



Jarosław ŚLIZOWSKI\*, Kazimierz URBAŃCZYK\*\*, Karolina SERBIN\*\*\*

### **Wytrzymałość doraźna i odkształcenie niszczące w laboratoryjnych badaniach soli kamiennej**

Streszczenie: W pracy omówiono dwa kryteria wytrzymałościowe stosowane dla soli kamiennej, polegające na określeniu dopuszczalnej wartości maksymalnych naprężeń głównych i maksymalnych odkształceń głównych w zależności od wartości najmniejszego naprężenia głównego. Bazę doświadczalną stanowiły wyniki badań jedno- i trójosiowego konwencjonalnego ściskania uzyskane podczas badań rdzeni z nowo budowanych komór w wysadzie Mogilno i komór w złożu pokładowym Mechelinki. Stwierdzono, że pomimo dużego rozrzutu wyników i różnego kształtu krzywych aproksymacyjnych rezultaty wykazują jedno charakterystyczne podobieństwo. Wyrazy wolne występujące w analizowanych wzorach są takie same dla naprężeń, jak i odkształceń. Ich wartości odpowiadają również wartości naprężeń i odkształceń niszczących podczas jednoosiowego ściskania. Choć sam efekt może być przypadkowy i powinien być potwierdzony innymi rodzajami testów to wskazuje na dużą przydatność omawianych kryteriów do oceny stateczności wyrobisk górniczych wykonanych w złożach soli.

Słowa kluczowe: sól kamienna, wytrzymałość krótkotrwała, dopuszczalne naprężenie główne, dopuszczalne odkształcenie główne

#### **Short term strength and ultimate strain in rock salt laboratory tests**

Abstract: The paper discusses two strength criteria, which are used for the rock salt. The criteria determine ultimate value of maximum principal stresses and maximum principal strains, depending on the value of the smallest principal stress. The authors analyzed the conventional uniaxial and triaxial compression tests of samples taken from the drilling cores extracted during the construction of caverns in the Mogilno salt dome and in Mechelinki bedded salt. It was found that, despite the wide range of the obtained results and various shapes of approximation curves, an interesting coincidence in the results is observed. Free terms in the formulas are the same for the stress and strain. Their values also correspond to the values of failure stresses and strains during uniaxial compression. Although the effect could appear by chance and should be confirmed by other types of tests, the analysis showed these criteria being very useful to assess the stability of excavations carried out in rock salt.

\* Dr hab. inż., \*\* Dr, \*\*\* Mgr inż., Zakład Podziemnego Magazynowania i Składowania, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: slizow2@min-pan.krakow.pl

Key words: rock salt, short term strength, laboratory tests, ultimate principal stress, ultimate principal strain

## **Wprowadzenie**

Podstawowym źródłem informacji o właściwościach mechanicznych górotworu w sąsiedztwie komory magazynowej gazu są badania laboratoryjne. Testy *in situ* ograniczają się głównie do badań szczelności oraz pomiarów konwergencji otworów wiertniczych i komór (Brańka, Ślizowski J., Zajdel 1994; Kłeczek, Radomski 1983; Kunstmann, Poborska, Urbańczyk 2002; Ślizowski J. 2001). Możliwości rozpoznania są więc mniejsze niż w przypadku eksploatacji głębinowej i budowy składowisk odpadów promieniotwórczych, gdzie podstawowym źródłem informacji o właściwościach górotworu są obserwacje i testy *in situ*.

Innym istotnym problemem jest reprezentatywność badań laboratoryjnych. Najczęściej dyskutowanym zagadnieniem w tym zakresie jest wielkość próbek użytych do badań. Przyjmuje się, że średnica lub krawędź próbki powinna być 5–15 razy większa od rozmiarów największych kryształów co oznacza, że w przypadku soli grubokrystalicznych (kryształowych) średnica próbek powinna wynosić nawet 150–200 mm. W praktyce podczas badań, w szczególności krajowych, postulowana wielkość próbek nie była często zachowywana. W prezentowanych niżej badaniach średnica próbek wynosiła 42 mm w testach trójosiowych i 56 mm w testach jednoosiowych.

Należy zaznaczyć, że reprezentatywność badań laboratoryjnych ograniczają nie tylko rozmiary próbek. Istotny wpływ na otrzymane rezultaty może mieć również niejednorodność stanu naprężeń w próbce wywołana stałym przesuwem tłoka prasy. W takim przypadku więc jednorodność odkształceń próbki nie pozwala na badanie zjawiska redukcji naprężeń ekstremalnych, jakie zachodzi w górotworze.

Badania laboratoryjne podzielić można na eksperymenty krótkotrwałe (nazywane również badaniami doraźnymi) trwające do około jednej godziny, dla których zakłada się, że czas nie ma wpływu na otrzymywane rezultaty i eksperymenty długotrwałe (reologiczne), trwające nawet kilka lat.

Testy wytrzymałości prób soli w stanie jedno- i trójosiowego ściskania należą do standardowych laboratoryjnych badań, jakie się wykonuje dla prób rdzenia z otworów przeznaczonych do ługowania kawern magazynowych w złożu soli.

W ostatnich latach, w związku z rozbudową KPMG Mogilno i budową KPMG Kosakowo, odwiercono i przebadano kilka nowych otworów. Analizując wyniki uzyskane w różnych otworach, zaobserwowano zastanawiającą korelację pomiędzy wytrzymałościami doraźnymi i odkształceniami końcowymi.

### **1. Badania krótkotrwałe**

Krótkotrwałe badania wytrzymałościowe mają głównie charakter wskaźnikowy, w praktyce bowiem wyężenie górotworu nie może przekroczyć 50% naprężeń niszczących. Na ich podstawie przeprowadza się selekcję soli i planuje przebieg eksperymentów reologicznych.

Testy w warunkach trójosiowego stanu naprężeń na próbkach cylindrycznych, gdzie  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ , podzielić można na kilka rodzajów w zależności od tego, które obciążenia

próbek są zmieniane podczas eksperymentu. Z tego względu wyróżnia się kilka rodzajów testów:

- a) próba konwencjonalnego trójosiowego ściskania, w której zwiększamy wartość ciśnienia osiowego, a obciążenie boczne pozostaje stałe,
- b) próba konwencjonalnego trójosiowego wydłużania, w której wzrasta wartość ciśnienia bocznego przy stałym naprężeniu osiowym,
- c) próba zredukowanego trójosiowego ściskania, w której zmniejszamy wartość ciśnienia bocznego przy stałym naprężeniu osiowym,
- d) próba zredukowanego trójosiowego wydłużania, w której obniżamy wartość naprężenia osiowego przy stałym naprężeniu bocznym.

Wykonuje się również testy, w których zmieniana jest wartość zarówno naprężeń osiowych jak i bocznych, jednak autorom nie są znane przypadki przeprowadzenia tych badań dla soli kamiennej.

Dodatkowo eksperymenty można przeprowadzać ze stałą prędkością zadawania naprężeń lub odkształceń. Zdecydowana większość badań jakie przeprowadzono w świecie dla soli kamiennej, w związku z budową komór magazynowych gazu, była badaniami typu a) lub b), przy czym prędkość przyrostu odkształceń mieściła się w przedziale od  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  do  $10^{-2}\text{s}^{-1}$  (najczęściej  $5 \cdot 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ), a prędkość przyrostu naprężeń około 1 MPa/min.

Przedstawione w rozdziale 3. rozważania dotyczą badań typu a), wykonanych ze stałą prędkością zadawania naprężeń. Wykonano je w laboratorium OBRGSCHEM Chemkop na solach z sześciu otworów wiertniczych, w tym czterech z KPMG Mogilno (sole starsze – PZ2) i dwóch z KPMG Kosakowo (sole najstarsze – PZ1).

## 2. Wytrzymałość soli kamiennej

Podstawowym pojęciem związanym z wytrzymałością materiałów jest hipoteza wytrzymałościowa. Opisuje ona graniczny stan deformacyjno-naprężeniowy, przy którym następuje zniszczenie materiału. W wielu przypadkach granicę tę utożsamia się ze stanem naprężeń, przy których występują odkształcenia nieodwracalne. W przypadku soli, dla której odkształcenia nieodwracalne (niesprężyste) zachodzą praktycznie przy każdym obciążeniu, granice te są wyraźnie różne.

Przy założeniu izotropii materiału najogólniejszą przestrzenią, w której przedstawiona jest wytrzymałość jest przestrzeń trójwymiarowa. Osie układu współrzędnych mogą reprezentować wartości naprężeń głównych lub tzw. niezmienniki stanu naprężeń, czyli wielkości niezależne od przyjętego układu współrzędnych, tzn. niezmiennie przy jego obrocie.

Z praktyki wiadomo, że decydujący wpływ na wytrzymałość mają skrajne wartości naprężeń głównych, a wpływ naprężenia pośredniego jest znacznie słabszy; tym samym w przypadku niezmienników najistotniejsze są niezmienniki liniowy i kwadratowy, którymi są np. naprężenie średnie  $\sigma_m$  i naprężenie efektywne  $\sigma_{ef}$ . W przypadku testów konwencjonalnego trójosiowego ściskania niezmienniki te są równe  $\sigma_m = \sigma_1 + 2\sigma_3$ , a  $\sigma_{ef} = \sigma_1 - \sigma_3$ , czyli jest równe tzw. naprężeniu różnicowemu.

Najliczniejszą grupą hipotez stosowanych dla soli kamiennej są właśnie hipotezy oparte na niezmiennikach stanu naprężeń. Zaliczyć do nich można hipotezy Druckera-Pragera oraz

hipotezę Burzyńskiego. Są to hipotezy dwuparametryczne, a parametrami są wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozrywanie. Spotyka się również hipotezy znacznie bardziej złożone, tj. hipotezy niemieckie przedstawione w pracach (Hunsche 1991, 1993; Lux, Hou, Düsterloh 1998).

Oprócz niewątpliwych zalet hipotezy te posiadają również wady, a podstawową z nich jest trudność z jednoznacznym określeniem stopnia wyężenia górotworu, który jest uzależniony od ścieżki obciążeń (Ślizowski J., 2006).

Innym rodzajem hipotez dla skał są hipotezy określające wartość maksymalnego naprężenia głównego w zależności od dwóch pozostałych naprężeń lub tylko od naprężenia minimalnego (Kwaśniewski 1996). Dla soli kamiennej hipotezę tego typu przedstawiono w pracy (Ślizowski J., Urbańczyk 2004):

$$\sigma_1^{\max} = a\sigma_3^b + R_c \quad (1)$$

gdzie:

- $\sigma_1^{\max}$  – największe dopuszczalne naprężenie główne,
- $R_c$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- $a, b$  – stałe, dopasowane na drodze aproksymacji wyników badań.

Podobną zależność wyprowadzono dla odkształceń niszczących:

$$\varepsilon_1^{\max} = e\sigma_3^f + \varepsilon_0^{kr} \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon_1^{\max}$  – największe dopuszczalne odkształcenie główne,
- $\varepsilon_0^{kr}$  – odkształcenie podczas zniszczenia w trakcie krótkotrwałego jednoosiowego ściskania,
- $e, f$  – stałe dopasowane na drodze aproksymacji wyników badań.

W powyższych formułach (1) i (2), wartości  $R_c$  i  $\varepsilon_0^{kr}$  były przyjmowane wyłącznie na podstawie testów jednoosiowych. Parametry te można również oszacować w sposób pośredni dopasowując, metodą najmniejszych kwadratów, wytrzymałości i odkształcenia niszczące wyznaczone dla jedno- i trójosiowego ściskania, jako dwie funkcje potęgowe ciśnienia bocznego z trzema parametrami każda:

$$\sigma_1^{\max}(\sigma_3) = a\sigma_3^b + c \quad (3)$$

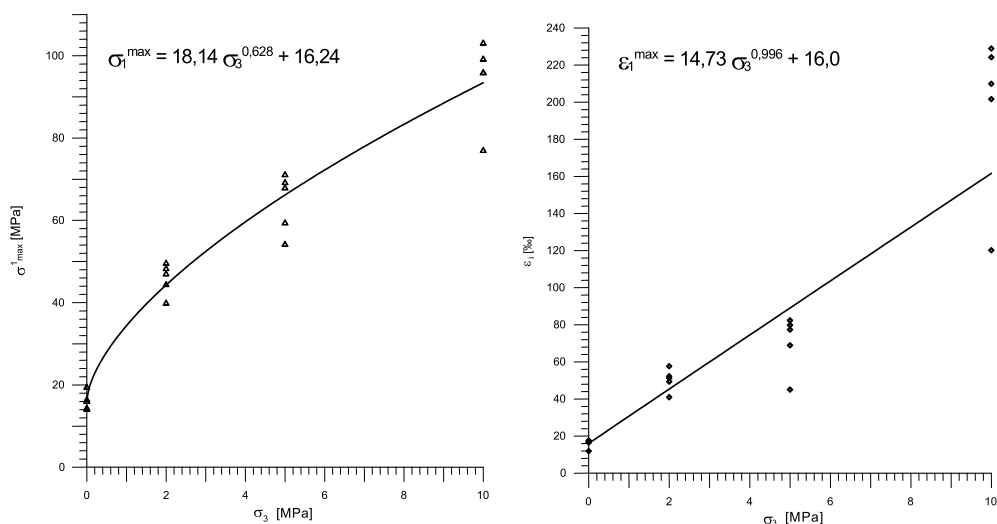
$$\varepsilon_1^{\max}(\sigma_3) = e\sigma_3^f + g \quad (4)$$

gdzie:

- $a, b, c, e, f, g$  – dopasowywane stałe empiryczne, przy czym w idealnym przypadku całkowitej zgodności pomiędzy dopasowywaną krzywą a wynikami empirycznymi powinno zachodzić:  $c = R_c$  oraz  $g = \varepsilon_0^{kr}$ .

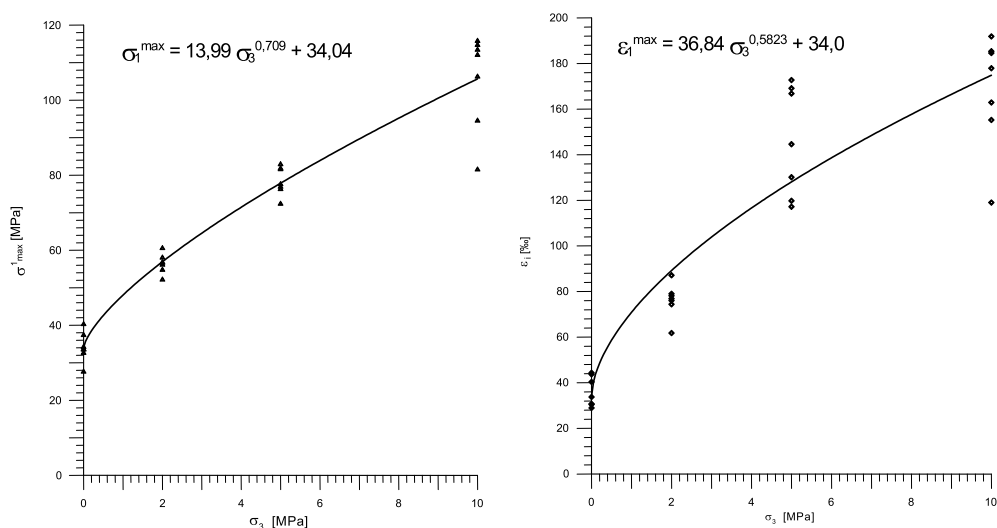
### 3. Wyniki badań laboratoryjnych

Prezentowane rezultaty obejmowały łącznie 148 testów, w tym 37 testów jednoosiowego ściskania oraz 111 testów ściskania trójosiowego, przy naprężeniach bocznych 2, 5 i 10 MPa. Rysunki 1–6 przedstawiają dopasowania formuł (3) i (4) uzyskane dla poszczególnych otworów przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów (m.n.k.).



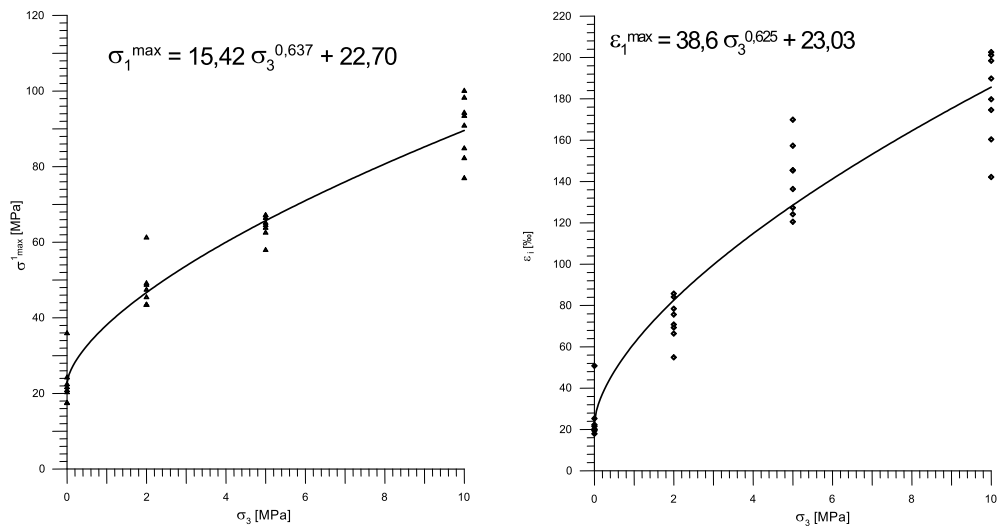
Rys. 1. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 1

Fig. 1. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 1



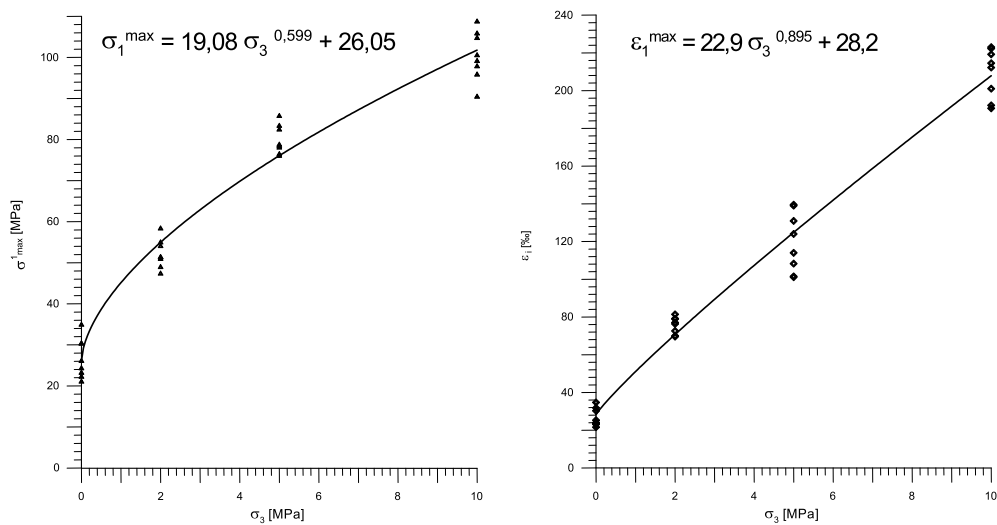
Rys. 2. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 2

Fig. 2. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 2



Rys. 3. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 3

Fig. 3. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 3

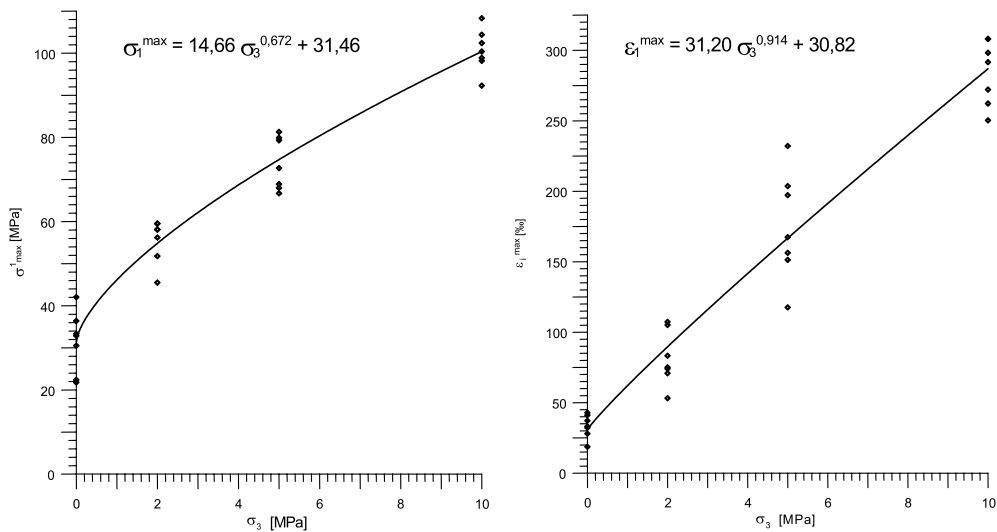


Rys. 4. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 4

Fig. 4. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 4

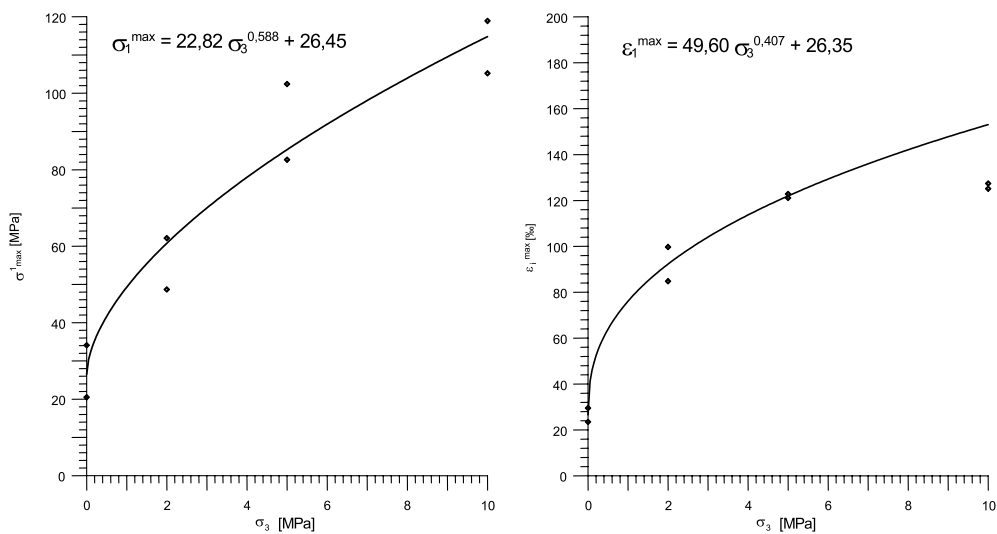
Wytrzymałości i odkształcenia końcowe charakteryzują się sporym rozrzutem zarówno dla prób w obrębie pojedynczych otworów, jak i też dla średnich wartości w różnych otworach, czego konsekwencją są znaczące różnice pomiędzy dopasowanymi współczynnikami równań  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$  dla różnych otworów.

W tej sytuacji zaskakująca jest korelacja, jaką można zaobserwować pomiędzy wyrazami wolnymi  $c$  i  $g$ . Jeśli naprężenie wyrażone jest w megapaskalach, a odkształcenie w pro-



Rys. 5. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 5

Fig. 5. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 5



Rys. 6. Aproksymacja danych z badań laboratoryjnych funkcjami (3) i (4) dla otworu 6

Fig. 6. Approximation of laboratory tests data using formulas (3) and (4) – well 6

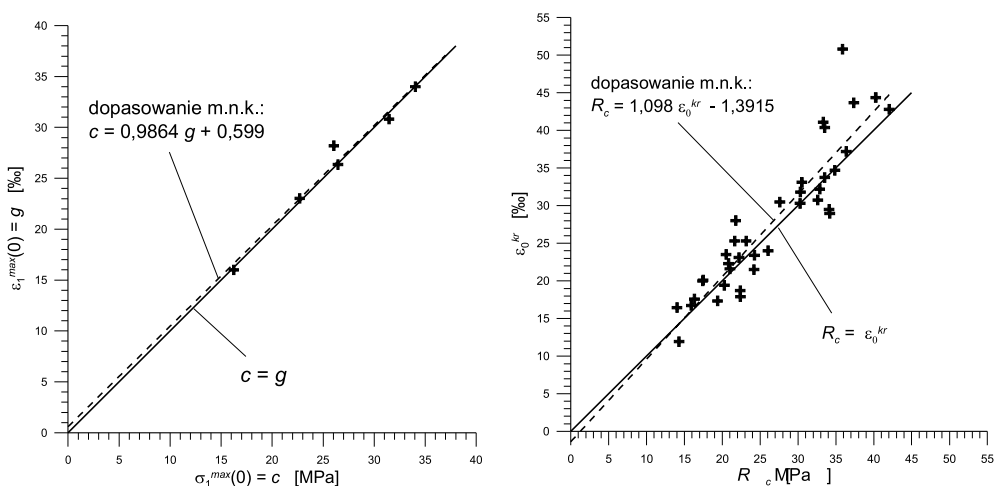
milach, wartości tych współczynników są praktycznie sobie równe, co obrazuje tabela 1. W tabeli tej, dla porównania, zamieszczono również średnie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz odpowiadające im odkształcenia niszczące.

Rysunek 7 przedstawia korelację pomiędzy współczynnikami  $c$  i  $g$  wyznaczonymi dla sześciu rozważanych otworów oraz pomiędzy współczynnikami  $R_c$  i  $\varepsilon_0^{kr}$  uzyskanymi

TABELA 1. Porównanie parametrów dopasowanych formuł (3) i (4) dla poszczególnych otworów ze średniami z badań jednoosiowego ściskania

TABLE 1. Comparison of formulas (3) and (4) fitted parameters for the each well and the results of uniaxial compression tests

Otwór	Parametr $c$ we wzorze (3) [MPa]	$R_c$ we wzorze (1) [MPa]	$g$ we wzorze (4) [‰]	$\varepsilon_0^{kr}$ we wzorze (2) [‰]
1	16,24	15,98	16,00	16,00
2	34,04	34,15	34,00	36,05
3	22,70	22,51	23,03	24,66
4	26,05	26,52	28,20	26,78
5	31,46	31,32	30,82	33,30
6	26,45	27,30	26,35	26,50



Rys. 7. Korelacja pomiędzy wyrazami wolnymi  $c$  i  $g$  w dopasowaniach (3) i (4) oraz wynikami badań jednoosiowego ściskania  $R_c$  i  $\varepsilon_0^{kr}$

Fig. 7. Correlation between free terms in the fits (3) and (4) and the results of uniaxial compression tests  $R_c$  and  $\varepsilon_0^{kr}$

w 37 testach jednoosiowego ściskania. Na rysunkach zaznaczono również proste regresji dopasowane metodą najmniejszych kwadratów oraz linie o nachyleniu  $45^\circ$ , tzn.  $y = x$ .

## Wnioski

1. Zgodnie z oczekiwaniami, rozrzut wyników analizowanych badań był bardzo duży, a szczególnie duży w przypadku odkształceń niszczących. Konsekwencją tego jest



- zróznicowany charakter dopasowanych krzywych, zwłaszcza jeśli chodzi o wykładniki potęg.
2. Przy takim rozrzucie parametrów zaskakująca jest korelacja pomiędzy dopasowanymi wyrazami wolnymi  $c$  i  $g$  dla poszczególnych otworów i ich zbieżność z wynikami testów jednoosiowego ściskania.
  3. Autorzy nie zauważyli w literaturze informacji na temat powyższej korelacji. Nie można wykluczyć, że może mieć ona charakter przypadkowy, gdyż jak na razie, nie można podać jej fizycznej przyczyny, a sześć otworów nie jest statystycznie dużą liczbą.
  4. Może jednak korelacja wskazywać na jakąś fizyczną właściwość soli kamiennej, która do tej pory umknęła uwadze badaczy. Należy sięgnąć do danych archiwalnych i sprawdzić, czy sytuacja taka występowała w przypadku wcześniejszych badań.
  5. Ciekawe byłoby stwierdzenie, czy podobna tendencja występuje również w przypadku innych typów badań niż omawiane testy konwencjonalnego trójosiowego ściskania ze stałą szybkością zadawania naprężeń.
  6. Biorąc pod uwagę zbieżność wyrazów wolnych dopasowań ze średnimi wynikami jednoosiowego ściskania, należy stosowane formuły potęgowe ocenić jako dobrze opisujące własności wytrzymałościowe soli.

### *Literatura*

- Brańka S., Ślizowski J., Zajdel Z., 1994 – Laboratory and field investigation on rheological properties of rock salt for determination of natural gas storage cavern locations in salt dome Mogilno. Proceedings of Eight International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, West Virginia, USA, s. 22–28 May, vol. 3, s. 2049–2952.
- Hunshe U., 1991 – True Triaxial Failure Tests on Cubic Rock Salt Samples – Experimental Methods and Results. Proceedings of the IUTAM-Symposium – Hannover. Springer: Berlin.
- Hunshe U., 1993 – Uniaxial and Triaxial Creep and Failure Tests on Rock: Experimental Technique and Interpretation. In: Time-dependent Behaviour of Geomaterials. Udine, October 11–15.
- Kłeczek Z., Radomski A., 1983: Konwergencja górotworu solnego w podziemnej kawernie magazynowej na tle perspektywy budowy podziemnych zbiorników w Polsce. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo z. 4.
- Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K., 2002 – Zakres otworowego ługownictwa solnego – Aktualne kierunki rozwoju. AGH, Kraków.
- Kwaśniewski M., 1996 – Wytrzymałość skał w warunkach prawdziwego trójosiowego stanu naprężeń ściskających – aparatura, metodyka badań, wyniki. XIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Ustroń.
- Lux K.-H., Hou Z., Düsterloh U., 1998 – Some New Aspects in Modelling of Cavern Behavior and Safety Analysis. SMRI Meeting 4–7 October, Rome, Italy.
- Ślizowski J., 2001 – Badania własności reologicznych soli kamiennej przy projektowaniu komór magazynowych gazu ziemnego w górotworze solnym. Przegląd górniczy nr 5.
- Ślizowski J., 2006 – Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej. Studia, Rozprawy, Monografie nr 137, Wyd. IGSMiE, Kraków.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., 2004 – Influence of depth on rock salt around the single chamber. IGSMiE, Cracow.

