

*Sławomir Porzucek**

BADANIA MIKROGRAWIMETRYCZNE NAD PŁYTKO LEŻĄCYMI STARYMI SZTOLNIAMI WYDRAŻONYMI W PIASKOWCU**

1. Wstęp

Na terenie Polski, a szczególnie w jej południowej części, prowadzono podziemną, płytką eksploatację minerałów i surowców skalnych. Wskutek tej działalności powstały wyrobiska, które dzisiaj coraz częściej udostępniane są do celów turystycznych. Ich stateczność i bezpieczeństwo określa się na podstawie badań i modeli geomechanicznych [1]. Narzuca się opracowanie metody pozwalającej na doświadczalne określenie aktualnego stanu górotworu nad podziemnymi obiektami pochodzenia antropogenicznego. W 2007 roku w Katedrze Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH podjęto badania mające za zadanie przybliżyć rozwiązanie tego problemu. Do realizacji zadania wykorzystano metodę mikrograwimetryczną, która m.in. pozwala na śledzenie rozkładu gęstości objętościowej w przypowierzchniowej partii górotworu [2, 3]. Przeprowadzono serię badań nad starymi wyrobiskami, które są dostępne i ich rozmiary można pomierzyć. Znajomość rozmiarów pustek pozwala na wyeliminowanie ich wpływu grawitacyjnego z wartości pomierzonych siły ciężkości. Pozostały efekt grawitacyjny zależy tylko od rozkładu gęstości w górotworze, a przede wszystkim od rozkładu gęstości nad wyrobiskami. Pojawienie się względnie ujemnych mikroanomalií siły ciężkości świadczyć będzie o istnieniu stref o obniżonej gęstości w stosunku do otoczenia. Można założyć, że przyczyną obniżenia gęstości są rozluźnienia w górotworze, które powstały wskutek istnienia w nim wyrobisk. Grawimetryczne prace modelowe pozwolą na przybliżone określenie rozmiarów stref rozluźnień i oszacowanie obniżenia ich średniej gęstości objętościowej. W artykule przedstawiono wyniki badań mikrograwimetrycznych dla trzech wyrobisk prowadzonych w piaskowcu.

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

** Badania przedstawione w artykule finansowane zostały z projektu badawczego Ministerstwa Nauki numer 0482/T02/2006/31

2. Lokalizacja badań

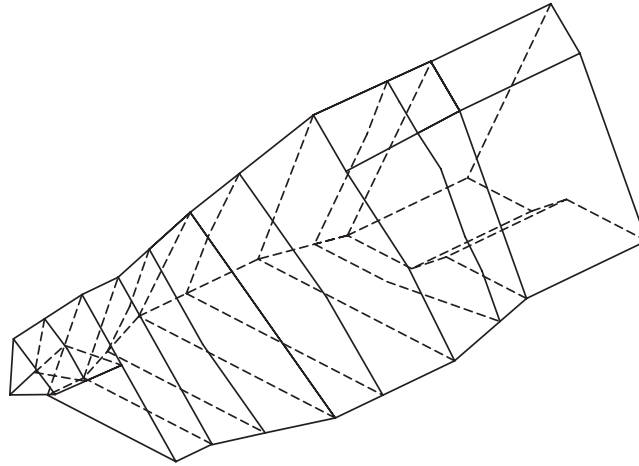
Kilkanaście kilometrów na północ od Krosna znajduje się, utworzony w 1993 r., Czarnorzecko-Strzyżowski Park Krajobrazowy. Na jego obszarze zostało zinwentaryzowanych 14 jaskiń i schronisk podskalnych oraz 18 obiektów pochodzenia sztucznego [7]. Te ostatnie obiekty powstały wskutek podziemnej eksploatacji piaskowców dolnych warstw istebniańskich, która była tu prowadzona od XIX wieku [8]. Wydobywany surowiec służył, w zależności od granulacji ziaren, do produkcji oselek, ostrzałek oraz żaren. Większość ze sztolni wydobywczych uległa zawaleniu lub takiemu przemieszczeniu się skał, która uniemożliwia określenie ich pierwotnego kształtu. Po zapoznaniu się z aktualnym stanem wyrobisk i ich położeniem do badań wybrano trzy sztolnie zlokalizowane w pobliżu miejscowości Czarnorzeki, na zboczach Suchej Góry, których nazwy przyjęto za publikacją „Jaskinie Polskich Karpat Fliszowych” t. 3 [5].

3. Sztolnia „nad Czają I”

Sztolnia „nad Czają I” położona jest w lesie na łagodnym zboczu Suchej Góry. Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie obrazujące dojście i wlot do sztolni. Wykonano również dokładne obmiary geodezyjne sztolni, co pozwoliło na zbudowanie modelu sztolni (rys. 2). Sztolnia ma całkowitą długość ok. 15,5 m i przekrój trójkątny o długości podstawy od 3 do 5 m i wysokości od 3 do 4 m. Ukształtowanie terenu i lokalizacja obiektu pozwoliła na wytyczenie dwóch profili na powierzchni terenu przechodzących nad wyrobiskiem. W profilach wytyczono punkty, w których wykonano badania mikrograwimetryczne oraz pomiary geodezyjne wszystkich trzech składowych w lokalnym układzie współrzędnych.



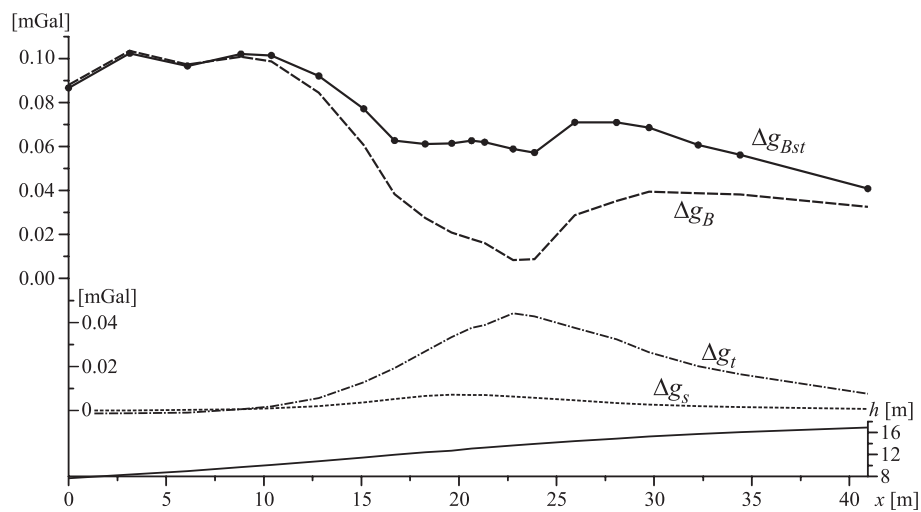
Rys. 1. Dojście i wejście do sztolni „nad Czają I”



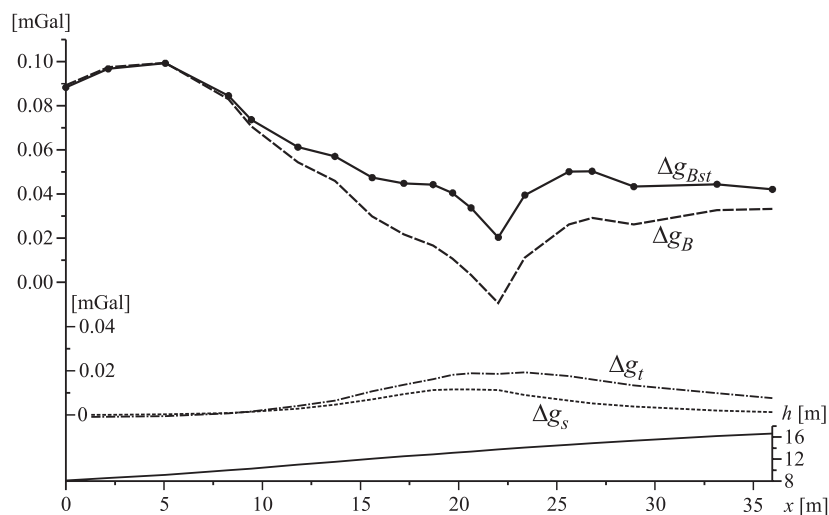
Rys. 2. Trójwymiarowy model sztolni „nad Czają I”

Wyniki pomiarów mikrogravimetrycznych wykonanych w punktach na obu profilach przedstawiono, w postaci mikroanomalia siły ciężkości w redukcji Bouguera Δg_B — rysunki 3 i 4.

Na obu profilach w rozkładzie mikroanomalia siły ciężkości wyraźnie rysuje się względnie ujemna mikroanomalia o trudnej do określenia, z uwagi na trend regionalny, amplitudzie. W skład elementów wywołujących te mikroanomalia na pewno wchodzi istniejąca sztolnia, ale dodatkowo mogą oddziaływać dwa czynniki: obniżenie, będące dojściem do sztolni oraz poszukiwane strefy rozluźnień nad sztolnią.



Rys. 3. Rozkłady siły ciężkości w profilu 1 — sztolnia „nad Czają I”



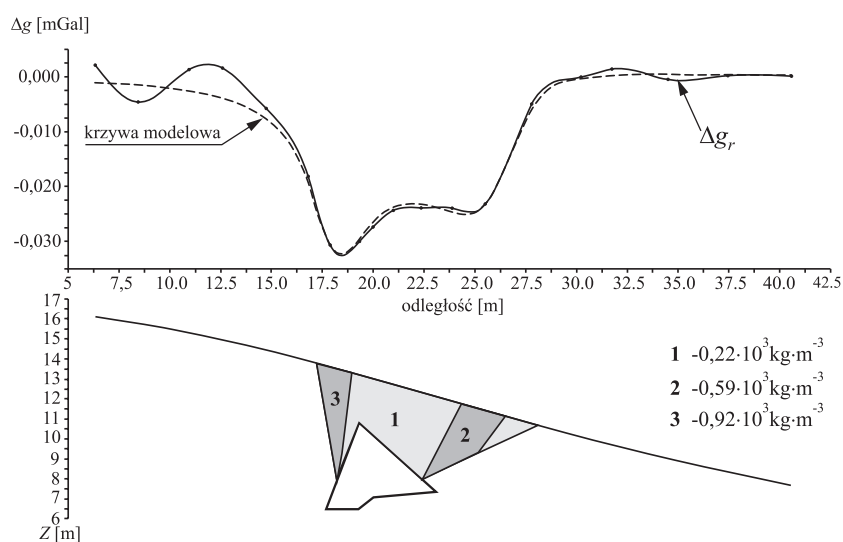
Rys. 4. Rozkłady siły ciężkości w profilu 2 — sztolnia „nad Czają I”

Celem wyeliminowania wpływu sztolni na pomierzoną wartość siły ciężkości wyliczono poprawkę, jako efekt grawitacyjny od modelu wyrobiska przedstawionego na rysunku 2. Do obliczeń użyto autorskiego programu „ModGraw” w oparciu o algorytm przedstawiony przez Hanemana [4]. Rozkład poprawki na wpływ grawitacyjny sztolni Δg_s przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Poprawka osiąga w profilu 1 wartość maksymalną 0,007 mGal, natomiast w profilu 2, z uwagi na większe rozmiary sztolni bezpośrednio pod profilem, wartość 0,015 mGal.

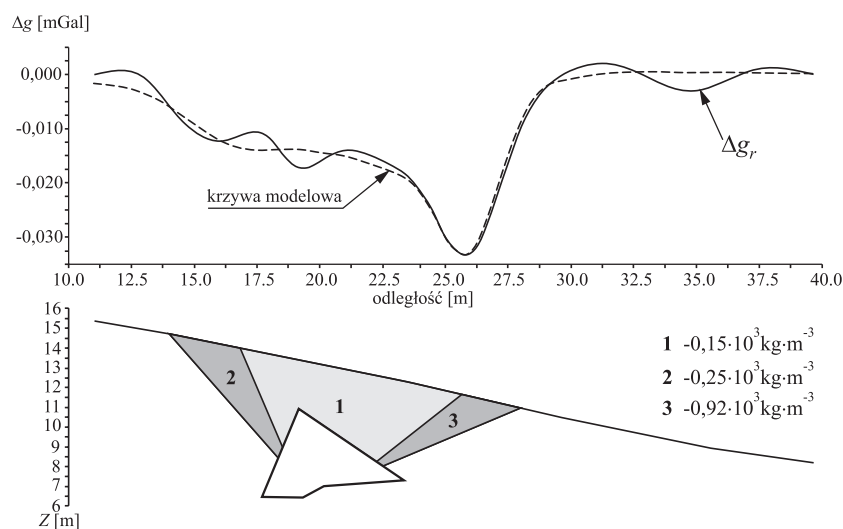
Wyeliminowanie grawitacyjnego wpływu pochodzącego od obniżenia, będącego dojściem do sztolni (rys. 1) wykonano obliczając poprawkę topograficzną siły ciężkości Δg_t , w oparciu o metodę triangulacji opracowaną przez Wójcickiego [9]. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono rozkład tej poprawki, odpowiednio w profilach 1 i 2. Maksymalna wartość poprawki w profilu 1 wyniosła 0,045 mGal, natomiast w profilu drugim tylko 0,019 mGal — z uwagi na większe oddalenie od obniżenia, a co za tym idzie jego mniejszy wpływ grawitacyjny na wartość pomierzoną siły ciężkości.

Po uwzględnieniu obu powyższych poprawek otrzymano rozkład mikroanomalii siły ciężkości oznaczony jako Δg_{Bst} . Można łatwo zauważyć znaczną zmianę rozkładu siły ciężkości w stosunku do rozkładu wyjściowego. Co prawda na obu profilach dalej są widoczne względnie ujemne mikroanomale siły ciężkości, ale ich amplituda uległa znacznemu zmniejszeniu. Można domniemywać, że mikroanomale te pochodzą od rozluźnień istniejących ponad wyrobiskiem. Celem wyodrębnienia z całkowitego pola siły ciężkości efektu grawitacyjnego od tych rozluźnień wyliczono na obu profilach anomalię regionalną, przybliżając ją wielomianem stopnia 3. Po odjęciu jej rozkładu od rozkładu mikroanomalii Δg_{Bst} otrzymano poszukiwaną mikroanomalię rezydualną Δg_r — rysunki 5 i 6. W obu profilach mikroanomalia rezydualna posiada amplitudę ok. 0,03 mGal.

W następnym etapie przeprowadzono modelowanie grawimetryczne mające na celu określenie położenia, rozmiarów i zmian gęstości stref rozluźnień nad sztolnią. Wyniki modelowania przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Grawimetryczny model rozluźnień nad sztolnią „nad Czają I” — profil 1



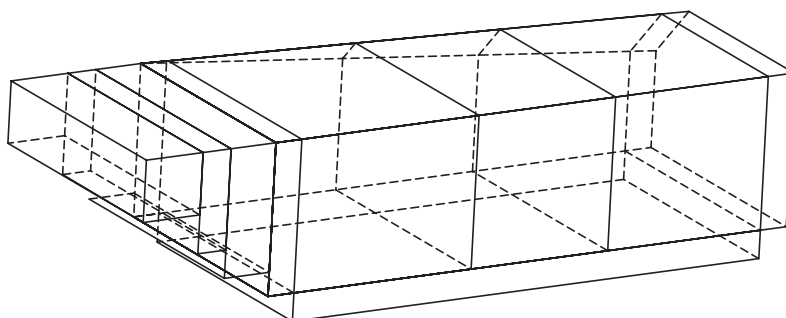
Rys. 6. Grawimetryczny model rozluźnień nad sztolnią „nad Czają I” — profil 2

Modele stworzone dla wyników uzyskanych w profilu 1 i 2 są bardzo podobne do siebie, co wskazuje że rozkład stref rozluźnień nad sztolnią jest zbliżony w obu profilach. Nie

mogło być inaczej, albowiem odległość pomiędzy profilami wynosi ok. 3 m. W obu profilach wyinterpretowano niewielkie rozluźnienia (o kontraście gęstości w stosunku do otoczenia odpowiednio $-0,15$ i $-0,22 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) nad samą sztolnią i strefy po obu stronach sztolni o znacznie większym kontraście gęstości (od $-0,25$ do $-0,92 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Niemożliwe jest stworzenie modelu, który nie posiada stref bocznych — ich brak nie pozwala na dopasowanie nachylenia krzywej modelowej do mikroanomalii rezydualnej na jej skłonach. Taki model podobny jest do modeli prezentowanych wcześniej dla górotworu olkuskiego [6], dla dolomitów kruszczośnych.

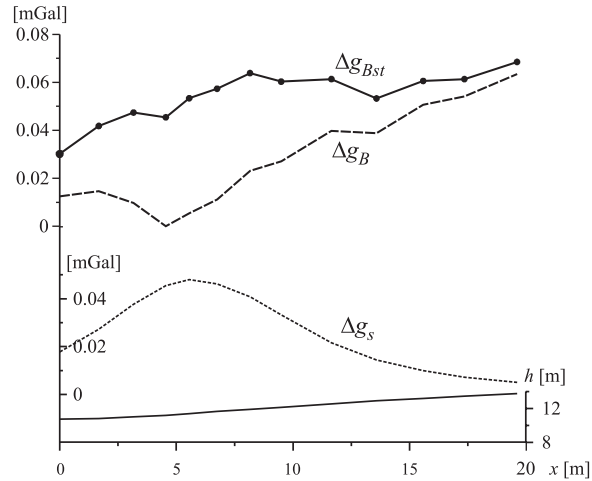
4. Sztolnia „Sucha Góra I”

Sztolnia ta położona jest przy drodze prowadzącej do przekaźnika telewizyjnego usytuowanego na szczycie Suchej Góry. Korzystając z obmiarów geodezyjnych stworzono model wyrobiska — rysunek 7. Wejście do wyrobiska jest utrudnione, a jego początkowa 2,5-metrowa część jest bardzo niska. Zasadnicza część wyrobiska posiada przekrój prostokątny o szerokości ok. 4,5 m oraz wysokości ok. 3,2 m, z czego 0,5 m zalane jest wodą, a jego długość wynosi ok. 10 m.



Rys. 7. Trójwymiarowy model sztolni „Sucha Góra I”

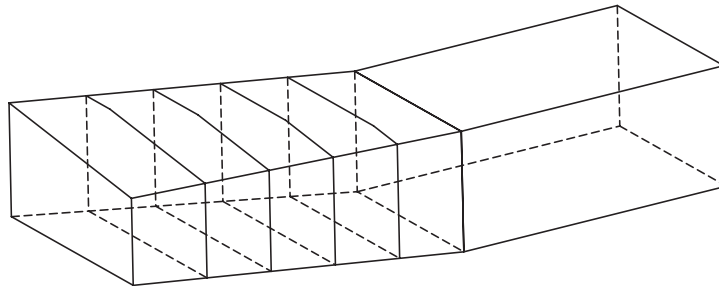
Nad sztolnią wykonano pomiary w jednym profilu, który niestety z uwagi na ukształtowanie powierzchni terenu musiał być z początku ograniczony. Uzyskane wyniki w postaci rozkładu mikroanomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera Δg_B przedstawiono na rysunku 8. W rozkładzie uwidacznia się niewielka względnie ujemna mikroanomalia siły ciężkości, którą należy wiązać z istnieniem wyrobiska. Podobnie jak w przypadku sztolni „nad Czają I” korzystając z modelu wyrobiska (rys. 7) wyliczono poprawkę Δg , eliminującą wpływ gravitacyjny sztolni na pomiar (rys. 8). Po uwzględnieniu poprawki otrzymano nowy rozkład siły ciężkości Δg_{Bs} (rys. 8), w którym zniknęła względnie ujemna mikroanomalia. Brak tej mikroanomalii świadczy o braku stref o obniżonej, w stosunku do otoczenia, gęstości nad sztolnią. Świadczy to o tym, że sztolnia jest stabilna i w chwili obecnej nie powoduje rozwoju stref rozluźnień w jej otoczeniu i ponad nią.



Rys. 8. Rozkłady siły ciężkości — sztolnia „Sucha Góra I”

5. Sztolnia „Sucha Góra II”

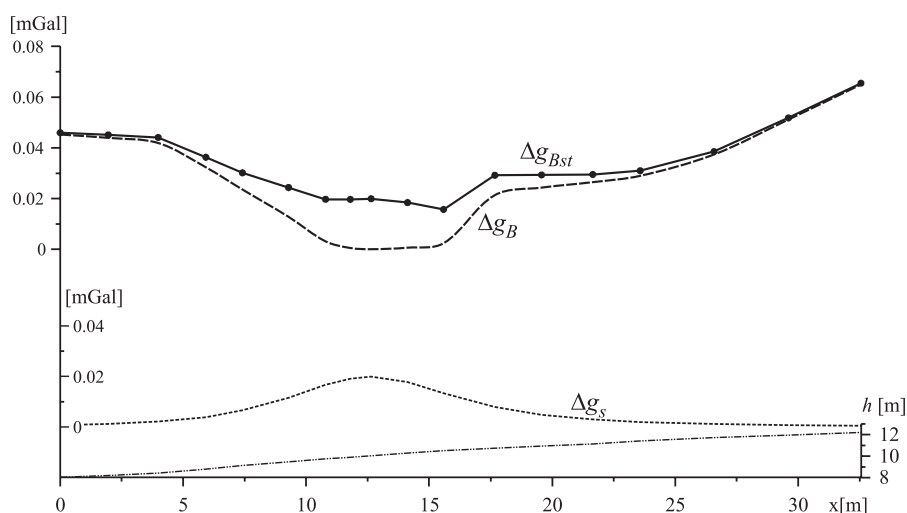
Sztolnia położona jest w bezpośrednim sąsiedztwie sztolni „Sucha Góra I”, w odległości ok. 30 m. Wykonane pomiary geodezyjne pozwoliły wykonać jej model — rysunek 9. Sztolnia ta posiada w przybliżeniu przekrój prostokąta i jest mniejsza od poprzedniczki. Jej długość wynosi ok. 9,5 m, szerokość ok. 2,8 m, a wysokość ok. 1,8 m.



Rys. 9. Trójwymiarowy model sztolni „Sucha Góra II”

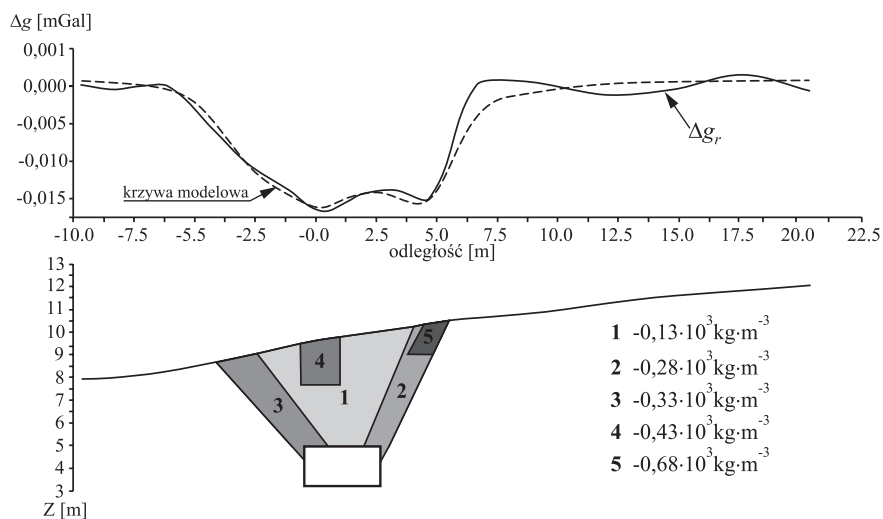
Nad wyrobiskiem punkty w jednym profilu o długości 36 m, w których to punktach wykonano pomiary mikrogravimetryczne. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 10 w postaci rozkładu mikroanomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera Δg_B . Na rozkładzie wyraźnie zaznacza się względnie ujemna mikroanomalia niewątpliwie związana ze sztolnią. Podobnie jak w poprzednich przykładach, korzystając ze zbudowanego modelu (rys. 9), wyliczono poprawkę, mającą na celu eliminację wpływu sztolni na pomierzone wartości siły ciężkości. Po jej uwzględnieniu rozkład siły ciężkości Δg_{Bs} przyjął postać wi-

doczną na rysunku 10. Wprowadzona poprawka obniżyła amplitudę względnie ujemnej mikroanomalii, ale jej nie wyeliminowała. Świadczy to o tym, że istnieją strefy obniżonej gęstości w górotworze w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska.



Rys. 10. Rozkłady siły ciężkości — sztolnia „Sucha Góra II”

W następnym etapie z rozkładu siły ciężkości Δg_{Bs} wyeliminowano wpływ czynnika regionalnego i uzyskano rozkład mikroanomalii rezydualnych Δg_r (rys. 11), który pochodzi od struktur lokalnych.



Rys. 11. Grawimetryczny model rozluźnień nad sztolnią „Sucha Góra II”

Amplituda obliczonej mikroanomaliai Δg_r jest niewielka i wynosi 0,02 mGal, ale oparta jest na 8 punktach pomiarowych. Założono, że mikroanomalia ta pochodzi od rozluźnień w górotworze ponad sztolnią i przystąpiono do modelowania grawimetrycznego. Wyniki tego modelowania przedstawiono na rysunku 11. Otrzymany model jest podobny do modeli wykonanych dla sztolni „nad Czają I”. Istnieje nieznaczne obniżenie gęstości objętościowej nad samą sztolnią ($-0,13 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), a na jego brzegach pojawiają się strefy o obniżeniu gęstości $-0,33$ i $-0,28 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Brak tych dwóch stref nie pozwala na dopasowanie krzywej modelowej do rozkładu mikroanomaliai rezydualnej siły ciężkości Δg_r . Wymodelowano również dwie, niewielkie przypowierzchniowe strefy obniżonej gęstości, które niekoniecznie mogą być skutkiem istnienia wyrobiska, a przypowierzchniowymi obniżeniami wypełnionymi lżejszymi utworami np. ściółką leśną.

6. Podsumowanie

Przebadano górotwór nad trzema sztolniami w Czarnorzecko-Strzyżowskim Parku Krajobrazowym, wydrążonymi w piaskowcach istebniańskich. Pozostałe, zinwentaryzowane sztolnie w większości uległy zawaleniu, a te istniejące położone były w miejscach uniemożliwiających pomiar siły ciężkości. Można się było spodziewać, że nad badanymi sztolniami nastąpiły zmiany w górotworze poprzez powstanie szczelin i spękań, czyli nastąpiło obniżenie gęstości objętościowej tych partii górotworu. W razie zaistnienia tych zmian metoda mikrogravimetryczna powinna pozwolić na znalezienie tych rozluźnień, a także poprzez prace modelowe określenie ich rozmiarów i wielkości obniżeń gęstości.

Badania mikrogravimetryczne wykazały istnienie względnie ujemnych mikroanomaliai siły ciężkości nad dwoma z trzech badanych sztolni, czyli potwierdziły przypuszczenie istnienia stref rozluźnień nad nimi. Grawimetryczne prace modelowe wykazały, że rozkład zmian gęstości w górotworze nad tymi sztolniami był bardzo podobny. Sama metoda mikrogravimetryczna nie jest w stanie określić stopnia stateczności wyrobiska i czy jest ono bezpieczne. Być może budowa odpowiedniego modelu geomechanicznego, który odpowiadałby modelowi rozluźnień, jest w stanie rozwiązać ten problem.

Niemniej jednak metoda mikrogravimetryczna pozwala rozpoznać stopień rozluźnienia górotworu ponad wyrobiskiem, co może pomóc przy weryfikacji modeli geomechanicznych i może zwiększyć bezpieczeństwo obiektów podziemnych.

LITERATURA

- [1] *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, s. 69–78
- [2] *Fajkiewicz Z.*: Geneza anomalii siły ciężkości i jej pionowego gradientu nad pustkami występującymi w skałach kruchych. *Ochrona Terenów Górniczych*, Nr 73/3–74/4, rok XIX, 1985, 3–13
- [3] *Fajkiewicz Z.*: Mikrogravimetryczne badania zmian gęstości górotworu powstałych w wyniku jego eksploatacji. I Krajowa Konferencja Naukowa nt. Wykorzystanie nowych kierunków badań w geofizyce górniczo-inżynierskiej, *Materiały AITP Naft.*, 1977

- [4] *Hanemann K.D., Militzer H.*: Ein neues Verfahren zur Streckenreduktion in der Untertagegravimetrie, 3. Internationale Alpengravimetrie-Kolloquium, Leoben 1983, Meft 12, Zentralanstalt für meteorologie und Geodynamik, Publikation nr 298, Wien, 1985, s.195–204
- [5] Jaskinie Polskich Karpat Fliszowych. Tom 3. Jaskinie Beskidu Niskiego, Pogórza Dynowskiego, Gór Sannocko-Turczańskich, Bieszczadów (red. M. Pulina), Polskie Towarzystwo Nauk o Ziemi, Warszawa, 1998
- [6] *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, Wrocław, 2001, s. 343–350
- [7] *Mleczek T.*: Jaskinie i sztolnie Czarnorzecko-Strzyżowskiego Parku Krajobrazowego. *Jaskinie* 2(15), 1999a, s. 20–21
- [8] *Mleczek T.*: Jaskinie Czarnorzecko-Strzyżowskiego Parku Krajobrazowego. Arch. Zespołu Karpackich Parków Krajobrazowych w Krośnie, 1999 b
- [9] *Wójcicki A.*: Approximation of the gravity attraction caused by the terrain relief forms using a polyhedron method, *Acta Geophysica Polonica*, 41, 3, 1993, pp. 1–24