

WYKORZYSTANIE POMIARÓW NIWELACYJNYCH W MODELOWANIU WARUNKÓW GÓRNICZO- -GEOLOGICZNYCH NA OBSZARZE LGOM

Ewa Sudoł

Politechnika Wroclawska

Streszczenie. Skomplikowana budowa geologiczna spotęgowana dodatkowo występowaniem licznych zaburzeń tektonicznych struktury, a także wpływem wstrząsów sejsmicznych oraz robót strzałowych powoduje, że laboratoryjnie wyznaczone właściwości próbek skalnych wykorzystywane w modelowaniu MES mogą odbiegać od właściwości górotworu. W pracy przedstawiono sposób interpretacji fizycznego modelu MES górotworu w oparciu o pomiary niwelacji precyzyjnej oraz analizę odwrotną. Fizyczny model górotworu określono, bazując głównie na wynikach badań laboratoryjnych właściwości skał tworzących górotwór. Ze względu na dużą niejednorodność zarówno litologiczną, fizyczno-mechaniczną, jak i tektoniczną górotworu LGOM zaproponowano zastosowanie analizy wstecz. Polega ona na wprowadzeniu poprawek do laboratoryjnie wyznaczonych współczynników skał wyznaczonych na podstawie dopasowania obliczonego modelu do wyników pomiarów niwelacyjnych.

Uzyskane rezultaty analiz wykorzystane zostaną do określenia efektywności modelowania MES oraz przyczynią się do rozpoznania mechanizmu deformacji pionowych powierzchni górotworu w niejednorodnych strefach tektonicznych.

Słowa kluczowe: LGOM, niwelacja, metoda elementów skończonych

WSTĘP

Problematyka związana z modelowaniem deformacji powierzchni wywołanych eksploatacją górnictwem jest interdyscyplinarna. Badania nad tym zagadnieniem prowadzone są od ponad 100 lat. W Polsce najbardziej popularną metodą predykcji wskaźników deformacji jest teoria Budryka-Knothe'go. W ostatnim okresie wykorzystywane są również analizy modeli strukturalnych z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) oraz prowadzone są próby użycia sztucznych sieci neuronowych.

Fizyczna interpretacja zależności pomiędzy czynnikami deformującymi a geodezyjnie obserwowanymi deformacjami prowadzona jest z wykorzystaniem analiz statystycznych lub metodami, które pozwalają zintegrować informacje geodezyjne i geologiczno-górnictwowe [Szostak-Chrzanowski 2005]. W tym celu powszechnie

wykorzystywana jest metoda elementów skończonych. Słuszność wyboru tej metodyki potwierdzają badania przeprowadzone w Polsce m.in. dla obszaru LGOM przez Walaszczuka i in. [1999]. Numeryczne metody MES wykorzystane zostały m.in. do interpretacji osiadań terenu w kopalni potasu i soli w New Brunswick w Kanadzie wywołanych zmianami hydrologicznymi [Szostak-Chrzanowski i in. 2007]; weryfikacji parametrów geomechanicznych dużej ziemnej tamy zlokalizowanej w Kalifornii podczas wypełniania zbiornika [Szostak-Chrzanowski i in. 2007]; a także do modelowania osiadań terenu na obszarze La Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) w Wenezueli [Szostak-Chrzanowski i in. 2006]. Podczas przeprowadzanych obliczeń numerycznych MES zaproponowano zastosowanie „analizy wstecz” [Szostak-Chrzanowski i in. 2008] polegającej na korekcji parametrów modelu MES, wynikającej z porównania obliczonych osiadań terenu z rezultatami geodezyjnych pomiarów niwelacyjnych.

Na obszarze LGOM od wielu lat wykonywane są badania dotyczące zachowania się skał w otoczeniu wyrobisk górniczych z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Prace te prowadzone są głównie w celu rozpoznania mechanizmu zjawiska tąpnięć [Zorychta 2001].

Fizyczny model górotworu określany jest głównie na podstawie badań laboratoryjnych właściwości skał tworzących górotwór, badań geologiczno-geofizycznych oraz geodezyjnych pomiarów deformacji górotworu poddanego eksploatacji podziemnej [Walaszczyk i in. 1999]. Prace prowadzone w okresie ostatnich dwudziestu pięciu lat [Kunysz 1980, Kijewski i Lis 1981, Cyrul 1999] doprowadziły do systematyki własności skał LGOM. Własności fizyczne i mechaniczne skał, wydzielonych odmian litologicznych występujących w złożu, stropie i spągu prezentowane są w pracach Kijewskiego i in. [1981] oraz Monografii LGOM [1996].

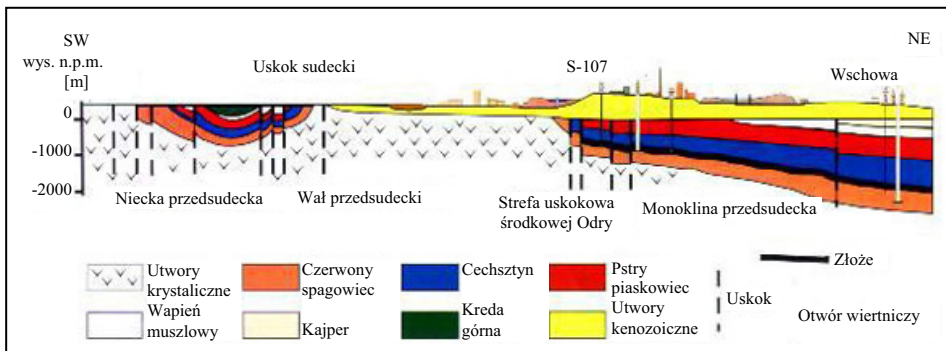
BUDOWA GEOLOGICZNO-TEKTONICZNA LGOM

Złoże rud miedzi monokliny przedsudeckiej związane jest z cechsztyńską formacją miedzionośną. Okruszcowanie skał złożowych obejmuje utwory (rys. 1):

- węglanowe dolomitu granicznego,
- łupkowe łupku miedzionośnego,
- klastyczne białego spągowca,
- węglanowe wapienia cechsztyńskiego.

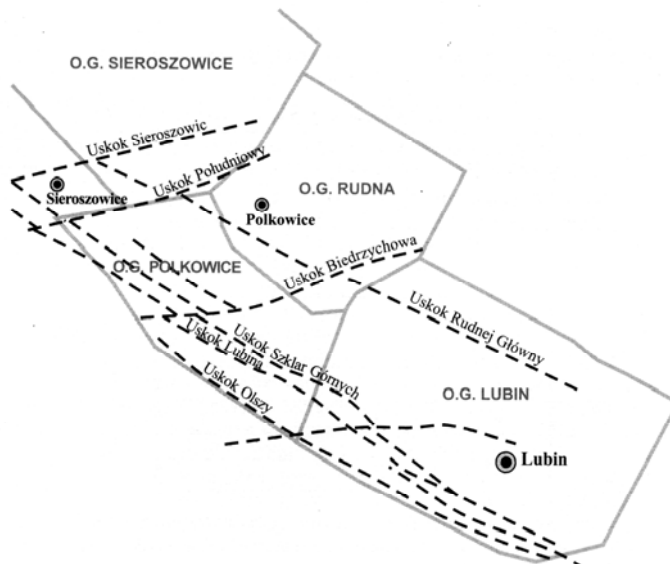
W stropie złoża występują osady cechsztyny, w postaci wapieni dolomitów i anhydrytów. W spągu zalegają piaskowce i zlepionce czerwonego spągowca [Tajduś i in. 2002].

Miąższość bilansowa złoża jest zmienna i waha się od kilkudziesięciu centymetrów do kilkunastu metrów. Mineralizacja bilansowa obejmuje we wschodniej części złoża głównie piaskowce i łupki przy stropie, natomiast w kierunku zachodnim mineralizacja częściowo przemieszcza się w górę profilu litologicznego, w skały węglanowe [Butra, 2003]. Aktualnie eksploatowane złożo rud miedzi występuje na głębokości od 600 do 1380 metrów. Seria złożowa zapada się pod kątem 3–5° (lokalnie również większym) w kierunku północno-wschodnim (N-E) (www.kghm.pl).



Rys. 1. Przekrój geologiczny przez Nieckę Północnosudecką (rejon starego zagłębienia miedziowego), Blok Przedsudecki i Monoklinę Przedsudecką (złoża miedzi LGOM) [źródło: www.kghm.pl]

Fig. 1. Geological cross-section of the North Sudetic Basin (former copper region), Foresudetic Belt and Foresudetic Monocline (LGOM copper deposit)



Rys. 2. Tektonika obszaru LGOM [źródła Instytutu Geofizyki PAN, 2006 r.]

Fig. 2. Tectonic of LGOM area

Struktura monokliny przedsudeckiej ukształtowała się w czasie ruchów kimeryjskich i laramijskich. W jej obrębie znajduje się wiele szerokopromiennych struktur antyklinalnych, z których część jest związana ze zróżnicowanym ukształtowaniem podłoża przedpermskiego lub z ruchami bloków podłoża. Miąższość skorupy ziemskiej w obszarze bloku zmienia się w granicach 32–34 km [Mizerski 2002].

Na obszarze LGOM, w wyniku prowadzonych badań, ujawniono następujące systemy uskoków (rys. 2):

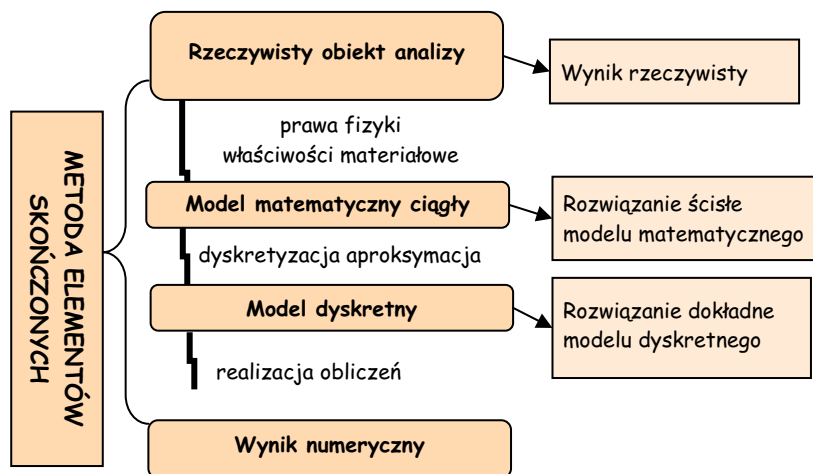
- strefy uskoków środkowej Odry o przebiegu NW-SE, spełniających rolę dominującą. W systemie tym wyodrębnić można między innymi uskoki: Olszy, Główny Lubina, Południowy Lubina, Środkowy Lubina, Szklar Górnych;
- o przebiegu W-E (równoleżnikowy), do których zaliczono m.in. uskok Biedrzychowa, uskok Polkowic oraz uskok Kłopotowa;
- o przebiegu N-S (południkowy), gdzie należy szereg krótkich uskoków, wśród których największym jest uskok Obory;
- strefę uskokową Rudnej Główniej o orientacji NE-SW [Bielawa, Motowidło 1990].

MODELOWANIE NUMERYCZNE

Metoda Elementów Skończonych (MES, ang. FEM, finite-element method) jest zaawansowaną matematycznie metodą obliczeń fizycznych opierającą się na podziale obszaru (tzw. dyskretyzacja, ang. mesh), najczęściej powierzchni lub przestrzeni, na skończone elementy uśredniające stan fizyczny ciała i przeprowadzaniu faktycznych obliczeń tylko dla węzłów tego podziału. Poza węzłami wyznaczana właściwość jest przybliżana na podstawie wartości w najbliższych węzłach.

Analiza konstrukcji metodą elementów skończonych polega na sformułowaniu odpowiedniego opisu matematycznego, a następnie rozwiązania postawionego problemu. Warunkiem wiarygodności i praktycznej przydatności obliczeń MES jest znajomość odpowiedniego do potrzeb modelu.

W środowisku MES użytkownik buduje model geometryczny, definiuje właściwości materiałowe i warunki brzegowe (rys. 3). Następnie wybiera typ elementu i określa wymagania dotyczące podziału na elementy. Zasadnicze obliczenia metody odbywają się po zdefiniowaniu rodzaju zagadnienia (statyczne, drgania własne, drgania nieustalone), metody rozwiązania i jej głównych parametrów (kryteria zbieżności, stopień szczegółowości wyników).



Rys. 3. Schemat postępowania. Opracowanie własne na podstawie Zagrajek [2000]

Fig. 3. Schematic diagram of FEM procedure Zagrajek [2000]

W ostatnich latach stworzono szereg bardziej lub mniej wyidealizowanych modeli analitycznych i numerycznych niestabilnego zachowania się górotworu w trakcie prowadzonej eksploatacji [Tajduś 2008]. Modele te pozwalają m.in. na określenie warunków powstania tapnięcia w przyjętych sytuacjach górniczo-geologicznych LGOM. Służyły temu szczególnie badania prowadzone przez m.in. Pietruszczaka i Mroza [1980], Mroza i Nawrockiego [1989], Kłeczka [1994], Zorychtę [2000] oraz Walaszczyka i in. [1999].

Na szczególną uwagę zasługują prace Walaszczyka i in., którzy przedstawili sposób identyfikacji fizycznego modelu górotworu kopalni Rudna na podstawie pomiarów osiadania powierzchni terenu. Stworzona komputerowa symulacja przemieszczenia i naprężenia górotworu przedstawiona została w postaci wykresów osiadań powierzchni, izolinii naprężeń normalnych oraz statycznych w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobisk komorowych.

W cytowanych pracach autorzy nie uwzględniali obecności uskoków tektonicznych. Nie pozwoliło to odzwierciedlić przyczyn nieregularności osiadania powierzchni terenu.

Przez lata naukowcy starali się znaleźć prosty model fizyczny, który pozwoliłby na prawidłowy opis zachowania się górotworu w rejonie eksploatacji i był użyteczny do modelowania numerycznego. Stosowano następujące rozwiązania [Tajduś 2008]:

1. Model sprężysty:

- górotwór traktowany jako jednorodny opisany modelem sprężystym (liniowo sprężysty z uogólnionym prawem Hooke'a);
- górotwór uwarstwiony opisywany modelem sprężystym w obrębie warstw (różne warunki na granicach warstw:
 - warstwy ściśle połączone,
 - warstwy przedzielone cienkimi warstwami o niskich wartościach sprężystych,
 - na kontakcie między warstwami wprowadzono tarcie i kohezję,
 - kontakt między warstwami charakteryzuje brak kohezji i tarcia;
- górotwór traktowany jako sprężysty „nie przenoszący rozciągań”. Model ten wykorzystany został m. in. przez prof. A. Szostaka-Chrzanowskiego w celu określania wpływu eksploatacji na powierzchnię ziemi.

2. Model sprężysto-plastyczny

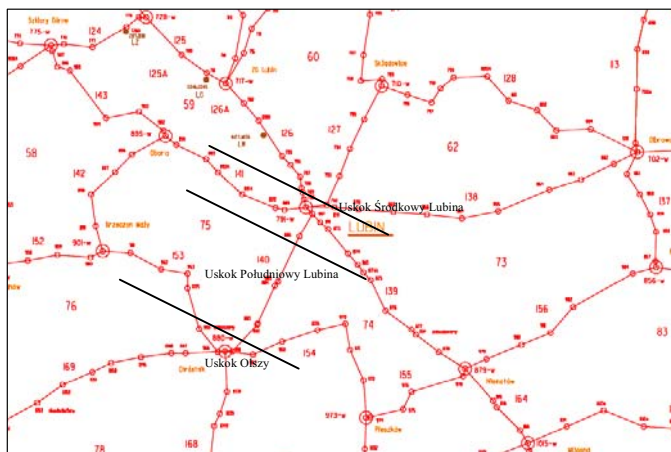
Siriwardane [1985] przedstawił analizę opartą na obliczeniach modelem sprężystym i sprężysto-plastycznym, w wyniku której uznał, że określenie wpływu eksploatacji na powierzchnię terenu metodą MES nie powinno być przeprowadzane modelem sprężystym ze względu na zbyt duży zasięg niecki osiadań.

WSTĘPNE BADANIA WŁASNE

W pracy podjęto próbę identyfikacji zmian wysokości reperów przy wykorzystaniu numerycznych modeli przekrojów pionowych górotworu. Na podstawie wstępnych analiz ciągów niwelacyjnych do przykładowych badań wybrano linię nr 140 przebiegającą prostopadle do uskoków tektonicznych: Główny Lubina, Południowy Lubina i Olszy (rys. 4). Zmiany wysokości punktów rejestrowane na wybranym odcinku są porównywalne z różnicami wysokości reperów na analizowanym obszarze. Dodatkowo zmiany wysokości punktów w wybranym ciągu niwelacyjnym pozwolą podjąć próbę określenia wpływu reakcji struktur geologicznych po obu stronach uskoków

przecinających analizowany przekrój. Rozpoczęte badania mają na celu uzyskanie informacji o wpływie niejednorodnej struktury geologicznej na zidentyfikowane nieregularne osiadania terenu.

Celem przeprowadzanych badań jest stworzenie numerycznych modeli MES w odniesieniu do warunków górniczo-geologicznych ze szczególnym uwzględnieniem niejednorodności górotworu. Identyfikacja poprawności modelu zostanie przeprowadzona z wykorzystaniem geodezyjnych pomiarów osiadania terenu. Na podstawie wyników pomiarów niwelacyjnych oraz informacji o przebiegu uskoków tektonicznych przeprowadzone zostanie „wpasowanie” wybranego modelu numerycznego MES do rzeczywistych warunków powierzchni górotworu. Efektem tego zadania będzie dopasowanie rodzaju modelu górotworu do rzeczywistego stanu powierzchni terenu, określonego z wykorzystaniem pomiarów niwelacyjnych.



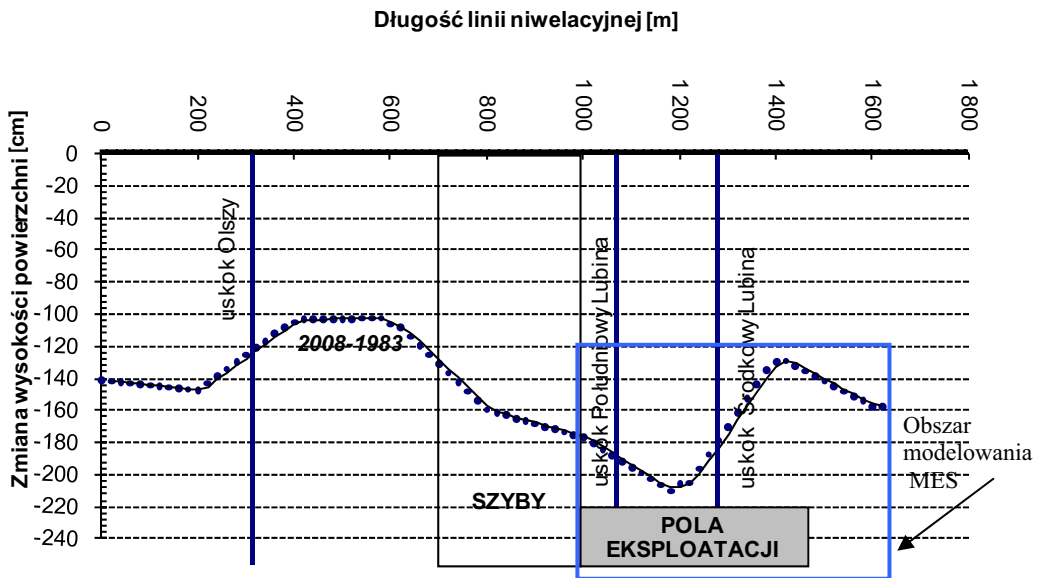
Rys. 4. Fragment szkicu linii niwelacyjnych na analizowanym obszarze
Fig. 4. Leveling lines on selected LGOM area

Na pierwszym etapie wykonano wykres osiadania powierzchni terenu dla wybranego przekroju na podstawie pomiarów niwelacyjnych zrealizowanych w latach 1983–2008 (rys. 5).

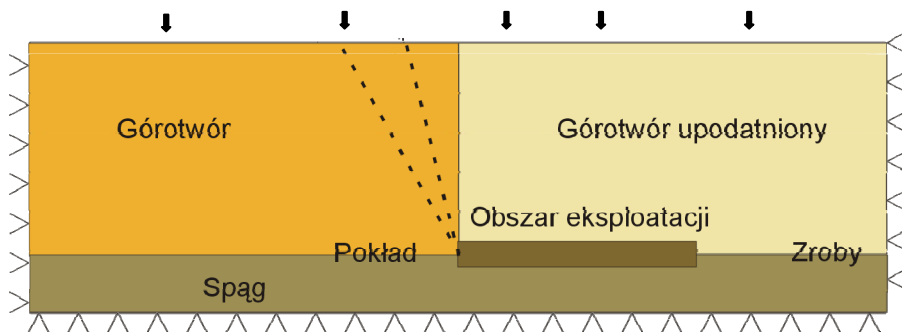
Na podstawie wstępnych analiz zmian pionowych wysokości reperów wytypowano fragment obszaru do modelowania numerycznego. Podczas tworzenia modelu obliczeniowego wykorzystano mapę górniczą (pokładową) z zaznaczonymi na niej kolejnymi fazami eksploatacji oraz lokalizacją rozpoznanych nieciągłości tektonicznych.

Obliczenia przeprowadzono, opisując górotwór jako model sprężysty górotwór uwarstwiony, górotwór traktowany jako sprężysty „nie przenoszący rozciągań” oraz model sprężysto-plastyczny.

Do rozważań przyjęto zróżnicowane parametry fizykomechaniczne (moduł Younga oraz współczynnik Poissona), określone zgodnie z rodzajem skał oraz ich rozmieszczeniem w analizowanym przekroju górotworu. Schemat modelu pokazano na rysunku 6. Model przedstawia przekrój (płaski stan odkształcenia) o wymiarach 1200 x 2000 m z usytuowanymi w niej komorami i filarami o szerokości 6–12 m i wysokości 4–6 m. Średnia głębokość eksploatacji wyniosła 900 m. Podczas obliczeń założono zerowe przemieszczenia pionowe na dolnej krawędzi modelu, zerowe przemieszczenia poziome na krawędziach bocznych oraz zadano obciążenie grawitacyjne.

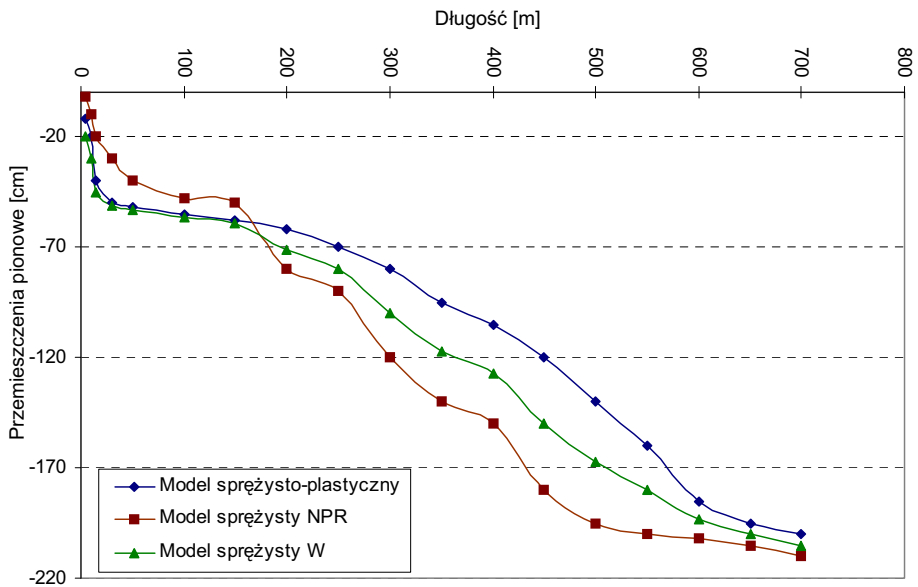


Rys. 5. Osiedlenia terenu, lokalizacja uskoczków tektonicznych i pola eksploatacji
 Fig. 5. Graph of ground subsidence

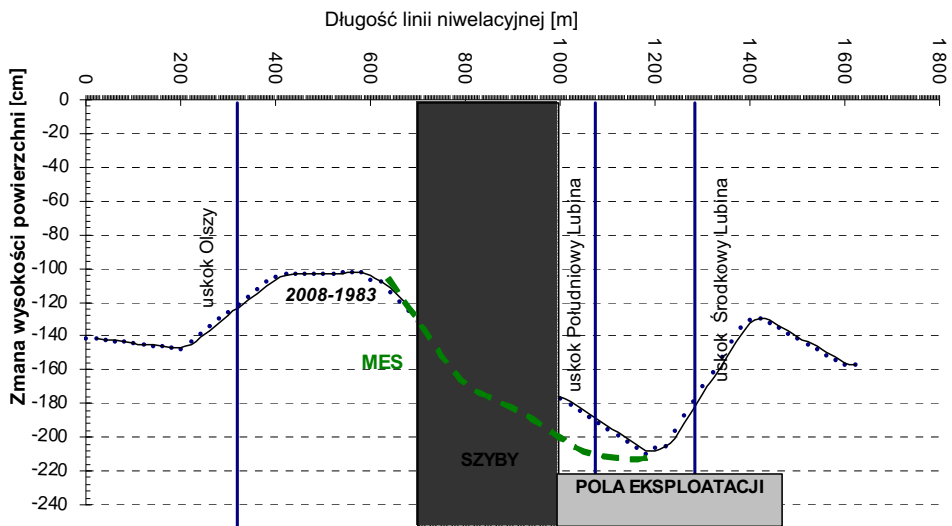


Rys. 6. Schemat modelu obliczeniowego z opisanymi rodzajami skał
 Fig. 6. Analysis region and characteristic rock mass

W wyniku obliczeń numerycznych, przeprowadzonych oddzielnie dla każdego z modeli górotworu, uzyskano wartości przemieszczeń pionowych powierzchni terenu (rys. 7). Osiedlenia terenu uzyskane przy wykorzystaniu modelu sprężysto-plastycznego i modelu sprężystego z górotworem uwarstwowionym osiągnęły zbliżone wartości przemieszczeń pionowych terenu do niecki wyznaczonej z wykorzystaniem pomiarów niwelacyjnych. Wynik uzyskany z zastosowaniem modelu sprężystego „nie przenoszącego rozciągań” natomiast lepiej odzwierciedla nieregularne osiedlenia powierzchni terenu (rys. 7).



Rys. 7. Porównanie wyników analizy MES
Fig. 7. Comparison results of FEM analysis



Rys. 8. Porównanie wyników analizy osiadania terenu i MES
Fig. 8. Comparison results of FEM analysis

Wstępne wyniki modelowania numerycznego odbiegają od rzeczywistych wartości. Wielkość osiadań wyznaczone podczas modelowania są wyższe niż uzyskane z wykorzystaniem pomiarów niwelacyjnych. Różnica pomiędzy zmianą wysokości reperów uzyskaną z pomiarów niwelacyjnych a wartością obliczoną numerycznie przekracza 10 cm (rys. 8). Główną przyczyną tych rozbieżności może wynikać z faktu, że obszar LGOM charakteryzuje się dużą niejednorodnością zarówno pod względem rodzaju skał, jak i tektoniki obszaru.

Z tego względu podczas przeprowadzania dalszych badań numerycznych zaplanowano wprowadzenie do modelu nieciągłości tektonicznych w postaci uskoku tektonicznych oraz modelowanie połączeń warstw skalnych na granicy uskoku. W związku z dużą niejednorodnością zarówno litologiczną, fizyczno-mechaniczną, jak i tektoniczną górotworu LGOM zaplanowano również zastosowanie analizy wstecz.

PODSUMOWANIE

Występowanie licznych nieciągłości tektonicznych na obszarze górniczym LGOM oraz skomplikowana budowa geologiczna stwarzają liczne trudności podczas budowy modeli numerycznych MES służących do identyfikacji procesów deformacyjnych zachodzących na powierzchni górotworu. Wstępne wyniki analiz pokazują celowość wyboru metod numerycznych do identyfikacji zmian wysokości reperów oraz wskazują dalsze zadania zmierzające do rozpoznania mechanizmu nieregularnych deformacji powierzchni terenów górniczych.

PIŚMIENNICTWO

- Bielawa K., Motowidło A., 1990. Wycieczka IV – Strefa uskoku Głównego Rudnej w kopalni Rudna, Materiały Sesji „Problemy Tektoniki LGOM”, Lubin.
- red. Butra J., Kicki J., 2003. Ewolucja technologii eksploatacji złóż rud miedzi w polskich kopalniach, Kraków.
- Cyruł T., 1999. Zachowanie pokrytyczne skał w profilu litologicznym złoża LGOM, Rudy i Metale Nieżelazne 1999 nr 12.
- Kijewski P., Lis J., 1981. Mechaniczne własności piaskowców białego spągowca. Rudy i Metale. 1981, nr 4.
- Kłęczek Z., 1994. Geomechanika górnicza, Katowice
- Kunz N., 1980. Analiza własności fizykochemicznych skał na tle rozwoju litologicznego w monoklinie przedsudeckiej, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Mizerski W., 2002. Geologia Polski dla geografów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Monografia KGHM Polska Miedź SA, Lubin, 1996.
- Mróz Z., Nawrocki P., 1989. Deformation and stability of an elasto-plastic softening pillar. Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol 22. Springer – Verlag.
- Pietruszczak S. Mróz Z., 1980. Numerical Analysis of Elastic-Plastic Compression of Pillars Accounting for Material Hardening and Softening. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.17, Pergamon Press Ltd.
- Siriwardane H.J., 1985. A numerical procedure for predictin of subsidence caused by longwall mining, 5th Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya 1985.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Massiera M., 2005. Use of deformation monitoring results In solving geomechanical problems – case studiem, Elsevier, Engineering Geology, 79, 3–12.
- Szostak-Chrzanowski A., Ortiz E., Chrzanowski A., 2006. Integration of in – situ data with modeling of ground subsidence in oil fields, 2006, Geokinematisher Tag, Heft 2006-1, 416–426.
- Szostak-Chrzanowski A., Massiera M., Chrzanowski A., 2007. Analysis of deformations of large earth dams, Journal of Applied Geodesy, 1, 81–89.

- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Deng N., Bazanowski M., 2008. Design and analysis of multi – sensor deformation detection system, *Journal of Applied Geodesy*, 2, 205–211.
- Tajduś A., Całka M., 2002. O możliwości powstawania pionowych rozwarstwień stropu nad wyrobiskami komorowymi w LGOM, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej (referat w formacie MS Word).
- Tajduś K., 2008. Określenie wartości parametrów odkształceniowych górotworu uwarstwionego w rejonie wpływów eksploatacji górniczej, praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie.
- Walaszczyk J., Barnat A., Hachaj S., 1999. Fizyczny model obliczeniowy MES w odniesieniu do warunków górniczo-geologicznych LGOM, XXII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Wrocław, 281–289.
- Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P., 2006. Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Warszawa.
- Zorychta A., 2000. Wpływ czynników geotechnicznych na zagrożenie tąpnięciami w kopalniach LGOM, *Cuprum: Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud.*
- Zorychta A., 2001. Wpływ zaburzeń uskokowych na kształtowanie się zagrożenia tąpnięciami w kopalniach LGOM, *Cuprum: Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud.*

USING THE LEVELING MEASUREMENT IN MODELING OF MINING AND GEOLOGICAL PARAMETERS ON LGOM AREA

Abstract. Deformation analysis of mines area includes geometrical analysis and physical interpretation. The most critical problem in modeling and predicting deformations is to obtain real characteristics of material because of very different rock – mass properties and tectonic activity.

This paper present the method of interpretation of physical finite element method's modeling by using precise leveling and back analysis. Physical model was built by using laboratory research of parameters characterizing rock – mass properties. Using the back analysis the material parameters of the observed area can be correcting by using the results of precise leveling.

The analysis permits to identify the deformation mechanism and to verify the in-situ parameters and explain the cause of deformation in case of irregular behavior of area.

Key words: LGOM, faults, leveling, FEM



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



DOLNY
ŚLĄSK

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Publikacja współfinansowana jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.09.2009

Do cytowania – For citation: Sudoł E., 2009. Wykorzystanie pomiarów niwelacyjnych w modelowaniu warunków górniczo-geologicznych na obszarze LGOM. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 8(3), 13–22.