

Janusz MADEJ, Sławomir PORZUCEK, Kamila WAWRZYNIAK

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

Kontrola stanu obwałowań metodą mikrograwimetryczną i georadarową

Streszczenie

Eksploatacja sztucznych zbiorników wodnych otoczonych obwałowaniami ziemnymi niesie za sobą niebezpieczeństwo powstawania rozluźnień w tychże obwałowaniach. Rozluźnienia te powstają zazwyczaj w wyniku sufozji, której przyczyną tkwi w niedoskonałej strukturze materiału budującego obwałowania lub błędach konstrukcyjnych. W miejscach osłabionych następują wysięki wody poza zbiornik, a w ostateczności może również wystąpić przerwanie ciągłości wałów. Do lokalizacji takich niebezpiecznych miejsc mogą służyć metody geofizyczne, a w szczególności metoda mikrograwimetryczna oraz metoda georadarowa. W artykule przedstawiono wyniki badań obwałowań zbiorników wód dołowych w kopalni KWK „Bogdanka”.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki badań geofizycznych, przeprowadzonych metodą georadarową i mikrograwimetryczną, w obrębie zapór zbiorników wód dołowych KWK „Bogdanka”. Zastosowanie powyższych metod geofizycznych wyniknęło z faktu, iż geofizyka jest nauką zajmująca się zagadnieniami rozpoznawania budowy geologicznej podłoża skalnego na podstawie pomiarów i obserwacji zjawisk związanych ze zróżnicowaniem parametrów fizycznych skał tego podłoża. Charakter niepożądanych zjawisk fizycznych, które mogą zachodzić w zaporze w czasie jej eksploatacji, a polegających na powstawaniu lokalnych niejednorodności może powodować powstawanie struktur różniących się własnościami fizycznymi, głównie gęstością objętościową. Efektywność rozpoznania, na podstawie badań geofizycznych, budowy nasypów zbiornika zależy od wielkości odchylenia od normy parametru fizycznego, czyli w tym wypadku gęstości objętościowej. Zmienność własności fizycznych w badanym środowisku jest podstawą do zastosowania metod geofizycznych – powoduje ona powstawanie zróżnicowanego obrazu pola fizycznego mierzonego na powierzchni terenu (Madej 1975).

Z dotychczasowych doświadczeń stosowania metod geofizycznych do rozwiązywania tego typu zagadnień wynika, iż przyjęcie do badań metody georadarowej i mikrograwimetrycznej w optymalny sposób umożliwi określenie ścisłego związku mierzonych tymi metodami rozkładów wielkości fizycznych z przyczynami indukowanymi działalnością wody w nasypie zapory (Nguyen i in. 2005).

Metody stosowane w tego typu badaniach powinny jak najdokładniej ujmować wpływ czynników, które decydują o bezpiecznej eksploatacji obwałowań. Zależy ona głównie od

warunków hydrogeologicznych oraz własności fizykomechanicznych podłoża i materiału skalnego użytego do budowy nasypów. W miarę upływu czasu, a w szczególności w wyniku długotrwałego nawodnienia wałów, zdarzyć się może wzmożona filtracja wody przez korpus wału, wyższe od projektowanego ciśnienie wody w porach czy nadmierne odkształcenia.

Lokalne niejednorodności w rozkładzie gęstości materiału skalnego korpusu wału obserwowane są w postaci anomalii siły ciężkości, jak i w zapisie echogramu. Przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki pomiarowej i interpretacyjnej śledzić można wszystkie te ubytki mas w korpusie wału, które stanowią zagrożenie dla jego stabilności.

2. Cel i zakres prac geofizycznych

Głównym celem pracy było określenie położenia stref rozluźnień oraz strukturalnych niejednorodności w obwałowaniach zbiorników wód dołowych KKWK „Bogdanka”. Cel ten osiągnięto poprzez wykonanie:

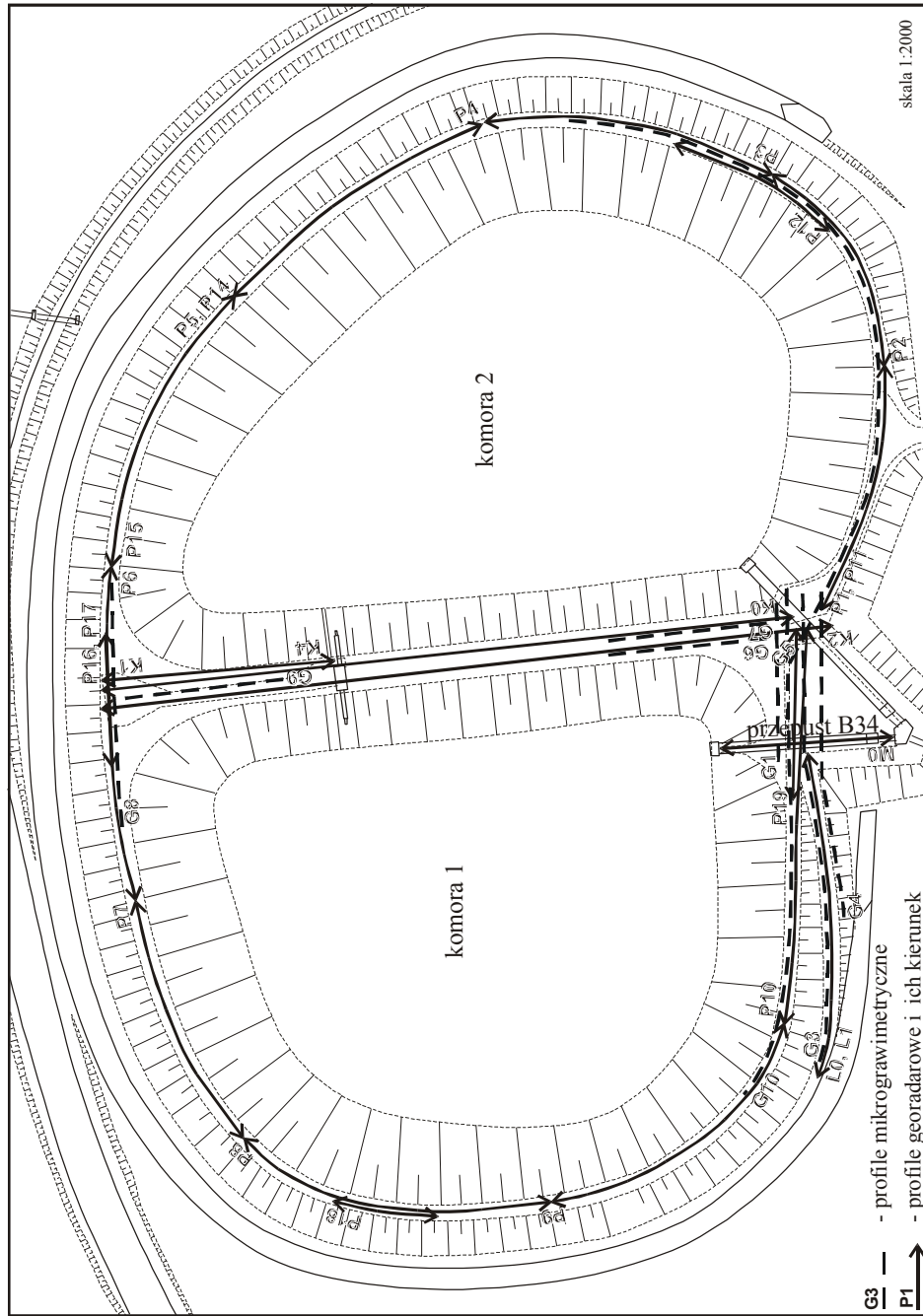
- badań metodą georadarową obejmujących całość nasypów grobli zewnętrznych obu komór oraz grobli działowej wraz z terenem przyległym do komory odpływowej, jak i rejon nad rurociągami łączącymi budowlę upustową z komórą zbiornika z komorą odpływową;
- badań mikrograwimetrycznych w rejonie stref rozluźnień stwierdzonych metodą georadarową. Dodatkowo, metodą mikrograwimetryczną i georadarową przebadano, w obrębie grobli zewnętrznej, rejony deformacji filtracyjnych powstałe na stoku skarpy powietrznej nad drenażem pachwinowych.

Lokalizację przeprowadzonych prac geofizycznych przedstawiono na rysunku 2.1.

3. Podstawy fizyczne zastosowanych metod geofizycznych

3.1. Metoda georadarowa

Metoda georadarowa należy do grupy metod radiofalowych. Aparatura pomiarowa składa się z jednostki centralnej, nadajnika, odbiornika oraz z dwóch anten: nadawczej i odbiorczej. Antena nadawcza emituje w głąb górotworu falę elektromagnetyczną, która ulega odbiciu, załamaniu i tłumieniu. Najważniejszym zjawiskiem, z punktu widzenia metody georadarowej, jest odbicie fali na granicy dwóch ośrodków różniących się stałą dielektryczną. Otrzymany obraz falowy jest odzwierciedleniem budowy geologicznej ośrodka. Z uwagi na duże tłumienie fali elektromagnetycznej, jak również niewielką moc anteny nadawczej, zasięg głębokościowy metody georadarowej nie przekracza na ogół kilkunastu metrów. Głębokość penetracji zależy od częstotliwości transmitowanego sygnału oraz od warunków geologicznych, a w szczególności od wilgotności badanego ośrodka.



Rys. 2.1. Lokalizacja badań geofizycznych
Fig. 2.1. Location of geophysical surveys

3.2. Metoda mikrograwimetryczna

Badania mikrograwimetryczne pozwalają poznać powierzchniowy obraz zmian siły ciężkości, będący odwzorowaniem przestrzennego rozkładu gęstości w nasypie. Obraz ten przedstawiony jest w postaci rozkładu mikroanomali siły ciężkości w redukcji Bouguera. Wielkość obserwowanych mikroanomali zależy od różnic gęstości skał budujących formy geologiczne lub antropogeniczne w stosunku do gęstości ich otoczenia, od głębokości położenia i rozmiarów tych form. Procesy filtracyjne, których intensywność zależy zarówno od rodzaju materiału użytego do budowy nasypów jak i od wysokości wody w zbiorniku, naruszają jednorodność ośrodka skalnego zapory. Prowadzić to może do powstawania stref rozluźnień w nasypie skarpy, których rozkład jest funkcją ww. czynników. Rozkład ten jest przedmiotem pomiarów w metodzie mikrograwimetrycznej. Stanowi on podstawę do jakościowo-ilościowej interpretacji, w wyniku której określa się związek pomierzonego rozkładu pola siły ciężkości z budową geologiczną i rozmieszczeniem form antropogenicznych oraz wyznacza się parametry fizyczne tych form.

4. Metodyka prac geofizycznych

Terenowe prace geofizyczne przeprowadzono w oparciu o zdjęcie profilowe. Dotyczy to zarówno metody georadarowej, jak i mikrograwimetrycznej.

Pomiar w metodzie georadarowej, wykonywany wzdłuż profilu, uważać można za obserwację ciągłą. W metodzie mikrograwimetrycznej natomiast dokonuje się obserwacji w punktach skąd otrzymuje się ciąg pomiarów dyskretnych. Przy małym kroku pomiarowym, tj. małej odległości między punktami pomiarowymi w zdjęciu profilowym rozkład zmian siły ciężkości zbliżony jest do obserwacji ciągłej.

4.1. Metoda georadarowa

Badania przeprowadzono w 23 profilach pomiarowych, o łącznej długości 2411 m, których lokalizację prezentuje rys. 2.1.

Całość badanego obszaru została podzielona na cztery podobszary:

1. „Obwałowania” – nasypy grobli zewnętrznych – profile P1–P11.
2. „Grobla” – wał oddzielający komory osadników – profile K0–K3.
3. „Pochylnia” – droga na skłonie wału na zachód od przepustów – profile L0 i L1.
4. „Placyk” – obszar między przepustem przy komorze 1 a przepustem B34 – profil M0.

Lokalizację wszystkich profili przedstawiono na rys. 2.1.

Wszystkie pomiary wykonane zostały georadarem RAMAC/GPR produkcji szwedzkiej.

Ten nowoczesny radar może współpracować z różnymi zestawami anten o częstotliwościach od 10 MHz do 1000MHz oraz z antenami otworowymi. Anteny połączone są z jednostką centralną światłowodami, co poprawia zakres dynamiczny aparatury i uniemożliwia zakłócenia spowodowane interferencją pomiędzy kablami. Jest to aparatura o wyłącznie cyfrowym torze pomiarowym i bardzo wysokiej dynamice zapisu. Dalsze zwiększenie dynamiki można osiągnąć przez sumowanie (składanie) sygnału. Maksymalna liczba złożeń wynosi nawet 32768, co praktycznie całkowicie eliminuje niskoamplitudowy szum losowy i zwiększa stosunek S/N (Signal/Noise).

Georadar RAMAC/GPR jest sterowany podłączonym komputerem IBM PC (notebookiem). Pakiet oprogramowania umożliwia wybór podstawowych parametrów pomiarowych (długość okna czasowego, wzmacnienie sygnału), zawiera on ponadto podstawowe procedury interpretacyjne.

4.2. Metoda mikrogravimetryczna

Pomiary mikrogravimetryczne zrealizowane zostały metodą punktów pośrednich i przedstawione w lokalnym układzie odniesienia. Obserwacje mikrogravimetryczne prowadzone były metodą jednokrotnych pomiarów. Czas kontroli miejsca zera grawimetru, czyli dryftu był dostosowany do warunków i wskazań przyrządu. Dowiązania ciągów pomiarowych pozwoliły eliminować dryft krótkookresowy. Średnio i długookresowe zmiany miejsca zera grawimetru, spowodowane składową pionową siłą luni-solarnych, eliminowane były w czasie pomiarów poprzez program wewnętrzny grawimetru, sporządzony przez producenta, na podstawie formuły Longmana (Longman 1959).

W trakcie obserwacji mikrogravimetrycznych dokonywano pomiarów wysokości statywu pod przyrządem pomiarowym celem uwzględnienia, w obliczeniach wartości wyrównanych siły ciężkości, poprawki wolno-powietrznej siły ciężkości.

Powtórzone w wielu punktach obserwacje mikrogravimetryczne umożliwiły obliczenie średniego błędu kwadratowego pojedynczego pomiaru, który wyniósł $\pm 0,009$ mGal, co odpowiada wysokim możliwościom technicznym użytego przyrządu i potwierdza, że badania wykonano z dużą precyzją.

Obserwacje mikrogravimetryczne wykonano wysokiej klasy grawimetrem kwarcowym, astatyzowanym z możliwością automatycznego zapisu wyników badań. Był to grawimetr CG-3 kanadyjskiej firmy Scintrex.

Wykonano również niezbędne, terenowe prace geodezyjne stanowiące integralną część badań grawimetrycznych. Polegały one na określeniu położenia punktów pomiarowych w terenie, ich stabilizację oraz wyznaczeniu współrzędnych w przyjętym lokalnym układzie odniesienia. Dokładność wyznaczenia wysokości punktów pomiarowych osiągnęła wartość $\pm 0,01$ m, zaś współrzędne poziome wyznaczono z dokładnością do $\pm 0,1$ m.

Pomierzone wielkości względne natężenia siły ciężkości wyrównane zostały ze względu na dryft grawimetru. Następnie dla wszystkich punktów pomiarowych uwzględniono wszystkie konieczne poprawki siły ciężkości: wolnopowietrzną, Bouguera oraz topograficzną, w wyniku czego otrzymano wartości mikroanomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, które zostały wyrażone na poziomie odniesienia przyjętym na wysokości położenia najniższego punktu pomiarowego.

Pomiary mikrogravimetryczne wykonano w 9 profilach o łącznej długości 760 m. Obserwacje przeprowadzono w 260 punktach pomiarowych położonych we wzajemnych odległościach równych od 2 m do 4 m.

5. Wyniki badań i ich interpretacja

5.1. Metoda georadarowa

Interpretacja georadarowego materiału pomiarowego oparta była na próbie wyodrębnienia przerw korelacji impulsów warstwie przypowierzchniowej.

5.1.1. „Obwałowania”

Badany obszar cechuje się dobrym dostępem i techniczną łatwością wykonania pomiarów natomiast pomiary są bardzo trudne do interpretacji. Wynika to z braku istotnych, z punktu widzenia metody georadarowej, różnic parametrów fizycznych materiału tworzącego obwałowanie. Ponadto materiał wykorzystany do budowy wału charakteryzuje się stosunkowo dobrą przewodnością, co przekłada się na szybki zanik sygnału georadarowego (silne tłumienie fali elektromagnetycznej). Osiągnięty zasięg głębokościowy nie przekracza 6–7 m, za wyjątkiem profili P1 i P11, gdzie uzyskano dobrą korelację refleksów do głębokości 12 m. Związane jest to z różnicami własności materiału wykorzystanego do budowy obwałowań. Skala głębokościowa echogramów jest przewyższona w stosunku do skali odległości. Zastosowanie identycznych skal pionowej i poziomej powoduje spadek czytelności echogramów.

Niektóre części profili pomiarowych przechodzą przez zbrojone płyty betonowe zakłócające obraz georadarowy. Na echogramach objawia się to silnymi zdudnieniami, które utrudniają poprawną interpretację. Zakłócenia spowodowane płytami betonowymi nie są jednakowe we wszystkich miejscach ich występowania. Największe różnice widoczne są między profilem P1 wykonanym na koronie wału, prawie w całości na płytach betonowych a profilem P6 gdzie płyty występują pomiędzy 34. a 50. metrem. Związane jest to zapewne z różnicami w materiale zastosowanym do budowy obwałowań. Materiał występujący na trasie profilu P1 i P11 charakteryzuje się znacznie mniejszym tłumieniem fali elektromagnetycznej, co odzwierciedla się w stosunkowo dużym zasięgu głębokościowym. Jedynie na tym odcinku są widoczne dobrze korelujące się refleksy pochodzące od podłoża obwałowań. Widoczne refleksy odwzorowują generalnie płaskie granice litologiczne a ich łukowaty kształt na echogramach jest wynikiem przewyższenia skali głębokościowej.

Zestawiając profile pomiarowe P1 do P10 w jeden ciąg odpowiadający koronie obwałowania, można zaobserwować różnice w charakterze zapisu georadarowego. Można wyróżnić strefy o zwiększonym zdudnieniu sygnału, które mogą świadczyć o gorszej spoiistości materiału budującego obwałowanie.

Szczególnie wyróżniają się następujące strefy:

- strefa G – od 64 metra profilu P1 do 2. metra profilu P2,
- strefa K – na profilu P4 pomiędzy 38. a 57. metrem ,
- strefa L – na profilu P6 i P7 – od 51. metra profilu P6 do 15. metra profilu P7,
- strefa M – na profilu P8 pomiędzy 78. a 89. metrem,
- strefa A – cały profil P10 , który z niewielką przerwą łączy się z profilem P1.

Charakter najbardziej rozległych anomalii na profilu P10 i P6, P7 może świadczyć o podobnej sytuacji geologicznej w tych dwóch miejscach.

Na żadnym wykonanym profilu pomiarowym nie stwierdzono anomalii wskazującej na istnienie strefy zagrażającej stabilności obwałowania i wymagającej natychmiastowej interwencji. Widoczne zmiany charakteru zapisu georadarowego w różnych miejscach badań są generalnie niewielkie i odzwierciedlają subtelne zmiany parametrów fizycznych utworów budujących obwałowanie.

5.1.2. „Grobla”

Na żadnym wykonanym profilu nie da się wydzielić strefy anomalnej mogącej być przedmiotem dalszych analiz. Dobrze widoczne anomalie spowodowane są obiektami

stojącymi na powierzchni grobli (lampy, metalowy pomost) lub przepustem w okolicach 130. metra profilu K0. Jedynie pomiędzy 30. a 34. metrem profilu K0 widoczne jest „synklinalne” ułożenie refleksów w przypowierzchniowej warstwie (do głębokości ok. 2 m). Strefa ta jest jednak bardzo słabo czytelna.

5.1.3. „Pochylnia”

Na profilach wykonanych wzdłuż pochylni nie udało się wydzielić żadnej istotnej strefy anomalii. Również widoczny poniżej pochylni ślad wycieku nie odzwierciedla się na echogramach.

5.1.4. „Placyk”

Badania nad rurociągami B34 potraktowane były jako eksperymentalne, ponieważ oczekiwano, że refleksy od rurociągów mogą maskować ewentualne refleksy użyteczne.

W strefie nad rurociągami, czyli do głębokości 4 m, nie udało się wyróżnić żadnej anomalii. Zatem zapis georadarowy nie potwierdza nieszczelności rurociągów lub istnienia strefy rozluźnień wokół nich.

5.2 Metoda mikrograwimetryczna

Podstawą interpretacji badań mikrograwimetrycznych jest, w tym wypadku, związek względnie ujemnych mikroanomalii siły ciężkości z występowaniem stref rozluźnień w korpusie skarp odpowietrznych.

W wielu przypadkach śledzenia stref rozluźnień obserwuje się mikroanomalie siły ciężkości, o amplitudach, których wartości są tylko kilka razy większe od błędu pomiarowego. Ważnym elementem interpretacji wyników badań mikrograwimetrycznych jest wyodrębnienie mikroanomalii użytecznych. Przyjmuje się, że aby osiągnąć zadowalający poziom ufności mikroanomalii, co najmniej 95%, mikroanomalia ta winna być zaobserwowana w odpowiedniej ilości punktów. Ilość ta uzależniona jest od stosunku amplitudy mikroanomalii do rozproszenia wyników. Za ocenę tego rozproszenia, tzn. odchylenia standardowego, przyjmuje się średni błąd kwadratowy pojedynczego pomiaru. W omawianych badaniach wyniósł on $\pm 0,009$ mGal. Uzyskanie poziomu ufności 95% dla mikroanomalii o amplitudzie równej 0,02 mGal jest możliwe w przypadku, gdy jest ona obserwowana w co najmniej 3 punktach. Uzyskanie większego poziomu ufności wymaga obserwacji mikroanomalii siły ciężkości w większej ilości punktów lub rejestracji w dwóch bądź trzech profilach ją śledzących (Fajkiewicz 1980).

Analizując pozyskany z pomiarów materiał badawczy wyodrębniono tylko te mikroanomalie, które cechowały się 95-procentowym lub większym poziomem ufności.

Większą część zakresu badań mikrograwimetrycznych zrealizowano na terenie przyległym do komory odpływowej – wykonano tu pomiary w profilach G1, G3, G4, G10 (rys. 2.1) oraz południowym i południowo-wschodnim odcinku obwałowania komory 2 – profil G5. Groble działowe pokryto czterema profilami. Dwa z nich, równoległe do siebie, zlokalizowano przy południowym krańcu grobli (profile G6 i G7), a pozostałe dwa profile (G8 i G9) przy północnym jej połączeniu z groblami zewnętrznymi obu komór – rys. 2.1.

Wyniki z terenu przyległego do komory odpływowej, przedstawiono na rys. 5.1.

Z zestawionych tu rozkładów mikroanomali siły ciężkości wynika, iż ogólny trend pola siły ciężkości, tj. wzrost jego wartości w kierunku zachodnim, ma niewątpliwie związek z budową geologiczną podłoża skalnego, na którym zbudowano nasypy zapór (Łobacz 1999). Fakt rejestracji tej tendencji nie wnosi jednak istotnych informacji w kontekście rozwiązywanego zadania. Najistotniejsze są bowiem lokalne, względnie ujemnie mikroanomale, które wydzielić można na tle uchwyconego trendu. Na rys. 5.1 zaznaczono mikroanomale ze stref anomalnych oznaczonych symbolami A, B i C, których poziom ufności przekroczył 95%. Amplitudy tych mikroanomali wahają się od 0,02 mGal (strefa B) do 0,04 mGal (strefa C). Mikroanomalia A, zarejestrowana na odcinku niemal 30 m, związana jest z występowaniem strefy obniżonej gęstości objętościowej w stosunku do otoczenia, a jej znaczne rozmiary poziome wskazywać mogą na rozległe rozgęszczenie nasypu. Istnieje możliwość, że strefa ta jest wynikiem obecności kontaktu dwu rodzajów materiału skalnego użytego do budowy grobli w tym rejonie. Z analizy rozkładu mikroanomali w tym profilu wynika, że cięższego materiału użyto do usypywania wschodniej (wewnętrznej) części nasypu. Kontakt taki może stać się łatwą przyczyną dla filtracji wody z komory 1 na zewnątrz.

Dwie pozostałe mikroanomale (ze stref B i C), zarejestrowane w tym rejonie, mogą wiązać się z jedną przyczyną. Wzajemne położenie ich ekstremów wyznacza kierunek, którego przedłużenie ku północnemu wschodowi napotyka budowlę upustowe komory 1. Nieco mniejsza amplituda mikroanomali w strefie B w stosunku do amplitudy mikroanomali ze strefy C wynika z różnicy głębokości położenia źródła tych mikroanomali. Pod profilem, w którym stwierdzono mikroanomalię w strefie C, źródło jej leży płycej niż położenie głębokości źródła drugiej mikroanomali. Wynika to z faktu różnicy wysokości położenia punktów na obu profilach. Wydaje się wielce prawdopodobne, że przyczyną powstania obu mikroanomali wiązać można z deformacją filtracyjną, ujawniającą się w postaci zmniejszenia gęstości objętościowej nasypu w rejonie przepływu wody.

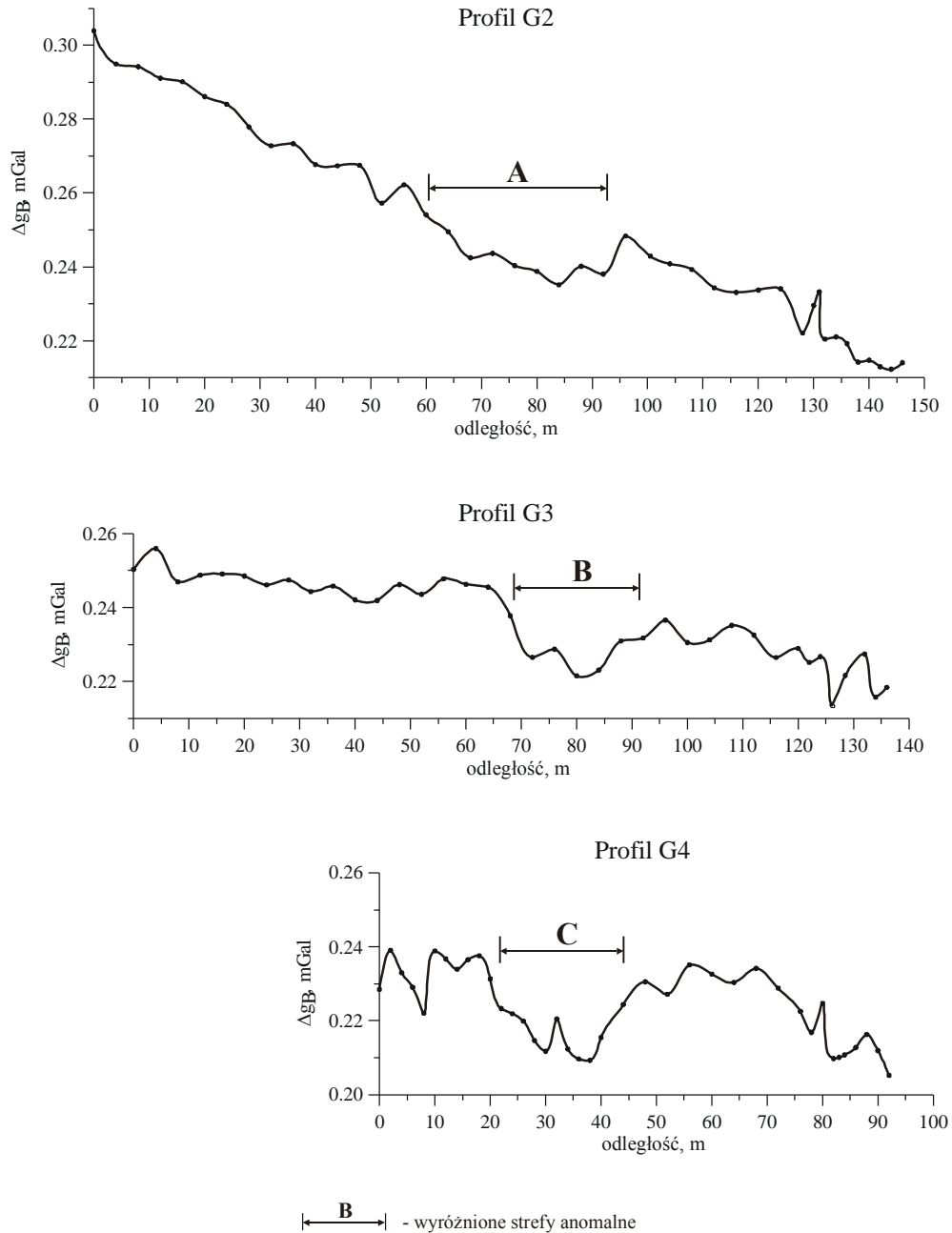
W profilach G6 i G7, usytuowanych przy południowym kontakcie grobli działowej z groblami obu komór (rys. 2.1), zarejestrowano dwie mikroanomale siły ciężkości – strefy D i E. Ich zbliżone amplitudy oraz położenia ich środków (rys. 5.2) wyraźnie wskazują, że są one wynikiem grawitacyjnego oddziaływania zmian gęstościowych na kontakcie grobli działowych z groblami komór 1 i 2. Symetryczny kształt obu mikroanomali świadczy ponadto, iż w miejscu kontaktu grobli powstała strefa niedoboru mas.

Badania mikrograwimetryczne wykonano również w rejonie północnego kontaktu grobli działowej z zewnętrznymi groblami. Pomiaru mikroanomali siły ciężkości przeprowadzono wzdłuż dwóch, prostopadłych do siebie, profili G8 i G9 – rys. 2.1.

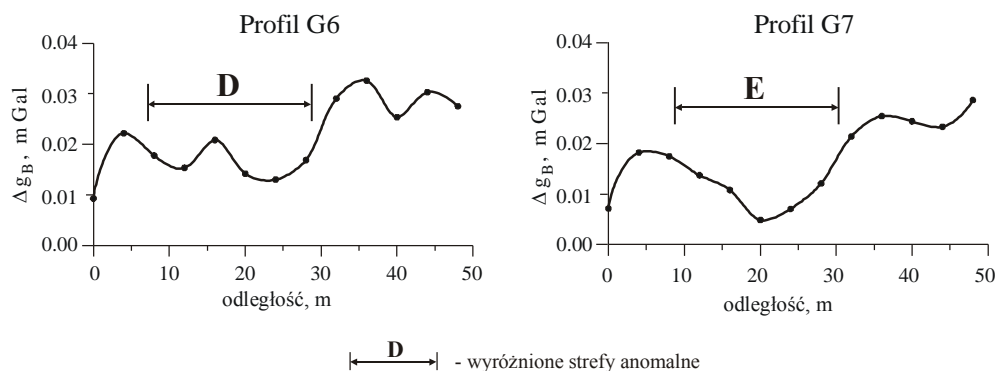
Podstawą wykonania badań mikrograwimetrycznych w tym rejonie był fakt stwierdzonych obniżen powierzchni terenu w dwóch miejscach: na skrzyżowaniu grobli działowej z zewnętrznymi oraz w odległości ok. 16 m od tego skrzyżowania w stronę środka grobli działowej. Podane wyżej miejsca odnoszą się do centrów tych obniżen. Poprowadzone przez nie profile mikrograwimetryczne miały za zadanie stwierdzenie wielkości ubytków mas w tym rejonie. Okazało się, że w profilu G8 brak jest mikroanomali ujemnej; mimo zarejestrowania obniżenia drogi w centrum profilu G8 o około 12 cm w stosunku do pierwotnego stanu. Należy stąd wnosić, że materiał skalny pod drogą grobli zewnętrznych jest jednolicie zagęszczony na odcinku badań mikrograwimetrycznych.

Odmienna sytuacja zachodzi w rejonie, przez który przebiega profil G9 (rys. 2.1). Zaobserwowana w tym profilu strefa anomalna F (rys. 5.3) nie odpowiada lokalizacji rejonu

obniżenia gruntu grobli działowej. Obniżenie to, szacowane na ok. 25 cm w stosunku do otoczenia, lokuje się w odległości ok. 8 m na północ od ekstremum mikroanomalii.



Rys. 5.1. Rozkład mikroanomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera w profilach G2, G3 i G4
Fig. 5.1. Distribution of Bouguer anomaly in profiles G2, G3 and G4



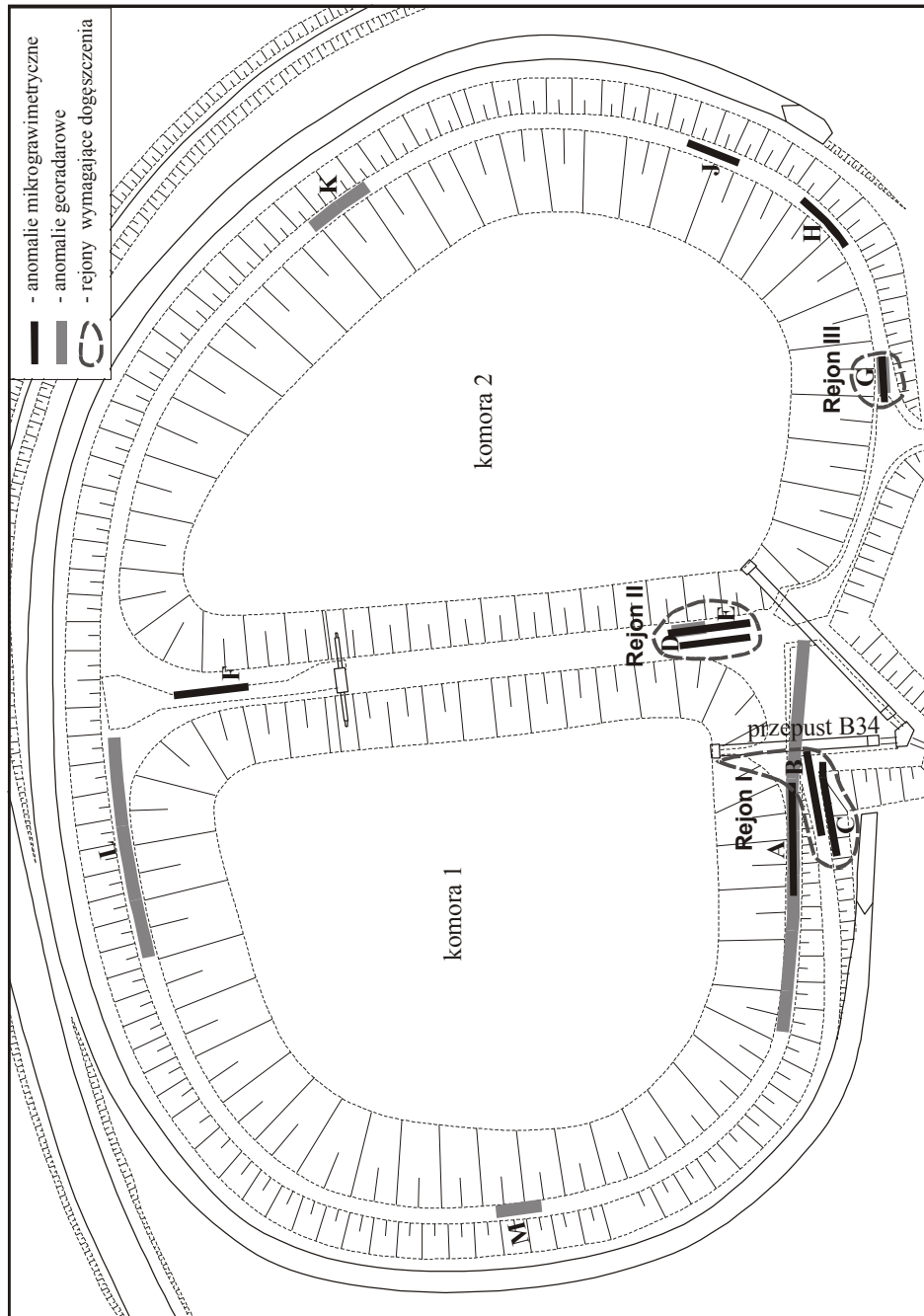
Rys. 5.2. Rozkład mikroanomali siły ciężkości w redukcji Bouguera w profilach G6 i G7.
 Fig. 5.2. Distribution of Bouguer anomaly in profiles G6 and G7

Jeśli zatem wykryta strefa rozluźnienia była przyczyną obniżenia się powierzchni terenu, to przesunięcie centrum tego obniżenia w stosunku do środka mikroanomali w tej strefie wskazuje na określony kierunek ruchu mas. Jest on zgodny z pierwotnym kierunkiem nachylenia skarpy odwodnej grobli zewnętrznych. Hipoteza ta pozostaje w dużej zgodności z postulowanym związkiem mikroanomali występujących w strefach anomalnych D i E ze strefą niedoboru mas na południowym kontakcie badanej grobli ze skarpami zewnętrznymi.

W trakcie prac przebadano również mikrograwimetrycznie południowy i południowo-wschodni odcinek grobli komory 2 – profil G5 rys. 2.1. Na profilu tym, o długości ponad 200 m, stwierdzono występowanie trzech względnie ujemnych mikroanomali siły ciężkości. Wszystkie jednak charakteryzują się małymi amplitudami nieprzekraczającymi 0,02 mGal. Nie jest wykluczone, iż mikroanomalie te mogą być związane z gęstościowym zróżnicowaniem materiału skalnego użytego do budowy grobli wynikającym zarówno ze składu mineralnego jak i z technologii tworzenia grobli. Należy w tym miejscu przypomnieć o sugerowanym wyżej związku występowania mikroanomali A ze skutkami procesu budowy pierwszego odcinka grobli w rejonie upustów dennych. Mikroanomalia ta została zinterpretowana jako konsekwencja istnienia kontaktu dwóch rodzajów materiału skalnego różniących się gęstością objętościową. Analogiczna sytuacja może mieć miejsce również na wschód od rejonu rurociągów upustowych. Kontakt tego obszaru z dalszym odcinkiem grobli komory 2, budowanym już z lżejszego materiału skalnego, może odzwierciedlać mikroanomalia G (rys. 5.3). Podobnie, jak w przypadku strefy A (rys. 5.1), również i w rejonie strefy anomalnej G może dojść do rozluźnienia nasypu skarpy.

5.3. Kompleksowa interpretacja

Kompleksowa interpretacja wyników badań geofizycznych przeprowadzona została w oparciu o założenie, że stwierdzone anomalie w zapisie georadarowym i odpowiadające im, co do lokalizacji, względnie ujemne mikroanomalie siły ciężkości są wywołane przez te same przyczyny.



Rys. 5.3. Wyniki badań geofizycznych
Fig. 5.3. Results of geophysical surveys

Analizując wyniki badań georadarowych należy na wstępie stwierdzić, że w 23 profilach badawczych wydzielono łącznie 6 stref anomalnych. Trzy spośród nich zostały potwierdzone badaniami mikrograwimetrycznymi, które w 9 profilach wykazały obecność 9 stref rozluźnień.

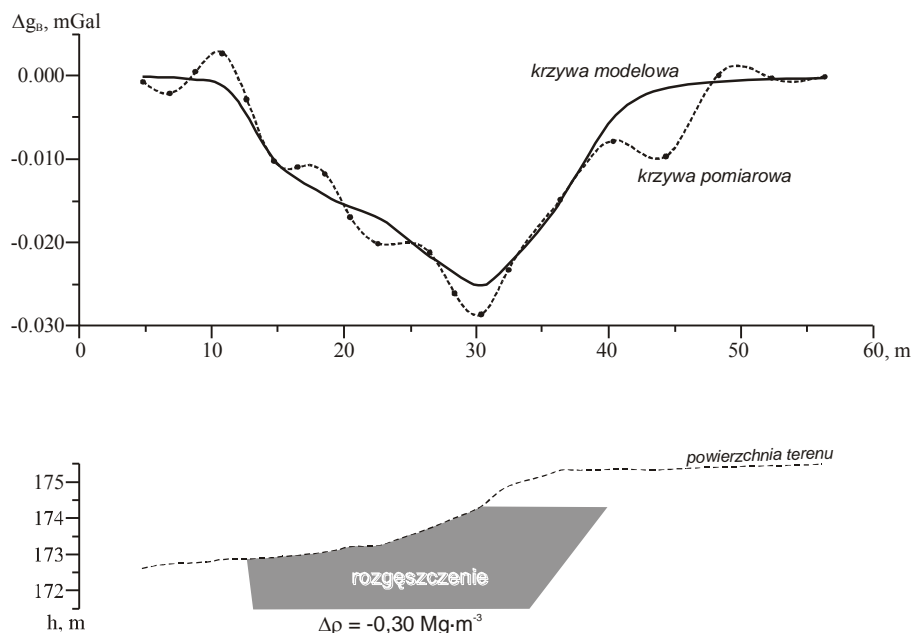
Z przedstawionego zarówno ilościowego zestawienia rejonów anomalnych, jak i z obrazowanej na rys. 5.3 ich lokalizacji, wynika, że w obszarze wspólnych badań większość stref rozluźnień została stwierdzona badaniami mikrograwimetrycznymi. Fakt ten ma wytłumaczenie w fizycznej interpretacji zarejestrowanych wskazań georadaru, jak i może świadczyć o tym, że konstrukcja skarp grobli jest w dobrym stanie. Wyjaśnić bowiem należy, iż wyraźniejsze, niż zarejestrowano, zróżnicowanie charakteru zapisu georadarowego na echogramie byłoby wtedy, gdyby następował proces wymywania cząstek gruntu z nasypu. Doprowadziłby on do powstawania pustek międzyziarnowych lub większych wolnych przestrzeni. W takim przypadku pojawiłby się silny efekt zdudnienia sygnału jako skutek odbicia fali elektromagnetycznej od pustej przestrzeni. Podobny efekt byłby obserwowany w wypadku wypełnienia porów wodą. Nie zaobserwowano rejestracji podobnych zjawisk w analizowanym zapisie georadarowym. Wnosić stąd należy, że okres wypełnienia obu komór wodą, do górnego jej poziomu, nie wywołał jeszcze tak destrukcyjnego wpływu na stan nasypów, by po usunięciu jego przyczyny (poprzez obniżenie poziomu wody) pozostał trwały ślad w zapisie georadarowym w postaci charakterystycznego obrazu pochodzącego od pustek sufozyjnych.

W obrazie mikrograwimetrycznym, jak sądzić można choćby z ilości zarejestrowanych mikroanomalii, zaznaczyły się dodatkowo również i te rejon, w obrębie których nie stwierdzono istotnych zmian w zapisie georadarowym. Prowadzi to do wniosku, że w obszarze ich występowania zaszły niewielkie zmiany parametrów fizycznych ośrodka skalnego. Jednak nie na tyle małe, by nie zostały zarejestrowane, w granicach dokładności metody, przez badania mikrograwimetryczne. A zatem w obszarach, które przebadano dwoma metodami, wykrywając nimi strefy A, D, E i G, można, na drodze modelowania grawimetrycznego, wyznaczyć parametry fizyczne wykrytych stref anomalnych. W tym celu, dla ograniczenia wieloznaczności rozwiązania modelowego, przyjęto do obliczeń parametry głębokościowe wyinterpretowanie ze wskazań georadarowych.

Mikroanomalia siły ciężkości, zarejestrowana w strefa anomalnej A, w profilu G2 (rys. 5.1) jest obrazem rozluźnienia ośrodka skalnego na długości ok. 10 m – rys. 5.3. Z badań georadarowych wynika, że materiał skalny w tym rejonie wykazuje nieznaczne rozluźnienie, a wnioskowanie o tym fakcie odbyło się na granicy dokładności metody. Potwierdzeniem tego jest uzyskany wynik modelowania grawimetrycznego. Według niego tę część grobli, od posadowienia do korony, buduje nasyp o średniej gęstości objętościowej tylko o $0.07 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ mniejszej niż jej wartość w otoczeniu.

Dużo większe rozluźnienie wyznaczono z modelowania grawimetrycznego mikroanomalii w strefach B i C (rys. 5.1). Przedstawiony na rys. 5.4 przykładowy wynik modelowania mikroanomalii ze strefy anomalnej C dowodzi, że generuje ją strefa obniżonej gęstości – $0,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w stosunku do otoczenia.

Położenie wyinterpretowanej strefy wskazuje na duży jej zasięg poziomy i pionowy. Sięga ona od podłoża skarpy nad drenażem powierzchniowym po rejon rur upustowych z komory 1. Zakres pionowy strefy anomalnej C to przedział od 174,5 m do 171,5 m n.p.m. Rozprzestrzenia się ona zatem od głębokości 2 m pod powierzchnia terenu „Placyk” nad rurami upustowymi i ma miąższość ok. 3 m. Położona wyżej, w strefie anomalnej B (rys. 5.1) mikroanomalia siły ciężkości jest genetycznie związana z mikroanomalią ze strefy C.

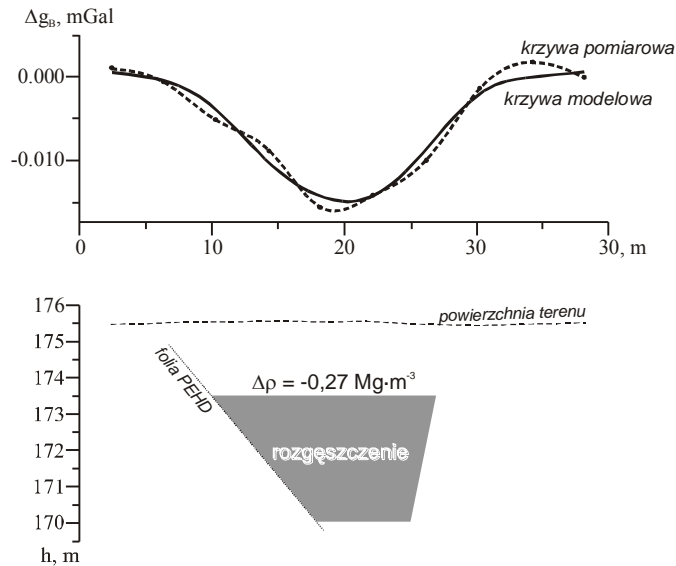


Rys. 5.4. Wynik modelowania grawimetrycznego wyróżnionej strefy anomalnej C
 Fig. 5.4. Result of gravity modeling of selected anomaly zone C

Przyjmując wyinterpretowany w profilu G4, model strefy rozluźnień do obliczeń jej efektu grawitacyjnego w profilu G3, otrzymuje się jego zgodność, w granicach dokładności metody, z rozkładem mikroanomali ze strefy B. Należy zwrócić uwagę, iż położenie obu mikroanomali B i C zawiera się w obrębie szerokiej strefy anomalnej zaznaczonej symbolem A.

Wyinterpretowany w obrębie strefy anomalnej E (rys. 5.2) model strefy rozluźnień sięga od dna zbiornika komory 1 (rys. 5.5) – od głębokości ok. 2 m pod powierzchnią grobli działowej. Głębokość położenia stropu strefy wynika z analizy echogramów georadarowych. Jej przyjęcie do budowy modelu strefy rozluźnień wyraźnie ograniczyło wieloznaczność rozwiązania. Uzyskano stąd zasięg poziomy strefy zbliżony do rzeczywistego, a w szczególności nachylenie granicy południowej odpowiadające pierwotnemu kształtowi skarpy odwodnej (przed budową grobli działowej).

Ilościową interpretację mikroanomali G (rys. 5.3) umożliwiły wyniki badań uzyskane z metody georadarowej. Analiza zapisu echogramu wskazuje na istnienie wąskiej strefy rozluźnień o szerokości ok. 10 m. Z badań tych nie udało się jednak zarejestrować wyraźnych impulsów od górnej granicy tej strefy, natomiast bardzo wyraźnie zapisany został efekt nieciągłości położonej na głębokości ok. 12 m pod koroną grobli. Istnienie tej nieciągłości może generować zmiany w nadległych warstwach pomniejszając ich gęstość. Przyjmując do modelowania te parametry, łącznie z szerokością strefy, wyinterpretowaną na podstawie badań georadarowych, otrzymuje się, że w analizowanej strefie gęstość jest o $0,17 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ mniejsza od gęstości otoczenia.



Rys. 5.5. Wynik modelowania grawimetrycznego wyróżnionej strefy anomalnej C
Fig. 5.5. Result of gravity modeling of selected anomaly zone C

6. Podsumowanie

Wyniki badań geofizycznych wykazały istnienie wielu stref rozluźnień i strukturalnych niejednorodności w obwałowaniach zbiorników. Stwierdzono, iż groble zewnętrzne zbudowane są z różnych rodzajów materiału skalnego pod względem jego parametrów fizycznych. Część z nich charakteryzuje się gorszą spójnością materiału i w rejonach tych stwierdzono występowanie stref rozluźnień. Ich rozmieszczenie podano na rys. 5.3.

Żadna ze stref nie stanowi jednak zagrożenia dla stabilności obwałowań i nie wymaga natychmiastowej interwencji. Zmiany charakteru zapisu georadarowego są niewielkie i odzwierciedlają subtelne zmiany parametrów fizycznych utworów skalnych.

Wyniki modelowań grawimetrycznych wykonanych w 4 profilach wykazuje, że strefy anomalne budują twory skalne różniące się od otoczenia gęstością objętościową maksymalnie tylko o $0,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Przyczyną rozluźnienia w rejonie I była filtracja wody w skarpie. Kreską przerywaną w tym rejonie oznaczono przypuszczalny, początkowy przebieg powyższej filtracji.

Zaobserwowane rejonie II anomalie mikrogravimetryczne w strefach anomalnych D i E wskazują na możliwość powstania ugięcia powierzchni terenu takiego samego, jakie miało miejsce na północnym kontakcie grobli działowej z obwałowaniem zewnętrznym zbiornika (strefa F).

Wykryte w rejonie III rozluźnienie (o kontraście gęstości ok. $0,17 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), zaczynające się na niewielkiej głębokości, szczególnie z uwagi na wykrytą georadarem nieciągłość geologiczną na głębokości ok. 12 m, może być przyczyną powstania w tym miejscu rozluźnienia.

Literatura

- [1] Fajkiewicz, Z., 1980: Mikrograwimetria górnicza, Wyd. „Śląsk”, Katowice.
- [2] Longman I.M., 1959: Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. *Geophysical Research*, vol. 64, no. 12, 2351–2355.
- [3] Łobacz, J., 1999, Dokumentacja warunków geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych pod budowę zbiornika wód dołowych na gruntach wsi Puchaczów i Kol. Bogdanka dla potrzeb KWK „Bogdanka”; Arch. Geologiczne Wydz. Ochrony Środ. i Rolnictwa Lubelskiego Urzędu Wojewódzkiego w Lublinie, nr arch. 1402.
- [4] Madej, J., 1975, Badania rozkładu mas w zaporach ziemnych metodą mikrograwimetryczną. *Zeszyty Naukowe AGH*, nr 524, *Geologia* z. 24, Kraków.
- [5] Madej, J., 1983, Untersuchunhg von Schuttdammen durch mikrogravimetrische messungen, *Neue Bergbautechnik*, nr 13, Heft 2, Leipzig.
- [6] Nguyen Van Giang, Zietek, J., Nguyen Ba Duan, Karczewski J., 2005, Study of geological sedimentary structures of the Mekong river banks by ground penetrating radar method for forecasting the zones capable of avulsion. *Acta Geophysica Pol.*, vol.53, no.2, 67–181.

Microgravity and georadar surveys of the embankments of surface mine ponds

Exploitation of artificial water reservoirs surrounded by earth embankments may lead to the formation of hazardous loosening zones in these embankments. Such loosening zones are usually caused by suffosion, which results either from structural imperfections of the material used in erecting the embankments or from engineering errors committed during their constructing. Water penetrates through the embankment in the weakened points, and in extreme cases the continuity of the embankment may be broken down. Such hazardous places can be localized using geophysical methods, with the microgravity and georadar surveys being particularly useful. The paper presents the results of such surveys in the embankments of the ponds retaining underground water pumped to the surface from the coal mine „Bogdanka”.

Przekazano: 10 kwietnia 2006 r.