

Jan Walaszczyk\*, Janusz Makówka\*\*

## MATEMATYCZNY MODEL NISZCZENIA STRUKTURY STROPU UWARSTWIONEGO\*\*\*

---

### 1. Wstęp

Procesy deformacyjne zachodzące w skałach stropowych nad rejonem prowadzonej eksploatacji poziomej są szeroko badane i analizowane w polskiej i światowej literaturze górniczej, przy czym główną uwagę skupiają deformacje pionowe. Tymczasem analiza deformacji poziomych może również nieść istotne informacje o procesach zachodzących w górotworze i informacje te mają praktyczne znaczenie nie tylko dla opisu badanych zjawisk, ale i dla prognozy zachowania się górotworu, w tym dla prognozy sejsmiczności. Analizy takie, oparte na pomiarach *in situ* [3] prowadził J. Drzewiecki [2]. Wykazał on, że w procesie deformowania się skał stropowych szczególne znaczenie mają przemieszczenia poziome. Dotyczy to głównie przypadku, gdy strop jest znacznie uwarstwiony, zaś spójność na kontakcie warstw jest niewielka. Dochodzi wtedy do przemieszczeń warstw względem siebie (po zerwaniu spójności kontaktów międzywarstwowych), co w istotny sposób zmienia sztywność górotworu oraz ma wpływ na proces niszczenia struktury wewnętrznej naruszonego eksploatacją stropu.

Do matematycznego opisu ww. zjawisk zastosowano w niniejszej pracy model numeryczny oparty na metodzie elementów odrębnych, zakładając bardzo duże uwarstwienie ośrodka skalnego oraz dopuszczając poślizgi międzywarstwowe. Szczególnej analizie poddano przemieszczenia poziome warstw stropowych nad polem eksploatacji ścianowej.

### 2. Model fizyczny ośrodka skalnego

Zbudowany w niniejszej pracy model dotyczy kopalni „Staszic”, pokładu 352 i prowadzonej w niej wysokowydajnej ściany 1003. Przypadek ten był przedmiotem wielu badań,

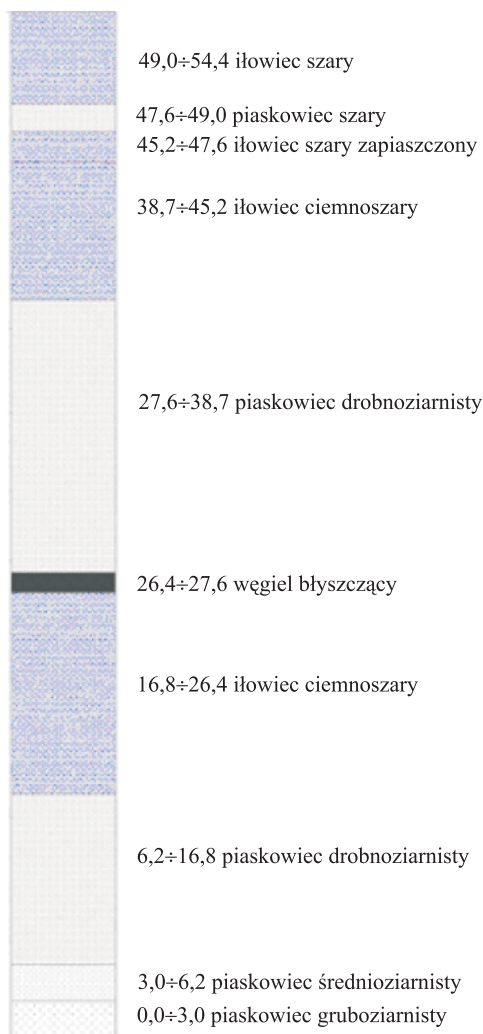
---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

\*\*\* Przedstawione wyniki badań przeprowadzono w ramach prac nad projektem badawczym KBN nr T12A 01524

w tym w szczególności badań w ramach projektu celowego nr 231/CS6-9/92 *Wysokowydajny kompleks ścianowy i nowa technologia wybierania pokładu węgla w KWK „Staszic”*, którego wyniki zamieszczono w pracy *Przodki ścianowe o wysokiej koncentracji produkcji* (Katowice – Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 1994). Informacje o budowie geologicznej i parametrach mechanicznych skał z otoczenia pokładu 352 zaczerpnięto z wyżej wymienionej pracy oraz publikacji J. Drzewieckiego i J. Smołki *Pomiary in situ nieciągłości zaistniałych w górotworze na skutek szybko przemieszczającego się frontu ściany* [3], a uzupełniono z innych źródeł rozproszonych (rys. 1).



**Rys. 1.** Profil geologiczny warstw stropowych pokładu 352

Pokład 352 posiada miąższość od 1,70 do 2,20 m. W stropie pokładu 352 na wybiegu ściany 1003 występuje kompleks łupków ilastych i zapiaszczonych. Pojawiają się też dwa pozabilansowe pokłady: pierwszy w jego stropie bezpośrednim, drugi około 18÷20 m powyżej. W spągu pokładu 352 zalegają łupki ilaste i piaszczyste z wkładkami piaskowca podzielone warstewkami węgla o grubości do 0,3 m.

Dla wszystkich warstw ośrodka budującego model numeryczny przyjęto model sprężysty Hooke'a. Parametry fizykomechaniczne skał zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1

**Materiały użyte w modelu i ich parametry mechaniczne**

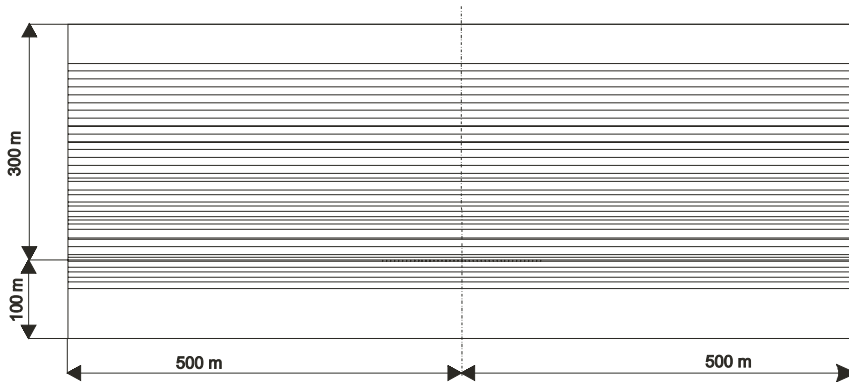
Rodzaj skały	Wielkość fizyczna	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\nu$ , —	$E$ , MPa
Węgiel pokładu 352	mat 1	1400	0,35	1150
Piaskowiec gruboziarnisty	mat 2	2450	0,24	9120
Piaskowiec średnioziarnisty	mat 3	2500	0,19	8090
Piaskowiec drobnoziarnisty	mat 4	2550	0,11	8640
Iłowiec zapiaszczony	mat 5	2570	0,11	9340
Węgiel z ilowcem	mat 6	2200	0,13	8930
Piaskowiec drobnoziarnisty z mułowcem i ilowcem	mat 7	2550	0,15	10 340
Iłowiec przechodzący w mułowiec	mat 8	2750	0,23	8790
Iłowiec szary zapiaszczony	mat 9	2700	0,16	8240
Piaskowiec drobnoziarnisty	mat 10	2550	0,16	10 000
Iłowiec szary	mat 11	2700	0,15	8740

$\rho$  — gęstość objętościowa,  $\nu$  — współczynnik Poissona,  $E$  — moduł Younga

Dla nieciągłości międzywarstwowych (styków) przyjęto model konstytutywny Coulomba – Mohra z poślizgiem i kontaktem powierzchniowym z zerowym tarcieniem, kohezją i wytrzymałością na rozciąganie. Przyjęto sztywność normalną  $jkn = 10$  GPa i sztywność styczną  $jks = 1,66$  GPa [1, 4]. Parametry te otrzymywały również nowo tworzone styki.

### 3. Model obliczeniowy

Model obliczeniowy jest tarczą górotworu o wymiarach 1000 × 400 m (rys. 2) i znajdującą się w płaskim stanie odkształcenia. Współrzędna  $x = 0$  znajduje się w osi symetrii modelu, natomiast współrzędna  $y = 0$  znajduje się na poziomie stropu pokładu modelowanej sytuacji górniczej.



Rys. 2. Model i jego wymiary

Poniżej tej współrzędnej znajduje się 2,1 m ośrodka odpowiadającego pokładowi 352, a dalej warstwy spagowe, powyżej zaś — warstwy stropowe. Do odległości 105 m od stropu pokładu zachowano uwarstwienie rzeczywiste, znane z uogólnionego profilu geologicznego (z czego 55 m uwidoczniło na profilu geologicznym na rys. 1). Powyżej górotwór jest zbudowany z łowca zapiaszczonego uwarstwowionego co 10 lub 20 m zależnie od wariantu, ostatnie 30 m w obu przypadkach pozostawiono w formie jednej warstwy. Uwarstwienie w modelu oraz zastosowane materiały opisano w tabeli 2.

Eksploatacja jest symulowana poprzez wykonanie w pokładzie wybrania o wielkości 50, 100 i 200 m, w których ośrodek jest usuwany bądź zamieniany na materiał *null model* — materiał równoważny pustce. Strefa eksploatacji jest lokalizowana w pokładzie symetrycznie względem osi symetrii modelu.

TABELA 2

**Profil litologiczny i granice modelu**

Lp.	Rodzaj skały	Odległość spągu warstwy od stropu pokładu, m	Grubość, m	Numer materiału w modelu	Nieciągłości wewnątrz warstwy (odległości od stropu pokładu), m
1	Dolna granica modelu	– 100			
2	Węgiel z łowcem/łupek węglowy	– 36,6	7,6	6	
3	Łowiec szary	– 29	19,6	10	– 15,2, – 22,2
4	Piaskowiec drobnoziarnisty	– 9,4	3,3	4	
5	Łupek piaszczysty/łowiec zapiaszczony	– 6,1	4	2	

TABELA 2 cd.

Lp.	Rodzaj skały	Odległość spągu warstwy od stropu pokładu, m	Grubość, m	Numer materiału w modelu	Nieciągłości wewnątrz warstwy (odległości od stropu pokładu), m
6	Węgiel pokładu 352 (mat 1)	-2,1	2,1	1	
7	Piaskowiec gruboziarnisty (mat 2)	0	3	2	
8	Piaskowiec średnioziarnisty (mat 3)	3	3,2	3	
9	Piaskowiec drobnoziarnisty (mat 4)	6,2	10,6	4	
10	Iłowiec zapiaszczony (mat 5)	16,8	9,6	5	
11	Węgiel z ilowcem (mat 6)	26,4	1,2	6	
12	Piaskowiec drobnoziarnisty z mułowcem i ilowcem (mat 7)	27,6	11,1	7	
13	Iłowiec przechodzący w mułowiec (mat 8)	38,7	6,5	8	
14	Iłowiec szary zapiaszczony (mat 9)	45,2	2,4	9	
15	Piaskowiec drobnoziarnisty (mat 10)	47,6	1,4	10	
16	Iłowiec szary (mat 11)	49	1,9	11	
17	Węgiel pokładu 350 (mat 1)	50,9	3,7	1	
18	Łupek piaszczysty/ilowiec zapiaszczony (mat 5)	54,6	13,4	5	61,6
19	Piaskowiec drobnoziarnisty (mat 4)	68	20,6	4	73,5, 82,4
20	Łupek piaszczysty/ilowiec zapiaszczony	88,6	16	5	96,6
21	Iłowiec szary zapiaszczony (mat 9)	104,6	195,4	9	110 i później co 10 lub co 20 m — zależnie od wersji modelu
22	Górna granica modelu	300			

Zadano następujące warunki brzegowe:

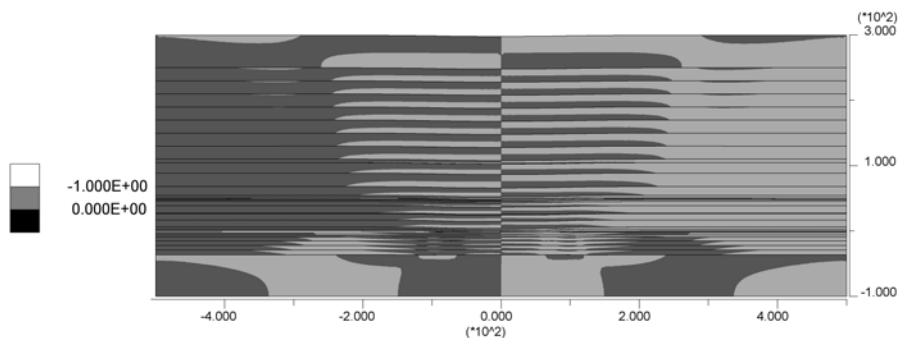
- na górnym brzegu modelu: naprężenie pionowe — 13,5 MPa;
- na brzegu lewym i prawym: warunek zerowej prędkości w kierunku  $x$ ;
- na brzegu dolnym: warunek zerowej prędkości w kierunku  $y$ .

Zadano grawitację równą  $-9,81\text{m/s}^2$ .

Do obliczeń użyto programu UDEC ver. 3.1 [4] będącego płaską (dwuwymiarową) implementacją metody elementów odrębnych [1].

#### 4. Przeszczenia poziome w otoczeniu eksploatacji ścianowej

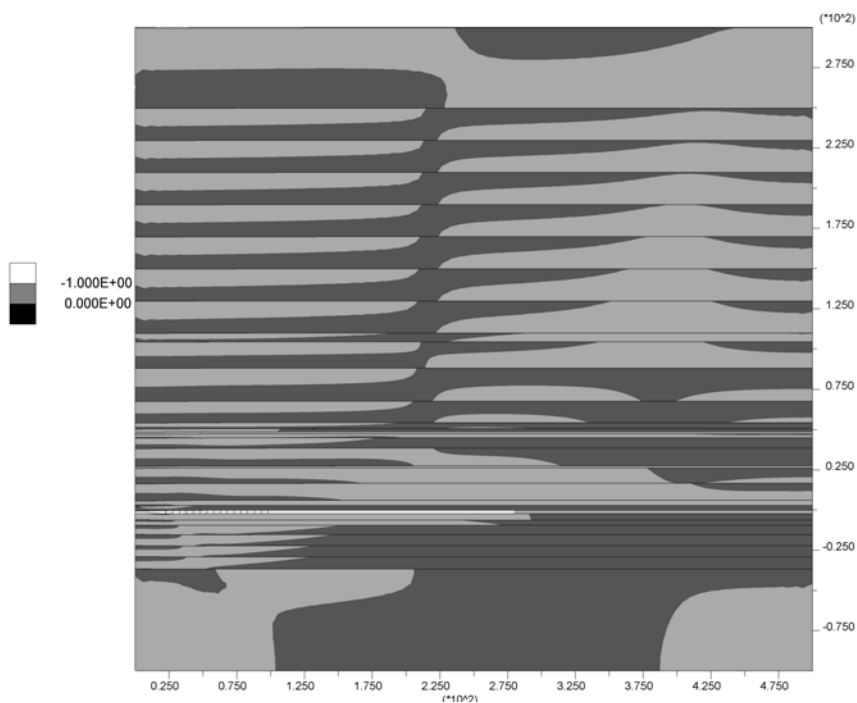
Ogólny obraz rozkładu przeszczeń poziomych w całym modelu przedstawia rysunek 3. (W celu lepszego pokazania ogólnego charakteru zachodzących procesów przeszczeniowych na rysunku zastosowano ograniczoną skalę odcieni szarości.) Widoczny jest na nim symetryczny układ przeszczeń różniący się jedynie zwrotem przeszczeń: po lewej stronie przewagę mają przeszczenia o znaku dodatnim, czyli w kierunku do środka modelu, zaś po prawej stronie przeważają przeszczenia w kierunku przeciwnym. Nad wybranym obszarem formują się fragmenty warstw skalnych, które ulegają ugięciu w kierunku pustki poeksploatacyjnej. W tych fragmentach w dolnej części warstwy materiał skalny poddawany jest ściskaniu i w wyniku tego obserwowane są przeszczenia w kierunku przeciwnym niż część wyżej leżąca.



**Rys. 3.** Rozkład przeszczeń poziomych przy postępie eksploatacji 200 m — widok całego modelu o uwarstwieniu stropu wysokiego 20 m

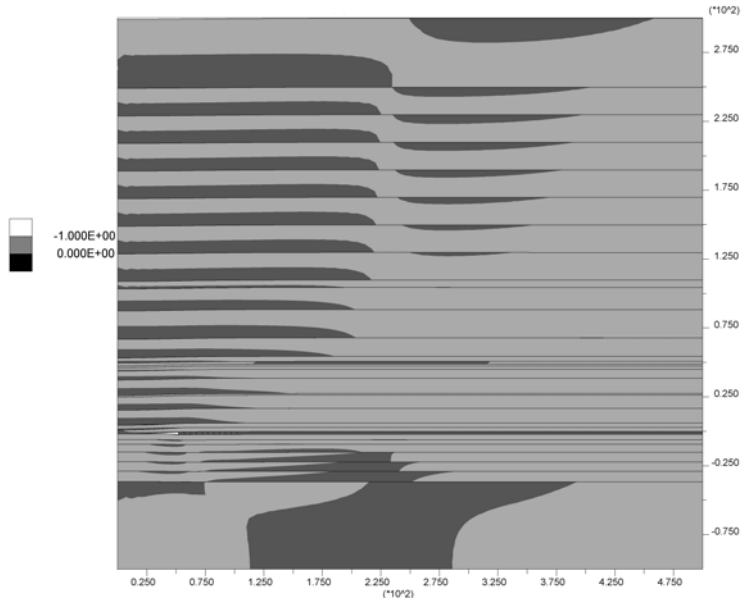
Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono jedną — prawą stronę modelu w różnych fazach symulacji postępu eksploatacji: 50, 100 i 200 m. Widoczny jest na nich rozwój stanu deformacji warstw stropowych. Przy wybraniu 50 m (rys. 4) nie następuje zaciśnięcie przestrzeni poeksploatacyjnej. Po wybraniu kolejnych 50 m (rys. 5) warstwy stropowe są już bliskie ugięcia takiego, by strop bezpośredni obniżył się do poziomu spagu. Na kolejnym rysunku 6 widoczne już jest pełne zaciśnięcie miejsca po wybranym fragmencie pokładu. Widoczne są również istotne zmiany w warstwach stropowych, szczególnie w stropie wysokim. O ile przy rozwinięciu symulowanej eksploatacji do 50 m stan deformacji sprawia wrażenie nieustabilizowanego i obok strefy sąsiadującej z obszarem uginającym się nad pustką poeksploatacyjną są widoczne fragmenty o przeszczeniach w kierunku dodatnim (zabarwione na

ciemnoszaro) również w miejscach dość odległych od eksploatacji, to na następnym rysunku widać, że obszary te są w zaniku. Wiążąc to z faktem, że pustka po wybranym pokładzie w części centralnej jest już zaciśnięta, można stwierdzić, że w tym momencie jest już wykształcona w pełni niecka osiadania wytwarzana nad polem eksploatacji. Sugeruje to obrys punktów, w którym w każdej z warstw zaczyna się strefa o przemieszczeniach poziomych z przeciwnym znakiem niż w części pozostałej. Znaczenie tych punktów jest istotne dla zrozumienia całości procesów przebiegających w stropie pola eksploatacyjnego. Jeśli przemieszczalibyśmy się wzdłuż wybranej warstwy zachowującej swą ciągłość z miejsca odległego od miejsca prowadzenia eksploatacji, to obserwowalibyśmy narastające rozciąganie jej w wyniku wyciągania w stronę pustki poeksploatacyjnej.

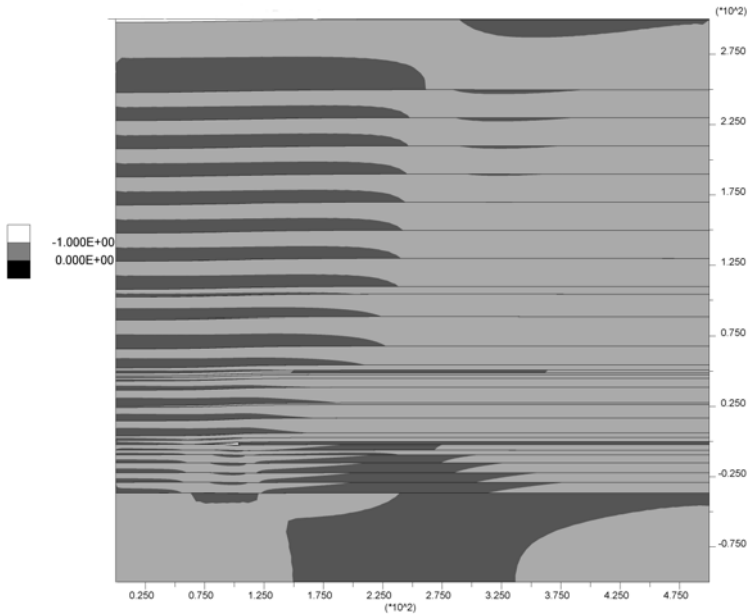


**Rys. 4.** Przemieszczenia poziome przy postępie eksploatacji 50 m — widok prawej strony modelu o uwarstwieniu stropu wysokiego 20 m

Na przedstawianych rysunkach zawierających przemieszczenia poziome przejawia się to wartościami przemieszczeń o znaku minus (jaśniejsze kolory). W pewnej odległości od tej pustki warstwa zaczyna być poddawana zginaniu. W takim miejscu w dolnej warstwy zaczynają być obserwowane naprężenia ściskające a w ich efekcie — przemieszczenia poziome o znaku dodatnim (ciemne obszary na rysunkach). Tak więc można stwierdzić, że miejsca zapoczątkowania przemieszczeń o znaku przeciwnym niż w reszcie warstwy należy określić jako przejście od rozciągania warstwy do jej zginania.



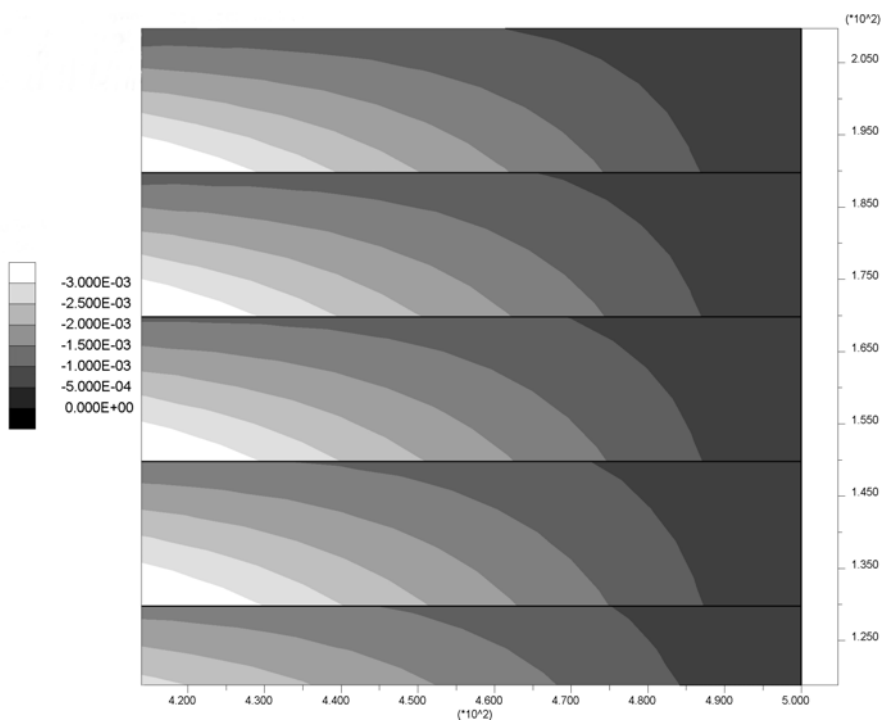
**Rys. 5.** Przemieszczenia poziome przy postępie eksploatacji 100 m — widok prawej strony modelu o uwarstwieniu stropu wysokiego 20 m



**Rys. 6.** Przemieszczenia poziome przy postępie eksploatacji 200 m — widok prawej strony modelu o uwarstwieniu stropu wysokiego 20 m

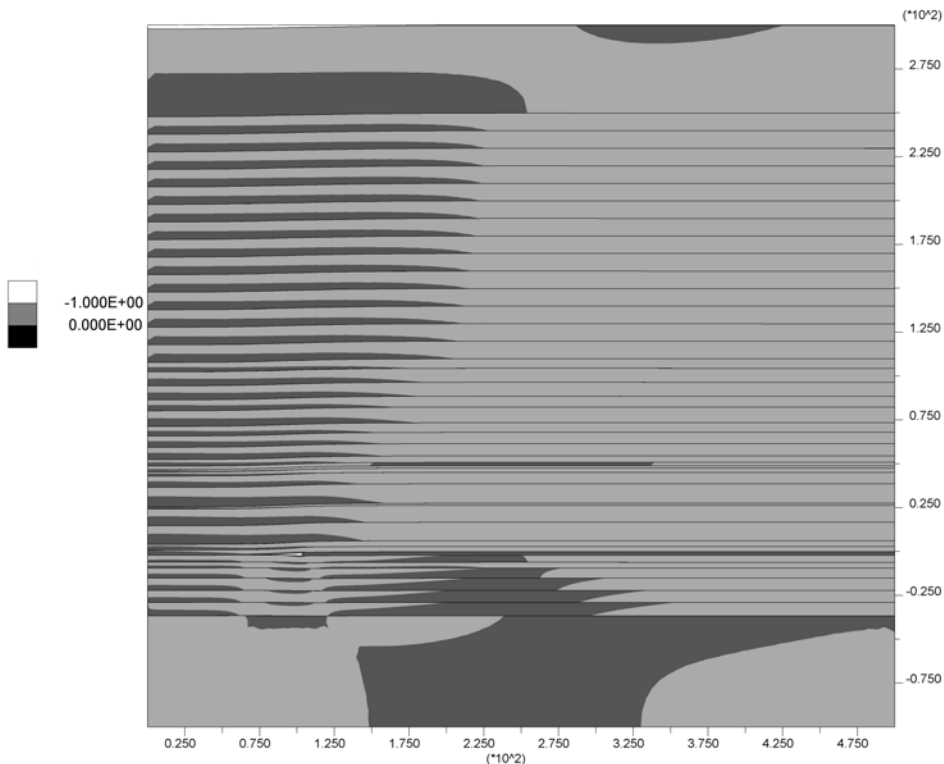


W miejscu tym można również stwierdzić, że następuje wzajemne przemieszczanie się górnej płaszczyzny warstwy niżej leżącej względem dolnej płaszczyzny warstwy leżącej wyżej — wynika to z tego, że wartości przemieszczenia mają znaki przeciwne. Jednakże bliższe przyjrzenie się przemieszczeniom w obszarach bardziej odległych od eksploatacji każe zauważyć, że tam również występuje skokowa zmiana wartości przemieszczeń wraz z przechodzeniem z jednej warstwy do drugiej, choć różnice przemieszczeń nie są duże. Rysunek 7 ilustruje to zjawisko. Na widocznym na nim fragmencie modelu na długości warstwy wynoszącej około 80 m różnica w wartości przemieszczenia poziomego między górną a dolną płaszczyzną wynosi około 2 mm. Zaznaczyć tu należy, że na kontaktach między warstwami nie założono występowania tarcia ani dylatacji.



**Rys. 7.** Przemieszczenia poziome przy postępie eksploatacji 200 m — widok prawej strony modelu o uwarstwieniu stopnia wysokiego 20 m

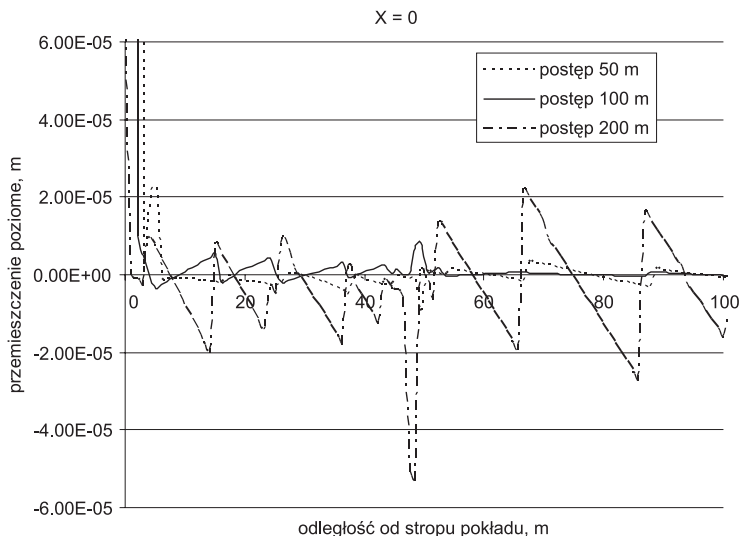
Na rysunku 8 przedstawiono rozkład przemieszczeń poziomych dla modelu o uwarstwieniu co 10 m w stopniu wysokim przy 200 m rozwinięcia eksploatacji. Na jego podstawie można stwierdzić, że w stopniu gęściej uławiconym warstwy uginanie rozpoczyna się w mniejszej odległości od krawędzi eksploatacji — w tym wypadku różnica w stosunku do modelu o uwarstwieniu co 20 m wynosi do 40 m.



**Rys. 8.** Przemieszczenia poziome przy postępie eksploatacji 200 m — widok prawej strony modelu o uwarstwieniu stropu wysokiego 10 m

Rysunki 3–8 nie umożliwiają dobrego odczytania wartości przemieszczeń występujących w modelu. Z tego względu na kolejnych rysunkach przedstawiono wykresy przemieszczeń z linii przekrojów wykonanych w trzech miejscach: w osi symetrii modelu, czyli w linii o współrzędnej  $X$  równej 0, następnie w linii o  $x = 100$  m, co odpowiada położeniu symulowanego frontu ściany przy pełnym rozwinięciu eksploatacji (druga część pola eksploatacyjnego znajduje się w drugiej połowie modelu), oraz w linii o  $x = 200$  m. Rysunki 9, 10 i 11 zawierają trzy wykresy dla tych przekrojów. Odpowiadają one trzem stadiom rozwinięcia eksploatacji: 50, 100 i 200 m — analogicznie jak na rysunkach 5, 6 i 8. Przekroje sięgają na odległość do 100 m od stropu pokładu, co odpowiada z jednej strony zakresowi, w którym uwzględniono realny profil geologiczny, a z drugiej — zasięgowi strefy, w której zastosowano drobny podział na siatkę elementów obliczeniowych i uzyskano wyniki dokładniejsze niż w strefach wyżej leżących.

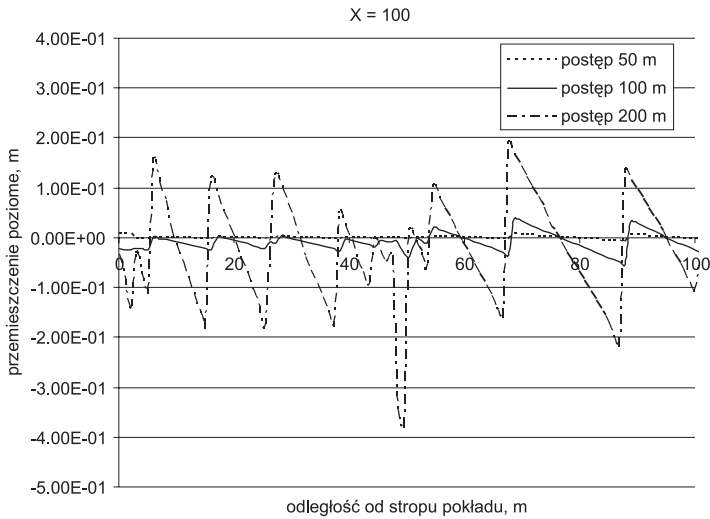
W pierwszej linii przekroju — w osi symetrii modelu — uzyskano bardzo niskie wartości przemieszczeń. Wynika to z faktu równoważenia się w tym miejscu sił i przemieszczeń. Inne niż zerowe wartości na tym przekroju wynikają z błędów obliczeń numerycznych.



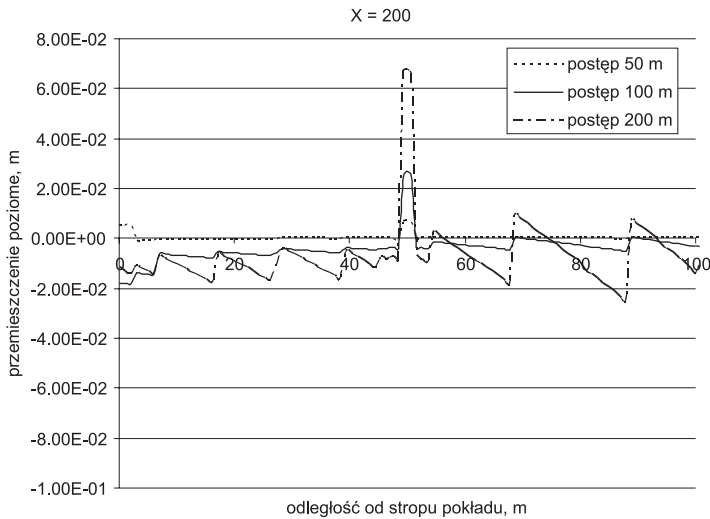
**Rys. 9.** Przemieszczenia poziome w przekroju pionowym usytuowanym w osi symetrii modelu ( $x = 0$ ) w warstwach stropowych przy różnych postęпах symulowanej eksploatacji

Bardziej interesujące dane zawiera rysunek 10 odpowiadający linii przekroju na współrzędnej  $x = 100$  m. Dla postępu eksploatacji równego 50 m przemieszczenia są nieznaczne, lecz już przy 100 m są zaznaczone wyraźnie zmiany przemieszczeń na kontaktach warstw. Są one tym większe, im wyżej jest zlokalizowana warstwa skalna, i osiągają maksymalnie wartość 5 cm. Największe wartości przemieszczeń występują, gdy eksploatacja osiągnie 200 m całkowitego wybiegu. W tym położeniu front modelowanej ściany znajduje się pod linią przekroju. Tendencje wzrostu przemieszczeń ulegają pogłębieniu. Osiągają one wartości ponad 22 cm dla najwyższej leżącej warstwy stropowej, a dla warstwy węgla pokładu 350 (między 48 a 50 m) dochodzą nawet do 40 cm, co jest wynikiem znacznej (ponadsiedmiokrotnej) różnicy w sztywności węgla w stosunku do otaczających go ilowców. Na tym wykresie najwyraźniej widać przeskoki wartości, a nawet zwrotu przemieszczeń na kontaktach warstw skalnych.

Rysunek 11 przedstawia wykresy przemieszczeń poziomych dla linii przekroju zlokalizowanej 200 m od osi symetrii modelu. Obserwowane tu przemieszczenia są znacznie mniejsze niż na poprzednim wykresie. Największe osiągają niespełna 7 cm i odpowiadają tej samej warstwie węgla, co w przypadku przekroju poprzedniego. Dla leżących poniżej tej warstwy skał daje się obserwować pewne zróżnicowanie w przemieszczeniach w obrębie każdej z warstw, lecz przemieszczenia mają ten sam znak, co oznacza, że warstwy skalne są wyciągane w całości, tyle że z różną intensywnością w różnych częściach swej grubości. Dopiero powyżej węgla pokładu 350 w linii przekroju odpowiadającej postępowi 200 m dolna płaszczyzna warstwy skalnej posiada przemieszczenia ze znakiem przeciwnym, co oznacza, że już w tym miejscu poddawana jest zginaniu — podobnie jak kolejne leżące wyżej warstwy.



**Rys. 10.** Przemieszczenia poziome w przekroju pionowym usytuowanym 100 m od osi symetrii modelu ( $x = 100$  m) w warstwach stropowych przy różnych postępowach symulowanej eksploatacji



**Rys. 11.** Przemieszczenia poziome w przekroju pionowym usytuowanym 200 m od osi symetrii modelu ( $x = 200$  m) w warstwach stropowych przy różnych postępowach symulowanej eksploatacji

## 5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań nad numerycznym modelem eksploatacji ścianowej i wywołanymi przez nią procesami w warstwach stropowych wykazują, że w znacznej odle-

głości od eksploatacji występują względne przemieszczenia poziome warstw w stosunku do siebie (przy założeniu ich ciągłości w poziomie oraz braku sił spójności czy sił tarcia na kontaktach). Znamienne jest przy tym, że o ile na znacznych odległościach od rejonu eksploatacji warstwy podlegają wyciąganiu w kierunku pustki, to w pewnej odległości od niej procesy deformacyjne zmieniają swój charakter i przechodzą w zginanie, co skutkuje tym, że część przekroju warstw podlega ścisaniu a przemieszczenia poziome zmieniają swój kierunek. W miejscach tych przyrasta znacznie wartość względnego przemieszczenia warstw względem siebie (dokładniej: płaszczyzn stropowych i spągowych tych warstw). Charakter obserwowanych zjawisk nie powinien ulec znaczącej zmianie w sytuacji zastosowania sił spójności i/lub tarcia na kontaktach czy symulowanej utracie ciągłości warstw nad pustką poeksploatacyjną.

#### LITERATURA

- [1] *Cundall P.A.*: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, France, 1971
- [2] *Drzewiecki J.*: Dependence of active volume of rock mass on the longwall coalface advance rate. Kwartalnik Archiwum Górnictwa, Warszawa – Kraków, 2001, 3–18, ISSN 0860-7001
- [3] *Drzewiecki J., Smolka J.*: Pomiary *in situ* nieciągłości zaistniałych w górotworze na skutek szybko przemieszczającego się frontu ściany. W: Przdolki ścianowe o wysokiej wydajności. Katowice – Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, grudzień 1994
- [4] UDEC Universal Distinct Element Method, v. 3.1 — User's Manual, t. 1–3, Minneapolis, Itasca Consulting Group, Inc., 1996–2000