

**Pilecki Zenon\*, Baranowski Adam \*\***

*\*AGH/IGSMiE PAN, \*\*AGH*

## **Estimation of dimension of regular type sinkhole activated by abandoned shafts**

### **Abstract**

Sinkholes are natural phenomena in the landscape that cover the majority of old mining sites of shallow hard coal and zinc-lead exploitation in Silesian Coal Basin. Each sinkhole has a unique characteristics due to mechanism of its occurrence. Some of them are related with old, abandoned shafts, often not quite well closed.

Based on numerical modeling a dependence of sinkhole diameter upon overburden soil parameters has been established. This dependence correlates quite well with hypothesis by prof. Chudek, even not proved yet.

The proposed paper discusses some theoretical aspects of sinkhole occurrence in the condition of Silesian Coal Basin. In the core part, basic assumptions and results of numerical calculations are presented. Finally, the calculated dependence and resulted graphs are compared to analytical once.

### **1. Wprowadzenie**

Występowanie deformacji nieciągłych na powierzchni terenu związane jest nie tylko z poeksploatacyjnymi pustkami, lecz również wynika z niewłaściwej likwidacji lub samolikwidacji starych wyrobisk szybowych. Na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) i w rejonie Olkusza stare szybiki górnicze po historycznej eksploatacji płytkich pokładów węgla kamiennego i rud metali są słabo udokumentowane. Lokalizacja takich wyrobisk szybowych jest udokumentowana w sposób niepełny na obecnych mapach górniczych, a zachowane, stare mapy górnicze nie gwarantują dokładnego odnalezienia wyrobiska na powierzchni.

W ogólnej ilości zaistniałych deformacji nieciągłych na terenie GZW jedynie niewielka część, około 5%, została spowodowaną niewłaściwie zlikwidowanymi szybami, szybikami i biedaszybami (Chudek 2002). Nie oznacza to, że tego rodzaju zagrożenie, głównie dla rozwoju budownictwa, jest niewielkie. Można wskazać rejony zagrożone wystąpieniem zapadlisk, lecz nie można przewidzieć czasu ich wystąpienia. Na przykład, prawdopodobieństwo zniszczenia stosunkowo nowocześnie zlikwidowanego szybu, przez przykrycie żelbetową pokrywą, rośnie wraz z upływem czasu w związku z rozwojem procesów niszczenia w obudowie i otaczającym ją ośrodku. Zdarza się, że powstanie pustki w wyrobisku szybowym zlikwidowanym przez zasypanie jest efektem przemieszczenia materiału użytego do wypełnienia szybu. Materiał ten przemieszcza się do wyrobisk przyszybowych w wyniku zniszczenia, z różnych przyczyn, uszczelnienia (tamy) lub jego braku.

Powierzchnia terenu wokół wyrobiska szybowego może obniżyć się lub w sposób nagły utworzyć zapadlisko. Do głównych czynników, które mają wpływ na wystąpienie zapadlisk związanych z wyrobiskami szybowymi należy zaliczyć:

- niekorzystne warunki wodne wynikające z intensywnych opadów atmosferycznych, związane z wypłukiwaniem materiału wypełniającego wyrobisko, procesem sufozji w ośrodku otaczającym wyrobisko szybowe czy korozji fizycznej i chemicznej obudowy,
- postępującą degradację obudowy szybów, szybików i biedaszybów,
- „ucieczkę” materiału wypełniającego wyrobisko szybowe,
- wzrost obciążenia gruntu w wyniku posadowienia budowli,
- obciążenia dynamiczne związane z drganiami komunikacyjnymi lub sejsmicznymi.

Jednym z istotnych parametrów charakteryzujących wielkość zagrożenia dla użytkowników powierzchni terenu jest średnica lub wymiary powierzchniowe zapadliska. Praca omawia jeden ze sposobów wyznaczenia wymiarów zapadliska oparty na modelowaniu numerycznym. Sposób ten można wykorzystać nie tylko do przewidywania średnicy zapadliska „szybowego” lecz również wytworzonego przez inne pustki w górotworze, o znanych w przybliżeniu wymiarach.

Istnieją również analityczne metody obliczeń wielkości zapadliska w zależności od właściwości luźnego nadkładu przedstawione w pracy M. Chudka (2002) czy F.G. Bell’a (1988). W pracy dokonano porównania wyników obliczeń numerycznych z wynikami metody analitycznej.

## **2. Analityczny sposób wyznaczenia wielkości zapadliska na powierzchni terenu**

Deformacje nieciągłe, w sensie definicji przedstawionej przez M. Chudka (2002) są takimi formami ukształtowania powierzchni terenu, które charakteryzują się przerwaniem jego ciągłości. Natomiast pod pojęciem zapadliska, w związku z jego różną interpretacją, przyjęto takie formy deformacji nieciągłych, które charakteryzują się zapadnięciem się powierzchni terenu.

W górotworze skłonnym do generowania zapadlisk należy wyróżnić dwie strefy decydujące o charakterze i wielkości deformacji nieciągłych (Chudek 2002):

- warstwy skał zwięzłych (górotwór zasadniczy), w którym występuje pustka,
- warstwę luźnych gruntów nadkładu.

Proces deformowania się górotworu prowadzący do powstania zapadliska na powierzchni terenu został opisany w licznych publikacjach krajowych i zagranicznych m. in. w pracach M. Chudka (2002), Z. Fajklewicza i in. (2004) czy E. Popiołka i Z. Pileckiego (2005). Na podstawie opisów zawartych w tych pracach, proces tworzenia się zapadliska można scharakteryzować następująco:

- w bezpośrednim stropie pustki, w wyniku naprężeń rozciągających, tworzy się strefa spękanych skał, generalnie w kształcie zbliżonym do „sklepienia ciśnien”. Wysokość tej strefy zależy od objętości pustki oraz budowy i właściwości ośrodka skalnego (górotworu zasadniczego),
- spękany ośrodek skalny z upływem czasu ulega rozluźnieniu i fragmenty skał opadają na dno pustki tworząc zawalisko. Powierzchnia stropu pustki przemieszcza się ku powierzchni terenu. Pomiędzy stropem a zawaliskiem tworzy się pustka wtórna,
- w wyniku rozwoju procesów reologicznych, przyspieszanych najczęściej procesami wietrzenia z udziałem wody, strefa spękań w stropie pustki przemieszcza się ku powierzchni terenu. Jednocześnie pustka zmniejsza swoją objętość, w związku ze zwiększoną objętością luźnych fragmentów skalnych,
- jeżeli grubość górotworu zasadniczego, na drodze „wędrówki” pustki ku powierzchni terenu jest odpowiednio duża, to pustka wtórna może ulec samopodsadzeniu. Jeżeli grubość górotworu zasadniczego jest niewystarczająca do samopodsadzenia pustki

podczas jej przemieszczenia do granicy nadkładu luźnego, wówczas bardzo prawdopodobne jest powstanie zapadliska na powierzchni terenu.

Jeżeli w nadkładzie występują grunty luźne należy się liczyć z wymiarami zapadliska w przekroju poziomym większymi od wymiarów pustki propagującej w górotworze zasadniczym. Wielkość tego zapadliska będzie zależeć od grubości luźnego nadkładu, parametrów wytrzymałościowych gruntu, warunków wodnych i warunku samopodsadzenia się propagującej pustki. W przypadku starych, zlikwidowanych wyrobisk szybowych, zagrożenie zapadliskowe ma miejsce jeżeli na odcinku nadkładu luźnych gruntów obudowa wyrobiska szybowego uległa zniszczeniu lub w najprostszych przypadkach zamknięcie wylotu szybu uległo zniszczeniu.

Maksymalną średnicę zapadliska  $D$  na powierzchni terenu można wyznaczyć z zależności (Bell 1988):

$$D = 2 \cdot Z \tan(90^\circ - \Theta) + 2r \quad (1)$$

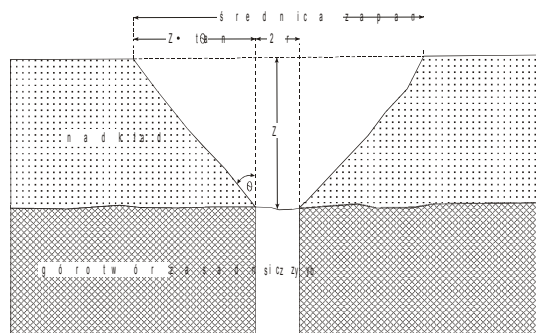
gdzie:

$Z$  – grubość luźnego nadkładu,

$\Theta$  - kąt tarcia wewnętrznego luźnego materiału nadkładu,

$r$  – promień wyrobiska szybowego.

Na rysunku przedstawiono schemat ilustrujący zależność (1). Im grubsza będzie warstwa luźnych utworów w nadkładzie, tym wielkość powierzchniowych wymiarów zapadliska będzie większa.



Rys. 1. Sposób obliczenia średnicy zapadliska w luźnym nadkładzie nad starym wyrobiskiem szybowym (Bell 1988)

### 3. Numeryczny sposób wyznaczenia wielkości zapadliska na powierzchni terenu

#### 3.1. Sposób przeprowadzenia obliczeń

Jakość wyników uzyskiwanych w analizie numerycznej w dużym stopniu zależy od wielu złożonych zagadnień począwszy od rozmiarów i kształtu modelu, warunków brzegowych i początkowych, stałych materiałowych czy doboru procedur obliczeniowych. Obliczenia numeryczne wykonano dla warunków starego, zlikwidowanego szybika „Andrzej” w rejonie Olkusza. Zebranie danych wejściowych na ogół polega na ustaleniu parametrów geologiczno-inżynierskich ośrodka. W przypadku szybika „Andrzej” stałe materiałowe przyjęto z badań archiwalnych, które uzupełniono danymi literaturowymi. Szybik ten był przyczyną średniej wielkości zapadliska (o średnicy leja 6 metrów i głębokości 2 metrów). Posiada on przypuszczalną głębokość 32 metry, a w przekroju poziomym jest kwadratem o boku 2 m.

Obliczenia przeprowadzono zakładając płaski stanu odkształcenia, w ośrodku sprężysto-plastycznym z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra. Modelowanie przeprowadzono w następujących podstawowych etapach:

- konstrukcja modelu obliczeniowego,
- doprowadzenie do równowagi sił w polu naprężeń pierwotnych,
- modelowanie wyrobiska szybowego i wyrobisk przyszybowych w kilku etapach z doprowadzeniem do równowagi sił w polu naprężeń wtórnych,

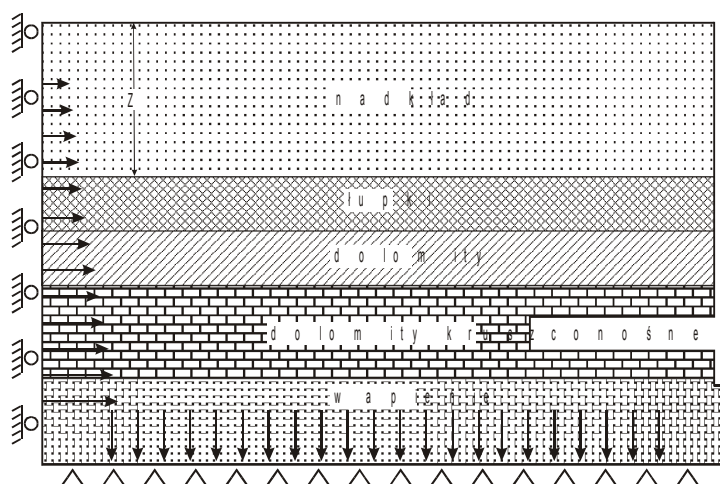
- wariantowa analiza stanu naprężenia i przemieszczenia w zależności od grubości nadkładu oraz rodzaju materiału w nadkładzie.

Na rysunku 2 przedstawiono geometrię modelu oraz jego warunki brzegowe i początkowe. Przyjęto, dla usprawnienia efektywności obliczeń model osiowosymetryczny. Wielkość składowych naprężenia pionowej i poziomej przyjęto jako zmienne w przedziale głębokości modelu, przy czym współczynnik rozporu bocznego  $\lambda=0,42$ . Model posiadał wymiary prostokąta o wysokości 150 metrów i szerokości 100 metrów. Oczko siatki obliczeniowej wynosiło 0.5 x 0.5 metra.

W analizie zależności średnicy zapadliska od grubości nadkładu, założono zgodnie z rozwiązaniem analitycznym (1), że średnica szybu nie ma wpływu na zachowanie się nadkładu, a jedynie powiększa średnicę zapadliska.

Budowę geologiczną modelu opracowano na podstawie materiałów archiwalnych. W podłożu występują cztery warstwy, natomiast w nadkładzie jedna, której właściwości były zmieniane w trakcie obliczeń. W modelu nie uwzględniono zawodnienia zakładając drenujący charakter górotworu. Pominięto również wpływ przepływu wody na zachowanie się ośrodka przyjmując, że jest to odrębne zagadnienie do rozważenia.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu metody różnic skończonych *FLAC 2D v.4.0.*, prod. Itasca, USA.



Rys. 2. Model obliczeniowy z warunkami brzegowymi i początkowymi

### 3.2. Stałe materiałowe

W obliczeniach przyjęto, że nadkład składa z jednego rodzaju materiału, przy czym analizowano trzy rodzaje gruntów (tab. 1), a górotwór zasadniczy z czterech warstw geologicznych (tab. 2).

Tabela 1.

Stałe materiałowe warstwy nadkładu przyjęte do obliczeń

| Rodzaj gruntu  | Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ] | Moduł sprężystości objętościowej [Pa] | Moduł sprężystości post. [Pa] | Kąt tarcia wewnętrzne go [stopnie] | Spójność [Pa] |
|----------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------|
| piaski i żwiry | 1500                                      | 1,50E8                                | 6,92E7                        | 39                                 | 0             |
| gliny          | 2060                                      | 2,00E7                                | 9,23E6                        | 15                                 | 2,60E4        |
| ily pylaste    | 2090                                      | 1,80E7                                | 5,11E6                        | 9                                  | 1,12E5        |

Tabela 2.

Stałe materiałowe górotworu zasadniczego przyjęte do obliczeń

| Numer warstwy | Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ] | Moduł sprężystości objętościowej [Pa] | Moduł sprężystości i postaciowej [Pa] | Wspł. Poissona | Kąt tarcia wewn. [stopnie] | Dylatacja [stopnie] | Wytrzymałość na rozciąganie [Pa] | Spójność [Pa] |
|---------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------|
| 2 warstwa     | 1900                                      | 8,33E9                                | 3,85E9                                | 0,30           | 13,0                       | 0,0                 | 1,2E+07                          | 7E4           |
| 3 warstwa     | 2550                                      | 7,11E9                                | 5,33E9                                | 0,20           | 36,3                       | 0,0                 | 6,2E+06                          | 9E6           |
| 4 warstwa     | 2650                                      | 7,84E9                                | 5,96E9                                | 0,20           | 36,3                       | 0,0                 | 6,9E+06                          | 9E6           |
| 5 warstwa     | 2100                                      | 2,26E0                                | 1,11E0                                | 0,20           | 36,3                       | 0,0                 | 1,5E+06                          | 9E6           |

warstwy: 2 – (kajper) łupki pstrze i mułowce; 3 – (trias) dolomity diploporowe; 4 – (trias) dolomity kruszonośne; 5 – (trias) wapienie KTG

### 3.3. Analiza wyników obliczeń

Na rysunku 3 pokazano przykład wyników obliczeń zachowania się nadkładu (piasku i żwiru) w strefie wpływu wyrobiska szybowego. Średnica zarysowującego się leja wynosi około 6,0 m i jest zbliżona do obserwowanego w rzeczywistości (rys. 3a). Zwiększając grubość nadkładu zwiększa się średnica leja, lecz jedynie do pewnej granicznej wielkości, powyżej której rozpoczyna się proces „kominowania” (rys. 3b). Powyżej granicznej głębokości, w spągowej części nadkładu w otoczeniu szybika zapadlisko przyjmuje kształt

„dzwonu”. Proces ten zilustrowano wykresem zależności znormalizowanej średnicy zapadliska  $y = D/D_{\max}$  od grubości luźnego nadkładu (rys. 4). Charakter zmian zależności jest dwumodalny. Do głębokości krytycznej zależność przyjmuje postać nieliniową, a powyżej tej granicy jest liniowa (rys. 5). Na przykład w zależności od rodzaju materiału nadkładu w części nieliniowej model można aproksymować zależnością wielomianową lub logarytmiczną:

- dla pisaków i żwirów
- dla glin
- dla ilów pylastych

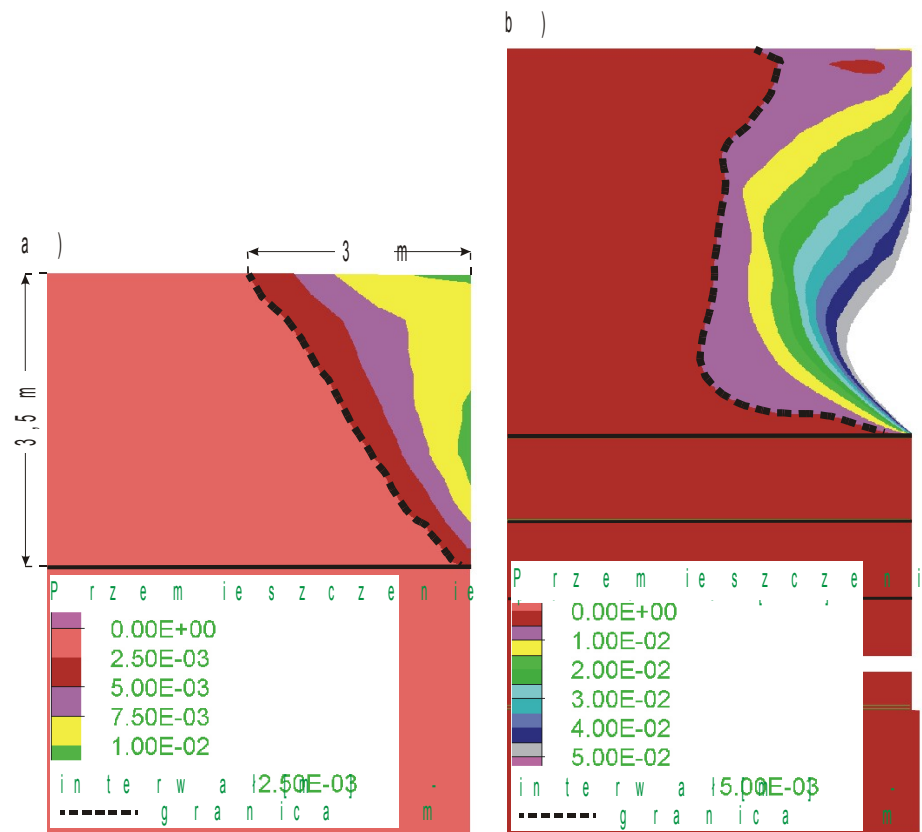
gdzie:

$D_{\max}$  - maksymalną średnicą zapadliska w analizowanym przedziale zmienności  $x$ ,

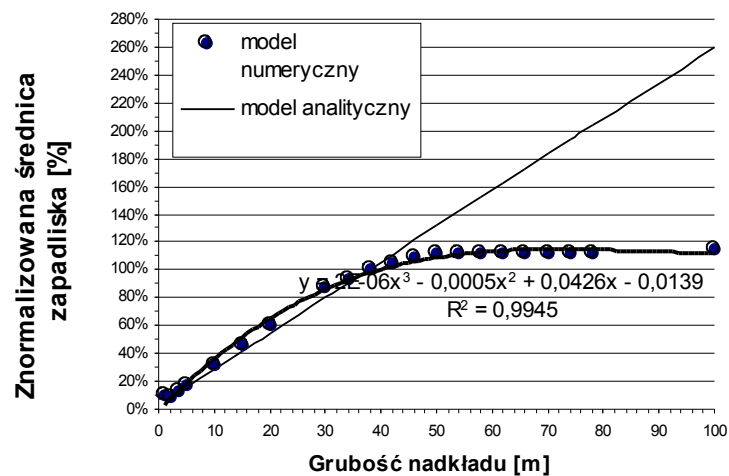
$X$  – grubość nadkładu.

Dla porównania na rysunku 4 pokazano wykres zależności średnicy zapadliska obliczonej metodą analityczną według wzoru (1). Na wykresie widać, że przy grubości nadkładu powyżej około 45 m, składającego się jedynie z utworów luźnych - piasku i żwiru, średnica zapadliska nie zwiększa się. Zależność „analityczna” jest w przybliżeniu zgodna z zależnością „numeryczną” dla grubości nadkładu do granicy krytycznej, dla konkretnej średnicy zapadliska.

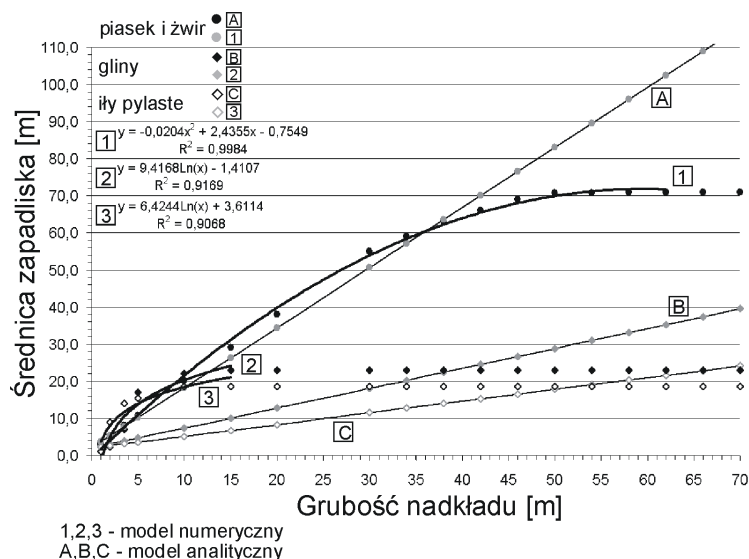
Na kolejnym rysunku 5 pokazano zależności średnicy zapadliska od grubości nadkładu dla wszystkich rodzajów materiałów przyjętych do obliczeń (tab. 2). W przypadku glin i ilów pylastych głębokości graniczne w nadkładzie wynoszą około 10 m, a średnice zapadlisk nie przekraczają 25 m.



Rys. 3. Przykład rozkładu przemieszczeń poziomych w strefie zapadliskowej nad wyrobiskiem szybowym dla grubości nadkładu 3,5 m (a) oraz powyżej głębokości granicznej zmiennej ze względu na rodzaj materiału(b)



Rys. 4. Wykres zależności znormalizowanej średnicy zapadliska od grubości luźnego nadkładu składającego się z piasków i żwirów nad wyrobiskiem szybowym



Rys. 5. Wykres zależności średnicy zapadliska od grubości nadkładu dla różnych rodzajów materiału nad wyrobiskiem szybowym

#### 4. Wnioski

Wyniki obliczeń numerycznych pokazują, że decydujący wpływ na wielkość zapadliska w warunkach nadkładu luźnych utworów i górotworu zasadniczego zbudowanego ze skał zwięzłych ma grubość i właściwości nadkładu. Powyżej pewnej wartości granicznej grubości nadkładu średnica zapadliska pozostaje w przybliżeniu niezmienna. Dla utworów typowo luźnych piaszczysto-żwirowych granica ta wynosi około 45 m. Można przyjąć, że dla grubości nadkładu większych od wartości granicznych rozpoczyna się proces „kominowania”. W procesie tym, w części spągowej nadkładu, ujawniają się charakterystyczne kształty zapadliska w postaci „dzwonu”.

Przedstawiona analiza numeryczna została wykonana dla stosunkowo prostej geometrii modelu ośrodka. Za pomocą obliczeń numerycznych można analizować zachowanie się bardziej złożonej budowy ośrodka, a zwłaszcza nadkładu, składającego się z kilku warstw, w tym utworów luźnych i zwięzłych.

#### Literatura

- [1] Bell F. G., 1988: Land development. State-of-the-art in the location of old mine shafts. Bull. of the Int. Ass. of Eng. Geology 37, 91-98.
- [2] Chudek M., 2002: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu. Wyd. Politechniki Śl., Gliwice.
- [3] Popiołek E., Pilecki Z. red. red., 2005: Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.