

*Agnieszka Maj**

WPŁYW PARAMETRÓW OŚRODKA SPRĘŻYSTO-LEPKIEGO NA KONWERCENCJĘ POWIERZCHNIOWĄ PROSTOKĄTNEGO CHODNIKA NA PODSTAWIE BADAŃ MODELOWYCH

1. Wstęp

Obserwacje konwergencji są rutynowymi pomiarami w polskich kopalniach soli. Istnieje bogata baza wyników tych pomiarów [1]. Konwergencja w praktyce kopalnianej traktowana jest jako wskaźnik zagrożenia zawałowego. Przyjmowana jest także jako parametr funkcji wpływu opisującej nieckę osiadań [3, 4]. Brak jednak ciągle podstawowej analizy wyników pomiarów konwergencji, ich interpretacji i wyłonienia jej zależności od warunków geometrycznych i fizycznych.

W ostatnich latach podjęte zostały próby interpretacji zjawiska zaciskania wyrobisk solnych w oparciu o modele fizyczne przy użyciu złożonych programów obliczeniowych [6]. Nie można przeprowadzać interpretacji czy prognoz zachowania górotworu, także w skali pojedynczego chodnika, bez rozpoznania własności przyjętego do obliczeń modelu. Elementem tego w odniesieniu do górotworu solnego jest ta praca.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów prawa materiałowego i kształtu wyrobiska na konwergencję wyrobiska chodnikowego, obliczaną numerycznie programem metody elementów skończonych. Podstawą analizy były wyniki szeregu zadań tak ułożonych, aby można było określić związki funkcyjne między parametrami fizycznymi i geometrycznymi a konwergencją chodnika.

2. Procedury obliczeń numerycznych

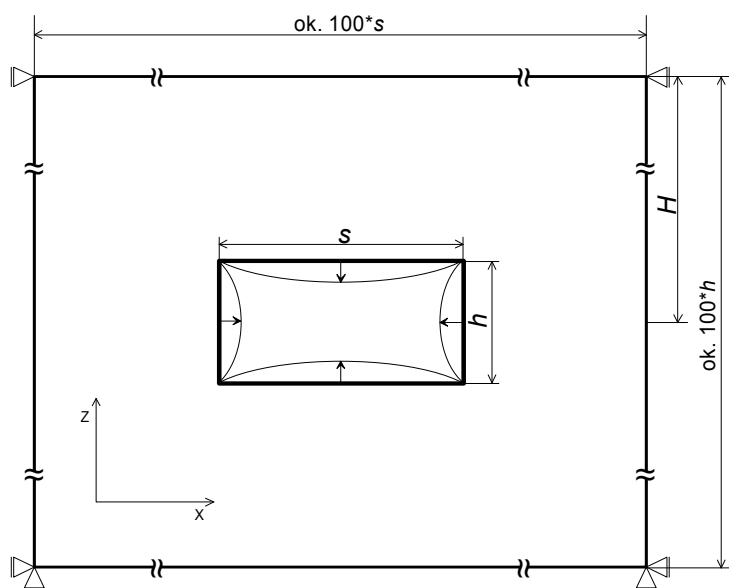
Badania konwergencji polegały na: (I) przyjęciu modelu fizycznego i matematycznego, (II) ustaleniu zakresu wartości parametrów modelu, (III) sformułowaniu zestawu zadań

* Instytut Mechaniki Górotworu, Polska Akademia Nauk, Kraków

z danymi wejściowymi do programu obliczeniowego Cosmos/M, (IV) obliczeniach numerycznych programem Cosmos/M z zapisem przemieszczeń, (V) wyliczeniach przyrostów przemieszczeń na konturze wyrobiska, konwergencji i jej przyrostów w czasie oraz (VI) analizie wyników i formułowaniu związków funkcyjnych.

Najprostszym obiektem geometrycznym do badań konwergencji w górotworze solnym jest wyrobisko chodnikowe o przekroju prostokątnym i wymiarach s , h w jednorodnym, izotropowym ośrodku o właściwościach sprężysto-lepkich w płaskim stanie odkształcenia (rys. 1). Właściwości ośrodka opisano prawem liniowej sprężystości Hooke'a o parametrach E i ν oraz potęgowym prawem pełzania Nortona o parametrach B i n [2, 8, 9, 11].

Wpływ brzegu modelu na badane związki został zminimalizowany przez oddalenie go od analizowanego obszaru o odległość równą co najmniej pięćdziesięciokrotnej szerokości wyrobiska. Założono przemieszczeniowe warunki brzegowe, przy czym górny brzeg modelu pokrywał się z przekrojem płaszczyzny powierzchni terenu. Litostatyczny stan naprężeń pierwotnych osiągnięto przez symulację procesu pełzania ośrodka w długim okresie, co najmniej 1000 lat. Ograniczono zakresy wartości parametrów geometrycznych (smukłość) i fizycznych (parametry prawa konstytutywnego: E , ν , B , n) do najczęściej przytaczanych w literaturze [10].



Rys. 1. Model geometryczny badanego zagadnienia

Konwergencja powierzchniowa [5] jest syntetycznym wskaźnikiem opisującym zaciskanie wyrobiska chodnikowego i dotyczy przyrostu pola powierzchni przekroju poprzecznego chodnika. Wyrażana jest wartościami ujemnymi. W tekście artykułu umownie przyj-

muje się, że wyrażenie „najmniejsza wartość konwergencji” (i analogiczne) odnosi się do jej wartości bezwzględnej.

W analizie używano następujących oznaczeń:

h, s — wysokość i szerokość przekroju chodnika;

λ — smukłość przekroju chodnika równa ilorazowi jego wysokości przez szerokość;

ξ_p — względna konwergencja powierzchniowa natychmiastowa chodnika równa stosunkowi przyrostu pola powierzchni przekroju chodnika do jego powierzchni;

$\Delta^v \xi_p / \Delta t$ — przyrost względnej konwergencji powierzchniowej w 20. roku zaciskania pustki.

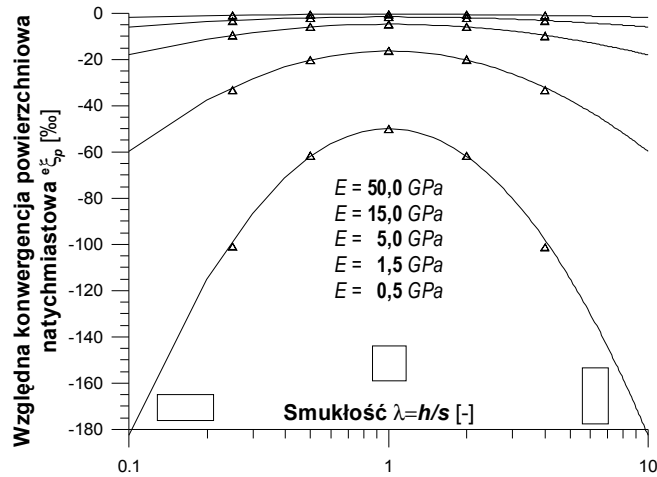
3. Konwergencja natychmiastowa i w trakcie pelzania w chodnikach o różnej smukłości

Kształt przekroju chodnika jest jednym z czynników najbardziej znacząco wpływających na sposób zaciskania wyrobiska. Wymiary chodnika nie wpływają na wartość względnej konwergencji [6]. W pracy [7] przedstawiającej wyniki badań wielopoziomowych struktur zauważono, że konwergencja powierzchniowa kopalni (ξ_K) jest funkcją kwadratu logarytmu smukłości wielopoziomowej struktury kopalni (λ_s). Cechą charakterystyczną tej relacji było to, że $\xi_K(\lambda_s) = \xi_K(\lambda_s^{-1})$.

Wstępna analiza wyników badań konwergencji wskazywała na podobną relację w odniesieniu do wyrobisk o odwrotnych smukłościach takich, że dla $\lambda = h/s$ i $\lambda' = h'/s'$ zachodzi: $\lambda\lambda' = 1$. Badanie wpływu smukłości prostokątnego przekroju chodnika na natychmiastową konwergencję przeprowadzono dla $\lambda = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0$. Rozpatrywano kilka wartości parametrów mechanicznych ośrodka: modułu Younga $E = 0,5; 1,5; 5,0; 15,0$ i $50,0$ GPa oraz współczynnika Poissona $\nu = 0,2; 0,3$ i $0,4$. Wynik obliczeń $5 \times 5 \times 3 = 75$ zadań prezentuje się jako funkcję smukłości przekroju chodnika (rys. 2).

Na wykresie (rys. 2) każdej smukłości odpowiada pięć punktów dla pięciu wartości E . Wpływ na konwergencję współczynnika Poissona w zakresie od 0,2 do 0,4 był nieznaczny. Maksymalna różnica konwergencji powierzchniowej dla skrajnych wartości ν wystąpiła przy $\lambda = 1$ i $E = 0,5$ GPa i wyniosła 5%, dlatego dalsze rozważania ograniczono tu do badania związków E i λ z konwergencją. Najmniejsze wartości konwergencji otrzymano dla chodników o przekroju kwadratowym $\lambda = 1$. Wraz z różnicowaniem wymiarów pionowego h i poziomego s przekroju chodnika wartości konwergencji wzrastają, a konwergencje chodników o smukłości λ i $1/\lambda$ są takie same. Przy zastosowaniu logarytmicznej skali λ ujawnia się na wykresie symetria wyników obliczeń konwergencji względem pionowej osi $\lambda = 1$.

Wyniki symulacji pokazują wyraźny wpływ modułu Younga, im mniejsza wartość E (większa odkształcalność) tym większe wartości konwergencji i większy wpływ smukłości chodnika.



Rys. 2. Konwergencja powierzchniowa natychmiastowa w funkcji smukłości

Wyniki obliczeń konwergencji odpowiadające poszczególnym wartościom E aproksymowano funkcjami opisującymi zależność konwergencji powierzchniowej od smukłości chodnika. Funkcje te można zapisać ogólnym wzorem:

$${}^e\xi_p(\lambda) = c_1 + c_2 \ln^2 \lambda, \quad (1)$$

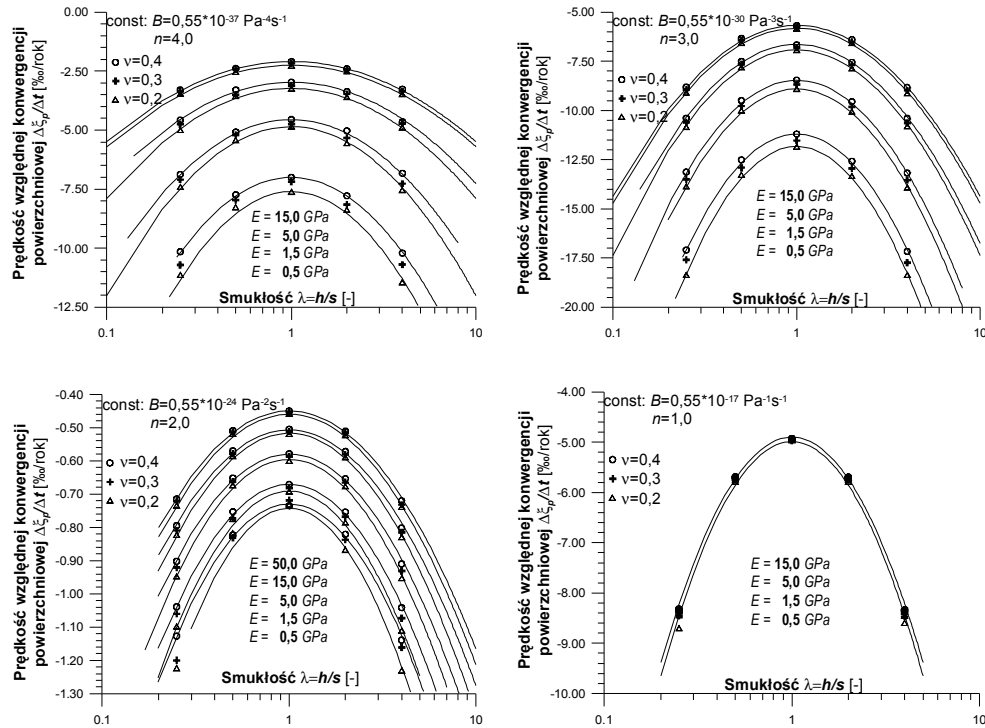
gdzie c_1 i c_2 są pewnymi stałymi. Między stałymi zachodzi relacja: $c_2 = 0,50c_1$, czyli:

$${}^e\xi_p(\lambda) = c_1(1 + 0,50 \ln^2 \lambda). \quad (2)$$

Stała c_1 jest równa natychmiastowej konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym $\lambda = 1$ i jest równa ekstremum funkcji aproksymującej zależność względnej konwergencji powierzchniowej od smukłości przekroju chodnika dla ośrodka o danym E .

Wielkością charakteryzującą zaciskanie w trakcie pełzania górotworu jest prędkość konwergencji. W drugiej serii zadań badano wpływ smukłości na prędkość względnej konwergencji powierzchniowej. Określano zaciskanie wyrobiska w 20. roku dla tego samego jak poprzednio zakresu wartości λ , E i v oraz dodatkowo dla wartości powiązanych ze sobą par parametrów (B, n) potęgowego prawa pełzania: $(B, n) = (0,55 \cdot 10^{-17} \text{ Pa}^{-1}\text{s}^{-1}, 1,0)$; $(0,55 \cdot 10^{-24} \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}, 2,0)$; $(0,55 \cdot 10^{-30} \text{ Pa}^{-3}\text{s}^{-1}, 3,0)$ i $(0,55 \cdot 10^{-37} \text{ Pa}^{-4}\text{s}^{-1}, 4,0)$. Wyniki przyrostów względnej konwergencji powierzchniowej $5 \times 4 \times 3 \times 4 = 240$ zadań przedstawiono na czterech wykresach (rys. 3), osobno dla każdej pary (B, n) . W analizie pominięto mniej istotny wpływ współczynnika Poissona.

Wykresy na rysunku 3 mają kształt analogiczny do wykresów na rysunku 2. Występuje także symetria względem pionowej osi $\lambda = 1$ przy wprowadzeniu logarytmicznej skali smukłości. Podobny jak poprzednio jest też wpływ wartości modułu Younga, im mniejsze E , tym prędkość konwergencji większa.



Rys. 3. Prędkość względnej konwergencji powierzchniowej w funkcji smukłości dla różnych wartości parametrów prawa pełzania

Zmienność wartości konwergencji zależy od poszczególnych wartości par B , n . Wraz z obniżaniem wartości parametru n (od $n = 4$ do $n = 1$) przedział wartości prędkości konwergencji dla poszczególnych wartości λ zmniejsza się i przy $n = 1$ moduł Younga nie ma znaczenia.

Funkcja aproksymacyjna wyrażająca szukany związek ma analogiczną postać jak (2), ale zmienną zależną jest teraz przyrost konwergencji w czasie:

$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t} = c_3 + c_4 \ln^2 \lambda \quad (3)$$

Stosunek współczynników w funkcji (3) zawarty jest w przedziale $0,30 \leq c_4/c_3 \leq 0,33$.

Zastępując stosunek współczynników c_4/c_3 przez pewną stałą c_5 związek (3) można w przybliżeniu wyrazić funkcją:

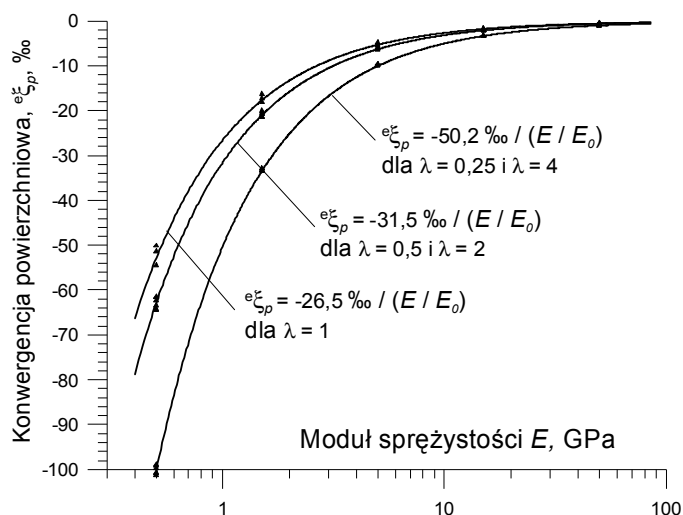
$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t} = c_3 (1 + c_5 \ln^2 \lambda) \quad (4)$$

gdzie $c_5 \approx 0,33$.

Dla $\lambda = 1$ wartość stałej c_3 jest prędkością konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym w fazie pełzania w ośrodku o danych wartościach (B, n) .

4. Wpływ modułu Younga na konwergencję natychmiastową i w trakcie pełzania

W poprzednim rozdziale przedstawiono zależność względnej konwergencji powierzchniowej natychmiastowej od smukłości przekroju wyrobiska. Wyniki obliczeń tych samych co poprzednio zadań przedstawiono w tym rozdziale na wykresie zależności konwergencji od modułu Younga E (rys. 4).



Rys. 4. Zależność sprężystej konwergencji powierzchniowej od E

Wartość konwergencji powierzchniowej jest największa dla $E = 0,5$ GPa (duża odkształcalność), a najmniejsza dla $E = 50$ GPa (mała odkształcalność). Poszukiwano funkcji opisującej zależność względnej konwergencji powierzchniowej od modułu Younga dla poszczególnych wartości λ . Funkcją tą jest hiperbola zmiennej E/E_0 , wykazująca zbieżność do asymptoty $e\xi_p = 0$:

$$e\xi_p(\lambda, E) = \frac{e\xi_p(\lambda)}{E/E_0} \quad (5)$$

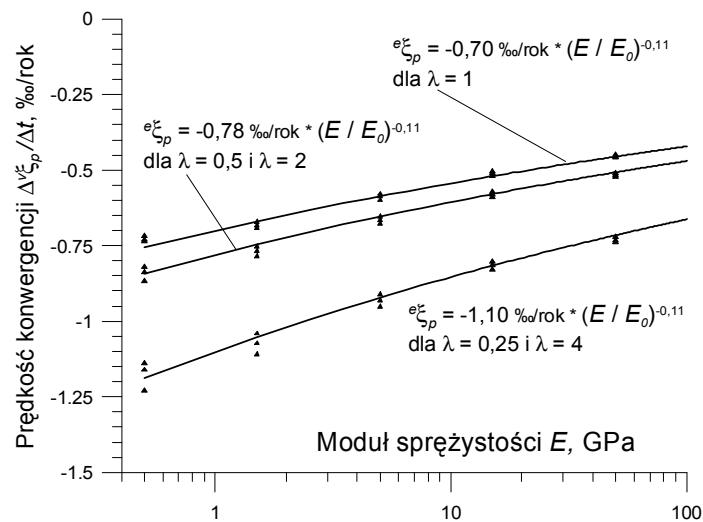
Analiza wymiarowa wykazała konieczność wprowadzenia do wzoru wielkości $E_0 = 1$ GPa.

Wprowadzając funkcję ${}^e\xi_p(\lambda)$ zapisaną wzorem (1) otrzymano:

$${}^e\xi_p(\lambda, E) = \frac{c_1 + c_2 \ln^2 \lambda}{E / E_0} \quad (6)$$

Szukając znaczenia stałych w tej funkcji przyjęto najpierw $E = E_0$. Okazało się, że dla $\lambda = 1$ otrzymano $c_1 = 12,5\%$ i jest to wartość względnej konwergencji powierzchniowej chodnika o przekroju kwadratowym w ośrodku o module Younga $E = 1$ GPa. Natomiast jeżeli $\lambda = e$ (podstawa logarytmu naturalnego), to c_2 równe jest różnicy konwergencji chodników o $\lambda = 1$ i $\lambda = e$. Różnica ta ma wartość 26,5%.

Prędkość zaciskania wyrobiska jest konsekwencją jego właściwości sprężystych i lepkich górotworu, dlatego parametry prawa Hooke'a wpływają także na prędkość konwergencji. W następnym badaniu poszukiwano zależności prędkości względnej konwergencji powierzchniowej w 20. roku zaciskania pustki od modułu Younga. Wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 5 pokazują — podobne jak rysunku 4 — związki konwergencji z modulem Younga. Dla małych wartości modułu Younga wartości konwergencji są większe.



Rys. 5. Prędkość konwergencji powierzchniowej lepkiej w funkcji E dla $n = 2,0$ i $B = 0,12 \cdot 10^{-24} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Przeprowadzając analogiczne do poprzedniego postępowanie, znaleziono funkcję opisującą zależność prędkości względnej konwergencji od E i λ w postaci:

$$\frac{\Delta^v \xi_p}{\Delta t}(\lambda, E) = \frac{-0,7\%/rok - 0,19\%/rok \ln^2(\lambda)}{(E / E_0)^{0,11}} \quad (7)$$

Wartość $-0,7\%$ /rok jest prędkością względną konwergencji powierzchniowej wyrobiska o przekroju kwadratowym w ośrodku o $E = 1$ GPa, a $-0,19\%$ /rok jest różnicą prędkości konwergencji powierzchniowej pomiędzy wyrobiskami o przekrojach $\lambda = e$ i $\lambda = 1$. Wykładnik o wartości 0,11 w mianowniku (9) wyraźnie łagodzi wpływ wartości modułu Younga na konwergencję.

5. Podsumowanie

- Z badań wynika, że wartości względnej konwergencji powierzchniowej oraz jej prędkości pozostają takie same dla wyrobisk o smukłości λ i jej odwrotności $1/\lambda$.
- Zależności względnej konwergencji powierzchniowej i jej prędkości od logarytmu smukłości przekroju chodnika można opisać funkcjami parabolicznymi. Wartość konwergencji i jej prędkości osiąga minimum dla $\lambda = 1$.
- Zależności względnej konwergencji powierzchniowej i jej prędkości od modułu Younga można opisać funkcjami hiperbolicznymi. Wartość konwergencji i jej prędkości maleje asymptotycznie do zera ze wzrostem modułu Younga.
- Wpływ współczynnika Poissona w zakresie od 0,2 do 0,4 na konwergencję nie jest znaczący. Wartość konwergencji i jej prędkości zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości współczynnika Poissona. Spowodowane jest to tym, że przy jednakowym module Younga wraz ze wzrostem współczynnika Poissona rośnie moduł ściśliwości K i tym samym materiał staje się mniej odkształcalny.
- Przedstawione związki funkcyjne i wartości stałych uzyskano na drodze obliczeń numerycznych. W rzeczywistości na wartości konwergencji, jej rozkłady czasowe i przestrzenne mają wpływ nieuwzględniane w tego typu badaniach czynniki, takie jak na przykład przekroczenie wytrzymałości skał stropowych, bardziej złożone i zróżnicowane właściwości fizyczne górotworu czy stan naprężeń pierwotnych odbiegający od litostatycznego.

LITERATURA

- [1] *Bieniasz J., Wojnar W.*: Zarys historii pomiarów i wybrane wyniki obserwacji zjawiska konwergencji wyrobisk w pokładowych złożach soli. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 23, z. spec. 1, 2007, 133–142
- [2] *Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.*: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Katowice, Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1994
- [3] *Hejmanowski R.*: Czasoprzestrzenny opis deformacji górotworu wywołanych filarowo-komorową eksploatacją złoża pokładowego. Kraków, UWNB AGH, Rozprawy Monograficzne, nr 131, 2004
- [4] *Kortas G.*: Przemieszczenia i odkształcenia w wielopoziomowych komorowo-filarowych kopalniach soli. *Zeszyty Naukowe AGH*, nr 1207, *Geodezja*, z. 101, UWND AGH, Kraków, 1989
- [5] *Kortas G.*: Konwergencje wyrobisk, [w:] Kortas G. (red.), *Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli*. Kraków, IGSMiE PAN 2004
- [6] *Kortas G.*: Modelowanie konwergencji i stanu naprężeń wokół wyrobisk, [w:] Kortas G. (red.), *Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli*. Kraków, IGSMiE PAN 2004

- [7] *Kortas G.*: The influence of the form of a salt mine on the displacement of the ground surface. *Archiwum Górnictwa*, vol. 52, iss. 1, 2007, 107–120
- [8] *Kortas G., Maj A.*: Modelowanie konwergencji w modularnej strukturze wielopoziomowej kopalni soli. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, t. 7, nr 3–4, 2005, 237–252
- [9] *Prij J.*: Finite elementenanalyse am gebirgmechanischen verhalten von steinsalz. *Symposium „Górnictwo surowców chemicznych — zbiorniki podziemne — środowisko naturalne”*, AGH, Kraków, 8–10.11.1984, 333–360
- [10] *Sobczyk J., Kortas G.*: Określenie współczynników potęgowego prawa pełzania soli kamiennej na podstawie testów laboratoryjnych. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, t. 5, nr 3–4, 2003, 421–432
- [11] *Ślizowski J., Urbańczyk K.*: Influence of depth on rock salt effort around the single chamber. Kraków, IGSMiE PAN 2004