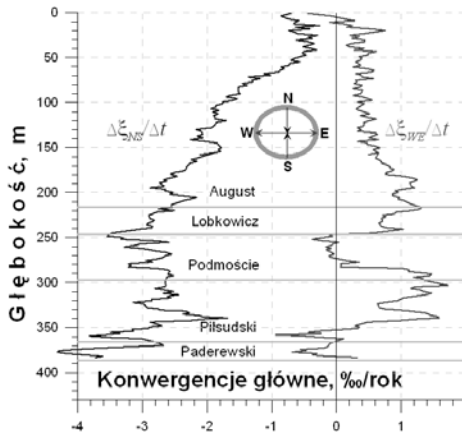


Grzegorz Kortas*

SZYB Z OBUDOWĄ W GÓROTWORZE SOLNYM — WSTĘPNE BADANIA MODELOWE

1. Wstęp

Szyb jest szczególnym wyrobiskiem. Ze względu na jego podstawowe znaczenie dla kopalni podziemnej, obudowa szybu powinna zapewnić jego długotrwałą funkcjonalność. W kopalniach soli obudowa szybów projektowana jest według norm dotyczących ośrodka sprężystego lub sprężysto-plastycznego [8], w których nie rozpatruje się wpływu czasu na naprężenia [7]. Liczne obserwacje pokazują, że obudowa szybów w górotworze solnym po pewnym czasie ulega niszczeniu a szyby zaciskaniu, przejawiającym się radialnymi przemieszczeniami. Przykładem tego są konwergencje przekraczające 4%/rok w szybie Campi w kopalni Bochnia przed 2003 r. (rys. 1). Po przebudowie, nowa obudowa betonowa tego szybu uległa ponownie spękanom i wystąpiły ruchy konwergencyjne.



Rys. 1. Prędkości konwergencji poziomych w szybie Campi, wg [4]

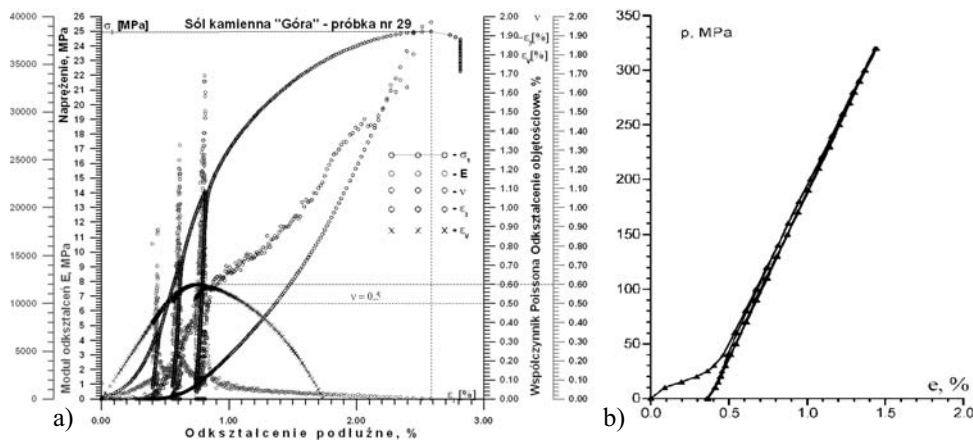
* Instytut Mechaniki Górotworu, Polska Akademia Nauk, Kraków

Nieliczne publikacje dotyczące tego problemu mają na ogół charakter opisu obserwowanych zjawisk lub też zaleceń naprawczych, np. [1], ich szerokie omówienie przedstawiono w pracy Kortasa, Wichura, Flisiak i Schinohla [7]. Sygnałem o możliwości zastosowania modelowania numerycznego do określenia zachowania się obudowy betonowej wykazującecej pełzanie są prace [3] i [6].

W tej pracy przyjęto założenie, że górotwór solny jest ośrodkiem sprężysto-lepkim a obudowa po przekroczeniu stanu pokrytycznego może ulegać pełzaniu. Przedstawiono kształtowanie się naprężeń w obudowie, wskazując na czynniki decydujące o ich wartościach. Podstawą tej analizy były badania modelowe.

2. Górotwór solny, jego właściwości, model fizyczny i matematyczny

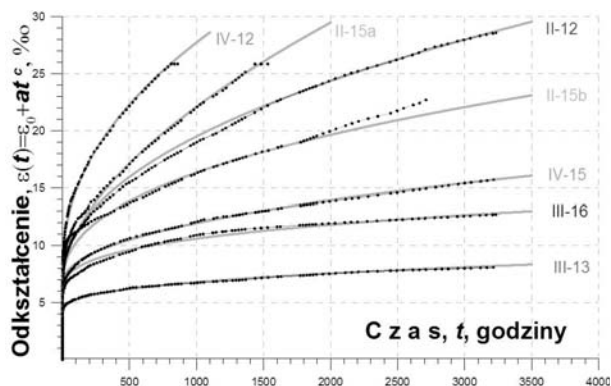
Badania laboratoryjne soli kamiennej wykazują, że w trakcie cyklicznego obciążania i odciążania w testach doraźnych występują odwracalne odkształcenia sprężyste (rys. 2a), a związek odkształceń objętościowych z hydrostatycznym stanem naprężenia jest ściśle liniowy (rys. 2b). W solach trwałe odkształcenia pojawiają się już przy najmniejszych różnicach naprężeń i nie są to odkształcenia plastyczne, lecz lepkie [2], rosnące w funkcji potęgowej czasu (rys. 3).



Rys. 2. Przykład testów doraźnych próbek soli kamiennej, jednoosiowy i trójosiowy

Przesłanki te, ale przede wszystkim kompleksowe studia nad zachowaniem się soli kamiennej w związku z wykorzystaniem górotworu solnego do podziemnego magazynowania gazu i paliw ciekłych oraz składowania odpadów niebezpiecznych, stworzyły nowe podstawy naukowe geomechaniki solnej, co zaznaczyło się w literaturze naukowej i na sympozjach geomechanicznych (Mechanical Behavior of Salt, World of Salt, Solution Mining Research Institute Meetings, Quo Vadis Sal i in.).

Obecnie przyjmuje się, że prostym związkiem konstytutywnym ośrodka sprężysto-lepkiego, określającym zachowanie soli kamiennej jest powiązanie liniowego prawa Hooke'a z



Rys. 3. Test pełzania próbek soli kamiennej i ich aproksymacja funkcją potęgową czasu

potęgowym prawem pełzania Nortona. Prawo to dla ustalonych warunków termicznych przedstawia się związkiem naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera–Misesa–Hencky’ego (efektywnych) z odkształceniem w postaci:

$$\varepsilon = B\sigma_{rd}^n t$$

$$\sigma_{rd} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

gdzie:

- B — podatność na pełzanie [5],
- n — współczynnik potęgowy.

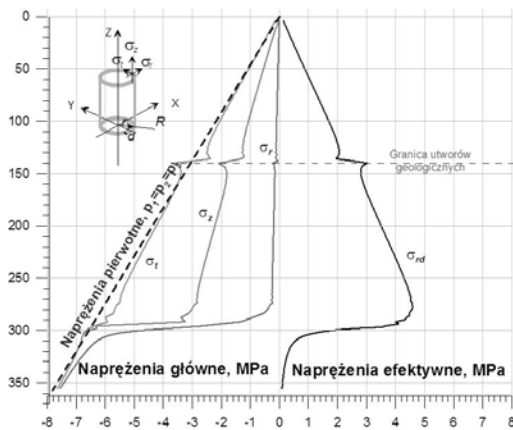
W badaniach modelowych, zgodnie z pracą [2] dla górotworu solnego przyjęto $n = 2$, natomiast $B = B_{gór} = 0,12 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^2 \text{ s}^{-1}$ [5], moduł Younga dla soli $E = 15 \text{ GPa}$, betonu $E = 30 \text{ GPa}$, a współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

Badania przeprowadzono stosując numeryczną metodę obliczeń z wykorzystaniem modułu Nonlinear programu metody elementów skończonych CosmosM. Przyjęto symetrię osiową i przemieszczeniowe warunki brzegowe. Warunkiem początkowym był hydrostatyczny stan naprężeń pierwotnych w górotworze solnym. Warunek ten osiągnięto poprzez pełzanie górotworu w czasie 1000 lat. Potem utworzono szyb z obudową betonową, obliczano reakcję sprężystą i w następnych krokach oddziaływania reologiczne w okresie $t = 100$ lat.

3. Rozkład naprężeń w otoczeniu szybu w górotworze sprężysto-lepkim

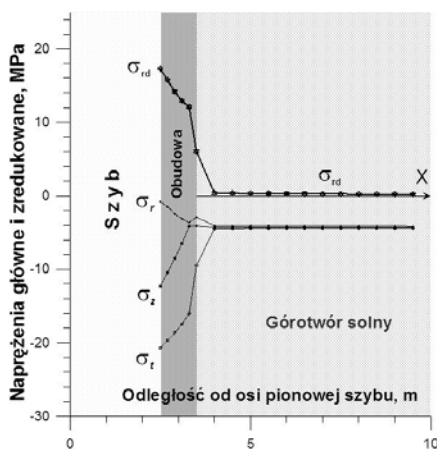
Celem pierwszych testów modelowych było przedstawienie stanu naprężenia na ścianie szybu bez obudowy. Określano wpływ głębokości H i położenia granicy utworów solnych, różniących się podatnością na pełzanie $B_{gór}$, na rozkład naprężeń głównych: w kierunku radial-

nym σ_r , pionowym σ_z i obwodowym σ_t . Naprężenia główne σ_z i σ_t w jednorodnym górotworze rosną liniowo z głębokością, a naprężenie radialne jest $\sigma_r = 0$. Naprężenie główne $\sigma_t(H)$ odpowiada w przybliżeniu naprężeniom pierwotnym $p_1 = p_2 = p_3 = p(H)$. W tym teście podatność na pełzanie dolnych utworów była czterokrotnie większa niż górnych. Wpływ zmiany podatności utworów na ich granicy zaznacza się wzrostem i spadkiem naprężeń (rys. 4).



Rys. 4. Przykład rozkładu naprężeń głównych i zredukowanych w szybie bez obudowy

Z badań wynika znane z praktyki górniczej spostrzeżenie, że przyczyną lokalnych przekroczeń wytrzymałości górotworu w szybach bez obudowy może być granica utworów różniących się właściwościami lepkimi. W szczególności wtedy, gdy w solach występują warstwy różniące się podatnością na pełzanie lub o małej wytrzymałości. Ze względu na funkcjonalność szybu, w takich warunkach konieczne jest wprowadzenie obudowy. Rozkład naprężeń głównych w kierunku poziomym w szybie z obudową betonową przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Przykład rozkładu naprężeń głównych i zredukowanych w kierunku poziomym

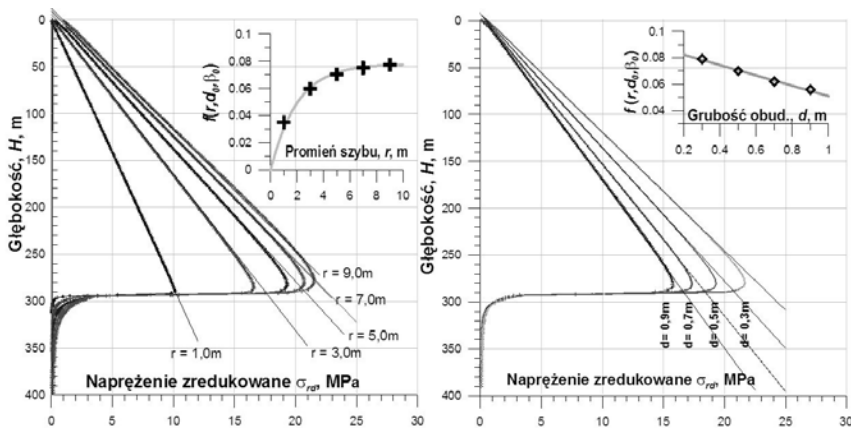
Naprężenia σ_r , σ_z i σ_t za obudową szybu są prawie jednakowe i bliskie naprężeniom pierwotnym p , stąd $\sigma_{rd} \approx 0$. Natomiast w obudowie szybu $|\sigma_z| < |\sigma_r|$ i przekracza p . Na ścianie szybu $\sigma_r = 0$. O wartości naprężeń zredukowanych σ_{rd} decyduje głównie naprężenie obwodowe σ_t . W przybliżeniu $\sigma_{rd} = 0,85|\sigma_t|$.

4. Wpływ podatności obudowy szybu na naprężenia zredukowane w obudowie szybu

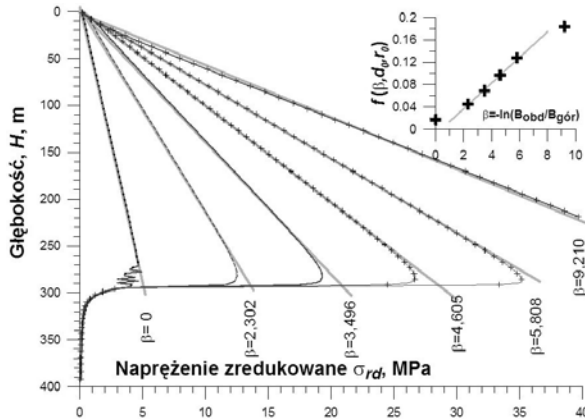
Stan naprężenia w obudowie szybu zależy od średnicy szybu r , grubości obudowy d oraz podatności obudowy na pęcznienie. Na wzrost naprężenia w materiałach wykazujących mniejszą podatność niż otoczenie wpływa różnica ich podatności na pęcznienie. Okazuje się, że relację tę dobrze charakteryzuje wskaźnik podatności względnej wyrażony logarytmem stosunku podatności obudowy B_{obd} do podatności górotworu $B_{gór}$:

$$\beta = -\ln\left(\frac{B_{obd}}{B_{gór}}\right) \quad (2)$$

W badaniach parametryzowano wartości r , d i podatności względnej obudowy b przy ustalonych wartościach dwóch pozostałych zmiennych $r_0 = 5$ m, $d_0 = 0,5$ m, $b_0 = 6,91 = -\ln 1000$. Wyniki testów przedstawiono na wykresach zależności σ_{rd} od głębokości (rys. 6 i 7). Otrzymany z obliczeń numerycznych związki $F(3)$, prezentują liniowe funkcje głębokości $F = f(H)$, o zmiennym współczynniku proporcjonalności f . Opracowanie wyników testów polegało na wyznaczeniu: wartości dyskretnych trzech funkcji $f_i(r_i, d_0, b_0)$, $f_i(d_i, r_0, b_0)$, $f_i(b_i, r_0, d_0)$, a po aproksymacji — ich postaci matematycznych $f(r)$, $f(d)$, $f(b)$. Wyniki tych aproksymacji pokazano na wykresach (rys. 6 i 7). Z założenia jednorodności górotworu wynika proporcjonalność p_z do głębokości H , dlatego w ostatecznej formie wzorów wprowadzono naprężenie pierwotne p_z .



Rys. 6. Zależność $\sigma_{rd}(H, r_i)$ od promienia szybu i $\sigma_{rd}(H, d_i)$ od grubości obudowy



Rys. 7. Zależność $\sigma_{rd}(H, b_i)$ dla różnych wskaźników podatności obudowy

$$\sigma_{rd} = F(r, d, \beta, H) \approx Hf(r, d, \beta) = \text{const } p_z \varphi(r, d, \beta) \quad (3)$$

Funkcje określające zależność naprężeń zredukowanych w zakresie przeprowadzonych testów mają postać:

$$\text{dla } d_0 = 0,5 \text{ m i } \beta_0 = 6,91 \quad \sigma_{rd} \approx 3,61 p_z (1 - e^{-\frac{0,5r}{r_j}}) \quad r_j = 1 \text{ m} \quad (4)$$

$$\text{dla } r_0 = 5 \text{ m i } \beta_0 = 6,91 \quad \sigma_{rd} \approx 4,17 p_z \left(1 - 0,434 \frac{d}{d_j}\right) \quad d_j = 1 \text{ m} \quad (5)$$

$$\text{dla } r_0 = 5 \text{ m i } d_0 = 0,5 \text{ m} \quad \sigma_{rd} \approx 1,06 p_z (\beta - 0,40) \quad (6)$$

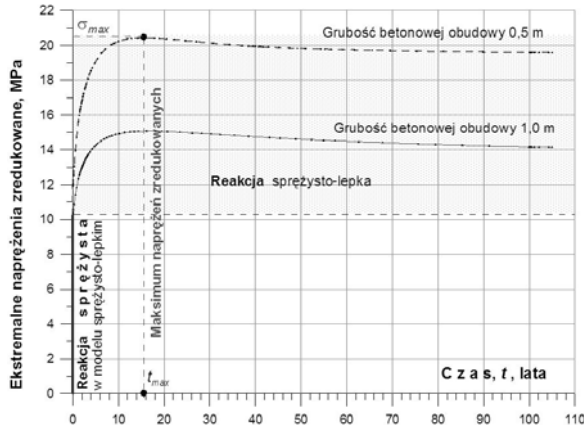
Uzyskane wyniki wskazują, że ze wzrostem promienia lub zmniejszeniem grubości obudowy lub spadkiem podatności obudowy na pełzanie zwiększają się naprężenia zredukowane w obudowie.

Przedstawione tu wyniki badań nie prowadzą do wyłonienia ogólnej postaci funkcji F , bo dotyczą tylko ośrodka o założonej podatności $B_{g\acute{o}r} = 0,12 \cdot 10^{-23} \text{ Pa}^2 \text{ s}^{-1}$, a wartości naprężeń przedstawiono tylko dla stanu, jaki występuje po 100 latach od utworzenia szybu. W następnym rozdziale omówiony został wpływ czasu na kształtowanie się naprężeń w obudowie szybu.

5. Zależność naprężeń zredukowanych w obudowie szybu od czasu

W ośrodku o właściwościach sprężystych, o stanie naprężeń w obudowie szybu decyduje reakcja natychmiastowa, czyli stan, jaki powstaje w obudowie ostatecznej po zgłębieniu szybu. W takich warunkach nie uwzględnia się wpływu czasu na naprężenia. W ośrodku sprężysto-lepkim, po reakcji sprężystej następuje pełzanie górotworu z redystrybucją naprężeń. Wtedy naprężenia w obudowie ulegają zmianie, zależnej od właściwości fizycznych

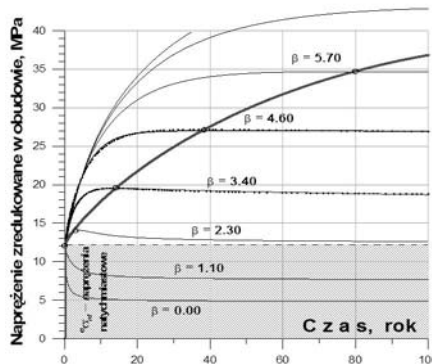
górotworu i obudowy oraz parametrów geometrycznych szybu i obudowy. Na rysunku 8 przedstawiono przykład kształtowania się naprężeń zredukowanych w obudowie betonowej szybu w funkcji czasu dla dwóch obudów betonowych różniących się grubością.



Rys. 8. Przykład zależności σ_{rd} od czasu dla dwóch grubości obudowy

Początkowa wartość $\sigma_{rd}(t=0) = \epsilon \sigma_{rd}$ dla $d_0 = 0,5$ m jest prawie dwukrotnie mniejsza niż wartość naprężenia maksymalnego $\max \sigma_{rd}$ pojawiającego się po około 15 latach (linia górna, rys. 8). Wzrost grubości obudowy do 1 m zmniejsza wpływ oddziaływań reologicznych na wzrost naprężeń w obudowie (linia dolna, rys. 8).

Następne testy modelowe — dla $r_0 = 5$ m i $d_0 = 0,5$ m — przeprowadzono dla różnych wartości wskaźników podatności obudowy b (rys. 9). Stwierdzono, że po reakcji sprężystej wartości $\sigma_{rd}(t)$ mogą się zwiększać lub zmniejszać. Istnieje w takim razie pewna wartość graniczna b_g , taka, że dla $b < b_g$ $\sigma_{rd}(t) < \epsilon \sigma_{rd}$ a dla $b > b_g$ $\sigma_{rd}(t) > \epsilon \sigma_{rd}$. Wartość graniczna b_g dla przyjętych parametrów znajduje się w przedziale $1,1 < b_g < 2,3$.



Rys. 9. Zależność maksimum σ_{rd} od czasu i podatności obudowy

Rozpatrzmy zachowanie się obudów różniących się podatnością b . Jeżeli $b < b_g$, to początkowe naprężenia w obudowie maleją natychmiast po utworzeniu szybu. Najmniejsze wartości $\sigma_{rd}(t, b)$ wystąpią dla szybów bez obudowy, czyli dla $b = 0$. Jeżeli $b > b_g$, to $\sigma_{rd}(t)$ jest początkowo funkcją rosnącą z ekstremum w czasie t_{max} , a $\sigma_{rd}(t_{max}, b) = \max \sigma_{rd}(b)$, potem funkcją malejącą. Wartości naprężeń w punktach ekstremum $\max \sigma_{rd}(b)$ rosną ze wzrostem $b > b_g$, czyli ze spadkiem podatności na pełzanie materiałów obudowy.

Zbiór punktów $\max \sigma_{rd}(t, b)$ w funkcji czasu dla warunków tego testu i $b > b_g$ aproksymować można tu funkcją wykładniczą, na przykład (7):

$$\frac{\max \sigma_{rd} - \epsilon \sigma}{\sigma_j} = \left(\frac{t}{t_j} \right)^{0,775 \left(1 - \frac{t}{1000t_j} \right)}, \quad \sigma_j = 1 \text{ MPa}, t_j = 1 \text{ rok} \quad (7)$$

Jeżeli na ścianie szybu $\max \sigma_{rd}(t, b)$ jest większe od wytrzymałości materiału obudowy, lokalnie wystąpi stan pokrytyczny, spękanie obudowy i jej miejscowe upodatnienie. Jednocześnie w tym miejscu obudowy nastąpi spadek naprężeń i ich wzrost w sąsiedztwie, powodując propagację szczelin. Dalszy rozwój tego procesu prowadzi do stanu, w którym pewne obszary obudowy zachowują się jak ciało pseudolepkie, czyli materiał w fazie pokrytycznej, niespójny i wykazujący pełzanie. Efekty takich procesów przejawiających się konwergencją w szybie Campi przedstawiono na rysunku 1.

Wyniki przedstawionych analiz pokazują, że utrzymanie spójności w sztywnych obudowach (niepodatnych na pełzanie) wymaga zwiększenia ich wytrzymałości długotrwałej, w przeciwnym przypadku prowadzi do skrócenia czasu ich funkcjonalności.

6. Wnioski i uwagi końcowe

Reologiczne oddziaływania górotworu solnego na sztywną obudowę szybu, odporną tylko na natychmiastowe obciążenia sprężyste, mogą po pewnym czasie powodować jej niszczenie. Obserwacje wskazują, że w stanie pokrytycznym obudowa upodatnia się i wykazuje pełzanie (rys. 1). Badania ujawniają, że wartość maksymalnych naprężeń zredukowanych w obudowie maleje ze wzrostem podatności obudowy na pełzanie (rys. 9).

Wyniki badań pokazują, że naprężenia zredukowane w obudowie po długim okresie czasu wyrazić można w przybliżeniu prostymi związkami funkcyjnymi promienia szybu, grubości obudowy i stosunku podatności obudowy do podatności górotworu (6 i 7). Pozwala to szacować wpływ tych czynników na wyętie obudowy.

Przeprowadzone badania nie rozwiązują w pełni problemu współpracy obudowy szybu z górotworem o właściwościach sprężysto-lepkich. Wskazują jednak potrzebę i możliwość stworzenia podstaw naukowych dla projektów inżynierskich i kontroli stanu obudowy szybów w górotworze solnym. Wykorzystanie wyników takich prac w budowaniu konstrukcji szybowych w kopalniach soli zwiększy ich skuteczność i zmniejszy koszty.

Powody te były przyczyną wystąpienia z wnioskiem do Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego o przeprowadzenie kompleksowych badań w trybie projektu badawczego [7].

LITERATURA

- [1] *Bauer J. i in.*: Ocena stanu obudowy murowej szybu „Kościuszko” w Kopalni Soli Wieliczka. Prace Naukowe IGiH Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
- [2] *Flisiak D.*: Metodyka badań soli kamiennej w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania dla projektowania podziemnych magazynów. *Górnictwo i Geoinżynieria*, z. 3. Kraków 2007
- [3] *Olovyanny A., Kozel A.*: Numerical Modeling of Deformation in a Shaft in the Interstratified Salt Rocks. *Journal of Mining Science*, Vol. 41, Nr 3, 2005
- [4] *Kortas G.* [red.]: Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli. IMG PAN Wyd. IGSMiE. Kraków 2004
- [5] *Kortas G.* [red.]: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych. IMG PAN Wyd. IGSMiE. Kraków 2008
- [6] *Kortas G., Maj.*: Określenie obciążenia charakterystycznego obudowy szybu Kinga i Daniłowicz Kopalni Soli Wieliczka od skał otaczających rury szybowe. CBiDGP S.A., Katowice-Lędziny 2009 (praca niepublikowana)
- [7] *Kortas G., Wichur A., Flisiak D., Schinohl J.*: Określenie długotrwałego zachowania się szybów w górotworze solnym oraz bezpieczeństwa ich użytkowania. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wniosek projektu badawczego nr identyfikacyjny 80300. 2010. Warszawa 2010
- [8] *Wichur A.*: Nowe normy projektowania obudowy szybów górniczych. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe* nr 4, 1996