

JAROSŁAW ŚLIZOWSKI*, KAZIMIERZ URBAŃCZYK**

**AN ATTEMPT TO ASSES SUITABILITY OF MIDDLE-POLAND SALT DOMES
FOR NATURAL GAS STORAGE****OCENA PRZYDATNOŚCI ŚRODKOWOPOLSKICH WYSADÓW SOLNYCH
DO MAGAZYNOWANIA GAZU ZIEMNEGO**

The aim of the paper is to assess geological conditions in Middle-Poland salt domes and their suitability for natural gas storage. The starting point to the assessment were statistical distributions of caverns depth and volume in Mogilno CUGS. The distributions were generalized to other domes using the part of anticline forms in the salt mirror surface. The expected average cavern volumes, depths with their standard deviations are evaluated. Storing capacity of the caverns and the risk of a borehole unsuitable for cavern location are also given.

Keywords: Polish Zechstain, salt domes, salt caverns, natural gas storage, cavern capacity

Artykuł jest próbą oceny możliwego zróżnicowania pojemności magazynowej kawern w wysadach solnych okręgu środkowopolskiego, których lokalizację przedstawia rys. 1, na podstawie ich budowy geologicznej oraz danych uzyskanych podczas projektowania i eksploatacji KPMG Mogilno. W pierwszej kolejności określono potencjalne objętości maksymalne kawern w wysadach solnych ograniczone jedynie warunkami geomechanicznymi i ługowniczymi. Stwierdzono, że w takim przypadku objętość kawern określona wzorem (1) mogłaby przekraczać 1 mln m³. Objętości zaprojektowanych do chwili obecnej 15 kawern były mniejsze w niektórych przypadkach nawet kilkakrotnie z przyczyn geologicznych oraz błędów technologicznych i technicznych.

Pojemność magazynowa kawern zależy również od głębokości ich posadowienia oraz ograniczeń technologicznych na wartości minimalnego i maksymalnego ciśnienia magazynowania. Z przeprowadzonej analizy (rys. 2 i 3) wynika, że optymalna głębokość środka kawerny, przy której pojemność jest największa wynosi od 1150 m p.p.t. przy dużej konwergencji do 1350 m p.p.t. przy konwergencji dwukrotnie niższej. Zlokalizowanie komory na głębokości optymalnej rzadko jednak będzie możliwe w rozpatrywanych wysadach ze względu na możliwość występowania w interesującym interwale głębokości warstw nie-nadających się do ługowania komory. Mogą to być warstwy soli magnezowo-potasowych, soli ilastych (zubrów) oraz anhydrytu.

* AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, FACULTY OF DRILLING, OIL AND GAS, AL. MICKIEWICZA 30, 30-059 CRACOW, POLAND

** RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTRE FOR MINING OF CHEMICAL RAW MATERIALS "CHEMKOP", UL. WYBICKIEGO 7, 31-261 CRACOW, POLAND

Kolejną część pracy stanowi statystyczna analiza głębokości posadowienia i objętości komór w KPMG Mogilno, przedstawionych na rys. 4. Na podstawie tych danych sporządzono histogram, określający prawdopodobieństwo ulokowania komory na danej głębokości a następnie do otrzymanego histogramu dopasowano rozkład trapezowy o gęstości prawdopodobieństwa wyrażonej wzorem (3). Parametry a , b , c , d otrzymanego rozkładu oraz jego wartość oczekiwaną μ i odchylenie standardowe σ zawiera tabela 1, zamieszczona w rozdziale czwartym. Uzyskana wartość oczekiwana niewiele odbiega od optymalnej głębokości posadowienia kawerny w przypadku wysokiej wartości konwergencji.

Drugą analizowaną wielkością była objętość analizowanych kawern, która mieści się w przedziale 182 tys. m³ do 562 tys. m³. Na podstawie rzeczywistych danych objętości komór określono empiryczną gęstość rozkładu prawdopodobieństwa możliwości wyługowania kawerny o danej objętości w danym otworze do którego dopasowano rozkład trójkątny, o gęstości prawdopodobieństwa wyrażonej wzorem (6) otrzymując wartość oczekiwaną 349,7 m³, zaś odchylenie standardowe 114,9 m³. Dystrybucję rozkładu oznaczającą prawdopodobieństwo wyługowania komory nie mniejszej niż dana wartość przedstawia rysunek 6.

Zasadniczym celem pracy jest uogólnienie danych z KPMG Mogilno na inne wysady, które różnią się głębokością położenia zwierciadła solnego i procentowym udziałem warstw nadających się do wyługowania komory. W wydajach solnych okręgu środkowopolskiego występują sole powstałe w czterech cyklotemach cechsztynu PZ1, PZ2, PZ3 i PZ4 w skład których wchodzi odpowiednio sole najstarsze, starsze, młodsze i najmłodsze. Dodatkowo w każdym cyklotemie występuje anhydryt, w cyklotemach PZ3 i PZ4 duże ilości soli ilastych (zubrów brunatnych i czerwonych), w cyklotemach PZ2 i PZ3 sole magnezowo-potasowe, a w cyklotemie PZ1 skały wapienne. Do lokowania kawern magazynowych najodpowiedniejsze są sole występujące w cyklotemach PZ1 (o ile występuje) i PZ2 ulokowane najczęściej w formach antyklinalnych. Przykładowe rozmieszczenie soli PZ2, PZ3 i PZ4 dla wydajów Damasławek i Łanięta na głębokości zwierciadła solnego przedstawia rysunek 7.

Proporcje obu rodzajów soli są różne w różnych wydajach, przy czym zaobserwować można, że udział soli najstarszych i starszych maleje nieliniowo ze wzrostem powierzchni wydaju solnego, co przedstawia rysunek 8. Oznaczając symbolem A powierzchnię form antyklinalnych a symbolem P całkowitą powierzchnię zwierciadła solnego, zależność tę można przybliżyć wzorem (9). Określając hipotetyczne pojemności kawern magazynowych, przyjęto, że zarówno rozkład prawdopodobieństwa ulokowania komory na danej głębokości, jak i jej objętość zależą od wartości współczynnika A/P . Przyjęto więc hipotezę, że odchylenie standardowe rozkładu głębokości posadowienia w rozpatrywanym wydajzie σ ma się tak do odchylenia standardowego w wydajzie Mogilno σ_M jak odpowiednie stosunki A/P .

Analogicznie określono wstępne wartości pozostałych parametrów rozkładu trapezowego a , b , c , d . Ostateczne wartości parametrów wyznaczono dostosowując je do głębokości zwierciadła solnego, a w razie możliwości, również do głębokości optymalnej. Powierzchnię wydajów P , ilorazów A/P , maksymalną głębokość zwierciadła soli oraz otrzymanych ostatecznie wartości parametrów rozkładu trapezowego wraz z wartością średnią μ i odchyleniem standardowym σ_h przedstawiono w tabeli 1.

Kryterium A/P posłużyło również do wyznaczenia przeciętnej objętości komór w poszczególnych wydajach V_{av} , które przyjęto zgodnie z zależnością (11) a uzyskane wartości przeciętne wraz z odchyleniem standardowym σ_V przedstawiono w tabeli 1.

W tabeli podano również ryzyko odwiercenia otworu negatywnego. Przyjęto, że taka sytuacja będzie mieć miejsce jeśli do głębokości 1850 m p.p.t. nie zostanie znaleziona warstwa soli odpowiedniej miąższości, nadająca się do lokalizacji kawerny. Przeciętne pojemności początkowe komór magazynowych (C_{av}) w analizowanych wydajach równe są w przybliżeniu iloczynowi przeciętnej objętości i różnicy ciśnienia maksymalnego i minimalnego dla przeciętnej głębokości (wzór (2) ze współczynnikiem $k = 1$). Poniższe rysunki 9 i 10 przedstawiają natomiast odpowiednio pojemności początkowe oraz po 20 latach jakie posiadać będą komory, jeśli zostaną zlokalizowane na określonej głębokości.

Zgodnie z przyjętą hipotezą sytuacja w wydajach o większej powierzchni zwierciadła solnego niż wydaj Mogilno może być jeszcze mniej korzystna. Polepszenie efektywności gospodarowania będzie możliwe przy lepszym rozpoznaniu budowy wydajów i wprowadzeniu nieregularnych siatek otworów. Duże nadzieje można tu wiązać z radarem otworowym, którym przeprowadzono pomiary w części eksploatacyjnej kopalni Mogilno, jednak złożoność budowy wewnętrznej środkowopolskich wydajów solnych i znaczna odległość otworów sprawia interpretacja wyników pomiarów georadarowych jest bardzo skomplikowana.

Słowa kluczowe: cechsztyń, wysady solne, kawerny solne, magazynowanie gazu ziemnego, pojemność kawerny

1. Introduction

Although rock salt deposits in Poland are spread out along most of the Polish territory, only a small part of them is suitable for exploitation of rock salt as well as storage of liquid hydrocarbons, compressed air and other fluids, because of their depth. Only salt deposits in the Gulf of Gdansk and the Fore-Sudetic Monocline as well as central-Poland Zechstein salt domes shown in Figure 1 are of economic meaning.

Gas storage cavern capacity depends on its volume and depth. Due to different values of minimum and maximum storing pressure there is an optimum depth for which the capacity of cavern with a given volume is the largest. Theoretically, location of a cavern at the optimum depth in salt dome is possible, however, rather unlikely in practice. Layers of magnesium-potassium salt, salt mudstone or anhydrite which occur in these domes, can cause impossible to leach a regular and tight cavern.

This paper is an attempt to estimate the capacity of gas storage caverns in 7 salt domes, that are undeveloped yet, such as: Damasławek, Dębina, Izbica Kujawska, Kłodawa, Łanięta, Lubień,

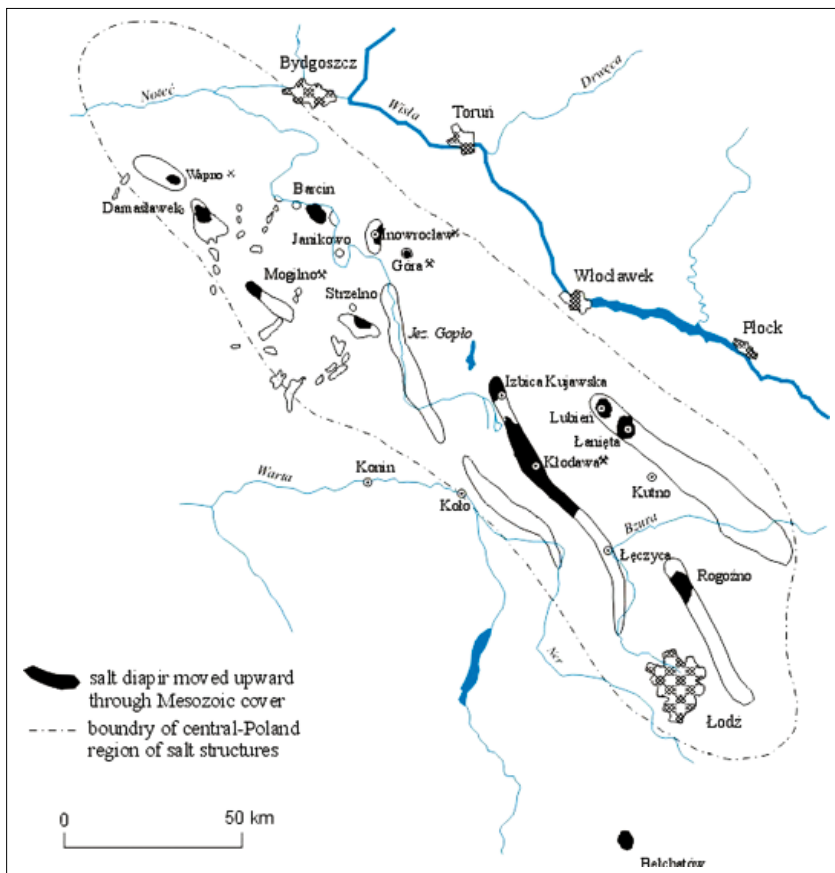


Fig. 1. Middle-Poland region of salt structures (after Lankof, 2010)

Rogożno based on the data obtained during the design and construction of Mogilno CUGS (Cavernous Underground Gas Storage facility). The obtained results can be used not only to design underground gas storage cavern facilities in middle-Poland salt domes (Cetinkaya, 2007), but also to energy storage (Flisiak i in., 1997; Pająk i in., 2010) and other issues concerning rock salt exploitation (Kortas, 2007).

2. Gas storage cavern capacity

Simplified scheme of gas storage cavern is shown in Figure 2.

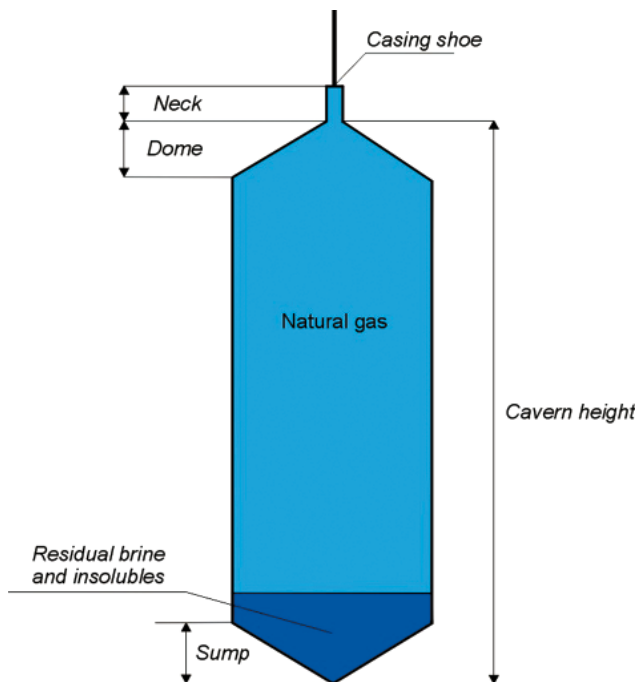


Fig. 2. Scheme of natural gas storage cavern

The main part of the cavern is a cylinder of D_{\max} diameter, below it a tapered sump which can be approximated by a cone of $1/6 D_{\max}$ and above a dome, which can be approximated by a cone of $1/3 D_{\max}$ height. The volume of such cavern is described by formula:

$$V = \frac{\pi}{12} D_{\max}^2 (3H - D_{\max}) \quad (1)$$

where:

- H — cavern height,
- D_{\max} — diameter of a cylindrical part.

The value of the D_{\max} maximum diameter is mainly determined by leaching aspects. In deposit of homogeneous leaching properties, cavern shape is approximately axially-symmetric till the diameter of the cavern does not exceed $2/3$ of cavern height H . Cavern of larger diameter starts to deviate from the regular shape, thus usually, the maximum cavern diameter is limited to $2/3$ of its height in the design studies.

Height of a cavern in salt dome is theoretically limited only by the possibility of debrining, however, this restriction is significant only at small depths. According to (Ślizowski & Urbanczyk, 2011) the total height of the cavern with casing cemented to a depth of 800 m b.g.l. would be about 380 m, whereas at a depth of 1200 m b.g.l. – 593 m. In the case of Mogilno CUGS, debrining possibility has never been a significant limitation; because of geological conditions the caverns have had to be lower. Thus theoretically, according to formula (1) in salt dome, at a depth of 800 m b.g.l., considering cavern diameter D_{\max} equal to about 60 m, it is possible to leach the cavern with a total volume of about 1 mln m^3 , and at a depth of 1200 m b.g.l. over 1.6 mln m^3 .

The initial cavern storing capacity is approximately equal to the product of a volume and a difference between maximum and minimum gas storage pressure, and can be describe by linear functions of depth.

$$C_0 = kV \cdot (p_{\max} - p_{\min}) \quad (2)$$

where:

- C_0 — initial cavern capacity [Nm^3] (after debrining),
- $p_{\max} = g_s \cdot h_1$ — maximum storing pressure,
- $g_s = 0,0018$ [MPa/m] — safety gradient (with respect to fracturing),
- h_1 — depth of the last cemented casing shoe,
- $p_{\max} = g_w \cdot h_2 + p_0$ — maximum storing pressure,
- $g_w = 0,00835$ [MPa/m], $p_0 = -6,1$ [MPa] — parameters connected with strength,
- h_2 — reference depth (cavern center or the bottom of sump),
- k — coefficient depending on mean temperature and compressibility of stored gas.

The value of g_s parameter was chosen after microfracturing tests performed in Mogilno CUGS boreholes while parameters g_w and p_0 after numerical calculations (Ślizowski et al., 2010). The value of g_s parameter is greater than the g_w , thus the initial cavern volume increases with depth, due to larger amount of gas that can be store in a 1 m^3 volume of the cavern. The pattern changes over time as a result of convergence (the loss of cavern volume because of rock massif creeping) whose rate increases nonlinearly with depth. Below a certain depth the difference $p_{\max} - p_{\min}$ cannot compensate the loss of cavern volume due to convergence. Figure 3 shows cavern storing capacity (the amount of gas that can be stored in 1 m^3 of the initial cavern volume) after 20 years taking into account cavern convergence. Two convergence rates have been considered with the high value two times bigger than the lower one (Ślizowski et al., 2009). The variant with no limits for minimum and maximum storing pressures was considered and the variant with 3.3 MPa minimum pressure and 21.3 MPa maximum pressure following the case of Mogilno CUGS.

As can be seen from the Figure 3, the optimum depth of cavern center lays between 1150 m b.g.l. (in the case of high convergence) and 1350 m b.g.l. in the case of low convergence. A similar, although much wider range can be found in literature, e.g. Fernandez and Guarascio (1998).

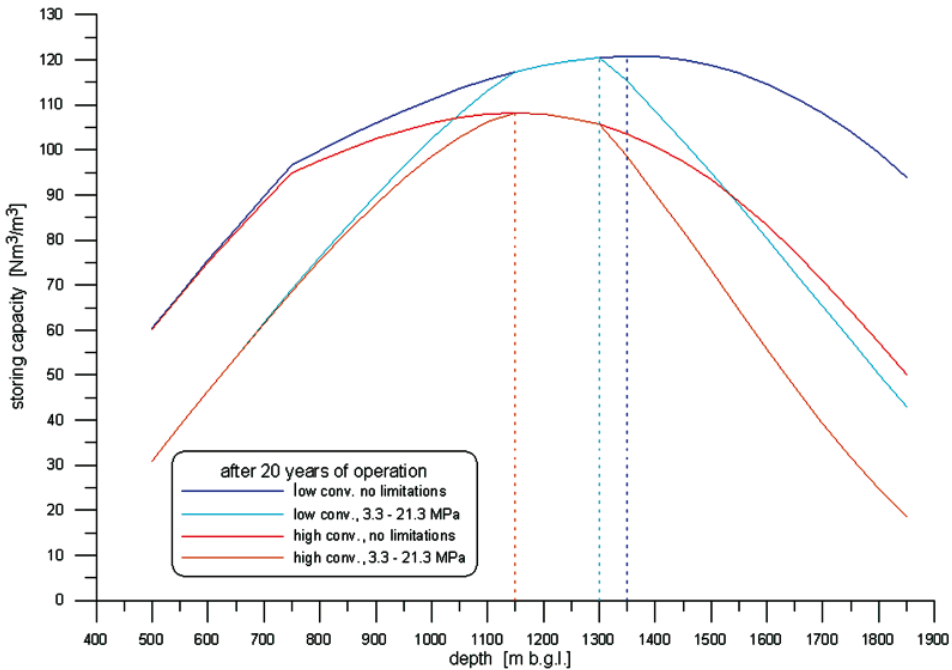


Fig. 3. Storing capacity after 20 years

3. Depth and volume of Mogilno CUGS storage caverns

So far, 15 caverns have been designed in Mogilno CUGS (currently in development or in operation) and no negative borehole have been found, where location of the cavern was not possible. However, some caverns had to be located a considerable distance from the optimal zone as shown in Figure 4.

The diagram presented in Figure 5 shows the number of caverns located at a given depth prepared taking into account the above depth intervals.

In the same figure, the second y-axis shows the probability of locating the cavern at a given depth. The corresponding values were obtained normalizing the histogram field to unity. Then, the trapezoidal distribution was matched to the obtained histogram with a probability density expressed by the formula:

$$f(h) = \begin{cases} \frac{2}{(b-a)(d+c-b-a)} h - \frac{2a}{(b-a)(d+c-b-a)} & \text{for } a \leq h \leq b \\ \frac{2}{(d+c-b-a)} & \text{for } b \leq h \leq c \\ \frac{-2}{(d-c)(d+c-b-a)} h + \frac{2d}{(d-c)(d+c-b-a)} & \text{for } c \leq h \leq d \end{cases} \quad (3)$$

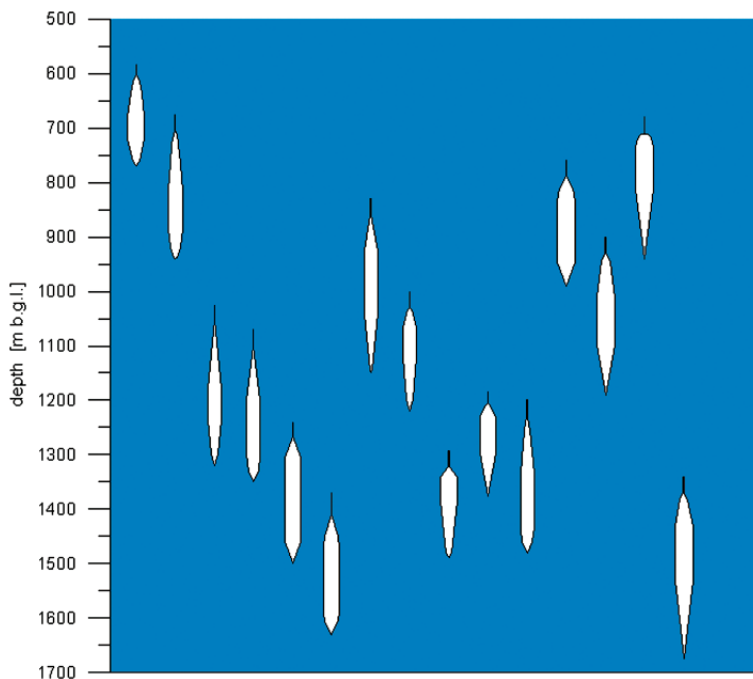


Fig. 4. Depth intervals of Mogilno CUGS caverns

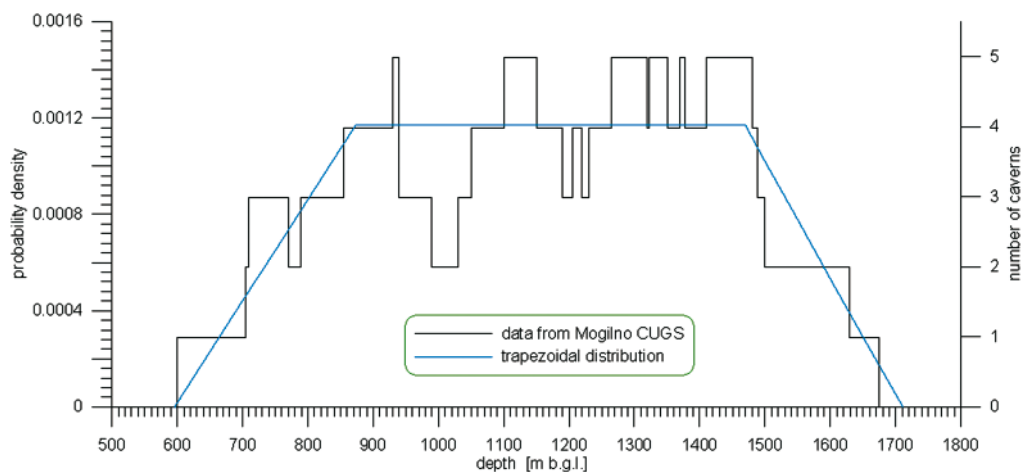


Fig. 5. Number of Mogilno CUGS caverns occurring at a given depth (right axis) and probability of cavern location at a given depth (left axis)

The expected value of the trapezoidal distribution is given by the formula:

$$\mu = \frac{d^2 + c^2 + cd - b^2 - a^2 - ab}{3(d + c - b - a)} \quad (4)$$

and variance:

$$\sigma^2 = \frac{d^3 + d^2c + cd^2 + c^3 - b^3 - b^2a - ab^2 - b^3}{6(d + c - b - a)} - \mu^2 \quad (5)$$

fitted distribution parameters are as follows:

$$a = 596 \text{ m}$$

$$b = 873 \text{ m}$$

$$c = 1470 \text{ m}$$

$$d = 1710 \text{ m}$$

$$2/(d + c - b - a) = 0,0011689 \text{ m}^{-1} \text{ (maximum of the distribution)}$$

$$\mu = 1161,32 \text{ m (mean value)}$$

$$\sigma = 258,043 \text{ m (standard deviation)}$$

As one can see, the mean value is close to the optimum cavern depth for high values of convergence.

The second analyzed parameter was cavern volume, which is dispersed in the range of 182 - 562 thousand m^3 in case of Mogilno CUGS. A histogram for the volume distribution was created in similar manner and then a triangular distribution was fitted. The distribution describes probability that geological conditions allow to leach a cavern of the given volume in a certain borehole.

$$f(V) = \begin{cases} \frac{2(V - V_1)}{(V_2 - V_1)(V_0 - V_1)} & \text{for } V_1 \leq V \leq V_0 \\ \frac{2(V_2 - V)}{(V_2 - V_1)(V_2 - V_0)} & \text{for } V_0 \leq V \leq V_2 \end{cases} \quad (6)$$

The mean value of the triangular distribution is given by the formula:

$$\mu = \frac{V_1 + V_0 + V_2}{3} \quad (7)$$

and variance:

$$\sigma^2 = \frac{V_1^2 + V_0^2 + V_2^2 - V_1V_0 - V_2V_0 - V_1V_2}{18} \quad (8)$$

Fitted parameters are as follows:

$$V_1 = 66 \text{ tys. m}^3$$

$$V_0 = 354 \text{ tys. m}^3$$

$$V_2 = 629 \text{ tys. m}^3$$

$$w = 2/(V_2 - V_1) = 0,003552398 \text{ m}^{-3} \text{ (maximum of the distribution)}$$

$$\mu = 349,7 \text{ m}^3 \text{ (mean value)}$$

$$\sigma = 114,9 \text{ m}^3 \text{ (standard deviation).}$$

Cumulative distribution function for the volume is shown in Figure 6. The distribution shows the probability of leaching the cavern with a volume not less than shows the value on the abscissa.

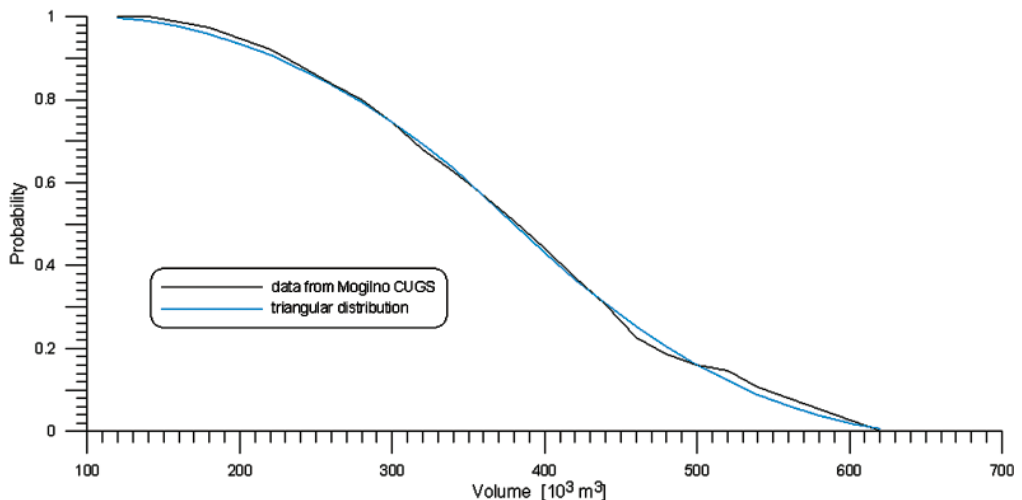


Fig. 6. Cumulative distribution function for cavern volumes according to Mogilno CUGS

The above results need to be generalized to encompass the other salt domes, which differ with geological conditions as depth of salt mirror surface or thickness of salt layers suitable for cavern leaching.

4. Hypothetical storing capacity of salt caverns located in central-Poland salt domes

4.1. The geological structure of salt domes

Four Zechstein cyclothemes PZ1, PZ2, PZ3 and PZ4 have been distinguished in central-Poland salt domes. The cyclothemes include respectively the oldest, older, younger and the youngest salts. Besides, each cyclotheme contains anhydrite, PZ3 and PZ4 – significant amount

of salt mudstone (brown and red “zubers”), PZ2 and PZ3 – magnesium and potassium salts, and PZ1 – limestone. The most suitable salts to locate a storage cavern are those of PZ1 and PZ2 cyclothemes, which occur mostly in the anticline forms. As an example, the distribution of the PZ2, PZ3 and PZ4 salts for Łanięta and Damasławek domes at the depth of salt surface is shown in Figure 7.

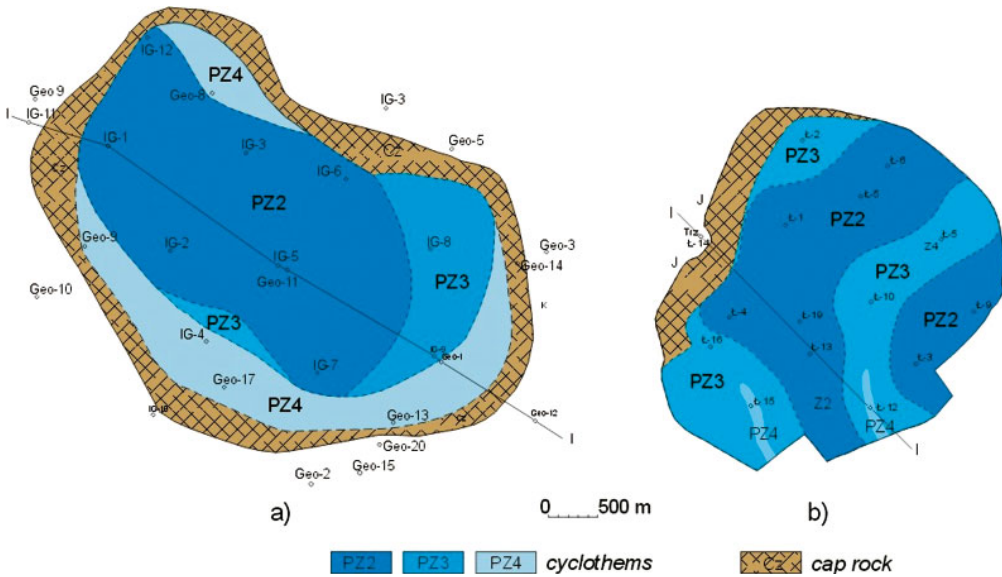


Fig. 7. Geological maps of Damasławek a) and Łanięta b) salt surface (after Ślizowski & Lankof, 2009)

The relative amounts of all types of salt are different in different salt domes, but it can be observed that the ratio of the older and oldest salt nonlinearly decreases with increasing salt dome surface (Ślizowski K., 1983), as shown in Figure 8. This dependence can be approximated by the exponential formula:

$$A/P = 0.7294 P^{-0.22109} \quad (9)$$

4.2. Capacity evaluation criterion

To determine the hypothetical cavern storing capacity, it was assumed that both the distribution of cavern depth and cavern volume depend on the A/P ratio. If the value of A/P ratio reaches one, virtually it is possible to locate a cavern at any depth (below the salt mirror surface with sufficient protecting distance to the salt mirror surface) with a volume limited only by the above mentioned leaching and geomechanical conditions (cf. formula (1)).

When the A/P decreases, the distribution of the cavern location possibility has a larger standard deviation, the lower the A/P ratio is observed. Therefore, it is assumed that the standard

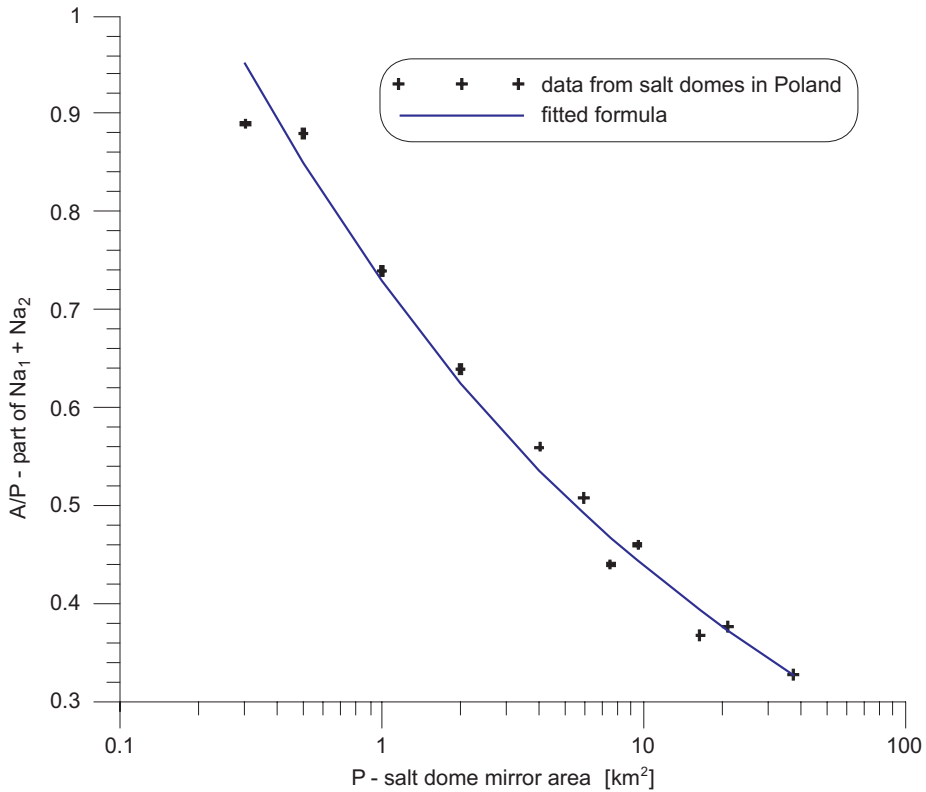


Fig. 8. Part of older and the oldest salts observed at salt dome mirror area (A/P) versus entire salt dome mirror area (P) for the Middle-Poland salt domes (after Ślizowski, 1983)

deviation of the cavern depth distribution in considered salt dome σ_h refers to the standard deviation of that in the Mogilno salt dome σ_{hM} as the corresponding relations of A/P , ie:

$$\sigma_h = \sigma_{hM} \frac{(A/P)_M}{(A/P)} \quad (10)$$

where:

A/P — value for the analyzed salt dome,
 $(A/P)_M = 0,44$ — value for Mogilno salt dome.

Similarly, the preliminary values of the remaining trapezoidal distribution parameters a , b , c , d were determined. The final values of parameter had to be adjusted to the depth of salt mirror surface and, if possible, to the optimum depth also.

The salt dome surfaces P , quotients A/P , the maximum depth of salt mirror surface and final values of the adopted trapezoidal distribution parameters with a mean value and a standard deviation are presented in Table 1 for seven Middle-Poland salt domes.

In the same manner criterion A/P was used to determine the average volume of caverns in each salt dome, according to the formula:

$$V_{av} = V_M \frac{(A/P)}{(A/P)_M} \quad (11)$$

The obtained average values and standard deviations are shown in Table 1.

Table 1 also shows the risk of drilling a negative borehole i.e. when down to the depth of 1850 m b.g.l no salt layer of an adequate thickness, suitable for location of the cavern is met.

4.3. Cavern storing capacity depending on the depth

The average initial capacity of the storage caverns (C_{av}) in the analyzed domes is approximately equal to the product of average volume and the difference between maximum and minimum pressures for average depth (formula (2) with a coefficient $k = 1$). The obtained values for the regarded salt domes are presented in Table 1.

The following Figures 9 and 10 show respectively the initial capacity after debrining and capacity after 20 years (with convergence effect) for the caverns located at a given depth.

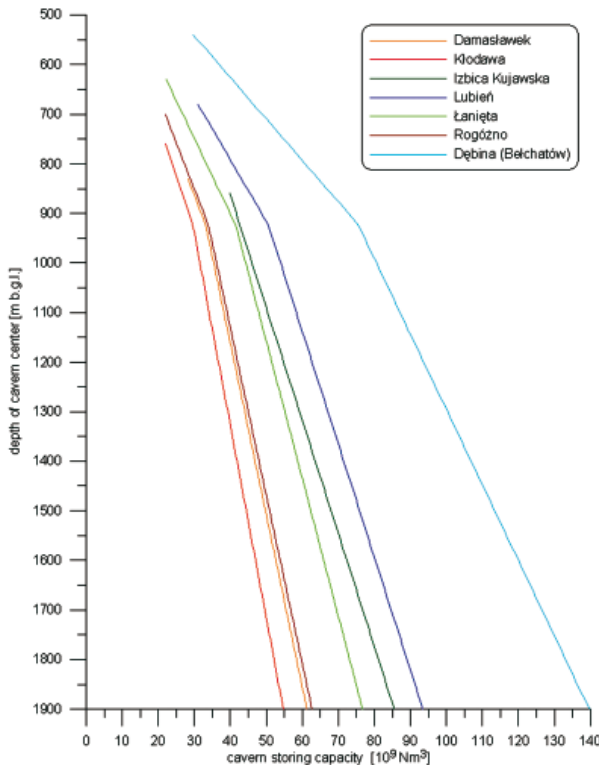


Fig. 9. Initial cavern storing capacity

TABLE 1

Expected parameters of considered salt domes, storage caverns and their average storing capacities (C_{av}).

Salt dome	P [km ²]	A/P [-]	$H_{sm,max}$ [m b.g.l.]	Trapezoidal distribution				Depth		Volume		C_{av} [10 ⁹ Nm ³]	Risk
				a	b	c	d	μ [m b.g.l.]	σ [m]	V_w [10 ³ m ³]	σ [10 ³ m ³]		
Mogilno	7.5	0.44	255	596	873	1470	1710	1161	258	354	114.9		
Damasławek	16.5	0.367	497	698	1046	1797	2099	1409	324.7	295.5	95.8	54.7	9.10%
Kłodawa	37.5	0.328	532	732	1209	2236	2649	1705	444.1	263.9	85.7	42.3	40.26%
Izbica Kujawska	4	0.56	354.5	714	952	1465	1672	1200	221.8	450.5	146.2	79.2	0.00%
Lubień	5.9	0.508	441.6	668	929	1491	1716	1200	242.9	409.1	132.7	71.9	0.00%
Lanięta	9.5	0.46	303.8	598	893	1529	1785	1200	275	370.1	120.1	65	0.00%
Rogóźno	21	0.376	372.8	573	951	1767	2095	1345	352.5	302.3	98.2	57.4	10.46%
Dębina	0.5	0.837	215	868	1031	1381	1522	1200	151.3	673.5	218.6	118.4	0.00%

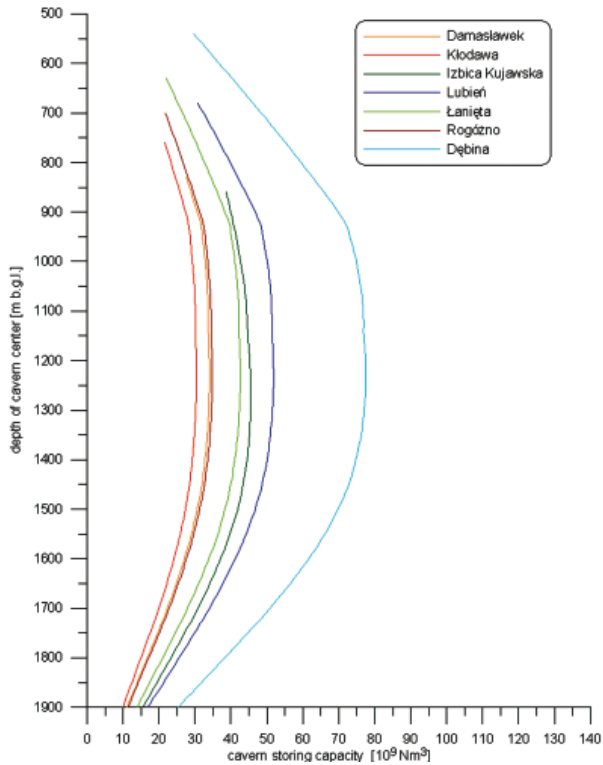


Fig. 10. Cavern storing capacity after 20 years of operation for high convergence

The observed in Figure 9 bending of the curves is related to limitations on the value of minimum and maximum storing pressure. Figure 10 confirms that the largest capacity of the caverns is observed at the optimum depth calculated in chapter 2.

5. Conclusions

The volumes of the Mogilno CUGS caverns are much smaller than the potential storage capacity in homogeneous salt domes in which the volumes of leached caverns could exceed 1 mln^3 . Respectively, even smaller caverns capacities were reached in some cases because of technological and technical issues. Nevertheless, the average depth of the caverns located in Mogilno CUGS is close to the optimum depth, which is favorable.

According to the adopted hypothesis, the situation in salt domes of a larger salt mirror surface than that of Mogilno salt dome may be even less favorable. Improving the effectiveness of development will be possible with a better survey of the salt domes structure and implementation of an irregular net of boreholes. Great hopes can be associated with the borehole ground-penetrating radar developed by German researchers, who conducted measurements in operational part of the Mogilno mine.

It should be noted that the complexity of the internal structure of the central-Poland salt domes is much larger than German domes and thus the interpretation of GPR measurements is more complicated. Also important may be geomechanical studies on the effect of cavern shape irregularity on the stability and tightness of the storage caverns.

References

- Cetinkaya E., 2007. *Modeling peak-load exploitation of underground gas storage in salt caverns Turkish and Polish case studies*. Archives of Mining Sciences, Vol. 52, No 1, p. 21-47.
- Fernandez G., Guarascio M., 1998. *Cavern Design, Safety and Environmental Adequacy*. [in:] Guidelines for Safety Assessment of Salt Caverns, Manual of SMRI Fall 1998 Technical Class, Rome, Italy.
- Flisiak D., Flisiak J., Tajduś A., 1997. *Geomechaniczne problemy projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza dla energetyki*. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Wyd. PAN, Kraków.
- Kortas G., 2007. *The influence of the form of a salt mine on the displacement of the ground surface*. Archives of Mining Sciences, Vol. 52, No 1, p. 107-120
- Lankof L., 2010. *Analiza odkształcalności i utraty masy zębów brunatnych w aspekcie składowania odpadów promieniotwórczych w środkowopolskich wysadach solnych*. Studia, Rozprawy, Monografie, Wyd. IGSMiE, Kraków.
- Pająk L., Gonet A., Śliwa T., Knez D., 2010. *Analiza możliwości wykorzystania magazynów ciekłego propanu, lokowanych w strefie kawern wysadów solnych do produkcji energii*. Wiertnictwo Nafta Gaz, T. 27, Z. 4, s. 657-667.
- Ślizowski K., 1983. *Warunki geologiczno-górnice w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonania podziemnych zbiorników cieczy i gazu*. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, z. 121, Kraków.
- Ślizowski K., Lankof L., 2009. *Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce*. Przegląd Geologiczny, vol. 57, nr 9, s. 829-838.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., 2011. *Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-technicznych*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Serbin K., 2010. *Numeryczna analiza konwergencji pola komór magazynowych gazu w wy-sadzie solnym*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi IGSMiE PAN., T. 26, Z. 3, s. 85-93.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Wojtuszczyńska K., 2009. *Convergence estimation for gas storage caverns field*. SMRI Spring Meeting 2009, Kraków.

Received: 14 February 2012