

Monika ŁÓJ

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

## Mikrogravimetryczny pomiar gęstości objętościowej form nasypowych na przykładzie hałdy węgla

### Streszczenie

Praca przedstawia wykorzystanie metody grawimetrycznej do określenia gęstości objętościowej hałdy węgla jako przykład jej stosowania w określaniu tej gęstości dla innych dowolnych form nasypowych. W tym przypadku wybrana została metoda Parasnisa określania gęstości objętościowej na podstawie pomiarów grawimetrycznych

Głównym celem wykonanych prac mikrogravimetrycznych było określenie gęstości objętościowej węgla zdeponowanego na wybranym składowisku. Zaletą wybranej metody jest to, iż jako metoda powierzchniowa pozwala na określenie gęstości w sposób niemal ciągły wzdłuż całej badanej formy nasypowej, co umożliwi dokonanie przeglądu stanu zbudowanych form i na ewentualną reakcję w przypadku pojawienia się zmian gęstości.

### 1. Wstęp

Formy nasypowe to głównie wały przeciwpowodziowe i wały otaczające sztuczne zbiorniki wodne np. wód dołowych, poflotacyjnych itp. oraz hałdy górnicze czy zwałowiska skał na terenie odkrywkowych kopalń. W trakcie ich eksploatacji własności fizykochemiczne mogą ulegać zmianom, w związku ze sposobem ich eksploatacji, oraz zmiennymi warunkami atmosferycznymi.

W miarę upływu czasu, materiał skalny, z którego zbudowane są nasypy ulega zagęszczeniu pod wpływem własnej masy, co jest pozytywną cechą danej struktury. Jednak dość często w czasie użytkowania zachodzą procesy odwrotne. Pod wpływem wody wypełniającej zbiorniki wodne, a także pod wpływem filtracji wód opadowych dochodzi do powstania stref zmniejszonej gęstości, które stanowić mogą potencjalne zagrożenie dla stabilności i wytrzymałości formy nasypowej.

Aby uchronić się przed tym, należałoby poznać aktualny stan rozmieszczenia stref o zróżnicowanych gęstościach oraz badać jego zmiany w czasie.

W postaci pryzm (hałd) składowany jest również różnego rodzaju materiał skalny przed jego konkretnym wykorzystaniem. Czasem konieczne jest poznanie masy składowanego materiału. Łatwiej znając objętość pryzmy i jej gęstość można obliczyć składowaną masę.

W obu przypadkach możliwość wyznaczenia wartości gęstości objętościowej daje zastosowanie badań grawimetrycznych. Przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki pomiarowej i interpretacyjnej śledzić można rozkład gęstości objętościowej wzdłuż całej badanej formy nasypowej. W przypadku metody Parasnisa określenie gęstości objętościowej na podstawie pomiarów grawimetrycznych, daje bardzo dobre rezultaty.

Ważnym w tym przypadku jest to, aby wartości pomierzone siły ciężkości, na podstawie których określana jest gęstość objętościowa, nie były zaburzone przez anomalie nie związane z badaną pryzmą, tzn. przez anomalie związane z polem regionalnym, w obrębie którego zlokalizowany jest badany obiekt. Dlatego jednym z ważnych elementów przy projektowaniu badań grawimetrycznych jest założenie profili pomiarowych, które umożliwią zbadanie rozkładu pola regionalnego siły ciężkości wokół badanej formy.

## 2. Cel i zakres prac mikrograwimetrycznych

Praca przedstawia przykładowe wykorzystanie metody grawimetrycznej do określenia gęstości objętościowej hałdy węgla.

Głównym celem wykonanych prac mikrograwimetrycznych było określenie gęstości objętościowej węgla zdeponowanego na wybranym składowisku.

Zakres przewidywanych prac mikrograwimetrycznych zaplanowany został tak, aby w miarę możliwości zastosowanej metody, określić również przedział zmienności gęstości objętościowej zdeponowanego węgla wzdłuż badanej pryzmy. Zmienność ta jest związana z różnym okresem czasu składowania materiału oraz z jego granulacją.

Wielkość obszaru, jaki został objęty pomiarami mikrograwimetrycznymi zdeterminowany został koniecznością uwzględnienia wpływu wszystkich czynników na obliczaną gęstość objętościową, za pomocą metody grawimetrycznej. W metodzie tej istotną rolę odgrywa bowiem wpływ pola regionalnego siły ciężkości.

Celem poznania grawitacyjnego wpływu regionalnych zmian w budowie geologicznej podłoża składowiska węgla na wartość  $\Delta g$ , wykonano obserwacje mikrograwimetryczne wzdłuż czterech profili. Ich położenie gwarantuje wystarczające rozpoznanie kształtu pola siły ciężkości, na podstawie którego określić można przebieg jego regionalnych zmian.

## 3. Podstawy fizyczne metody mikrograwimetrycznej w aspekcie wykorzystania jej do obliczeń gęstości objętościowej

Wyznaczenie z pomiarów mikrograwimetrycznych gęstości objętościowej materiału skalnego ma tę zasadniczą zaletę, iż obliczona jej wartość odnosi się do warunków *in situ*.

Określenie gęstości na podstawie pomiarów mikrograwimetrycznych opiera się na zależności pomierzonych wartości siły ciężkości od formy rzeźby terenu. Zależność tę po raz pierwszy wykorzystał Nettleton (Nettleton 1940) nazywając ją sposobem profilowym określania gęstości.

W 1952 r. Parasnis (Parasnis 1952) zmodyfikował powyższy sposób opierając obliczenia gęstości na prostej zależności pomierzonych wartości siły ciężkości w redukcji wolnopoietrznej od wartości poprawki Bouguera z uwzględnieniem wpływu rzeźby terenu (poprawki topograficznej siły ciężkości).

Sposób ten wymaga spełnienia trzech warunków. Pierwszy to ten, aby pomiarowe punkty grawimetryczne leżały na różnych wysokościach. Fakt ten decyduje o dokładności wyznaczenia gęstości. Drugi warunek – badana nierówność terenowa (wzgórze, pryzma itp.) winna być zbudowana z jednorodnego materiału skalnego, co decyduje o braku lokalnych

niejednorodności wpływających na obliczaną wartość gęstości. Trzeci – należy dokładnie rozpoznać przebieg pola regionalnego siły ciężkości w rejonie badań. Jego kształt determinuje wybór kierunku profili badawczych, w których określana jest poprawnie wartość gęstości.

Błąd wyznaczenia gęstości wiąże się bezpośrednio z błędami popełnianymi zarówno podczas wykonywania pomiarów mikrogravimetrycznych jak i geodezyjnych oraz wynika z dokładności wyznaczenia wartości poprawki topograficznej siły ciężkości.

#### 4. Metodyka prac terenowych i obliczeniowych

Prace mikrogravimetryczne wykonane zostały w dwóch etapach. W etapie pierwszym wykonano obserwacje wzdłuż czterech, „zewnętrznych” profili (rys. 4.1). Usytuowano je w takich odległościach od badanej przyzmy węgla, by jej efekt grawitacyjny nie wpływał na wartości siły ciężkości mierzone w tych profilach. Wyniki obserwacji mikrogravimetrycznych dokonane w tych profilach posłużyły do obliczeń anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera. Rozkład tych mikroanomalii przedstawiono na rys. 4.1. Przedstawia on kształt pola regionalnego dla badanego obszaru. Przebieg tego pola umożliwi wybór profili do obliczeń gęstości węgla.

W drugim etapie prac terenowych przeprowadzono obserwacje mikrogravimetryczne na górnej powierzchni przyzmy węgla, u jej podnóża oraz na skłonach jej skarp. Lokalizację punktów pomiarowych podano na rys. 4.1. Wyniki badań z tego etapu posłużyły do obliczeń gęstości objętościowej węgla.

Do pomiarów użyto wysokiej klasy grawimetru kwarcowego, astatyzowanego z automatycznym zapisem wyników obserwacji CG – 3 kanadyjskiej firmy SCINTREX o dokładności pomiaru 0,01 mGal i 0,005 mGal dla pomiarów powtarzanych.

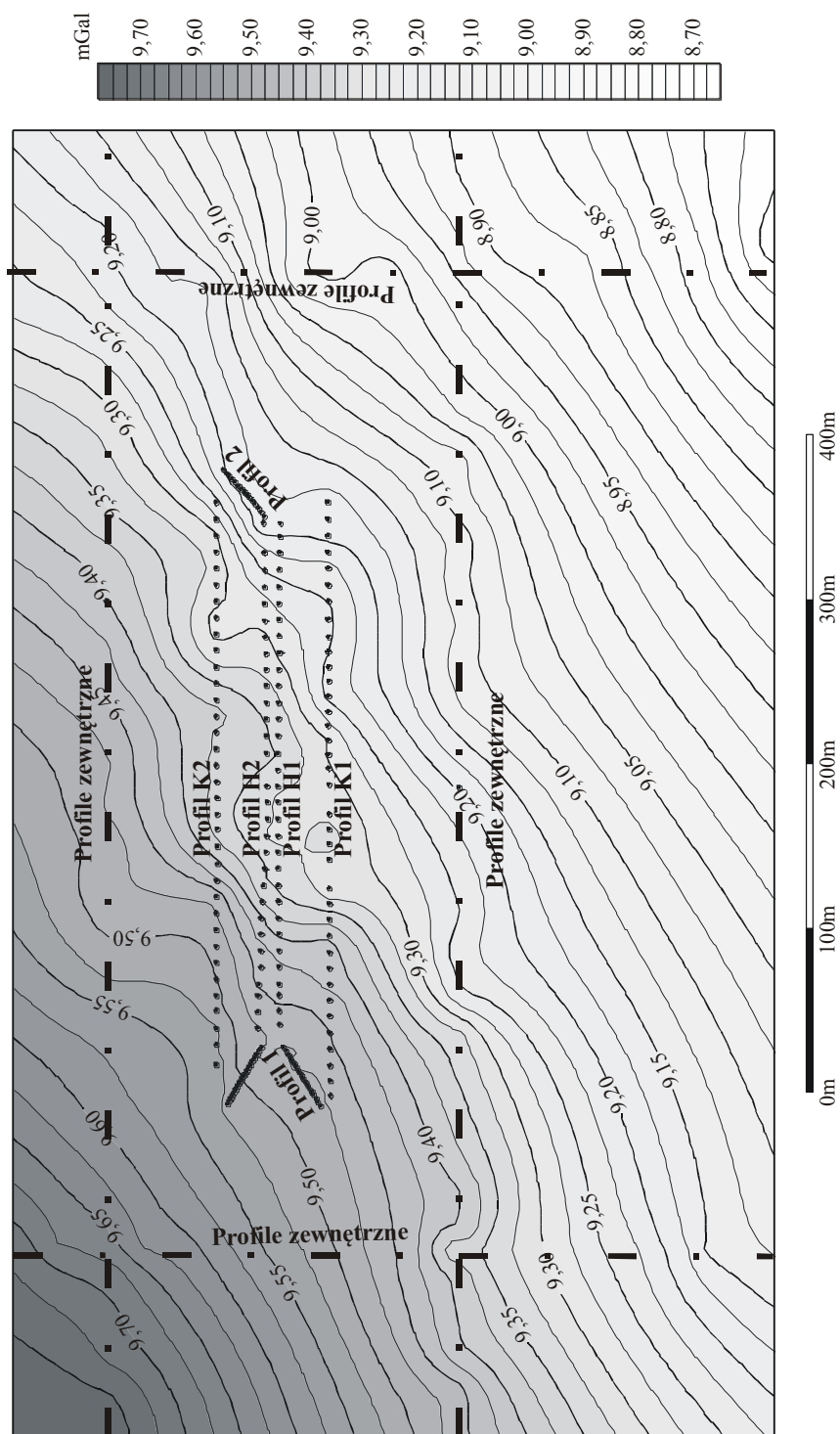
Powtórzone w wielu punktach obserwacje mikrogravimetryczne umożliwiły obliczenie średniego błędu kwadratowego pojedynczego pomiaru, który wyniósł  $\pm 0,007$  mGal, co wskazuje, iż badania wykonano z dużą precyzją.

Wykonano również niezbędne prace geodezyjne stanowiące integralną część badań mikrogravimetrycznych. Polegały one na określeniu położenia punktów pomiarowych w terenie, ich stabilizację oraz wyznaczenie współrzędnych w przyjętym, lokalnym układzie odniesienia.

Pomierzone w obu etapach wielkości względne natężenia siły ciężkości wyrównane zostały ze względu na dryft grawimetru. Po wprowadzeniu odpowiednich poprawek siły ciężkości posłużyły one do wyliczenia mikroanomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera (Fajkiewicz 1980). Ich rozkład przedstawiono na rys. 4.1.

Na szczególną uwagę zasługuje tutaj poprawka topograficzna siły ciężkości. Eliminuje ona grawitacyjne oddziaływanie rzeźby terenu otaczającej punkty pomiarowe. W przypadku realizowanego zadania „rzeźbą” tą była przyzma węgla. W punktach położonych u jej podnóża, na skarpach jak i na jej górnej powierzchni grawitacyjny wpływ tej przyzmy jest znaczny. W znaczący też sposób wpływa zarówno na kształt pola regionalnego jak i na obliczane gęstości objętościowe węgla.

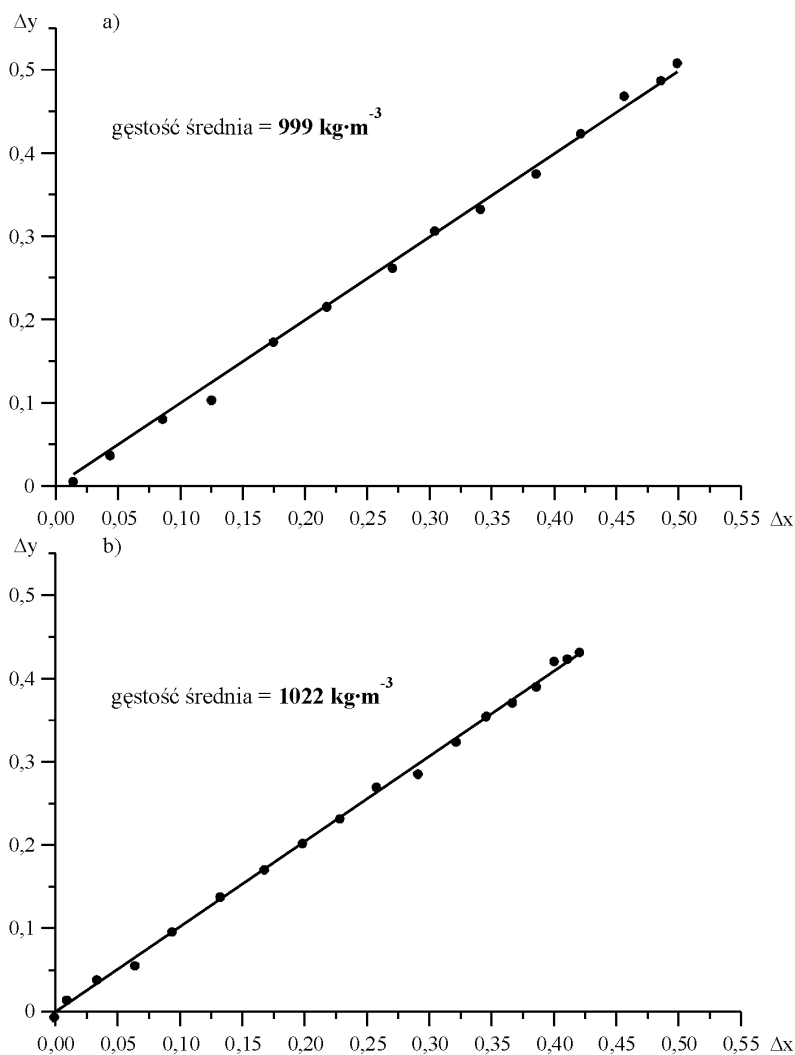
Dane z 4 profili „wewnętrznych” – K1, H1, K2, H2 i dwóch przebiegających po skłonach skarp – profil 1, profil 2, wykorzystane zostały do obliczeń gęstości objętościowej węgla.



Rys. 4.1. Rozkład mikroanomali siły ciężkości w rejonie składowiska węgla  
Fig. 4.1. Bouguer microanomaly on coal dump area

## 5. Wyniki badań i ich interpretacja

Analiza powierzchniowego rozkładu mikroanomali siły ciężkości w redukcji Bouguera, przedstawionego na rys. 4.1 przekonuje, iż pole siły ciężkości ulega dość regularnej zmianie. Wartości tego pola rosną w kierunku północno-zachodnim osiągając amplitudę zmian w obrębie zdjęcia grawimetrycznego równą 1 mGal. Ten zarejestrowany kierunek zmian pola regionalnego umożliwia poprawne obliczenie gęstości węgla w dwóch profilach usytuowanych na przeciwległych stokach przymy – w południowo-zachodnim narożniku – profil 1 oraz w północno-wschodnim – profil 2. Obliczenia wykonano stosując wyżej opisaną metodę Parasnisa (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Średnia gęstość objętościowa wyliczona metodą Parasnisa dla: a) profilu 1, b) profilu 2  
 Fig. 5.1. Average density by Parasnisa method for: a) profile 1, b) profile 2

Na rysunku tym przedstawiono zależności anomalii wolnopowietrznej ( $\Delta\gamma$ ) od sumy ( $\Delta x$ ) czynników wchodzących do obliczeń poprawki Bouguera i topograficznej. Zależności te są liniowe, a wartość współczynnika kierunkowego wykreślonej prostej odpowiada gęstości objętościowej. Zatem, na profilu 1, tj. w południowo-zachodnim narożniku pryzmy, gęstość objętościowa węgla wynosi  $1020 \text{ kg/m}^3$  a w przeciwległym narożniku, północno-wschodnim –  $999 \text{ kg/m}^3$  z błędem wyznaczenia  $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ .

Przeprowadzone na czterech równoległych do siebie profilach „wewnętrznych” obserwacje mikrograwimetryczne posłużyły do wyznaczenia gęstości węgla wzdłuż całej długości pryzmy. Zastosowano w tym celu również metodę Parasnisa, przy czym wybór par punktów pomiarowych do obliczeń gęstości determinował kształt pola regionalnego. Starano się tak dobrać położenia par punktów (na górnej powierzchni pryzmy i u jej podnóża), by leżały one w rejonach o najbardziej zbliżonych do siebie wartościach pola regionalnego. Taki wybór minimalizował wpływ tego pola na obliczaną gęstość objętościową węgla. Punkty pomiarowe ze stref, w których pole regionalne zaburzone zostało przez wpływ czynników lokalnych, zostały pominięte podczas doboru par punktów, na podstawie których obliczana była gęstość objętościowa wzdłuż badanej pryzmy węgla.

Na rys. 5.2 przedstawiono rozkłady obliczonych gęstości węgla w odniesieniu do położenia profili mikrograwimetrycznych i zasięgu tych części składowiska, do których odnoszą się wyznaczone gęstości węgla.

Średnia gęstość objętościowa węgla obliczona wzdłuż pryzmy na podstawie badań mikrograwimetrycznych wynosi  $1046 \text{ kg/m}^3$ . Została ona wyznaczona z błędem  $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ .

Jej wartość różni się nieco od wartości wyznaczonych w profilach 1 i 2, przebiegających po skłonach pryzmy węgla. Mniejsza wartość gęstości obliczona na skłonach spowodowana jest faktem mniejszego zagęszczenia pryzmy w jej brzegowych strefach. Skłony modelowane są przez luźne osypywanie się materiału tworzącego hałdę i nie ulegają zagęszczeniu bądź to poprzez naturalne zaleganie warstw nadkładu bądź poprzez ubijanie mechaniczne.

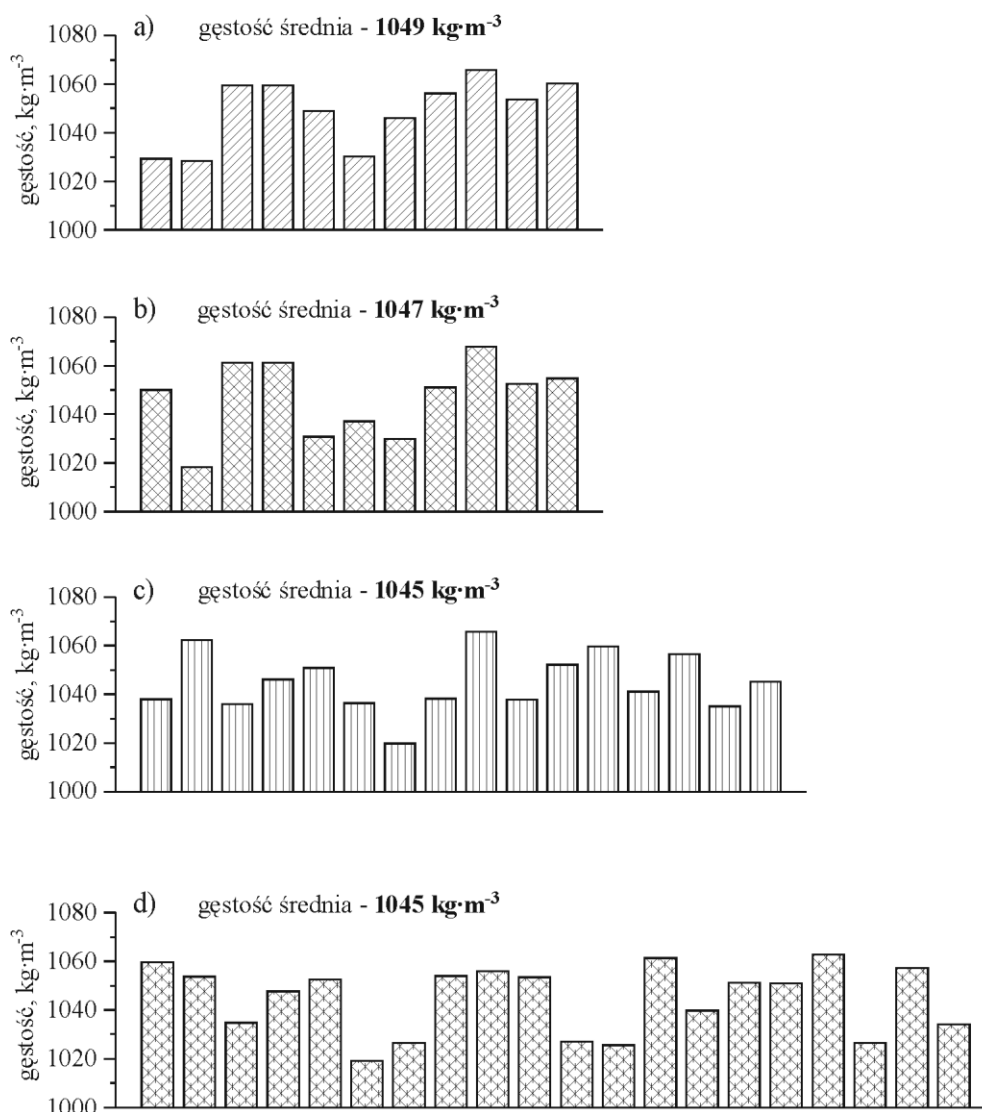
## 6. Wnioski

Badania grawimetryczne na wytypowanym składowisku węgla wchodziły w skład prac badawczych, których celem było opracowanie metodyki określania gęstości objętościowej badanej hałdy, na podstawie której wyliczana będzie masa składowanego materiału skalnego. Prócz nieinwazyjnych, powierzchniowych badań grawimetrycznych określających wartość gęstości objętościowej *in situ*, gęstość ta określana była w sposób laboratoryjny, na podstawie próbek węgla pobranych z otworów (Mazurek 2006).

Każda z zastosowanych metod pozwoliła na określenie w sposób niezależny gęstości objętościowej węgla składowanego na hałdzie. W ich wyniku otrzymano wartości w granicach:

- dla metody otworowej (wyznaczone z dokładnością  $45 \text{ kg/m}^3$  czyli ok. 3,5%) –
  - dla próbek nienaruszonych  $1070\text{--}1300 \text{ kg/m}^3$ ,
  - dla kruszywa węglowego o naturalnej wilgotności w stanie luźnym i zagęszczonym  $750\text{--}960 \text{ kg/m}^3$ ,
  - dla kruszywa węglowego suchego w stanie luźnym i zagęszczonym  $850\text{--}1070 \text{ kg/m}^3$ ;
- dla badań mikrograwimetrycznych *in situ* –  $999\text{--}1047 \text{ kg/m}^3$  (z dokładnością  $20 \text{ kg/m}^3$  czyli ok. 2%).

Zauważyć należy, iż gęstości obliczone na podstawie badań grawimetrycznych mieszczą się w granicach wartości wyznaczonych metodami otworowymi.



Rys. 5.2. Rozkład wartości gęstości objętościowej wzdłuż hałdy węgla obliczona z punktów pomiarowych leżących na profilach:

a) K2 i H2 b) K2 i H1 c) K1 i H2 d) K1 i H1

Fig. 5.2. Density value during the coal slag heap, calculated from two points lying on profiles:

a) K2 i H2 b) K2 i H1 c) K1 i H2 d) K1 i H1

Wykorzystana metoda grawimetryczna pozwala na wyznaczenie gęstości objętościowej z dużą dokładnością.

Zaletą wybranej metody jest to, iż jako metoda powierzchniowa pozwala na określenie gęstości w sposób niemal ciągły wzdłuż całej badanej formy nasypowej, co pokazał przedstawiony przykład. W przypadku metody otworowej jest to określenie jej wartości jedynie w punkcie wiercenia, a poza tym nie w każdej formie można wiercić otwory.

Zatem na podstawie metody grawimetrycznej wnioskować można o strefach, w których materiał skalny został słabo zagęszczony lub wymyty. Umożliwia to wykonanie przeglądu stanu zbudowanych form i na ewentualną reakcję w przypadku pojawienia się miejsc, gdzie w wyniku zmniejszenia gęstości nasypu dojść może do przerwania jego ciągłości.

### **Literatura**

- [1] Fajklewicz Z. 1980: Mikrogravimetria. Wyd. Śląsk Katowice.
- [2] Madej, J. 1975: Badania rozkładu mas w zaporach ziemnych metodą mikrogravimetryczną. Zeszyty Naukowe AGH, nr 524, Geologia, z. 24, Kraków.
- [3] Nettleton L.L. 1940: Geophysical Prospecting for Oil, Mc Graw-Hill Book Co, New York.
- [4] Parsanis D.A. 1952: Study of Rock Densities in the English Midlands. Monthly Notice of the Royal Astronomical Society Geophysical Supplement, vol. IV, no. 5.
- [5] Mazurek J. 2006, Sprawozdanie z badań nr 56, Laboratorium Badania Własności Skał i Wyrobów Kamieniarskich, Archiwum Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii.

### **Microgravity survey of embankment form bulk density for instance coal slag heap**

This paper present an example of how gravimetric method can be applied for the assessment of the current condition of rock mass over a embankment form bulk for instance coal slag heap. The method used during analysis is the Parasnis method.

The main aim of this survey was the coal density description. The gravity method is a surface method. It permit almost continuous describe of density value along embankment form bulk. It can be used in this form service and prevent it destruction.

*Przekazano: 10 kwietnia 2006 r.*