

JAROSŁAW ŚLIZOWSKI\*

## Prognoza konwergencji komory magazynowej gazu ziemnego w wysadzie solnym

### Słowa kluczowe

Wysad solny, komory magazynowe gazu, pełzanie soli, konwergencja

### Streszczenie

Konwergencja, czyli zaciskanie się komory magazynowej gazu ziemnego w złożu soli kamiennej wskutek zjawiska pełzania, jest jednym z czynników decydujących o efektywnej pojemności komory.

W artykule przedstawiono prognozę szybkości konwergencji wybranej komory, opracowaną na podstawie symulacji komputerowej ruchu górotworu, w powiązaniu z rozważaniami analitycznymi dotyczącymi scenariusza eksploatacji. Stwierdzono zmienność szybkości konwergencji, nawet w przypadku użycia stacjonarnego prawa pełzania soli, i decydującą rolę minimalnego ciśnienia magazynowania gazu na szybkość tego procesu.

### Wprowadzenie

Konwergencja, czyli zaciskanie się komór magazynowych gazu, jest obok ciśnienia magazynowania najistotniejszym czynnikiem decydującym o ich długotrwałej efektywnej pojemności. Jej oszacowanie należy więc do kluczowych problemów geomechanicznych, jakie należy rozwiązać przy projektowaniu kształtu i objętości komory. Nie jest to niestety zadanie proste, co wynika z fizycznej złożoności zjawiska pełzania soli kamiennej, decydującego o szybkości procesu konwergencji. Należy też zauważyć, że konwergencja jest sumą ruchu górotworu w całym zasięgu oddziaływania komory, co w praktyce oznacza odległości rzędu kilkuset metrów. Tym samym potrzebna jest znajomość stanu deformacyjno-naprężeniowego górotworu w tak dużym obszarze.

---

\* Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Wymaga to opracowania odpowiedniego matematyczno-fizycznego modelu górotworu solnego. Znane są co prawda bezpośrednie (*in situ*) metody pomiaru konwergencji komory. Należy do nich pomiar kształtu echosondą ultradźwiękową, który jest jednak mało dokładny, lub wprowadzenie do komory znacznika, na podstawie którego stężenia w wytłaczanym gazie można — po uwzględnieniu zjawisk termodynamicznych zachodzących przy zmiennociśnieniowym magazynowaniu gazu — oszacować aktualną objętość komory.

Podstawową niedogodnością wspomnianych metod jest oprócz kosztów fakt, że nie nadają się one do uogólnień, jak również możliwość prognozowania jest w znacznym stopniu ograniczona. Należy bowiem zaznaczyć, że szczególnie w przypadku złóż typu wysadowego o bardzo złożonej budowie geologicznej każdą komorę należy rozpatrywać indywidualnie, w zależności od własności reologicznych górotworu w jej otoczeniu. W artykule przedstawiony zostanie sposób oszacowania konwergencji komory wykonywanej aktualnie w wysadzie solnym Mogilno, przy jednym z możliwych harmonogramów jej eksploatacji.

### 1. Szybkość pełzania soli kamiennej

Dla określenia szybkości przyrostu składowych tensora odkształceń pełzania konieczne jest sformułowanie prawa pełzania i wyznaczenie, na podstawie badań laboratoryjnych, jego współczynników.

Przyrosty składowych tensora odkształceń pełzania określa uniwersalna, tzn. stosowana we wszystkich znanych z literatury modelach górotworu solnego, zależność:

$$d\varepsilon_{ij}^{re} = \frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_{ef}^{re} \frac{s_{ij}}{\sigma_{ef}} dt \quad (1)$$

gdzie:

- |   |   |
|---|---|
| $d\varepsilon_{ij}^{re}$  | — przyrosty odkształceń pełzania,                     |
| $\dot{\varepsilon}_{ef}^{re}$   | — szybkość odkształceń efektywnych pełzania,          |
| $\varepsilon_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}}$ | — odkształcenie efektywne (intensywność odkształceń), |
| $s_{ij}$  | — składowe dewiatora naprężeń,                        |
| $\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 s_{ij} s_{ij}}$                          | — naprężenie efektywne (intensywność naprężeń),       |
| $t$   | — czas.   |

Prawo pełzania jest funkcją (sumą funkcji; Langer 1984)) opisującą szybkość odkształceń efektywnych pełzania poprzez naprężenie efektywne, odkształcenie efektywne, czas oraz temperaturę. W literaturze znaleźć można również formuły wprowadzające do opisu dodatkowe czynniki, takie jak naprężenie średnie czy wilgotność (Hunsche, Schulze 1996). Najczęściej jednak stosuje się, ze względu na możliwość weryfikacji, formuły proste, do jakich należy prawo pełzania Nortona:

$$\dot{\epsilon}_{ef}^{re} = A e^{-Q/RT} \sigma_{ef}^B \quad (2)$$

gdzie:

- Q — wolna energia aktywacji,
- R — 8,3144 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> — stała gazowa,
- T — temperatura w skali bezwzględnej [°K],
- A, B — stałe współczynniki.

Niezależność powyższego prawa pełzania od czasu lub odkształceń efektywnych oznacza, że opisuje ono pełzanie stacjonarne, tzn. fazę, w której ma ono stałą prędkość. To właśnie prawo użyto w modelu górotworu solnego wykorzystanym do prognozy konwergencji komory.

Wartość współczynników A, B, i Q/R wyznaczono w oparciu o 23 testy pełzania, w tym:

- 10 testów w temperaturze pokojowej w jednoosiowym stanie naprężeń, przy intensywności naprężeń (równej ciśnieniu osiowemu  $\sigma_{ef} = p_z$ ) w granicach 7,5—12,5 MPa;
- 5 testów w temperaturze pokojowej w trójosiowym stanie naprężeń przy intensywności naprężeń (w tym przypadku jest ona równa różnicy ciśnień osiowych i bocznych  $\sigma_{ef} = p_z - p_b$ ) w granicach 10—20 MPa;
- 8 testów w temperaturach 30, 40, 50, 60°C (303, 313, 323, 333°K) ze zmianą temperatury podczas eksperymentu, przy stałej wartości intensywności naprężeń  $\sigma_{ef} = 10$  MPa.

Szczegółową dyskusję wyników i metodę wyznaczenia wartości współczynników prawa pełzania (2) zawierają publikacje (Ślizowski, Kasprzyk 1994; Ślizowski 2001).

Wartości te oszacowano na:

$$\begin{aligned} A &= 0,671, \\ B &= 2,8, \\ Q/R &= 5000^\circ\text{K}, \end{aligned}$$

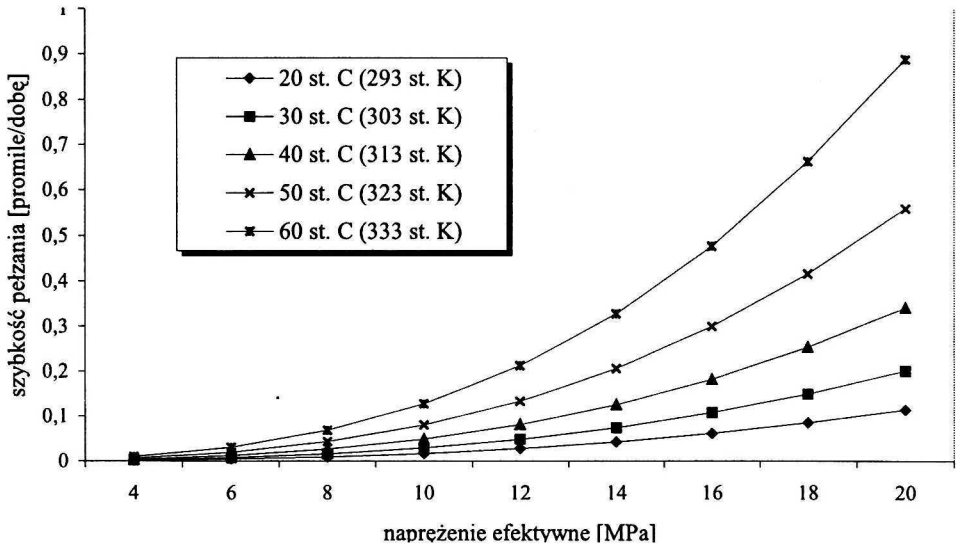
przy czym największy rozrzut wystąpił w przypadku współczynnika B i możliwe jest, że jego rzeczywista wartość dla soli występujących w interwale głębokości projektowanego posadowienia komory jest większa.

Wartości szybkości odkształceń efektywnych dla przyjętego prawa pełzania Nortona (2) z powyższymi współczynnikami w zależności od naprężeń efektywnych w pięciu temperaturach przedstawia rysunek 1.

## 2. Konwergencja otworu wiertniczego

Przed prognozą konwergencji zaprojektowanej komory, ogólną poprawność wyznaczonego prawa pełzania zweryfikowano w oparciu o konwergencję otworu wiertniczego, wykonanego w celu wyługowania omawianej komory. Było to możliwe dzięki porównaniu szybkości samowypływu solanki jaki zmierzono w rzeczywistości w otworze, z wynikami komputerowej symulacji konwergencji.

Pomiar samowypływu solanki dotyczył interwału głębokości 1200—1530 m ppt, na tym bowiem odcinku otwór był niezacementowany i niezarurowany, a jego objętość wynosiła 18,3 m<sup>3</sup>.



Rys. 1. Szybkość odkształceń efektywnych według przyjętego prawa pełzania

Fig. 1. Effective strain rate according to accepted creep law

Weryfikację prawa pełzania przeprowadzono stosując model numeryczny oparty na metodzie elementów skończonych (MES) i rozwiązujący zagadnienia symetrii osiowej. Założono przy tym, że napężenia pierwotne górotworu mają charakter litostatyczny:

$$p_z = p_x = \gamma H \quad (3)$$

a temperatura zmienia się z głębokością H:

$$T = 0,034 \cdot H + 285 \quad (4)$$

co jest zgodne z wynikami profilowania termicznego przeprowadzonego w otworze.

Symulację przeprowadzono dla prawie dwuletniego okresu, bowiem pomiar samowypływu rozpoczęto dopiero po 321 dniach od czasu zakończenia odwiercania otworu.

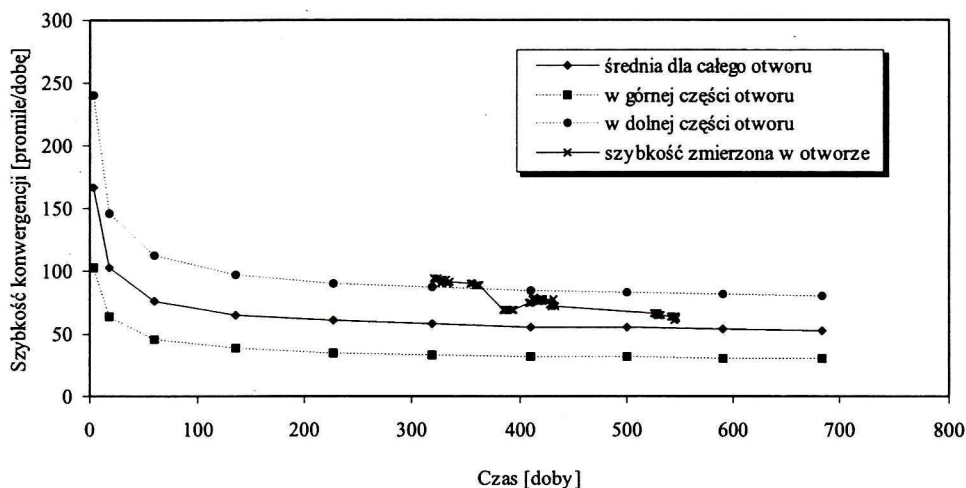
Porównanie wyników symulacji komputerowej z rzeczywistymi wartościami szybkości konwergencji przeliczonymi na skalę 1 roku, zgodnie ze wzorem:

$$\Delta K = \frac{\Delta S}{V} \cdot 365 \quad (5)$$

gdzie:

- $\Delta K$  — konwergencja względna,
- $\Delta S$  — samowypływ dobowy,
- $V$  — objętość niezacementowanej części otworu.

przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Szybkość konwergencji otworu wiertniczego

Fig. 2. Convergence rate of borehole

Zaznaczono na nim również teoretyczne wartości konwergencji w górnej i dolnej części otworu, a konkretnie w interwałach głębokości 1200—1225 m ppt. i 1505—1530 m ppt. W świetle rozrzutu rezultatów badań laboratoryjnych otrzymany wynik uznać należy za zadowalający. Zwraca uwagę spadek szybkości konwergencji pomimo przyjęcia stacjonarnego prawa pełzania.

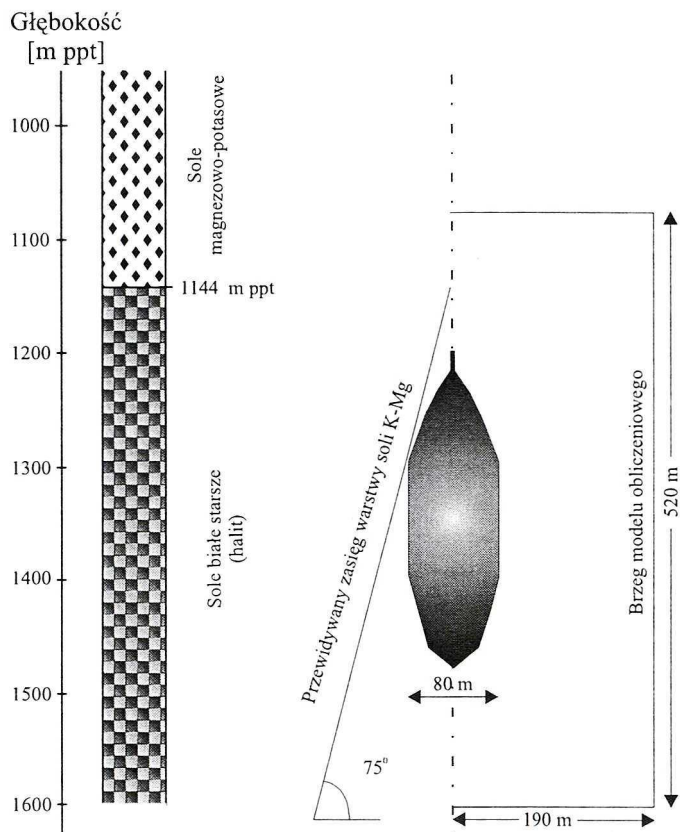
Przeprowadzone obliczenia numeryczne wskazują, że nawet dla niskiej wartości współczynnika  $B$  w prawie pełzania (2) występuje znaczna różnica pomiędzy konwergencją górnej i dolnej części otworu, która jest prawie trzy razy większa zarówno w początkowym, jak i końcowym okresie symulacji. Zwiększenie wartości współczynnika  $B$  spowoduje, co oczywiste, pogłębienie tej różnicy. Zaobserwowano również, że wzrost współczynnika  $B$  powoduje szybszą stabilizację szybkości konwergencji otworu, co jest niezgodne z wynikami pomiarów.

### 3. Szybkość konwergencji komory

Przekrój pionowy zaprojektowanej osiowosymetrycznej komory o objętości 817,6 tys. m<sup>3</sup> przedstawia rysunek 3.

Obliczenia MES przeprowadzono przy takich samych parametrach górotworu jak dla otworu wiertniczego. Przyjęto poziomy zasięg modelu, na którym złożono zerową wartość przemieszczeń radialnych w odległości 190 m od osi komory, czyli 150 m od jej maksymalnego promienia. Oddalenie górnego i dolnego brzegu modelu od stropu i spągu wynosiło 120 m. Brzeg górny został obciążony siłami wynikającymi z ciężaru skał nadległych, a na dolnym założono zerowe przemieszczenia pionowe. Przyjęto średni ciężar właściwy skał nadległych wynoszący 0,02157 MN/m<sup>3</sup>, zaś ciężar właściwy soli 0,02118 MN/m<sup>3</sup>.

Zakres obliczeń obejmował wyznaczenie stanu deformacyjno-naprężeniowego dla pięciu wartości ciśnienia wewnętrznego w komorze. Najpierw wyznaczono rozwiązanie dla komory



Rys. 3. Głębokość posadowienia i kształt komory

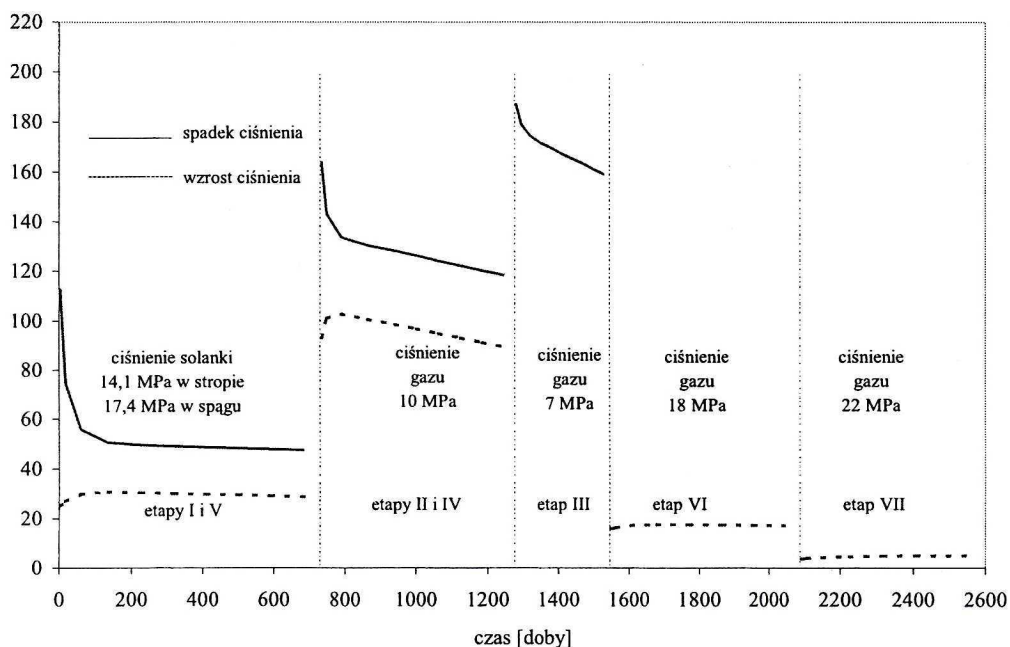
Fig. 3. Depth localisation and shape of cavern

wypełnionej solanką, co w rozważanym przypadku oznacza, że ciśnienie w stropie komory wynosiło 14,1 MPa, a w spągu 17,4 MPa. Następnie symulowano proces dwukrotnego zmniejszania ciśnienia wewnętrznego, odpowiednio do wartości 10 i 7 MPa. W dalszej kolejności symulowano wzrost ciśnienia, kolejno do wartości 10 MPa, ciśnienia solanki, 18 i 22 MPa, która to wartość odpowiada ciśnieniu maksymalnemu wynikającemu z warunku szczelinowania.

W sumie więc proces symulacyjny składał się z siedmiu etapów, których łączny czas wynosił 3910 dni.

Uzyskane podczas symulacji szybkości konwergencji względnej komory (przeliczonej analogicznie jak dla otworu na skalę 1 roku) przedstawia rysunek 4. Dla umożliwienia bezpośredniego porównania wyników uzyskanych w I i V etapie symulacji, tzn. dla ciśnienia solanki, oraz w II i IV (ciśnienie 10 MPa), rezultaty przedstawiono w jednakowych przedziałach czasowych, stąd też oś odciętych wykresu obejmuje 2545 dni. Zwracają uwagę znaczne różnice szybkości konwergencji w zależności od ciśnienia wewnętrznego i różny charakter krzywych uzyskanych na poszczególnych etapach. W przypadku symulacji spadku ciśnienia szybkość konwergencji, podobnie jak dla otworu, maleje, natomiast w przypadku symulacji wzrostu — rośnie.

Wartości na końcu poszczególnych etapów zawiera tabela 1.



Rys. 4. Szybkość konwergencji komory w trakcie symulacji

Fig. 4. Convergence rate of cavern during simulation

TABELA 1

Szybkość konwergencji komory

TABLE 1

Convergence rate of cavern

Etap	Ciśnienie w komorze	Szybkość konwergencji [%/rok]
I	ciśnienie solanki	47,71
II	10 MPa	118,32
III	7 MPa	159,02
IV	10 MPa	89,43
V	ciśnienie solanki	28,88
VI	18 MPa	17,16
VII	22 MPa	4,89

#### 4. Prognoza konwergencji rocznej

W związku z bardzo silną zależnością szybkości konwergencji od ciśnienia jej wielkość zależeć będzie od harmonogramu eksploatacji komory magazynowej. Ogólnie przeciętną wartość konwergencji rocznej określa całka:

$$\text{KONW} = \int_0^1 x(p(t))dt \quad (6)$$

gdzie:

KONW — średnioroczna szybkość konwergencji,

$x(p(t))dt$  — funkcja opisująca zależność szybkości konwergencji od ciśnienia wewnętrznego,

$t$  — czas liczony w latach.

Poniżej przedstawiona zostanie prognoza konwergencji w sytuacji, gdy komora będzie jednostajnie, tzn. ze stałą szybkością, napełniana i opróżniana w okresach półrocznych. Ciśnienie w komorze ma wtedy wartość:

$$p(t) = \begin{cases} p_{\min} + 2(p_{\max} - p_{\min})t & \text{dla } t \in <0, \frac{1}{2}> \\ p_{\max} - 2(p_{\max} - p_{\min})(t - \frac{1}{2}) & \text{dla } t \in <\frac{1}{2}, 1> \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$p_{\min}$  — minimalne ciśnienie gazu,

$p_{\max}$  — maksymalne ciśnienie gazu.

Zależność szybkości konwergencji od ciśnienia można wyznaczyć aproksymując wyniki zawarte w tabeli 1. W niniejszej prognozie do aproksymacji użyto eksponenty:

$$x = ae^{bp} \quad (8)$$

otrzymując następujące wartości współczynników:

$$a = 856,1$$

$$b = -0,22545.$$

Podstawiając (7) i (8) do (6) otrzymujemy następujący wzór na wartość konwergencji rocznej:

$$\text{KONW} = \frac{a}{bc} e^{bp_{\min}} (e^{bc} - 1) \quad (9)$$

gdzie:

$$c = p_{\max} - p_{\min}$$

Zgodnie z nim wartości konwergencji rocznej, w zależności od ciśnienia minimalnego (przy ustalonej wartości ciśnienia maksymalnego  $p_{\max} = 22,1$  MPa), są następujące:

$$50,17 \text{ \%}/\text{rok} \quad \text{dla } p_{\min} = 7 \text{ MPa},$$

$$30,78 \text{ \%}/\text{rok} \quad \text{dla } p_{\min} = 10 \text{ MPa},$$

$$22,55 \text{ \%}/\text{rok} \quad \text{dla } p_{\min} = 12 \text{ MPa},$$

$$16,75 \text{ \%}/\text{rok} \quad \text{dla } p_{\min} = 14 \text{ MPa}.$$



W przypadku innego scenariusza eksploatacji komory konwergencja roczna byłaby oczywiście inna, z całą pewnością jednak decydujący wpływ na jej wielkość będzie mieć wartość ciśnienia minimalnego.

### Uwagi końcowe

Konwergencja względna komory magazynowej wypełnionej solanką będzie — jak wskazują wyniki obliczeń — niższa od konwergencji względnej otworu wiertniczego, co wynika z korzystniejszych proporcji kształtu. Tym niemniej przedstawiona powyżej prognoza stanowi górne oszacowanie szybkości konwergencji, która w przypadku rozważanej komory może być w rzeczywistości mniejsza. Przyczyny tego są następujące:

Wartość współczynników prawa pełzania wyznaczono dla występujących w osi otworu wiertniczego soli białych starszych o silnych właściwościach reologicznych. W zasięgu oddziaływania komory znajdują się bez wątpienia warstwy soli znacznie wolniej pełznące, które nie miały wpływu na konwergencję otworu, ze względu na jego wymiary.

W przypadku konwergencji otworu wiertniczego wpływ nieuwzględnionej w obliczeniach wilgotności będzie na pewno większy niż w przypadku komory. Wynika to z faktu, że strefa przenikania solanki będzie w obu przypadkach podobna przy nieporównywalnym zasięgu oddziaływania wyrobisk.

Przyjęte stacjonarne prawo pełzania zakłada, że zjawisko to występuje przy każdej wartości naprężeń efektywnych. W rzeczywistości przy niskiej wartości intensywności naprężeń szybkość pełzania maleje, a nawet — jak wskazują ostatnie badania — istnieje granica naprężeń, poniżej której pełzanie nie występuje.

Uzyskane podczas symulacji szybkości konwergencji dla niskich ciśnień wewnętrznych miały cały czas tendencję malejącą.

Bez względu na powyższe przyczyny, w przypadku komór zlokalizowanych w wysadzie solnym na głębokości około 1250 m ppt. należy liczyć się nawet z kilkuprocentowym ubytkiem objętości w skali roku. Istotne znaczenie ma tutaj wysoki gradient temperatury występujący w wysadzie powodujący, że temperatura, a tym samym i konwergencja, będą znacznie wyższe niż w przypadku złóż pokładowych.

### LITERATURA

- Hunshel U., Schulze O., 1996 — Effect of Humidity and Confining Pressure on Creep of Rock Salt. Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Langer M., 1984 — The Behavior of Rock Salt. Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Ślizowski J., Kasprzyk W., 1994 — Wpływ temperatury na własności soli kamiennnej. Przegląd Górniczy nr 10.
- Ślizowski J., 2001 — Badania własności reologicznych soli kamiennnej przy projektowaniu komór magazynowych gazu ziemnego w górotworze solnym. Przegląd Górniczy nr 5.

**FORECAST OF NATURAL GAS STORAGE CAVERN CONVERGENCE IN SALT DOME****Key words**

Salt dome, gas storage cavern, salt creep, convergence

**Abstract**

Convergence that is compression of gas storage cavern in rock salt due to salt creep is one of the factor deciding about effective capacity of cavern.

In the article there is shown the forecast of convergence rate of selected rock salt cavern on the basis of massif movement computer simulation and of analytical consideration of exploitation scenario. Variability of speed convergence even in case of stationary salt creep law application and crucial role of minimum pressures of gas storing on rate of this process were ascertained.