

*Sławomir Porzucek**, *Marek Ciało***, *Janusz Madej**

GRAWIMETRYCZNE ODWZOROWANIE GEOMECHANICZNEGO MODELU STREF ROZLUŻNIEŃ W OTOCZENIU STAREGO WYROBISKA ***

1. Wprowadzenie

Bezpieczne zagospodarowanie terenów pogórnicznych uwarunkowane jest dobrym rozpoznaniem przypowierzchniowych (ale również i głębszych) partii górotworu pod kątem istniejących pustek i rozluźnień. Do potwierdzenia zinwentaryzowanych i lokalizacji niezinventaryzowanych zaburzeń w górotworze stosuje się metody geofizyczne, w tym często odporną na zakłócenia metodę mikrogawimetryczną [5–7, 13, 14].

W trakcie interpretacji wyników badań mikrogawimetrycznych często napotymano trudności związane ze znalezieniem takiego modelu grawimetrycznego, opisującego geometrycznie i gęstościowo zmiany w górotworze, dla którego rozkład jego efektu grawitacyjnego odpowiadałby pomierzonej anomalii siły ciężkości. W wielu przypadkach, mimo znanych lub spodziewanych rozmiarów zaburzeń, rezultaty modelowania nie były zadowalające. Wieloletnia analiza rozkładów anomalii siły ciężkości utwierdziła autorów w przekonaniu, że niemożliwość dopasowania modeli spowodowana jest zmianą gęstościową ośrodka nad starymi wyrobiskami. Potwierdziły to badania mikrogawimetryczne wykonane na terenie byłej kopalni rud cynku i ołowiu Bolesław [14].

W sąsiedztwie starych, płytko zalegających wyrobisk i zrobów może nastąpić proces degradacji własności odkształceniowych i wytrzymałościowych górotworu w ich otoczeniu, prowadząc do wytworzenia się wtórnej strefy zniszczenia [11, 16].

W strefie tej następuje obniżenie gęstości, co uwidacznia się w rozkładzie anomalii siły ciężkości. Powstanie takiej strefy w pewnych warunkach może doprowadzić do powstania deformacji nieciągłych na powierzchni terenu [3].

* Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Praca finansowana z projektu badawczego nr 0482/T02/2006/31

W artykule przedstawiono wpływ powyższych stref na modelowanie grawimetryczne i wynikające z tego implikacje.

2. Modelowanie rozwoju stref zniszczenia w otoczeniu budowli podziemnej

Do symulacji procesu rozwoju strefy spękań w otoczeniu budowli podziemnej zastosowano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie [2, 9]. W metodzie redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) zakłada się, że proces zniszczenia wywołany jest stopniowym obniżaniem parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Metoda ta wskazuje przebieg powierzchni poślizgu w miejscu, w którym najwcześniej wystąpi stan równowagi naprężenia stycznego i wytrzymałości na ścinanie. Przeprowadzanie analizy stateczności metodą SSR polega na swoistej symulacji, podczas której serią wskaźników stateczności (FS) przeprowadza się obniżenie kohezji i kąta tarcia wewnętrznego, czyli parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Można uznać, iż wskaźnik stateczności jest definiowany dla dwóch materiałów: pierwszy to aktualny, rzeczywisty materiał, a drugi to materiał fikcyjny, dla którego układ traci stateczność. W obliczeniach zakłada się ośrodek sprężysto-plastyczny spełniający zmodyfikowany warunek plastyczności Coulomba–Mohra. Wszystkie obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem programu FLAC i opartego o metodę różnic skończonych [8].

Celem przeprowadzonych obliczeń było nie tylko określenie wartości wskaźnika stateczności układu, ale także obserwacja rozwoju stref uplastycznienia w otoczeniu budowli podziemnej. Z pewnym przybliżeniem mogą one być utożsamiane ze strefami zniszczenia.

Rozpatrywano tutaj prostokątną komorę o wysokości 10 m i szerokości 20 m zlokalizowaną na głębokości 10 m (poziom stropu komory). Przyjęto, że komora jest zlokalizowana w jednorodnym ośrodku charakteryzującym się ciężarem objętościowym równym $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, kohezją 100 kPa oraz kątem tarcia wewnętrznego równym 33° (założono także moduł Younga ośrodka równy 500 MPa oraz współczynnik Poissona równy 0,3). Problem rozpatrzono w płaskim stanie odkształcenia. Ze względu na symetrię zagadnienia analizowano tylko połowę modelu. Model numeryczny stanowiła prostokątna tarcza utwierdzona u dołu i po bokach.

Na dolnej krawędzi tarczy oraz na krawędzi pokrywającej się z osią symetrii modelu przyjęto warunki przemieszczeniowe. Rozpatrywano tutaj dwa warianty odpowiadające zmien-nemu pierwotnemu stanowi naprężenia.

W wariantcie pierwszym założono na krawędzi bocznej warunki przemieszczeniowe, co odpowiada przyjęciu pierwotnego naprężenia poziomego równego:

$$p_x = \frac{\nu}{1-\nu} p_z$$

gdzie:

p_x, p_z — pozioma i pionowa składowa pierwotnego stanu naprężenia,
 ν — współczynnik Poissona.

W wariancie pierwszym poziome naprężenie pierwotne jest zatem równe $p_x = 0,43p_z$. Od wielu lat na całym świecie prowadzone są pomiary pierwotnego stanu naprężenia w ośrodkach skalnych i gruntowych. Ich wyniki wskazują, że na niewielkich głębokościach naprężenie poziome może być nawet kilkukrotnie większe od poziomego [1, 15]. Z tego względu w wariancie drugim przyjęto, że pierwotne naprężenie poziome jest równe pionowemu ($p_x = p_z$). Taka zmiana pierwotnego stanu naprężenia praktycznie nie zmienia wartości wskaźnika stateczności układu, ale ma pewien wpływ na rozkład stref uplastycznienia w otoczeniu komory. Dla wariantu pierwszego uzyskano wskaźnik stateczności (FS) równy 2,74, a dla drugiego 2,71. Tak niewielkie różnice wartości FS wynikają z faktu, że metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie jest praktycznie „nieczuła” na zróżnicowanie pierwotnego stanu naprężenia [4, 12].

Obliczenia przeprowadzono dla kolejnych etapów, ręcznie obniżając parametry wytrzymałościowe z krokiem redukcji równym 0,01. Dla każdego etapu obliczeń analizowano zmiany rozkładu stref uplastycznienia w otoczeniu komory.

3. Modelowanie grawimetryczne

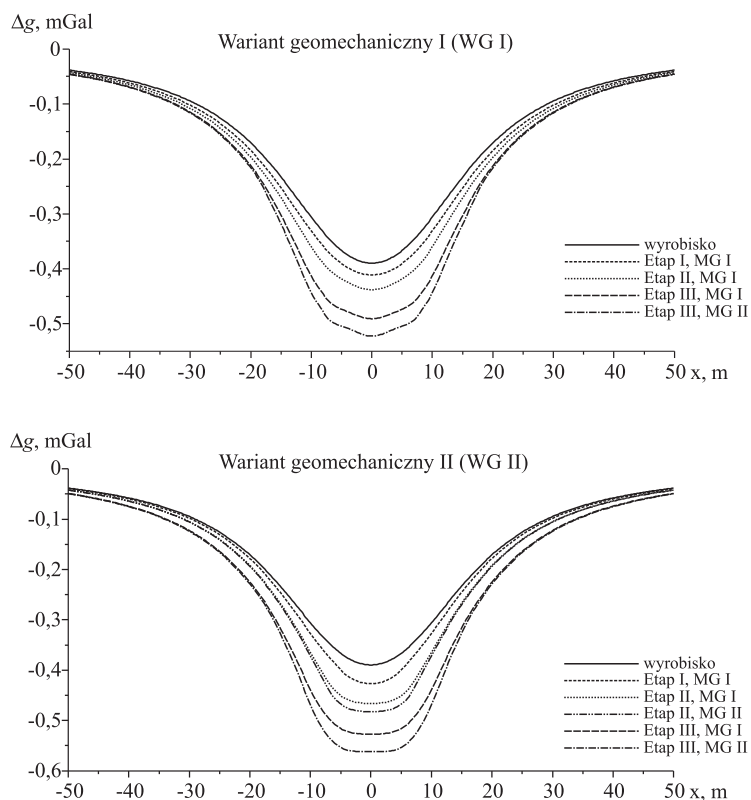
Do modelowania grawimetrycznego wybrano z każdego wariantu trzy etapy, które charakteryzowały się znaczną zmiennością zasięgu stref uplastycznienia. O ile geometria całego układu jest znana, to niestety niemożliwa jest precyzyjna ocena zmian gęstości w elementach modelu geomechanicznego, gdzie nastąpiły odkształcenia. Zgodnie z naturą zjawiska założono, że zmiany gęstości są zmienne począwszy od wyrobiska ku powierzchni i mają one charakter liniowy.

Dla wszystkich trzech etapów w obu wariantach geomechanicznych (WG) wyliczono efekt grawitacyjny pochodzący od wyrobiska i rozluźnień występujących w strefach uplastycznienia (rys. 1).

Do obliczeń wykorzystano algorytmy obliczające efekt grawitacyjny od ciał dwuwymiarowych. Obliczenia wykonano dla dwóch modeli gęstości (MG), przy przyjętej gęstości górotworu $2,5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. W obu modelach w obszarach poddanych odkształceniom założono liniową zmianę gęstości, począwszy od stropu wyrobiska ku powierzchni (tab. 1). Od stropu wyrobiska do spągu założono również liniowe obniżenie gęstości, z tym że w spągu (i poniżej) przyjęto wartość obniżenia stałą i równą $-0,2 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Kształty rozkładów efektu grawitacyjnego w wariancie geomechanicznym I (WG I) są bardzo zbliżone do siebie — tylko w rozkładach otrzymanych dla etapu III widoczne jest spłaszczenie rozkładów w okolicach minimum; natomiast w WG II efekt spłaszczenia widoczny jest już w etapie II.

Następnie przystąpiono do modelowania grawimetrycznego otrzymanych efektów (zwanymi dalej anomaliami) przy założeniu, że pochodzą one od jednego ciała o przekroju prostokątnym, tak jak modelowe wyrobisko. Modelowanie przeprowadzono przyjmując rozmiary wyrobiska jako wyjściowe, a celem ograniczenia ilości rozwiązań przyjęto gęstość ośrodka jako znaną i wynoszącą $2,50 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Rys. 1. Rozkład efektu grawitacyjnego od modelu wyrobiska z rozluźnieniami wokół niego

TABELA 1

Modele zmian gęstości w górotworze od stropu wyrobiska ku powierzchni

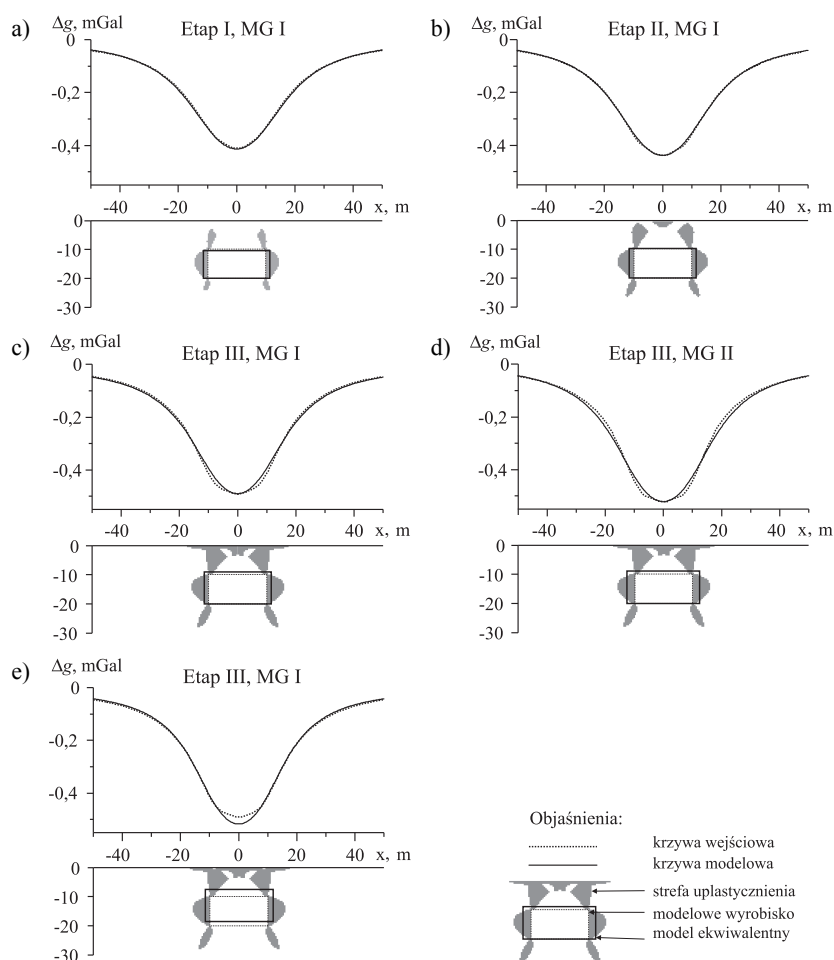
	WG I		WG II	
	MG I	MG II	MG I	MG II
	$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Etap I	-0,50÷-0,00	X	-0,50÷-0,20	X
Etap II	-0,75÷-0,00	X	-0,75÷-0,20	-0,75÷-0,35
Etap III	-1,00÷-0,20	-1,00÷-0,50	-1,00÷-0,20	-1,00÷-0,50

W wyniku modelowania otrzymano rozmiary ciała ekwiwalentnego, dla którego dopasowanie krzywej modelowej do wyliczonego efektu grawimetrycznego od modelu geomechanicznego było jak najlepsze. Rezultaty modelowania przedstawiono na rysunku 2 i 3.

Wariant geomechaniczny I

Etap I i II Dopasowanie krzywej modelowej do rozkładu anomalii wyjściowej jest bardzo dobre (rys. 2a i b), maksymalna odchyłka nie przekracza 0,01 mGal. Rozmiary modelu są bardzo zbliżone do rzeczywistych kształtów wyrobiska.

Etap III Dla tego etapu rozmiary modelu widocznie odbiegają od przyjętych rozmiarów wyrobiska (rys. 2c i 2d), a maksymalna odchyłka nie przekracza 0,030 mGal. Amplituda otrzymanego rozkładu jest identyczna z teoretycznym, natomiast wyraźnie widoczne są niedopasowania na skłonach anomalii. Na rysunku 2e przedstawiono rozkład bardzo dobrze dopasowujący się do rozkładu anomalii, natomiast amplituda jest różna o ok. 0,03 mGal. W tym przypadku model ciała leży płycej niż w rzeczywistości, a jego rozmiary są większe.

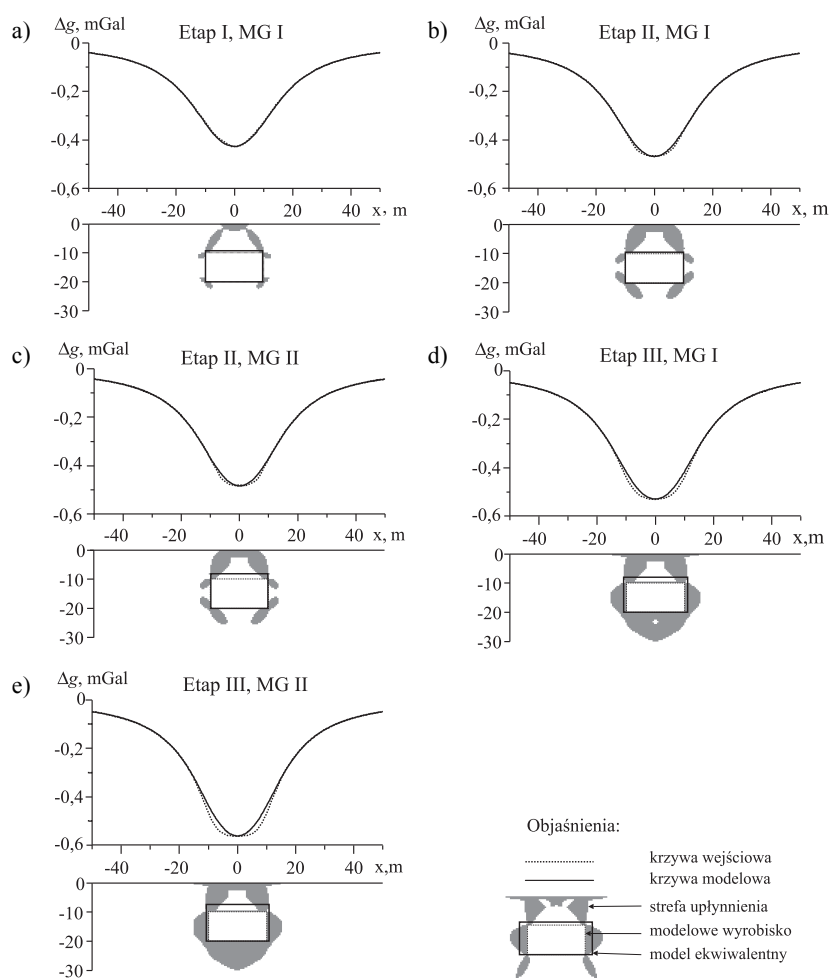


Rys. 2. Wyniki modelowania gravimetrycznego dla wariantu geomechanicznego I (WG I)

Wariant geomechaniczny II

Etap I Podobnie jak w WG I dopasowanie krzywej modelowej do rozkładu anomalii wyjściowej jest bardzo dobre (rys. 3a) i maksymalna odchyłka nie przekracza 0,01 mGal. W stosunku do wymiarów interpretowanego chodnika szerokość modelu jest praktycznie identyczna, ale wysokość jest o 10% większa.

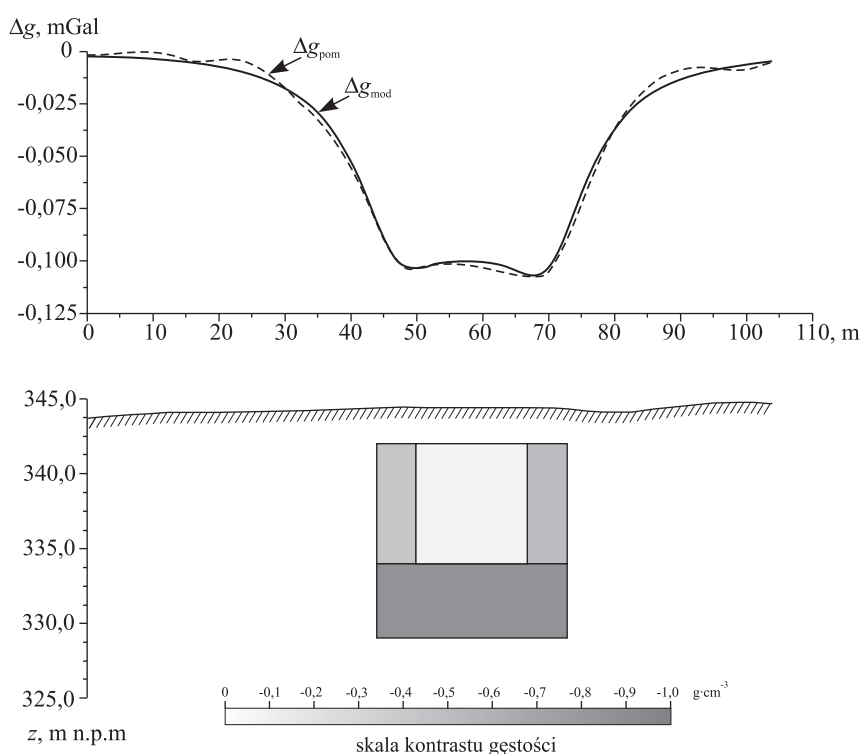
Etap II i III W obu etapach dla obu modeli gęstościowych (MG) (rys. 3b–e) widoczne jest niedopasowanie krzywych modelowych do rozkładu anomalii. Niedopasowanie jest lepiej widoczne dla MG II. Podobnie jak w etapie I szerokość modelu jest bardzo zbliżona do założonego wyrobiska, natomiast strop jest wyraźnie przesunięty ku powierzchni. Niedopasowanie waha się od 0,02 do 0,04 mGal.



Rys. 3. Wyniki modelowania grawimetrycznego dla wariantu geomechanicznego II (WG II)

Powyższa analiza wskazuje, że dla badanych wariantów geomechanicznych, dla małych zmian odkształceniowych w górotworze, praktycznie nie jest możliwe ich zarejestrowanie przy użyciu metody mikrogravimetrycznej. Dopiero większe zmiany odkształceniowe, a co za tym idzie większe zmiany gęstości w górotworze, mogą uwidaczniać się w interpretacji wyników powyższą metodą. Otrzymane wyniki dla drugiego wariantu geomechanicznego (WG II) wskazują, że mógłby on dobrze opisać anomalie zarejestrowane w warunkach górotworu olkuskiego [14].

Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowaną na obszarze OG KGH Bolesław, względnie ujemną anomalię siły ciężkości i model grawimetryczny, potwierdzony późniejszymi wierceniami. Kształt anomalii najbardziej zbliżony jest do wariantu geomechanicznego II (WG II) przy modelu gęstościowym (MG II) w etapie II i III. Wyinterpretowany model grawimetryczny w przybliżeniu zgadza się z rozkładem odkształceń (efekt grawitacyjny od zmian gęstościowych poniżej ciała jest do zaniedbania). Analizując ten przypadek i wiele podobnych oraz biorąc pod uwagę przedstawione prace modelowe wydaje się, że zmiany gęstości przyjęte w modelach gęstościowych (MG) mogą być większe niż założone przez autorów.



Rys. 4. Wyniki modelowania grawimetrycznego anomalii siły ciężkości z rejonu ZGH Bolesław [14]

4. Podsumowanie

Reasumując, nie jest proste określenie zmian gęstościowych zachodzących nad wyrobiskami bez znajomości rozmiarów tych wyrobisk. W chwili obecnej prowadzone są badania mikrograwimetryczne nad znanymi, płytko leżącymi wyrobiskami. Znajomość rozmiarów wyrobisk powinna pozwolić na wyeliminowanie efektu grawitacyjnego od nich z rozkładu siły ciężkości. Taki zabieg spowoduje, że pozostanie tylko wpływ od zmian w otoczeniu wyrobiska, a w szczególności nad nim.

Niemniej jednak wykrycie stref rozluźnień ma zasadnicze znaczenie przy lokalizacji otworów podszadających.

LITERATURA

- [1] *Brown E.T. and Hoek E.*: Trends in relationships between measured rock in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, 1978, s. 211–215
- [2] *Cala M., Flisiak J.*: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers, 2001, 111–114
- [3] *Cala M., Jarczyk M., Postawa J.*: Numeryczna analiza możliwości utraty stateczności wyrobisk zlokalizowanych na niewielkiej głębokości. *Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 4/1, 2004, 69–78
- [4] *Cala M.*: Numeryczne metody analizy stateczności zboczy. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie, nr 171, 2007
- [5] *Fajkiewicz Z.*: Geneza anomalii siły ciężkości i jej pionowego gradientu nad pustkami występującymi w skałach kruchych. *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 73/3–74/4, r. XIX, 1985, 3–13
- [6] *Fajkiewicz Z., Radomiński J.*: Nowe możliwości grawimetrycznego odwzorowania stanu naruszenia górotworu ekspansją pustek poeksploatacyjnych. *Archives of Mining sciences*, vol. 41, Issue 3, 1996, 325–339
- [7] *Fajkiewicz Z., Jakiel K., Madej J., Porzucek S.*: Badania geofizyczne w przywracaniu wartości użytkowych części obszaru górniczego byłej kopalni „Pstrowski”. Konferencja. Warsztaty’99 — Zagrożenia naturalne w górnictwie, Sesja nt. „Oddziaływanie górniczych zagrożeń na środowisko”, Jaworze k/Bielska Białej, 26–28 maj 1999, 33–40
- [8] *FLAC v. 5.0. Users Manual.* Itasca Consulting Group. Minneapolis, 2005
- [9] *Griffiths D.V., Lane P.A.*: Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, vol. 49(3), 1999, 387–403
- [10] *Jaeger C., Cook G.W.*: *Fundamentals of Rock Mechanics.* Chapman and Hall 1967
- [11] *Ladanyi B.*: Expansion of Cavities in Brittle Media. *Intern. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 1990
- [12] *Lorig L., Varona P.*: Practical slope stability analysis using finite-difference codes. *Slope stability in surface mining* (edited by Hustrulid, McCarter & Van Zyl), Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton, 2000, 115–124
- [13] *Łój M., Madej J., Porzucek S.*: Mikrograwimetria i geofizyka otworowa w badaniach zagrożeń powierzchni terenów pogórnich. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, nr 75, seria: konferencje, nr 41, 2005, 349–356
- [14] *Madej J., Jakiel K., Porzucek S.*: Grawimetryczna weryfikacja modelu rozluźnień nad wyrobiskiem w warunkach górotworu olkuskiego. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, nr 73, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej* 2001, 343–350
- [15] *Reinecker, J., Heidbach, O., Tingay, M., Sperner, B., & Müller, B.*: The release 2005 of the World Stress Map (available online at www.world-stress-map.org), 2005
- [16] *Sterpi D., Sakurai S.*: Numerical Analysis of Laboratory Tests on a Model Tunnel. *International Symposium. Deformation and progressive failure in geomechanics, IS-NAGOYA’97*, Pergamon, 1997, 757–762