

# Możliwości opracowanej w IMG PAN metodyki modelowania numerycznego w zakresie oceny stanu obiektu budowlanego poddanego oddziaływaniu eksploatacji górniczej

LUCYNA FLORKOWSKA, JERZY CYGAN, KRZYSZTOF TAJDUŚ, JAN WALASZCZYK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Ocena stanu obiektu budowlanego, głównie pod względem jego bezpieczeństwa, jest bardzo ważnym zagadnieniem na obszarach objętych oddziaływaniem podziemnej eksploatacji górniczej. Obszarów takich jest w Polsce prawie 17 tys. km<sup>2</sup>. Problemy z zabezpieczeniem istniejącej, często zabytkowej, zabudowy, wciąż narastają. Coraz trudniej jest postawić poprawną prognozę skutków eksploatacji w odniesieniu do budowli. Modelowanie numeryczne jest narzędziem, dzięki któremu przeprowadzić można analizę zachowania się konstrukcji, w warunkach, wymuszonych eksploatacją, deformacji podłoża.

W pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego wpływu eksploatacji ścianowej na grupę budynków, usytuowanych wzdłuż jednej ulicy. Symulację przeprowadzono, opierając się na geodezyjnych pomiarach deformacji terenu. Mimo zastosowania bardzo uproszczonego modelu numerycznego, uzyskano wyniki zbieżne z pomiarami przemieszczeń ścian budynków.

**Słowa kluczowe:** szkody górnicze w budynkach, modelowanie numeryczne, MES

## 1. Wstęp

Rozwój górnictwa podziemnego i zwiększanie wydobywania surowców mineralnych stawia wciąż nowe wyzwania w dziedzinie bezpieczeństwa obiektów budowlanych. Wyzwania te związane są przede wszystkim z postępującą degradacją górotworu, naruszonego eksploatacją kolejnych pokładów. Powierzchnia terenu doznaje znacznych deformacji, co, przy braku odpowiedniej profilaktyki, w drastyczny nieraz sposób odbija się zarówno na zabudowie, jak i na infrastrukturze technicznej, przemysłowej czy komunikacyjnej. Ze względu na fakt, że tereny górnicze są zwykle terenami gęsto zaludnionymi, a co za tym idzie o gęstej zabudowie, problem ochrony obiektów budowlanych dotyczy zarówno zagadnień związanych z zabezpieczaniem budowli istniejących, jak i odpowiednim projektowaniem i wykonywaniem nowopowstających.

Niezwykle istotną kwestię stanowi również, pojawiający się coraz częściej aspekt dotyczący tzw. terenów pogórnicznych. Wraz z procesem likwidacji nierentownych kopalń, wyłonił się problem rekultywacji i zagospodarowania zdegradowanych terenów. Posiadają one często bardzo atrakcyjną lokalizację, gdyż znajdują się w centach miejsko-przemysłowych aglomeracji. Mamy tu więc do czynienia z rosnącym zapotrzebowaniem na tereny pod nowe inwestycje i atrakcyjnymi cenami gruntów, pochodzących z tego typu „odzysku” z jednej strony, oraz z ogromnym problemem zdegradowanego podłoża (którego często inwestor nie jest do końca świadom) z drugiej. Jaka może być skala tego problemu świadczą chociażby dane, dotyczące powstającego od roku 2004, na terenie gmin Ruda Śląska i Świętochłowice, Śląskiego Parku Przemysłowego. Jak podaje oficjalna strona internetowa ŚPP: „Śląski Park Przemysłowy to ponad 1000 hektarów powierzchni inwestycyjnych, doskonale skomunikowanych i położonych w centrum aglomeracji śląskiej. Stworzony dla przedsiębiorców i z myślą o gospodarczym i społecznym ożywieniu doskonałych inwestycyjnie terenów.”

## 2. Ochrona obiektów a postępująca degradacja górotworu

Nakładanie się wpływów kolejnych eksploatacji, aktywacja starych zrobów oraz zmiany stosunków wodnych wydają się stanowić główne przyczyny postępującej degradacji górotworu w rejonach eksploatacji. Zjawiska te powodują, że coraz częściej postawienie prognozy deformacji terenu i obiektów budowlanych w oparciu o stosowane dotychczas metody staje się problematyczne. Znane i sprawdzone metody prognozowania coraz częściej okazują się zawodne, w sytuacjach mocno już naruszonego górotworu, na terenach, gdzie eksploatacja prowadzona jest od kilkudziesięciu lat a udokumentowane obniżenia terenu dochodzą do kilkunastu metrów. W takich warunkach, wykonanie wartościowej prognozy staje się coraz częściej zagadnieniem indywidualnym, wymagającym uwzględnienia specyficznej dla konkretnego obiektu sytuacji górniczej i geologicznej.

Niestety, nabywając parcelę na terenie objętym oddziaływaniem eksploatacji, inwestor najczęściej otrzymuje jedynie informację, w jakiej kategorii terenu górniczego znajduje się działka. Kategoria określa wartości wskaźników deformacji powierzchni terenu, które powinny zostać uwzględnione, jako wartości deformacji podłoża na etapie projektowania obiektu. Uwzględnienie wyznaczonych w prognozie podstawowej wartości obniżenia, nachylenia, liniowego odkształcenia poziomego oraz krzywizny powierzchni terenu w projekcie konstrukcyjnym powinno zapewnić bezpieczeństwo w zakresie nośności i użytkowania obiektu. Powinno, lecz niestety nie zapewnia – z dwóch przynajmniej powodów: Po pierwsze, dlatego, że prognoza wykonana jest dla eksploatacji planowanej przez zakład górniczy i zatwierdzonej przez Urząd Górniczy na okres 2-3 lat. Jest to niewiele, w porównaniu do okresu użytkowania obiektu. Po drugie zaś, parametry odkształceniowe przypisane do danej kategorii terenu są wartościami ustalonymi. Nierzadko natomiast zdecydowanie bardziej niebezpieczne są stany nieustalone i ignorowanie tego faktu podczas projektowania okazać się może katastrofalne.

W odniesieniu do dużych i odpowiedzialnych inwestycji oparcie się w procesie projektowania jedynie o prognozę podstawową okazać się może wysoce niewystarczające. W takich przypadkach wskazane jest opracowanie prognozy szczegółowej. Jak podaje Kawulok [2008] „w prognozie szczegółowej, oprócz wartości i czasu wystąpienia ekstremalnych wskaźników deformacji terenu, podaje się prędkości ich narastania, wartości wskaźników w wybranych kierunkach i inne dane geologiczno-górnice nieodzowne w projektowaniu danego obiektu. Zakres prognozy szczegółowej należy określać indywidualnie, w uzgodnieniu między projektantem a zakładem górniczym. Projektant powinien określić potrzeby prognozy, umożliwiające wyczerpującą ocenę konstrukcji, a zakład górniczy powinien ocenić możliwość spełnienia jego postulatów. Wykonanie prognozy szczegółowej jest nieodzowne, gdy przewidziane jest wznoszenie projektowanego obiektu podczas równoczesnego występowania deformacji terenu.”

Opracowana w IMG PAN metodyka modelowania numerycznego wpływu górniczych deformacji podłoża na obiekt budowlany służyć ma z założenia wykonywaniu właśnie tego typu indywidualnych analiz. Pozwala ona określić czasowy przebieg zmian stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia konstrukcji i podłoża wynikających z oddziaływania eksploatacji.

## 3. Metodyka modelowania numerycznego zagadnień związanych z ochroną budynków przed uszkodzami górniczymi

Rdzeń opracowanej metodyki stanowi model numeryczny analizowanego obiektu wraz z jego podłożem, zbudowany indywidualnie, z zachowaniem specyficznych dla niego warunków górniczych, geologicznych i budowlanych. W zakresie symulacji deformacji górniczych metodyka opiera się na teorii Budryka-Knothego, uwzględniając jednak budowę geologiczną i właściwości fizyczne podłoża (jako reologicznego ośrodka sprężysto-plastyczno-lepkiego). Model samego obiektu tworzony jest również indywidualnie, w oparciu o dokumentację inwentaryzacyjną. Metodyka dysponuje rozbudowanym aparatem matematycznym, pozwalającym na modelowanie złożonych praw materiałowych i procesów zachodzących w podłożu oraz samym obiekcie [Florkowska i in., 2006]. Należy jednak podkreślić, że potencjał ten ograniczony jest zawsze możliwościami przeprowadzenia dokładnego rozpoznania oraz wykonania badań laboratoryjnych, określających właściwości materiałów budowlanych i gruntu. W przypadku istniejących obiektów, często jest to bardzo utrudnione.

## 4. Przykład wykorzystania analizy numerycznej do wyznaczania zmian stanu konstrukcji pod wpływem eksploatacji

Przedstawiony poniżej przykład obliczeniowy jest częścią realizowanej od kilku lat tematyki, prowadzonej przez zespół autorów w ramach działalności statutowej IMG PAN. Stanowi on kontynuację prac rozpoczętych w roku 2007 i opisanych w pracy „*Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D*” [Cygan i in., 2007]. W wymienionej publikacji zaprezentowane zostały wyniki analiz wstępnych, prowadzonych za pomocą modelu fizycznego oraz mocno uproszczonego modelu numerycznego. W toku dalszych prac model numeryczny został gruntownie przebudowany i dopracowany. Poniższy rozdział prezentuje rezultaty ostatnich prac nad omawianym zagadnieniem.

Możliwości opracowanej metodyki, w zakresie oceny zmian stanu obiektu budowlanego, poddanego oddziaływaniu eksploatacji górniczej, przedstawione zostaną na przykładzie grupy istniejących budynków, zlokalizowanych nad ścianą wybieraną w mocno naruszonym górotworze.

### 4.1. Opis zagadnienia

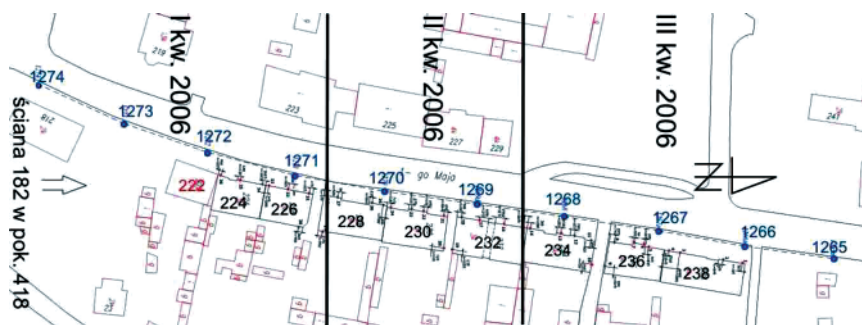
Omawiana grupa, to budynki usytuowane wzdłuż jednej ulicy, w mieście położonym na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (rys. 1).



Rys. 1. Analizowany ciąg budynków

Dla obiektów tych, na zamówienie KWK Pokój, wykonana zastała przez Instytut Techniki Budowlanej ekspertyza wytrzymałościowa [Kawulok, 2006], poprzedzona wizjami lokalnymi. Wiek techniczny budynków oceniony został na ok. 90 lat. Budynki wykonane są w technologii powszechnie stosowanej na przełomie XIX i XX wieku. W większości mają ściany murowane z cegły, fundamenty murowane z cegły lub kamienia, stropy ceramiczne (odcinkowe na belkach stalowych albo Kleina) lub drewniane, nadproża łukowe lub, sporadycznie, monolityczne. Niektóre z nich są podpiwniczone. Jak widać na fotografii 1, mają od dwóch do pięciu kondygnacji.

Po budynkami tymi, na przełomie lat 2005 i 2006, rozpoczęto eksploatację ściany 182, pokładu 418, stosując suchą podsadzkę. Z głębokości ok. 670 m wybierano warstwę o miąższości ok. 2.7 m z prędkością 2-3 m/dobę. Budynki znalazły się w zasięgu wpływu eksploatacji z początkiem roku 2006. Niestety, wskutek problemów technologicznych, postęp robót został dwukrotnie zatrzymany, w czasie, kiedy front eksploatacji znajdował się bezpośrednio pod budynkami. Najprawdopodobniej było to główną przyczyną powstania dużych uszkodzeń budynków, wywołanych znacznymi wychyleniami ścian szczytowych, które usytuowane były niemal prostopadle względem wybiegu ściany (patrz rys. 2). W momencie zauważenia



Rys. 2. Usytuowanie analizowanych budynków względem eksploatacji i położenie frontu eksploatacji (na podstawie danych udostępnionych przez KWK Pokój)

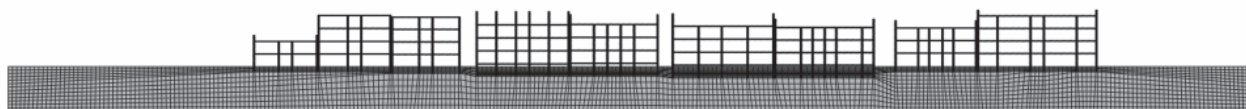
niekorzystnych zmian w konstrukcji budynków, kopalnia zleciła opracowanie wspomnianej wcześniej ekspertyzy wytrzymałościowej. Na jej podstawie wykonane zostały zabezpieczenia budynków, a nadzór techniczny nad obiektami powierzono Oddziałowi Śląskiemu ITB.

Jednocześnie na ścianach szczytowych zainstalowano repery i prowadzono pomiary geodezyjne poziomych przemieszczeń tych punktów. Pomiary geodezyjne wykonywane były także na linii pomiarowej, biegnącej wzdłuż ulicy, a więc równoległe do budynków. Rozmieszczenie reperów tej linii pokazano na rys. 2. Prace pomiarowe prowadzone były przez służby geodezyjne kopalni.

Na podstawie udostępnionych przez KWK Pokój danych pomiarowych oraz inwentaryzacyjnych budynków oraz własnej dokumentacji fotograficznej opracowany został model numeryczny obiektów i fragmentu podłoża.

## 4.2. Opis modelu

Wykorzystując fakt, że ciąg budynków usytuowany jest równoległe do kierunku eksploatacji, możliwe było zastosowanie modelu płaskiego (rys. 3), znacznie upraszczające opracowanie geometrii zagadnienia. Mimo to, odtworzenie geometrii całej grupy budynków okazało się zadaniem żmudnym, z uwagi na liczne braki oraz rozbieżności w istniejącej dokumentacji. Chociaż większość nieścisłości udało się wyjaśnić i skorygować, uzyskany model traktować należy jako przybliżony.



Rys. 3. Model numeryczny zagadnienia

Większe trudności wystąpiły w odniesieniu do przyjęcia modelu materiałowego. Pomimo, że, jak już wspomniano, opracowana metodyka umożliwia zastosowanie zaawansowanych opisów zachowania się ośrodków, to użycie ich w tym przypadku nie było możliwe, z uwagi na brak dokładnych danych na temat parametrów materiałowych.

Jeżeli chodzi o podłoże, to jedyne wiadomości na jego temat pochodziły z map geologicznych, jakimi dysponowała kopalnia oraz z dość ogólnych informacji zawartych w arkuszach ewidencyjnych budynków. Zwarta zabudowa miejska uniemożliwia wykonanie odpowiedniego rozpoznania geologicznego. W tej sytuacji przyjęto najprostszy model materiałowy, czyli model ciała izotropowego, idealnie sprężystego, a jego parametry zaczerpnięto z dostępnej literatury. Według informacji zawartych w dokumentacji udostępnionej przez kopalnię, na omawianym terenie przeważają grunty gliniaste. Przyjęto zatem, na podstawie (Borecka A., 2004, Kania M., 2007, PN-81/B-03020), moduł Younga  $E = 80 \text{ MPa}$  i współczynnik Poissona  $\nu = 0.27$  oraz gęstość  $\rho = 2060 \text{ kg/m}^3$ .

Opracowując model materiałowy dla budynków, oparto się na pracy L. Szojdy [2001], w której zawarte są m.in. wyniki obszernych badań laboratoryjnych różnego typu próbek murowych. Biorąc pod uwagę wiek rozważanych budynków, zastosowano jednak korektę wartości stałych materiałowych, gdyż wytrzymałości zarówno cegieł jak i zapraw wykonywanych na przełomie XIX i XX wieku, kiedy wzniesiono budynki, różniły się od wykonywanych obecnie. Jak podaje Z. Janowski [2007] „wytrzymałość cegieł używanych do wznoszenia budowli na terenie Polski pomiędzy XIV a XIX wiekiem wahała się pomiędzy 2-6 MPa”. Stare zaprawy wapienne w istniejących obiektach nie odpowiadają również cechom współczesnych zapraw o tej samej nazwie. Dobrze zachowane zaprawy mogą odpowiadać klasom zaprawy M1 i M2, których wytrzymałość na ściskanie zawiera się w przedziale 1-2 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie tego typu zapraw można uznać praktycznie za zerową.

Warunki początkowe analizy stanowił stan równowagi układu budynki–podłoże, na który składały się naprężenia pierwotne (geostatyczne) w podłożu oraz naprężenia od ciężaru własnego budynków i podłoża. Stąd uzyskane w analizie stany naprężeń, odkształceń i przemieszczeń obrazują wyłącznie zmiany tych wielkości w wyniku deformacji górniczych. Deformacje te zadano, jako przemieszczeniowe warunki brzegowe na dolnym brzegu zadania, co odpowiada przyjęciu założenia, że na pewnej głębokości pod budynkami, deformacje podłoża odpowiadają przemieszczeniom swobodnej powierzchni terenu. Inaczej

mówiąc – na pewnej głębokości deformacje górotworu nie są już zaburzone oddziaływaniem budynków. Zadawane przemieszczenia były przemieszczeniami pomierzonymi na punktach linii pomiarowej i miały charakter funkcji zależnej od czasu i położenia.

Obliczenia przeprowadzono w Laboratorium Obliczeń Numerycznych Mechaniki Ośrodków Wielofazowych IMG PAN.

### 4.3. Wyniki analizy

Przeprowadzona symulacja numeryczna pokazała obraz zmian, zachodzących w konstrukcji budynków pod wpływem deformacji podłoża. Zmiany te były bardzo duże i powodowały znaczne deformacje ścian i stropów, tak, jak zostało to zaobserwowane w rzeczywistości. Na rys. 4 przedstawiono obliczone przemieszczenia poziome ścian szczytowych. Widać, że wartości wychyleń są bardzo duże – od 100 do 180 mm.

Uzyskane z analizy numerycznej wyniki porównano z przemieszczeniami pomierzonymi na reperach, zainstalowanych na tych ścianach, w punkcie czasowym odpowiadającym dniu wykonania pomiaru. Błąd obliczenia przemieszczeń poziomych wyniósł 15÷35%. Wynik ten, przy tak mocno uproszczonym, zarówno w odniesieniu do geometrii, jak i do prawa materiałowego, modelu oraz przy przyjęciu szacunkowych tylko wartości jego parametrów, można uznać za zadowalający.

Zgodność (w określonym zakresie) obliczonych przemieszczeń z ich wartościami pomierzonymi pozwala założyć, że także wartości odkształceń i naprężeń wyznaczone zostały poprawnie. Można zatem przyjąć, że znamy wielkość naprężeń panujących w konstrukcji. Wiedza ta stanowi podstawę zarówno oceny bezpieczeństwa budynku, jak i zaprojektowania potrzebnych zabezpieczeń.

## 5. Podsumowanie

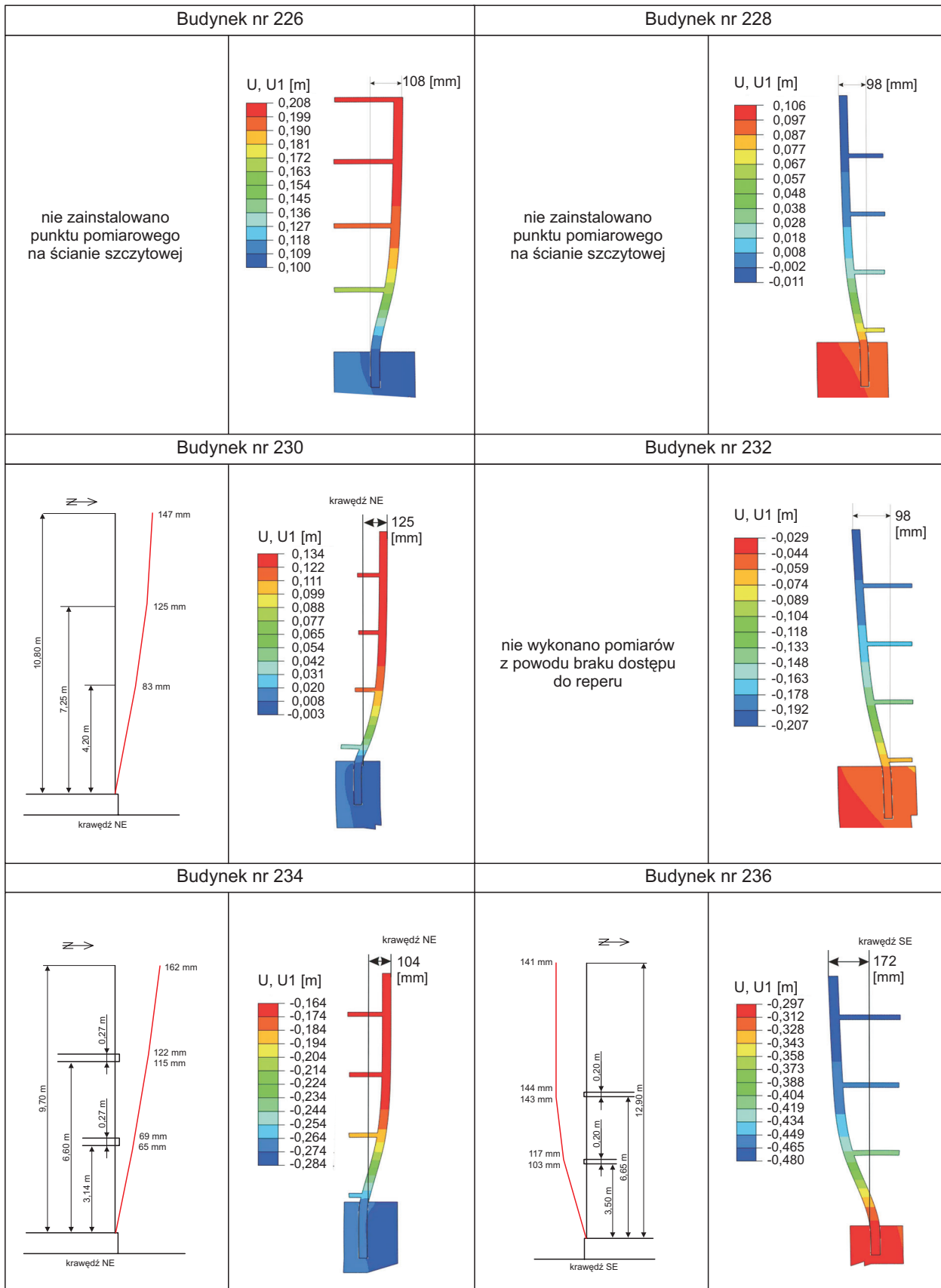
W pracy zaprezentowano wyniki symulacji komputerowej oddziaływania eksploatacji górniczej na grupę obiektów w zabudowie miejskiej. Symulacja dotyczyła rzeczywistej sytuacji, jaka miała miejsce podczas eksploatacji ścianowej, prowadzonej pod dzielnicą miasta o zabytkowej, XIX wiecznej zabudowie. Analizę numeryczną oparto na opracowanej w IMG PAN metodyce modelowania numerycznego metodą elementów skończonych, przy użyciu pakietu programów Abaqus.

Z powodu braku możliwości przeprowadzenia dokładnej identyfikacji zagadnienia, utworzony dla potrzeb analizy model numeryczny był modelem mocno uproszczonym. Mimo to, uzyskano wyniki w dużym stopniu pokrywające się z tym, co obserwowano na budynkach. Prowadzone przez służby miernicze kopalni obserwacje przemieszczeń punktów geodezyjnych, zainstalowanych na budynkach, pozwoliły na porównanie rezultatów obliczeń z wynikami pomiarów. Porównanie to wykazało, że dla poszczególnych budynków błąd wyznaczenia wychYLENIA ściany wynosił od 15 do 35%.

Odnosząc rezultaty obliczeń numerycznych do wyników pomiarów można stwierdzić, czy, i w jakim zakresie, wyznaczony na podstawie analizy stan naprężenia konstrukcji jest poprawny. Znajomość stanu naprężenia jest bardzo istotną, z punktu widzenia inżyniera, informacją. Pozwala ona ocenić bezpieczeństwo konstrukcji oraz zaprojektować odpowiednie jej wzmocnienia. Wyniki analizy umożliwiają również, co istotne, wyznaczenie prędkości zachodzących w konstrukcji zmian.

Opracowana w IMG PAN metodyka modelowania numerycznego, zagadnień związanych z deformowaniem się podłoża budowli, stworzona została głównie z myślą o prognozowaniu stanu budowli. Obecnie testowane są jej możliwości i przydatność w zakresie bieżącej obserwacji stanu obiektu. Kompleksowy system monitorowania, oparty z jednej strony na pomiarach, z drugiej zaś na modelu numerycznym budowli i jej podłoża, umożliwia, poza uzyskiwaniem bieżących informacji na temat deformacji konstrukcji, również wyznaczanie panującego w niej stanu naprężeń.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



Rys. 4. Porównanie wyników pomiarów geodezyjnych przemieszczeń poziomych ścian szczytowych budynków z wynikami obliczeń numerycznych (U1 – przemieszczenia poziome wyrażone w [m])

## Literatura

- Borecka A., Rybicki S., 2004: *Właściwości fizykomechaniczne gruntów zwałowych z nadkładu KWB „Turów”*. Materiały XXVII ZSMG, s. 15.
- Cygan J., Florkowska L., Leśniak J., Walaszczyk J., 2007: *Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D*. Prace IMG PAN, t. 9, z. 1-4.
- Dubiński J., Turek M., Aleksa H., 2005: *Węgiel kamienny dla energetyki zawodowej w aspekcie wymogów ekologicznych*. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, nr 2, 2005.
- Florkowska L., Cygan J., Leśniak J., Tajduś K., Walaszczyk J., 2006: *Metody analizy numerycznej współdziałania budynku z podłożem deformującym się wskutek eksploatacji podziemnej*. Prace IMG PAN, t. 8, nr 1-4.
- Janowski, Hojdys, Krajewski P., 2007: *Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych*. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, maj 2007.
- Jasieńko J., Łodygowski T., Rapp P.: *Naprawa i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*. DWE, Wrocław 2006.
- Kania M., 2007: *Analiza warunków stateczności budowli w sąsiedztwie zbocza przy różnych efektywnych głębokościach posadowienia*. Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele. 03/2007 (14), s. 22.
- Kawulok M., 2006: *Wykonanie obliczeń określających wytrzymałość wychylonych ścian szczytowych w budynkach mieszkalnych przy ul. 1-go Maja 226, 228, 230, 232, 234, 236 i 238 w Rudzie Śląskiej*. Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Budownictwa na Terenach Górniczych w Gliwicach, Gliwice – Praca niepublikowana.
- Szojda L., 2001: *Analiza współdziałania murowanych budynków ścianowych z deformującym się podłożem*. Politechnika Śląska, Gliwice.
- PN-81/B-03020: *Gruntby budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*.

### **Evaluation of the state of the building subjected to the influence of mining exploitation by means of numerical modelling methodology established in SMRI PAS**

#### **Abstract**

The paper contains some results of numerical modelling of the influence of mining exploitation onto a group of buildings situated longwise the street. Values of the terrain surface displacements obtained from survey measurements were used as boundary conditions for numerical calculations. However the numerical model was very simplified the calculated values of building displacements were very closed to the values measured at the same time on certain points of the buildings.

**Keywords:** mining damage in buildings, numerical modelling, FEM

Recenzent: Dr hab. inż. *Grzegorz Kortas*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN