ps} \quad (11)$$

najczęściej przyjmuje się

$$g_{sz} = 0,018 \text{ MPa/m}$$

Trudniej jest podać ogólną regułę dla ciśnienia minimalnego  $p_{\min}$ . Zależy ona nie tylko od głębokości posadowienia, ale też od wytrzymałości danej soli i od szybkości jej pełzania, od wielkości i kształtu kawerny.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że dla konkretnych warunków da się ją przybliżyć formułą liniową:

$$p_{\min} = g_{wytr} (h_{sr} - h_0) = g_{wytr} h_{sr} - p_0 \quad (12)$$

Wzór (12) stosuje się dla kawern, których środek znajduje się głębiej, niż  $h_0$ , dla kawern posadowionych płycej, ciśnienie minimalne jest 0 MPa, tak więc ściśle rzecz biorąc:

$$p_{\min} = \max (g_w h_{sr} - p_0, 0) \quad (12a)$$

Głębokość środka kawerny określona jest wzorem:

$$h_{sr} = h_{zs} - \frac{1}{2} (M + \Delta h_{ps} + \Delta h_{szy} - \Delta h_{sp}) \quad (13)$$

Przeanalizowawszy zestaw obliczeń dla kawern testowych o różnych wysokościach, na różnych głębokościach, z różnymi warunkami brzegowymi, przy różnych kryteriach wytrzymałości i różnych prawach pełzania, ostatecznie zdecydowano się na przyjęcie następującego kryterium:

$$p_{\min} = 0,00835 h_{sr} - 6,263 \text{ MPa} \quad (14)$$

Ilość gazu w kawernie magazynowej przy ciśnieniu  $p$  wyraża się wzorem:

$$m = \rho V = \frac{pV_g}{RTZ} \quad (15)$$

Aby wyrazić tę ilość w normalnych metrach sześciennych magazynowanego gazu, należy ją podzielić przez gęstość gazu w warunkach normalnych:

$$m_{Nm^3} = \frac{m}{\rho_N} = \frac{pV_g}{\rho_N RZ} \quad (16)$$

$$R = 505,206 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\rho_N = 0,736 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ (przy } T = 273,15 \text{ K; } p = 0,101325 \text{ MPa)}$$

$$\rho_N \approx \frac{0,101325 \cdot 10^6}{RT} = 0,734 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ (przybliżenie gazu doskonałego, pominięto } Z = 0,997).$$

Należy zwrócić uwagę, że objętość wypełniona gazem w kawernie –  $V_g$  we wzorach (15) i (16) jest objętością kawerny brutto  $V$  ze wzorów (3)–(5), pomniejszoną o objętość zasypu na dnie kawerny utworzonego przez części nierozpuszczalne oraz o objętość solanki

rezydualnej pozostawionej w kawernie. Czynniki  $f$  określający udział objętości wypełnionej gazem w całej objętości wyługowanej jest najczęściej rzędu 0,8.

Ilość gazu możliwa do zmagazynowania pomiędzy ciśnieniem minimalnym a maksymalnym, w normalnych metrach sześciennych, w objętości  $V_g$  wynosi:

$$\Delta m_{Nm^3} = m_{\max} - m_{\min} = \frac{fV}{R\rho_N} \left( \frac{p_{\max}}{T_{\max} Z_{\max}} - \frac{p_{\min}}{T_{\min} Z_{\min}} \right) \quad (17)$$

Wprawdzie rozpiętość temperatur, gdyby je brać bezpośrednio po zakończeniu napełniania i opróżniania, bywa dość znaczna (np. w kawernie Z-7 KPMG Mogilno  $T_{\min} = 24^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 55^\circ\text{C}$ ), jednak gaz w kawernie pozostaje w kontakcie z górotworem. Po pewnym czasie od poboru gazu temperatura w kawernie rośnie i można na nowo gaz pobierać, podobnie w jakiś czas po zatłoczeniu gazu temperatura spadnie i można jeszcze trochę gazu dotłoczyć. Tak więc niekoniecznie trzeba we wzorze (17) uwzględniać temperatury skrajne, zwłaszcza w aspekcie magazynu służącego do wyrównywania różnic sezonowych w zapotrzebowaniu na gaz.

Zdecydowano ostatecznie zaniedbać czynnik ściśliwości (przyjąć gaz doskonały) oraz pominąć różnice temperatur. Wtedy otrzymuje się:

$$\Delta m_{Nm^3} = \frac{fV \Delta p}{R\rho_N T} = \frac{fV \Delta p}{p_N} = 6,0377V \Delta p \quad (18)$$

## 2.4. Zdolność magazynowa

Potencjalna zdolność magazynowa danego obszaru jest ilością gazu, jaką można zmagazynować w kawernach wykonanych na jednostkowej powierzchni złoża.

Jest to więc ilość gazu, jaką można zmagazynować w jednej kawernie, podzielona przez powierzchnię terenu, jaka jest przypisana do tej kawerny.

$$C = \frac{\Delta m_{Nm^3}}{S} \quad (19)$$

gdzie  $\Delta m_{Nm^3}$  dane jest wzorem (17),  $V$  wyraża się wzorem (5), zaś za  $D_{\max}$  we wzorze (5), należy przyjąć najmniejszą wartość spośród  $D_{\max}$  zadanego (60 m),  $D_{\max}$  wynikającego ze wzoru (4) oraz wzoru (9).

## 3. MOŻLIWOŚCI BUDOWY MAGAZYNU W POLSKICH ZŁOŻACH POKŁADOWYCH

Cechsztyńska formacja solonośna występuje na większości terytorium Polski [1], jednak tylko niewielka jej część nadaje się do podziemnego magazynowania [3]. W opracowaniu [6] przyjęto, że głębokość stropu pokładu soli nie może być większa niż 1800 m p.p.t.



O przyjęciu tej granicy decydowały głównie względy geomechaniczne, a konkretnie duża szybkość konwergencji (zaciskania się) wyrobisk na znacznych głębokościach. Z tego też względu budowa komór możliwa jest jedynie w strukturach solnych okręgu środkowopolskiego oraz pokładach solnych na monoklinie przedsudeckiej i na wyniesieniu Łeby.

### **3.1. Monoklina przedsudecka**

Monoklina przedsudecka zbudowana jest z trzech kompleksów skalnych obejmujących podłoże krystaliczne (proterozoik i starszy paleozoik), skały osadowe permu i triasu oraz kompleks luźnych i spoistych skał trzecio- i czwartorzędowych stanowiących pokrywę monokliny. Utwory permu i triasu zapadają łagodnie od 2° do 5° w kierunku NE. Występują w nich liczne uskoki związane z waryscyjskim systemem dyslokacyjnym środkowej Odry odnowione podczas ruchów laramijskich. Warstwy solne ze względu na własności plastyczne nie przenoszą naprężeń, co objawia się zmniejszeniem amplitudy deformacji ku stropowi serii solnych.

Permskie skały osadowe reprezentowane są przez piaskowce czerwonego spagowca oraz utwory ewaporatowe cechsztynu, które wykształcone są w formie czterech cyklotemów PZ1-PZ4, w obrębie których występują między innymi cztery pokłady soli kamiennej:

- Najstarsza sól kamienna (Na1) zbudowana z odmian soli zarówno drobno, średnio i grubokrystalicznej o barwie białej, szarej, lub bezbarwnej o zróżnicowanej miąższości od kilku metrów do stu kilkudziesięciu metrów lokalnie przekraczając 300 m, W obrębie Na1 występują przerosty anhydrytu o miąższości do kilkudziesięciu metrów.
- Starsza sól kamienna (Na2) o barwie jasno- lub ciemnokremowej o strukturze średnio i grubokrystalicznej z domieszkami anhydrytu, gipsu i polihality w formie nieregularnych skupień. Na2 na przeważającej części monokliny nie przekracza 50 m, lokalnie osiągając ponad 150 m (w zach. części monokliny),
- Młodsza sól kamienna (Na3) drobno, średnio lub grubokrystaliczna zawierająca domieszki anhydrytu oraz substancji ilastej i żelazistej w formie rozproszonej. Osiąga znaczne miąższości lokalnie przekraczające 250 m,
- Najmłodsza sól kamienna (Na4) najczęściej drobno i średnioziarnistych o barwie jasnoszarej i różowej z niewielką domieszką części nierozpuszczalnych w głównie postaci anhydrytu.

### **3.2. Wyniesienie Łeby**

W północnej części Polski na wyniesieniu Łeby stanowiącym północno-zachodni skłon syneklizy perybałtyckiej cechsztyńska formacja solonośna zalega na utworach syluru na głębokości od ok. 700 do 1200 m p.p.t., zapadając w kierunku SE.

W cechsztyńskiej formacji solonośnej w tym regionie wyróżnić można trzy cyklotemy PZ1-PZ3, w których występuje jeden pokład soli kamiennej (Na1). W obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej Na1 można wyróżnić litofację soli kamiennej zawierającej domieszki anhydrytu i polihality. Są to sole średnio i drobnokrystaliczne z przewarstwieniami

pierwotnych soli wielkokrystalicznych o barwie białej, szarej i różowawej. Drugą grupę stanowi litofacja soli kamiennej charakteryzująca się obecnością materiału terygenicznego i większą zawartością siarczanów w postaci przewarstwień anhydrytu o grubości do 0,7 m i polihality około 2 m.

Sól kamienna Na1 występuje w postaci niezaburzonej tektonicznie warstwy ograniczonej od spągu anhydrytem dolnym (A1d), a od stropu anhydrytem górnym (A1g). Powierzchnia spągu utworów cechsztynu leży zgodnie na utworach podłoża prekambryjsko-paleozoicznego i wykazuje jednostajne nachylenie ku południowi.

Miażdżość pokładu soli jest uwarunkowana morfologią podłoża sylurskiego i waha się od 0 do 330,5 m (otwór Mechelinki IG-3).

W opisywanym rejonie istnieją trzy udokumentowane złoża soli kamiennej: złoża Łeba, Zatoka Pucka, i Mechelinki.

#### **4. ANALIZA ZMIENNOŚCI ZDOLNOŚCI MAGAZYNOWEJ ZŁÓŻ POKŁADOWYCH**

Pierwsze ilościowe próby oceny przydatności polskich złóż soli do magazynowania gazu przedstawiono w pracach [4, 5, 6]. Zawarto w nich, w postaci tabelarycznej potencjalne pojemności magazynowe pojedynczych kawern magazynowych w wybranych obszarach, którymi były [3]:

1. Na wyniesieniu Łeby – obszary: Białogarda, Tupadła, Głuszewo, Mechelinki.
2. Na monoklinie przedśudeckiej – obszary: Rybaki, Rybaki-Wężyska, Nowa Rola, Nowa Sól, Bytom Odrzański, Przyborów, Bronów-Wiewierz, Kąkolewo, Góreczki Wielkie.

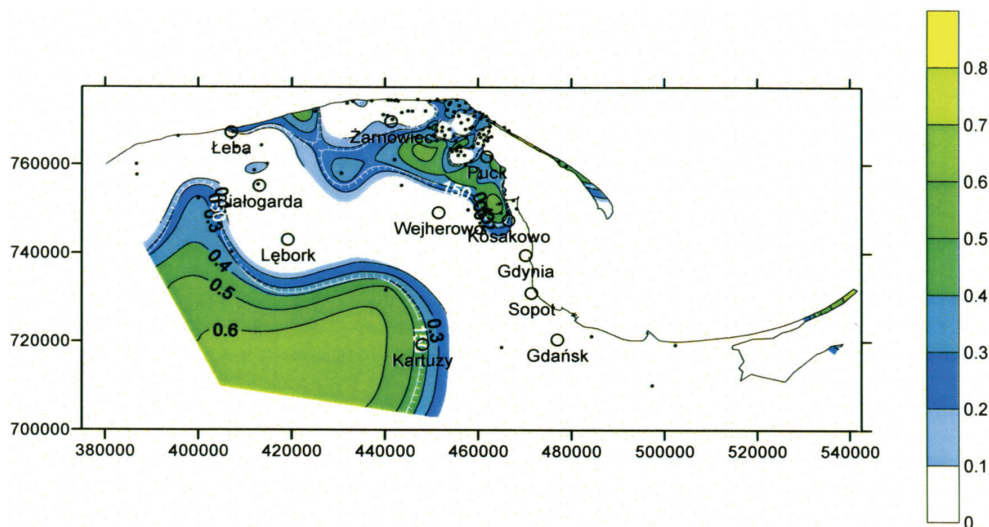
Niniejszy artykuł przedstawia dalszy etap prac, który obejmował opracowanie map izolinowych zdolności magazynowej polskich złóż soli.

Materiałem wyjściowym do sporządzenia map potencjalnej zdolności złoża soli do magazynowania gazu były mapy cyfrowe stropu złoża soli i jego miąższości, przygotowane przez pracowników PIG. Mapy te miały postać rastrów w siatce co 100 m.

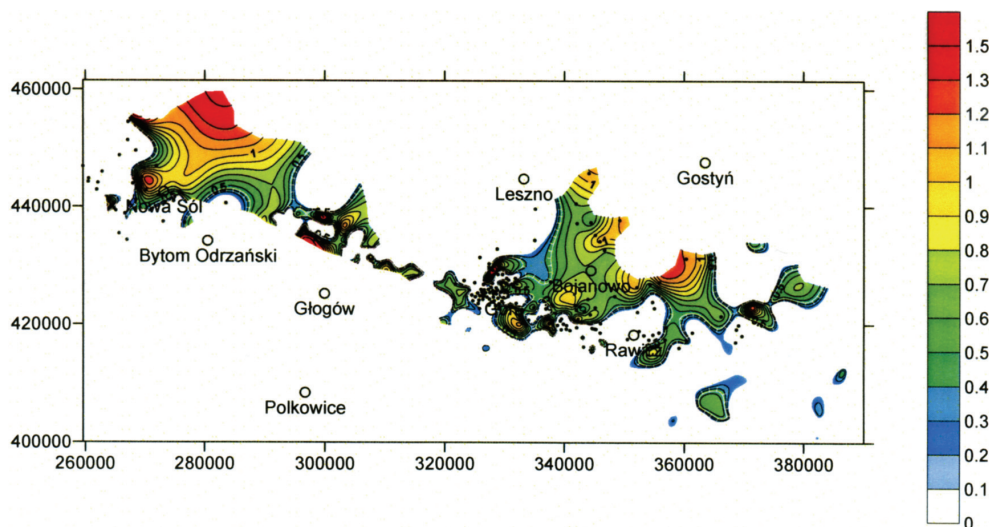
Raster głębokości stropu złoża soli i raster miąższości były przetwarzane na raster zdolności magazynowej, punkt po punkcie. Przyjęto, że kawerny będą rozmieszczone w siatce trójkątnej o rozstawie 250 m. Dla każdego punktu określano wysokość kawerny  $H$  następnie ustalano średnicę jej cylindrycznej części –  $D_{max}$ . Rozpatrywano przy tym warunki (4) i (9), biorąc minimum z tych dwóch wartości, o ile było mniejsze niż 60 m. Z kolei na podstawie wzorów (12) i (14) wyznaczano przedział ciśnień roboczych, zakładając jednak, że minimalne ciśnienie nie będzie niższe niż 4 MPa. Na końcu obliczano zdolność magazynową wzorem (19) z podstawieniami (7) i (18).

Obszary, w których strop złoża zalegał głębiej niż 1800 m p.p.t., oraz obszary o miąższości złoża poniżej 150 m uznano za nieprzydatne. Przy miąższości jednak pozostawiono margines 130–150 m, który zamieszczony jest na mapach.

Dwa wybrane przykłady opracowanych map zdolności magazynowej przedstawiają rysunki 3 i 4. Dotyczą one pojemności początkowej kawern i nie uwzględniają zjawiska konwergencji, która w przypadku komór ułożonych na dużych głębokościach może po kilku latach spowodować liczące się zaciśnięcie kawern, a co za tym idzie zmniejszenie ich pojemności użytkowej. Czarne punkty na mapach oznaczają położenie otworów wiertniczych w których przewiercono pokład soli kamiennej Na1.



**Rys. 3.** Zdolność magazynowa złoża soli Na1 na wyniesieniu Łeby



**Rys. 4.** Zdolność magazynowa złoża Na1 w środkowej części monokliny przedśudeckiej

Mapa na rysunku 3 przedstawia zdolności magazynowe w solach najstarszych cyklotemu Na1 na wyniesieniu Łeby. Z przedstawionej mapy wynika, że najlepsze warunki do magazynowania występują na południe od Lęborka, jednak sytuacja nie jest tak jednoznaczna, gdyż dane o miąższości złoża były wyinterpretowane z dość odległych otworów, a tym samym są one obarczone znaczną niepewnością, co dalsze prace nad mapami powinny uwzględnić. Natomiast maksima w północnej części rejonu mają dobre potwierdzenie otworami wiertniczymi. Ogólnie można stwierdzić, że maksymalna zdolność magazynowa na terenie Łeby może osiągać  $600 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$  powierzchni terenu.

Mapa na rysunku 4 przedstawia zdolności magazynowe w solach najstarszych cyklotemu PZ1 w środkowej części monokliny przedsudeckiej. Na monoklinie również pokład soli młodszej Na3 posiada zdolności magazynowe, choć na mniejszym obszarze.

Brzeży obszarów mają niekiedy dość zaskakujący kształt, co związane jest z trzema czynnikami:

- spadkiem miąższości pokładu poniżej 130 m,
- obniżeniem się stropu pokładu poniżej 1800 m p.p.t.,
- niemożnością wygenerowania sitki rastrowej z powodu zbyt dużej odległości od otworów rozpoznawczych.

Podobnie jak w przypadku rejonu na południe od Lęborka, należy tutaj z ostrożnym sceptycyzmem potraktować obszary o maksymalnej zdolności, zwłaszcza na północ od Bytomia Odrzańskiego, gdzie uzyskano zdolności magazynowe przekraczające  $1200 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$  powierzchni terenu.

Przedstawione mapy uwzględniają jedynie warunki geologiczne, a konkretnie jedynie miąższość złoża i głębokość jego zalegania. W przyszłości tworząc kolejną wersję map będzie trzeba też wziąć pod uwagę, że obszar monokliny przedsudeckiej jest pocięty licznymi uskokami, w pobliżu których nie powinno lokować się kawern magazynowych. Konieczność zachowania filarów wzdłuż uskoków spowoduje, że zdolność magazynowa rozpatrywanego terenu będzie mniejsza. Podobnie warunki na powierzchni – jeziora, zabudowa, obszary chronione, może zmniejszyć liczbę kawern, jakie będzie można na danym terenie wyługować. Ograniczenia te dotyczą również wyniesienia Łeby.

## 5. PODSUMOWANIE

Opracowane mapy zdolności magazynowej są pierwszą próbą oceny polskich złóż soli, a tym samym nie są ostateczne i wymagają uzupełnień. W pierwszym rzędzie autorzy przewidują uwzględnienie następujących elementów:

- sieć uskoków,
- dodatkowe dane z otworów, w których pokład soli zalega głębiej, niż 1800 m p.p.t.,
- element ryzyka związanego z niepewnością danych,
- konwergencja kawern.

Już na podstawie dotychczas wykonanych prac można stwierdzić, że korzystniejsze możliwości magazynowe pod względem geologiczno-górnictwem występują na monoklinie przedsudeckiej, gdzie można znaleźć obszary o zdolności magazynowej ok. dwukrotnie większej, niż na wyniesieniu Łeby. Problemem pozostaje możliwość utylizacji solanki z ługowania komór magazynowych.

## LITERATURA

- [1] Czapowski G., Bukowski K.: *Złoża soli w Polsce – stan aktualny i perspektywy zagospodarowania*. Przegląd Geologiczny, vol. 57, nr 9, 2009, 798–811
- [2] Guarascio M. (red.): *Guidelines for Safety Assessment of Salt Caverns*. SMRI Fall Meeting, Rome-Italy, 1998
- [3] Ślizowski J., Lankof L., Wojtuszevska K.: *Geomechaniczna ocena optymalnej głębokości komór magazynowych gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej*. Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie. WUG, 6(154), 2007, 50–51
- [4] Ślizowski J., Wojtuszevska K. & Wiśniewska M.: *Pojemność komór magazynowych gazu w pokładzie soli na monoklinie przedsudeckiej*. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, 2009, 5–11
- [5] Ślizowski J., Serbin K., Wiśniewska M.: *Efektywna pojemność komór magazynowych gazu w pokładowych złożach soli kamiennej*. Geologia (kwartalnik AGH), t. 36, z. 3, 2010, 407–417
- [6] Ślizowski K. (red.): *Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej*. Archiwum IGSMiE PAN, 2006 (praca niepublikowana)