

RYSZARD HEJMANOWSKI\*, ANDRZEJ KWINTA\*\*

## Modelowanie deformacji ciągłych powierzchni terenu w warunkach zmiennego zalegania złoża

### Wprowadzenie

W ostatnich latach coraz częściej w gronie specjalistów z zakresu ochrony terenów górniczych dyskutuje się o wiarygodności i o możliwościach podniesienia dokładności prognoz deformacji (Hejmanowski, Malinowska 2009; Kowalski 2005; Niedojadło 2008). Tego typu rozważania wynikają z rosnących kosztów finansowych i społecznych odszkodowań za szkody występujące w związku z realizowaną eksploatacją górnictw. Problem wiarygodności to przede wszystkim jakość danych geologiczno-górnictw (Noworyta, Sroka 2005; Popiołek, Ostrowski 1981; Stoch 2005), natomiast podniesienie dokładności prognozy może się wiązać z przyjęciem odpowiedniego modelu złoża oraz dokładności estymowanych parametrów modelu obliczeniowego. Z uwagi na powszechność stosowanej w polskim górnictwie teorii Knothe, przedmiotem dyskusji mogą być parametry modelu  $a$  oraz  $r$  (czy też zamiennie  $\beta$ ), jak również dodatkowo parametr przemieszczeń poziomych  $B$  (Budryk 1953) i współczynnik czasu  $c$  (Knothe 1953). Autorzy, zajmujący się od kilkunastu lat problematyką prognoz deformacji, zwrócili uwagę na często występujące uproszczenia modelu złoża przyjmowanego do obliczeń (Knothe 2005), co skutkuje istotnymi niedokładnościami wyników prognoz. Rozbieżności wyników prognoz w stosunku do obserwowanych po zakończeniu eksploatacji rzeczywistych deformacji powierzchni terenu jednoznacznie wskazują na niedopuszczalność tego typu uproszczeń. W artykule zaprezentowano wpływ uproszczenia opisu zalegania złoża na niedokładność wyników obliczeń modelowych. Ponadto przedstawiono przykład modelowania, w którym wyko-

\* Dr hab. inż., Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH Kraków;  
e-mail: hejman@agh.edu.pl

\*\* Dr inż., Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków.

rzystany został autorski system prognozowania MODEZ (Hejmanowski, Kwinta 2009). Program ten pozwala na niezwykle dokładne modelowanie warunków zalegania złoża oraz przebiegu samego procesu eksploatacji.

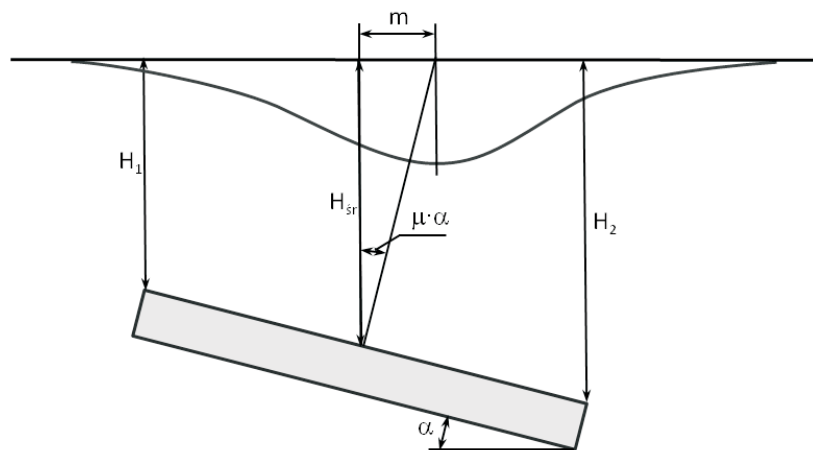
### 1. Zaleganie złoża w modelu obliczeniowym

Pod pojęciem zalegania złoża rozumie się tutaj nachylenie warstwy złożowej, a także zmienną miąższość eksploatowanej warstwy. O ile w przypadku złóż węgla kamiennego grubość jest z reguły prawie stała, o tyle zmienność tej wielkości w złożach rud miedzi może dochodzić do ponad 100% w obrębie sąsiednich parcel.

Zazwyczaj nie uwzględnia się nachyleń parcel eksploatacyjnych mniejszego niż  $10^\circ$ , uznając takie pokłady za prawie poziome. Oczywiście takie podejście było aktualne 40–60 lat temu, kiedy przeciętne głębokości eksploatacji były znacznie mniejsze niż współcześnie. Przy głębokościach eksploatacji dochodzących do 80–1000 m nawet nachylenie rzędu  $5^\circ$  może powodować znaczne nieregularności pola przemieszczeń. Obecnie, dysponując nowoczesnymi narzędziami informatycznymi, należy możliwie dokładnie uwzględniać w prognozach nachylenie, a nawet jego lokalną zmienność. Wpływ nieuwzględnienia nachyleń złoża jest dwójaki:

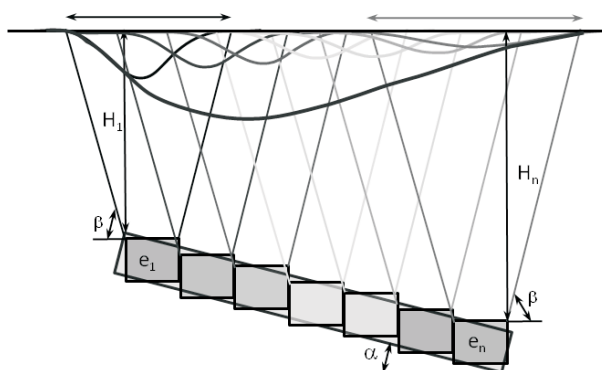
- nie uwzględnia się tzw. dewiacji niecki obniżeniowej  $m$  w kierunku upadu (rys. 1),
- nie uwzględnia się asymetrii niecki obniżeniowej wynikającej z większego rozproszenia wpływów po stronie upadu niż w części wyniesionej pola przemieszczeń (rys. 2).

W prognozach deformacji spotyka się upraszczanie danych geologiczno-górnicznych, polegające na wprowadzaniu średniej głębokości parcel  $z_0$  oraz średniej rzędnej powierzchni terenu  $H$  (rys. 3), jak i średniej miąższości w ramach danej parceli. W ten sposób



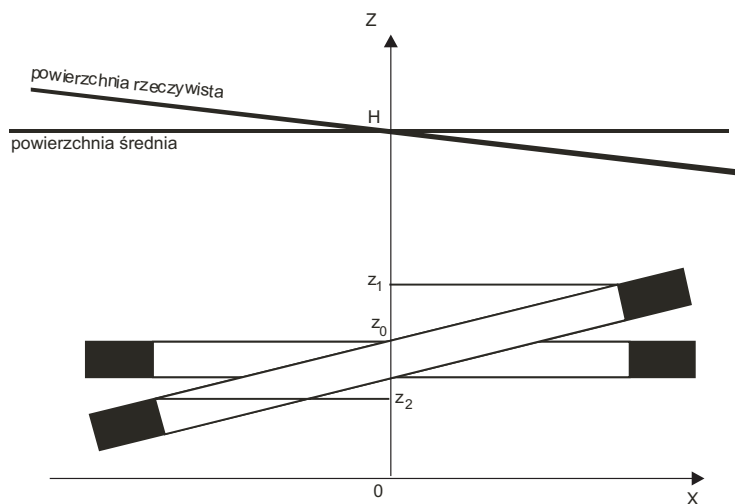
Rys. 1. Efekt dewiacji wpływów w kierunku upadu warstwy złożowej (Hejmanowski i in. 2009)

Fig. 1. Influence deviation effect in dip of bed direction (Hejmanowski et al. 2009)



Rys. 2. Efekt asymetrii niecki obniżeniowej (Hejmanowski i in. 2009)

Fig. 2. Asymmetry effect in subsidence trough (Hejmanowski et al. 2009)



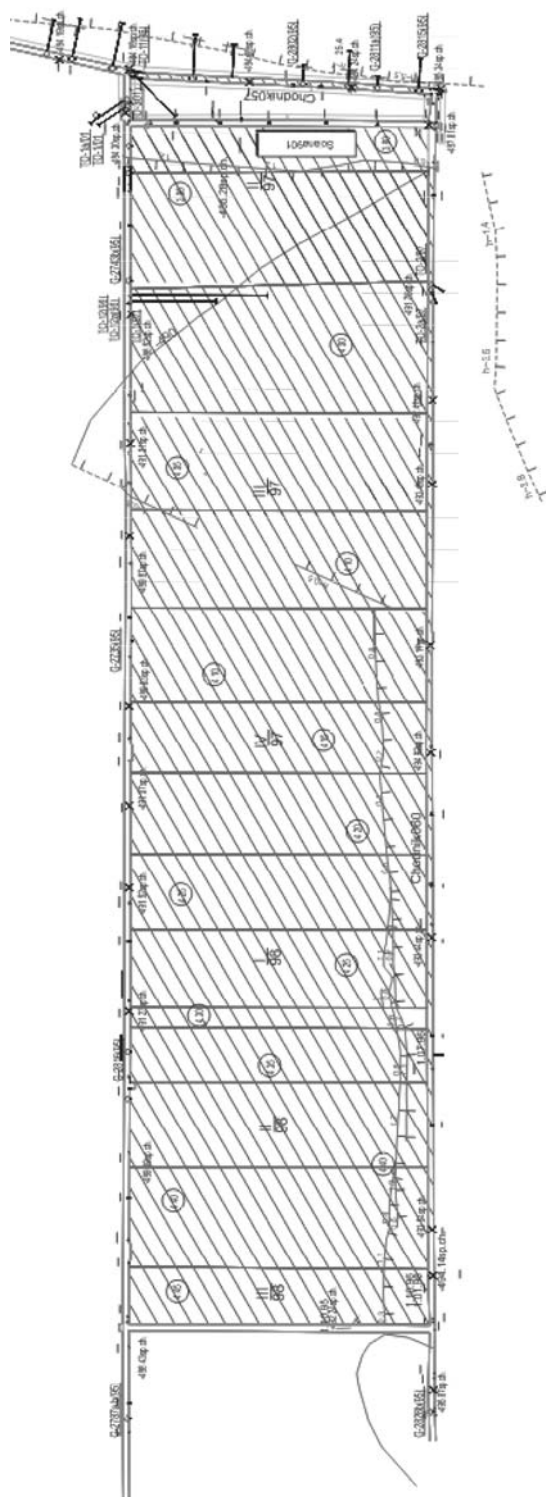
Rys. 3. Uśrednione dane geologiczne w modelu obliczeniowym

Fig. 3. Mean geological data in calculated model

wprowadzając dziewięć niecki nie uwzględnia się istotnego zniekształcenia pola przemieszczeń, które rejestruje się pomiarami geodezyjnymi.

## 2. Przykład obliczeniowy

W celu zilustrowania wpływu nieuwzględnienia zmiennych warunków zalegania eksploatowanej parceli przeprowadzono odpowiednie obliczenia. Do obliczeń przyjęto rzeczywistą eksploatację górnictwem zrealizowaną w postaci pojedynczej ściany w latach 1997–1998 przez kopalnię węgla kamiennego. Fragment mapy górniczej z uwzględnioną eksploatacją przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Ściana eksploatacyjna uwzględniona w obliczeniach

Fig. 4. Exploitation panel considered in the subsidence prediction

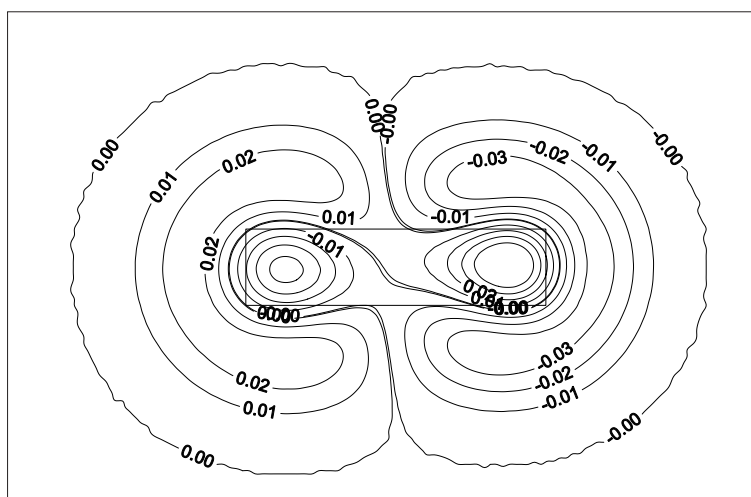
Uwzględniona w obliczeniach eksploatacja oraz konfiguracja powierzchni terenu powodują, że największa różnica głębokości pomiędzy punktami charakterystycznymi parceli eksploatacyjnej wynosi około 110 m, co przy długości parceli około 950 m daje nachylenie około 7 stopni. Nachylenie takie kwalifikuje ten przykład do pokładów poziomych, ponieważ przyjmuje się, że graniczna wartość nachylenia, powyżej której należy w obliczeniach uwzględniać odrzutowanie spowodowane nachyleniem wynosi 10 stopni. W analizowanym przypadku występuje również zróżnicowanie miąższości eksploatacji, która waha się w zakresie od 3,90 m do 4,45 m.

Dla tej eksploatacji przeprowadzono dwa obliczenia teoretyczne. W pierwszym obliczeniu uwzględniono zmienność zalegania pokładu (nachylenia), zmienność miąższości eksploatacji oraz ukształtowanie powierzchni terenu. W drugim przypadku wprowadzono uśrednione wartości głębokości eksploatacji, powierzchni terenu oraz miąższości eksploatacji. W obu przypadkach parametry modelu obliczeniowego przyjęto zgodnie z danymi pozyskanymi z kopalni:

- parametr kierowania stropem  $a = 0,8$ ,
- parametr zasięgu wpływów głównych  $\text{tg } \beta = 2,0$ ,
- współczynnik proporcjonalności  $B = 0,4r$ ,
- współczynnik dewiacji niecki  $\mu = 0,7$ .

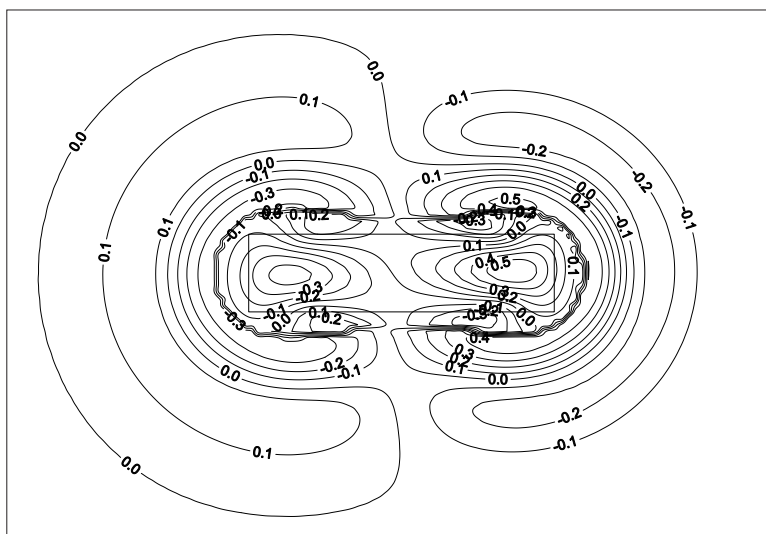
Obliczenie wykonano dla stanu asymptotycznego eksploatacji. Punkty obliczeniowe rozmieszczone były w regularnej siatce kwadratów o boku 20 m (10 200 punktów).

Obliczenia teoretyczne przeprowadzono w systemie MODEZ wersja 4.21. Uzyskane wartości wskaźników deformacji porównano, poprzez wyznaczenie różnic pomiędzy jednym i drugim obliczeniem, to znaczy od wskaźników deformacji wyznaczonych z danych zróżnicowanych odjęto wartości wskaźników wyznaczone dla uśrednionych danych. Wy-



Rys. 5. Różnica pomiędzy obliczonymi obniżeniami

Fig. 5. Difference between calculated subsidence



Rys. 6. Różnica obliczonych maksymalnych odkształceń poziomych

Fig. 6. Difference between calculated maximal horizontal strains

niki różnic dla przemieszczeń pionowych przedstawiono na rysunku 5, natomiast dla maksymalnych odkształceń poziomych przedstawiono na rysunku 6.

Różnice przemieszczeń pionowych (rys. 5) dla analizowanego przykładu wahają się w granicach od  $-44$  mm do  $+57$  mm, natomiast dla maksymalnych odkształceń poziomych te różnice wahają się pomiędzy  $-0,45$  mm/m a  $+0,58$  mm/m.

Przeprowadzone obliczenia na przykładzie przedstawionym powyżej potwierdzają, że nieuwzględnienie zmiennych warunków zalegania parceli eksploatacyjnej w trakcie obliczeń teoretycznych może prowadzić do istotnych rozbieżności i może generować błędne wartości obliczonych wskaźników deformacji. Uzyskane na rysunkach 5 i 6 rozbieżności dotyczą tylko pojedynczego pola eksploatacyjnego, natomiast przy analizie rzeczywistych przypadków prognozowania mamy do czynienia niejednokrotnie z kilkudziesięcioma parcelami, a nawet zdarzają się przypadki uwzględniania w prognozach kilkuset parcel eksploatacyjnych. Wtedy rozbieżności wyników obliczeń mogą być bardzo istotne i w sposób istotny wpływać na jakość prognoz i bezpieczeństwo powszechne.

### 3. System prognozowania MODEZ

Obliczenie wskaźników deformacji wywołanych eksploatacją górnictwem składa się z szeregu czynności, począwszy od wyboru teorii, poprzez przygotowanie danych, przeprowadzenie obliczeń, aż do sporządzenia raportu końcowego i analizy wyników. Obecnie istnieją możliwości wykonywania obliczeń dla dużej liczby punktów w wielu horyzontach czasowych z uwzględnieniem setek, a czasem i tysięcy parcel eksploatacyjnych (Białek

2003). Obliczenia deformacji dużych „projektów” wykonywane są bardzo szybko, a jedynym problemem jest właściwa interpretacja uzyskanych wyników.

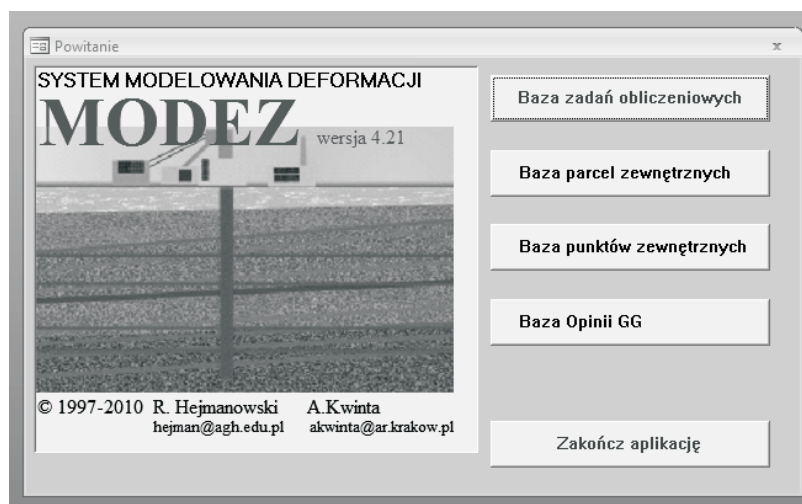
Wprowadzenie systemów prognozowania deformacji ma na celu automatyzację procesu obliczeniowego, przy jednoczesnym ułatwieniu zarządzania danymi i wynikami obliczeń. Od czasu wprowadzenia do użytku komputerów zbudowano wiele różnych programów do prognozowania deformacji. Wydaje się jednak, że najlepszym narzędziem do modelowania deformacji są bazy danych, które pozwalają w prosty sposób pozyskiwać i gromadzić dane niezbędne do obliczeń, jak również przetwarzać uzyskane w trakcie obliczeń wartości wskaźników deformacji.

Poniżej zaprezentowany zostanie w zarysie system prognozowania deformacji MODEZ (Hejmanowski, Kwinta 2009). System ten w pierwszej wersji powstał w 1997 roku na bazie programu „SubCalc” (Hejmanowski 1993). Jako bazę danych wybrano MS Access. Wszystkie obliczenia zostały oprogramowane z wykorzystaniem języka Delphi. Obecnie funkcjonuje czwarta wersja systemu (wersja 4.21). System MODEZ został utworzony przez zespół pod kierownictwem Hejmanowskiego i jest na bieżąco rozwijany o kolejne elementy. System jest zaprojektowany do opracowywania prognoz deformacji dla warunków górotworu karbońskiego i złóż węgla kamiennego, złóż rud miedzi, a także dla kopalń soli. Pozwala na uwzględnianie zmiennego zalegania pokładów, zmiennej miąższości eksploatowanych warstw, a także harmonogramu prowadzenia eksploatacji.

### 3.1. Elementy systemu MODEZ

System składa się zasadniczo z czterech baz danych MS Access oraz szeregu bibliotek systemu Windows realizujących obliczenia i procedury przetwarzania (\*.dll). Dodatkowo system można wzbogacić o dodatkowe aplikacje do przygotowania i przetwarzania, danych i wyników. Podstawowe bazy danych to:

- **Baza eksploatacji** – baza obejmująca zasadniczy zasób danych o eksploatacji górniczej. Eksploatacja górnicza podzielona jest na parcele eksploatacyjne, którym można przypisać ciągłość przestrzenną i czasową. Każda parcela powinna zawierać komplet informacji o geometrii, czasowym rozwoju eksploatacji i lokalnych wartościach parametrów modelu obliczeniowego. Poprzez zapytania bazodanowe spośród wszystkich parcel pobiera się do obliczeń wymagany zasób do zasadniczej bazy obliczeniowej Modez4.
- **Baza obiektów obliczeniowych** – baza zawierająca informacje o zdefiniowanych obiektach obliczeniowych. Podstawowe dane to: nazwa obiektu, typ, funkcja, geometria.
- **Baza opinii** – jest to baza pozwalająca na zarządzanie Informacjami o Wpływach Eksploatacji Górniczej (IWEG), które sporządza się dla wszystkich inwestycji na terenach eksploatacji górniczej.
- **Modez4** – jest to zasadnicza baza w której przeprowadza się konfigurację zadania obliczeniowego wskaźników deformacji, wywołuje się obliczenia i formatuje raporty wynikowe.



Rys. 7. Okno zarządzania systemem Modez w.4.21

Fig. 7. Management window of system Modez w.4.21

Dostęp do zarządzania wymienionymi bazami uzyskuje się po uruchomieniu pliku modez4.accdb. Wygląd okna zarządzania systemem przedstawiono na rysunku 7.

Obecna wersja systemu poza bazami danych zawiera 17 bibliotek wspomagających przygotowanie danych, przeprowadzenie obliczeń, konfigurację raportów końcowych.

### 3.2. Przeprowadzenie obliczeń

Samo przeprowadzenie obliczeń wskaźników deformacji jest tylko jednym z etapów prac, które należy zrealizować, aby wyznaczyć wskaźniki deformacji. System MODEZ pozwala na automatyzację i uproszczenie całego cyklu obliczeniowego. W celu wykonania prognozy deformacji należy przejść następujące etapy procesu obliczeniowego:

- wybór modelu prognozowania – współcześnie w polskim górnictwie powszechnie do prognozowania wykorzystuje się teorię Knothego, jednak na przestrzeni lat powstało wiele różnych modyfikacji tej teorii. Praktycznie wybór modelu prognozowania polega obecnie na przyjęciu klasycznej teorii, bądź uwzględnieniu którejś z modyfikacji. System można przystosować do dowolnej geometryczno-całkowej teorii prognozowania;
- przygotowanie danych do obliczeń związane jest przede wszystkim z identyfikacją zakresu obliczeń pod względem przestrzennym i czasowym. Wybór przestrzennego rozmieszczenia punktów obliczeniowych oraz dobór horyzontów czasowych związane są z zasobem pól eksploatacyjnych, które należy uwzględnić w obliczeniu. Dane dotyczące eksploatacji górniczej uzyskuje się na podstawie map pokładowych (geometria, głębokość, miąższość, postęp eksploatacji);
- konfiguracja obliczeń dla przyjętego modelu obliczeniowego obejmuje dobór parametrów modelu adekwatnych do danych warunków prowadzenia eksploatacji. W kla-



sycznej teorii Knothe'go dla stanów asymptotycznych występują dwa parametry. Modyfikacje teorii o możliwość przeprowadzania obliczeń wewnątrz górotworu w czasie, czy też uwzględniające zmianę właściwości ośrodka (nachylenie, anizotropia) powodują, że w obliczeniach może występować nawet kilkanaście parametrów. Model obliczeniowy bazuje na podziale eksploatacji na elementy złożowe (Kwinta 2008), dla których przeprowadza się obliczenia wskaźników, a następnie się je sumuje;

- d) zasadnicze obliczenia teoretyczne (modelowe) obejmują realizację algorytmu obliczeniowego mającego na celu wyznaczenie podstawowych wskaźników deformacji. Algorytm obliczeniowy jest zoptymalizowany dla różnych predefiniowanych typów zadań;
- e) raport z obliczeń powinien obejmować zestawienie graficzne (wykres, mapa rozkładu), zestawienie liczbowe (wartości ekstremalne wskaźników, tabelaryczne), część opisową obejmującą analizę uzyskanych wyników obliczeń. W systemie możliwe jest wykonywanie raportów, bądź generowanie odpowiednich plików wynikowych (w różnych formatach), które można przetwarzać w zewnętrznych programach.

Zanim rozwinęła się elektroniczna technika obliczeniowa prowadzono obliczenia teoretyczne wskaźników deformacji prostymi, analogowymi metodami. Wraz z rozwojem technologii komputerowych zagadnienia obliczeniowe coraz bardziej komplikowano (Białek 2003). System MODEZ był wykorzystywany do realizacji dużych zagadnień obliczeniowych (ponad 1000 parcel eksploatacyjnych, około 100 000 punktów i 80 czasów obliczeniowych), oczywiście w takim przypadku nastąpiło wydłużenie czasu pracy systemu, natomiast nie wystąpiły żadne błędy destabilizujące pracę komputera.

### Podsumowanie

Prognozowanie deformacji wywołanych podziemną eksploatacją górnictwem należy do zagadnień związanych z bezpieczeństwem powszechnym. Powszechnie w prognozowaniu wykorzystuje się modele geometryczno-całkowe, których dokładność zdeterminowana jest właściwą identyfikacją parametrów modelu obliczeniowego, a może przede wszystkim wykorzystaniem w obliczeniach rzeczywistych precyzyjnie określonych danych górnictwo-geologicznych eksploatacji górnictwa. Pierwotnie obliczenia teoretyczne prowadzone były dla uproszczonych przypadków, co związane było z dużą pracochłonnością obliczeń. Obecnie obliczenia wykonuje się głównie z zastosowaniem komputerów; daje to możliwość uwzględnienia bardzo skomplikowanych warunków górnictwo-geologicznych, dla wielu parcel eksploatacyjnych i dużej ilości punktów obliczeniowych. Precyzyjne zamodelowanie eksploatacji górnictwa w systemie komputerowym powoduje wyeliminowanie ważnego czynnika powodującego rozbieżności pomiędzy teoretycznymi a praktycznymi wartościami wskaźników deformacji. System MODEZ poprzez zastosowanie w obliczeniach elementów złożowych pozwala na precyzyjny opis warunków górnictwo-geologicznych.

Przedstawiony w niniejszej pracy prosty przykład obliczeniowy wskazuje na duże rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń dla uśrednionych danych eksploatacji, a dokładnie

opisanymi w modelu obliczeniowym. Wniosek z tego przykładu wskazuje jednoznacznie na konieczność wprowadzania do obliczeń precyzyjnych danych o warunkach górniczo-geologicznych eksploatacji, co powinno przyczynić się do zwiększenia zaufania do wyników obliczeń prognozowanych wartości wskaźników deformacji.

#### LITERATURA

- Białek J., 2003 – Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Budryk W., 1953 – Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu. *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa*, t. 1, z. 1, Warszawa.
- Hejmanowski R., 1993 – Zur Vorausberechnung förderbedingter Bodensenkungen über Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Praca doktorska. TU Clausthal, Niemcy.
- Hejmanowski R. i in., 2009 – Dokładność prognoz deformacji powierzchni terenu górniczego „Lubin I” i „Małomice I”, w aspekcie zmian dynamiki ruchów powierzchni w odniesieniu do prognoz krótko- i długookresowych. Praca naukowo-badawcza na zlecenie KGHM Polska Miedź SA (niepublik.).
- Hejmanowski R., Kwinta A., 2009 – System prognozowania deformacji Modez. Materiały konferencji „X Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych”, Kraków.
- Hejmanowski R., Malinowska A., 2009 – Evaluation of reliability of subsidence prediction based on spatial statistical analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 432–438, Wyd. Elsevier.
- Knothe S., 1953 – Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa* t. 1, z. 1, Warszawa.
- Knothe S., 2005 – Asymetryczna funkcja rozkładu wpływów eksploatacji górniczej w ośrodku zmieniającym swoje własności. *Archiwum Górnictwa* vol. 50 nr 4, Kraków.
- Kowalski A., 2005 – O błędach prognozy wskaźników deformacji powierzchni spowodowanych błędami parametrów teorii. Materiały konferencji „VIII Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych”, Ustroń.
- Kwinta A., 2008 – Dobór wielkości pola elementarnego do numerycznego obliczania obniżeń. *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo i geoinżynieria* z. 1, Kraków.
- Naworyta W., Sroka A., 2005 – Ocena niepewności prognozy wskaźników deformacji terenu metodą symulacji geostatystycznej. Materiały konferencji „VIII Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych”, Ustroń.
- Niedojadło Z., 2008 – Problematyka eksploatacji złoża miedzi z filarów ochronnych szybów w warunkach LGOM. *Rozprawy i monografie* nr 177. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Popiołek E., Ostrowski J., 1981 – Próba ustalenia głównych przyczyn rozbieżności prognozowanych i obserwowanych poeksploatacyjnych wskaźników deformacji. *Ochrona Terenów Górniczych* nr 58, Katowice.
- Stoch T., 2005 – Wpływ warunków geologiczno-górnicznych eksploatacji złoża na losowość procesu przemieszczeń i deformacji powierzchni terenu. *Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie*, Kraków (praca doktorska).

**MODELOWANIE DEFORMACJI CIĄGLYCH POWIERZCHNI TERENU W WARUNKACH ZMIENNEGO ZALEGANIA ZŁOŻA****Słowa kluczowe**

Deformacje górotworu, modelowanie, dokładność, prognoza

**Streszczenie**

Ciągłe deformacje powierzchni terenu wywołane podziemną eksploatacją górnictwem mogą powodować zagrożenie budynków i infrastruktury. Zagadnienie modelowania deformacji od strony teoretycznej jest znane od wielu lat. Powszechnie stosowany jest model Knothe. Dokładność prognozowanych deformacji zależy w dużej mierze od prawidłowej identyfikacji parametrów modelu i warunków zalegania przewidzianego do eksploatacji złoża.

W pracy przedstawiono charakterystykę metodyki modelowania warunków zalegania złoża w informatycznym systemie prognozowania MODEZ. Pozwala ona na uwzględnienie zmienności parametrów zalegania złoża i parametrów górnictwo-geologicznych eksploatacji. W konsekwencji daje to znaczną poprawę jakości prognoz deformacji.

**MODELING CONTINUOUS DEFORMATION OF TERRAIN IN VARIABLE CONDITIONS OF DEPOSITION****Key words**

Rock mass deformation, modeling, accuracy, prediction

**Abstract**

Surface subsidence induced by underground mining activity may cause danger to buildings and infrastructure. The issue of the surface subsidence modelling is known for many years. The Knothe's theory is the most often used method of surface deformation modelling. Surface subsidence predictions accuracy depends mainly on the correct identification of model parameters and geometrical conditions of the strata occurrence.

The paper presents a methodology for modelling of the seam occurrence in the computer system called MODEZ. That program is dedicated to surface subsidence prognosis. Shown system enables to take into account not only the variability of the seam deposit parameters but also the exploitations parameters. As a result it gives considerable improvement of the accuracy of the surface subsidence prognosis.

