

# 36

## SYMULACJA OBNIŻEŃ GÓROTWORU SPOWODOWANYCH EKSPLOATACJĄ KOLEJNYCH ŚCIAN Z WYKORZYSTANIEM TEORII AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

### WSTĘP

Prognozowanie deformacji terenu górniczego wskutek podziemnej eksploatacji jest zagadnieniem złożonym i podejmowanym w literaturze od wielu lat. W Polsce można wyróżnić grupę podstawowych metod wykorzystywanych w celu oceny wpływu eksploatacji na górotwór i jego powierzchnię. Zalicza się do nich przede wszystkim:

- Metody bazujące na formułach empirycznych, w których wskaźniki deformacji wyznaczane były w oparciu o różnego rodzaju wykresy czy nomogramy [7].
- Metody wykorzystujące do opisu rozkładu deformacji teorie geometryczno-całkowe. Zalicza się do nich powszechnie stosowaną teorię S. Knothego [1, 5]. Mimo upływu lat metoda jest przedmiotem badań kolejnego pokolenia naukowców [15].
- Metody bazujące na modelach ośrodków ciągłych, gdzie stan naprężeń i odkształceń określa układ równań różniczkowych i równanie stanu zależne od zastosowanego modelu [20].
- Metody bazujące na teorii ośrodka stochastycznego. W mechanice górotworu zostały zastosowane po raz pierwszy przez J. Litwiniszyna [10].
- Metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe [4].

Opublikowane wyniki badań J. Białka [2], R. Mielimąki [12] oraz P. Sikory [17, 18, 19, 20] wskazują, że metody oparte na teorii automatów komórkowych powinny także znaleźć się na tej liście. Dotychczas przedstawiona została już charakterystyka podstawowego modelu górotworu pozwalająca na jego praktyczne stosowanie. W przypadku modelu płaskiego, odwzorowującego dwuwymiarowy przekrój przez górotwór, wykazano, że możliwe jest w sposób naturalny i bezpośredni symulowanie wpływu niejednorodnej budowy górotworu oraz nieliniowego sumowania się wpły-

wów na rozkład obniżeń. Podobna charakterystyka, choć jeszcze nie tak kompletna, została opracowana dla modelu przestrzennego.

Celem artykułu jest próba weryfikacji założeń teoretycznych modelu na przykładzie rzeczywistej eksploatacji dwóch wyrobisk ścianowych. W artykule zawarto podstawową charakterystykę modelu górotworu jako przestrzenny, deterministyczny i skończony automat komórkowy. Opisano podstawowe warunki górniczo-geologiczne dokonanej eksploatacji oraz wyniki pomiarów geodezyjnych na linii pomiarowej przebiegającej na powierzchni terenu bezpośrednio nad polami eksploatacyjnymi. W części zasadniczej opisano wyniki symulacji komputerowej. Wyniki obliczeń numerycznych zostały zestawione z wynikami pomiarów geodezyjnych.

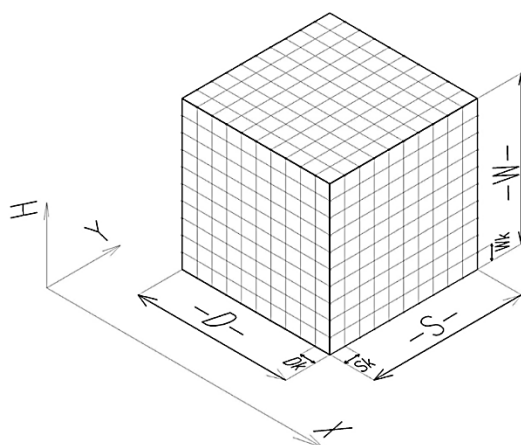
## **DETERMINISTYCZNY AUTOMAT KOMÓRKOWY JAKO PRZESTRZENNY MODEL GÓROTWORU**

Teoria automatów komórkowych jak i szerokie spektrum przykładów jej implementacji w wielu dziedzinach nauki były już wielokrotnie opisywane w literaturze. Należy jednak podkreślić, że mimo licznych przykładów stosowania tej teorii oraz jej uniwersalności nigdy wcześniej, z wyjątkiem wspomnianych autorów, nie była praktycznie stosowana w mechanice górotworu do opisu jego deformacji i powierzchni. Początki samej teorii sięgają lat 40-tych ubiegłego wieku. Za jej autora uważa się powszechnie Johna Von Neumanna [13], matematyka pracującego ówczesnie na cieszącym się światową sławą amerykańskim Uniwersytecie w Princeton. Od tego czasu pierwotnie opracowana metoda obliczeniowa doczekała się standaryzacji [21] i wielu praktycznych aplikacji, m.in. w naukach informatycznych do testowania poprawności działania algorytmów, w fizyce do symulowania przepływu gazów, ciepła, ognia czy w końcu do symulowania ruchu ulicznego [3, 22]. Ideę zastosowania teorii automatów komórkowych do symulowania obniżeń górotworu opracował T. Niemiec [14]. Z kolei podstawową charakterystykę modelu górotworu jako deterministyczny lub stochastyczny automat skończony, pozwalającą na praktyczne stosowanie metody, opracował P. Sikora [17]. Wymienieni autorzy skupiają się jednak na samej symulacji deformacji nie podając przy tym własnej teorii procesu powstawania obniżeń górotworu.

Jedną z podstawowych zalet metody obliczeniowej opartej na teorii automatów komórkowych jest to, że nie wymaga specjalistycznej wiedzy matematycznej do jej stosowania. Jednakże należy pamiętać że, automat komórkowy jest modelem matematycznym opartym na działaniu algorytmu. Praktyczne stosowanie metody wymaga wykorzystania narzędzi informatycznych. Z uwagi na brak powszechnie dostępnych programów pozwalających symulować deformacje górotworu wskutek podziemnej eksploatacji (w oparciu o przedmiotową teorię) metoda ta nie znalazła dotychczas szerszego zastosowania. Z tego też powodu pewne podstawowe elemen-

ty odnoszące się do budowy przestrzennego deterministycznego skończonego automatu komórkowego jako modelu górotworu zostały opisane w dalszej kolejności.

Koncepcja budowy najprostszego modelu górotworu jako deterministyczny automat komórkowy zakłada zdefiniowanie podstawowych parametrów automatu. Zalicza się do nich przede wszystkim określenie układu i rozmiaru siatki komórek, m.in. poprzez zdefiniowanie odwzorowywanych w rzeczywistości wymiarów komórki (szerokość  $S_k$ , długość  $D_k$  i jej wysokość  $W_k$ ). Na rysunku 1 przedstawiono fragment regularnej siatki automatu komórkowego o określonej ilości komórek [20]. Każda komórka, zgodnie z definicją automatu komórkowego, ściśle do siebie przylega i ma taki sam kształt i rozmiar.



**Rys. 1** Przestrzenna siatka automatu komórkowego o określonej ilości poziomów ( $W$ ), kolumn i wierszy ( $D \times S$ ). Komórkom przypisuje się odwzorowywane w rzeczywistości wymiary: długość ( $D_k$ ), szerokość ( $S_k$ ) oraz wysokość ( $W_k$ )

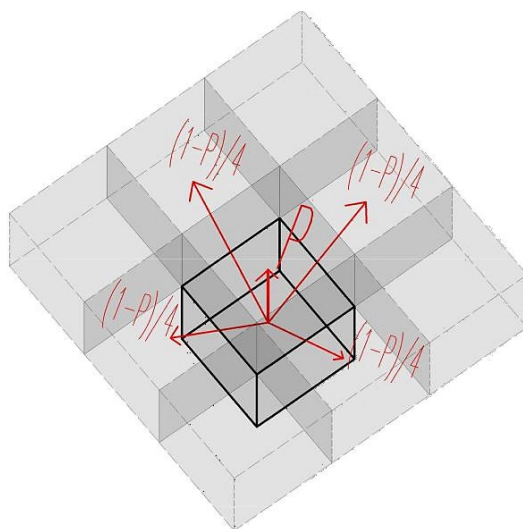
Źródło: [20]

Poprzez przypisanie komórkom odwzorowywanych w rzeczywistości wymiarów możliwe jest przeskalowanie rzeczywistych wymiarów górotworu i przede wszystkim odwzorowanie w nim dokonanej eksploatacji. Odbywa się to poprzez przypisanie odpowiednim komórkom wielkości pewnej objętości odpowiadającej powstałej pustce jako iloczyn wysokości furty eksploatacyjnej wyeksploatowanego pokładu  $g$  i współczynnika kierowania stropem  $a$ . W ten sposób ustala się stan początkowy komórek. Odwzorowanie w siatce jednej lub większej ilości wyeksploatowanych parcel kończy ustalanie tzw. warunków początkowych symulacji deformacji.

Przed właściwym wykonaniem symulacji konieczne jest zdefiniowanie kolejnych niezbędnych parametrów modelu, tj. tak zwanego sąsiedztwa komórkowego oraz funkcji przejścia. Sąsiedztwo komórkowe to przestrzeń wokół pojedynczej komórki w siatce automatu komórkowego z którą ta komórka może wymieniać przypisane jej dane. Elementarnym założeniem działania automatu komórkowego jest jed-

noczesna ewaluacja całego modelu. Innymi słowy każda komórka automatu musi zostać poddana działaniu pewnej funkcji – zwanej funkcją przejścia. Przekazanie danych z komórki do innych z siatki automatu odbywa się wyłącznie w zakresie zdefiniowanym przez sąsiedztwo komórkowe i w układzie oraz stosunku zdefiniowanym przez funkcję przejścia. Funkcja przejścia może mieć charakter deterministyczny – zastosowany w niniejszym opracowaniu lub losowy [18].

Rozwijając wcześniejszą myśl należy sprecyzować, że w rzeczywistości w modelu symulowany jest wysyp rumoszu skalnego do powstałej pustki poeksploatacyjnej. Najprostszy model zakłada liniowy i bezstratny proces rozkładu tego zjawiska. Dodatkowo zakłada się, że zaciskanie pustki spowodowane jest wyłącznie siłą grawitacji. Przekładając to na praktyczną realizację z wykorzystaniem technik informatycznych w automacie symulowany jest rozkład początkowo zainicjowanej pustki poeksploatacyjnej do poziomów nadległych za pomocą prostej pętli programowej. W modelu deterministycznym układ i stosunek wysypu do konkretnych komórek z sąsiedztwa komórkowego jest ściśle określony. Przyjęte, jako najwłaściwsze [18], sąsiedztwo komórkowe ograniczone do 5-ciu komórek względem komórki bazowej oraz podstawową charakterystykę najprostszej deterministycznej funkcji przejścia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Sąsiedztwo komórkowe oraz charakterystyka funkcji przejścia oparta na wartości częściowego przejścia głównego  $P$  z komórki bazowej do komórki nadległej

Źródło: [12]

Przedstawiony powyżej algorytm został szerzej opisany we wcześniejszych publikacjach [12, 20]. Na uwagę zasługuje przedstawiony parametr  $P$  – tzw. parametr przejścia głównego. Decyduje on o stosunku wielkości częściowego przejścia objętości przypisanej komórce bazowej (danej komórce rozpatrywanej w dyskrét-

nym czasie w kontekście ewaluacji całego modelu) do komórki nadległej oraz pozostałych czterech komórek z przyjętego sąsiedztwa komórkowego. Parametr P przyjmuje wartości z przedziału (0;1).

Działanie symulacji kończy się w momencie gdy suma objętości przypisana komórkom na etapie ustalania warunków początkowych będzie równa sumie objętości na poziomie odwzorowującym powierzchnię górotworu.

Podstawą do praktycznego stosowania przedstawionego modelu jako deterministycznego automatu skończonego jest zależność wiążąca podstawowe parametry, tj. przyjęte wymiary komórki  $S_k$  [m],  $D_k$  [m] i  $W_k$  [m], głębokość eksploatacji  $H$  [m], wartość maksymalnego obniżenia  $ag$  [mm] z maksymalnym nachyleniem  $T_{max}$  (wzór 1) [20].

$$T_{max(x)} = A \frac{ag}{H} \left( \frac{W_k}{D_k} \right) \left( \frac{W_k}{H} \right)^{-0.5} \left[ \frac{mm}{m} \right] \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – parametr dopasowania z uwagi na wartość parametru przejścia głównego  $P$ .

W modelu zdefiniowano współczynnik maksymalnego nachylenia  $a_T$  opisujący stosunek maksymalnego nachylenia do maksymalnego obniżenia (wzór 2).

$$a_T = \frac{T_{max} \cdot H}{ag} \quad (2)$$

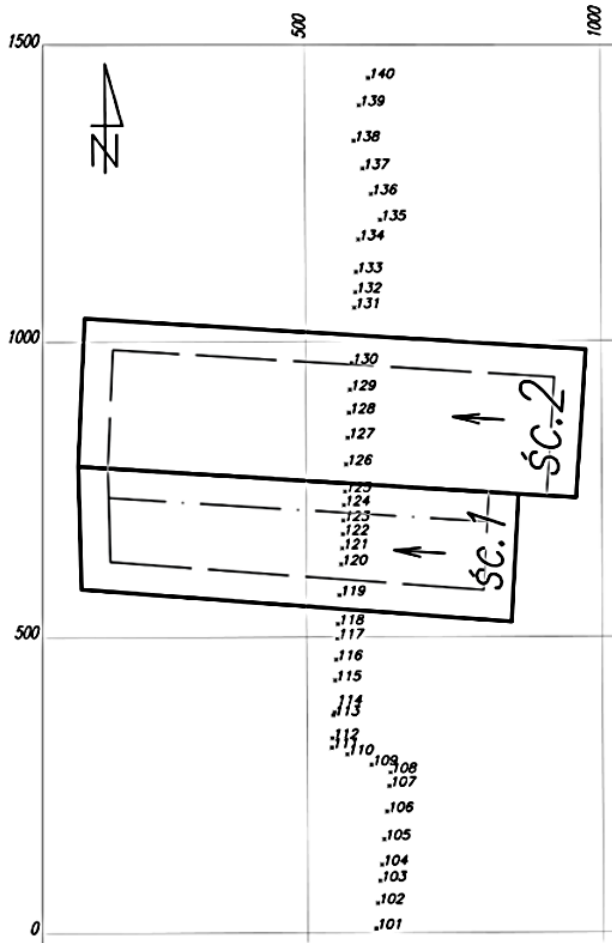
Ze wzorów 36.1 i 36.2 wynika, że parametr  $a_T$  jest zmienny w zależności od głębokości eksploatacji  $H$  [2].

Przedstawiony powyżej algorytm prowadzi do charakterystyki rozkładu obniżeń zgodnego z rozkładem dla teorii ośrodka stochastycznego J. Litwiniszyna [10, 18].

## OPIS DOKONANEJ EKSPLOATACJI W POKŁADZIE 338/2

Wybrany przykład rzeczywistej podziemnej eksploatacji węgla kamiennego został wybrany z uwagi na fakt, że była to pierwsza eksploatacja w tym rejonie górotworu oraz ze względu na prawidłowo zastabilizowaną, z uwagi na obserwacje skutków tej eksploatacji, linię pomiarową na powierzchni terenu górniczego.

KWK „D” w okresie między marcem 1994 r. a majem 1995 r. wyeksploatowała 2 wyrobiska ścianowe w pokładzie 338/2. Eksploatacja ściany pierwszej została zakończona w listopadzie 1994 r. W tym samym okresie rozpoczęto eksploatację ściany drugiej. Układ wyrobisk ścianowych na tle linii pomiarowej został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3 Kontury wyeksploatowanych parcel w pokładzie 338/2 na tle linii pomiarowej "1".  
Linia przerywaną zaznaczono kontury parcel pomniejszone o obrzeże eksploatacyjne.  
Skala 1:5000

Obydwie ściany zostały wybrane metodą na zawał stropu wzdłuż kierunku rozciągłości złoża. Nachylenie pokładu było nieznaczne i wynosiło ok. 6°. Głębokość eksploatacji wahała się od 590 m do 635 m – średnia głębokość eksploatacji wynosiła ok. 615 m. Wysokość furty eksploatacyjnej była mniej więcej równa grubości pokładu, tj. w przypadku ściany 1 średnio 1,8 m i w przypadku ściany 2 średnio 2,0 m. Długość ściany pierwszej wynosiła ok. 215 m natomiast ściany drugiej ok. 260 m. Odpowiednio wybiegi ścian wyniosły 746 m i 850 m.

Na powierzchni terenu górniczego zastabilizowano trwałymi znakami linię pomiarową „1” przebiegająca z południa (punkt 101) na północ (punkt 140) zgodnie z układem przedstawionym na rysunku 3. Odległości między punktami wynosiły średnio ok. 39 m. Cykliczne pomiary na linii obserwacyjnej wykonywane były metodą niwelacji geometrycznej precyzyjnej z wykorzystaniem kodowego niwelatora i łat

inwarowych. To ogromna zaleta w przeciwieństwie do coraz powszechniej stosowanych pomiarów GNSS RTN czy z wykorzystaniem technologii UAV, które rozwiązują wiele problemów [9] ale z racji ograniczeń dokładnościowych w podobnych analizach często powodują trudności w interpretacji otrzymanych wyników. Tzw. pomiar „zerowy” będący odniesieniem dla kolejnych cykli pomiarowych oraz mający na celu stwierdzenie stabilności gruntu wykonano przed rozruchem ściany pierwszej. W niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów niwelacyjnych wykonanych po zakończeniu eksploatacji ściany pierwszej i drugiej. Przyrosty obniżeń oraz obliczone wielkości nachyleń w stosunku do pomiaru zerowego zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1 Wyniki pomiarów niwelacyjnych jako obniżenia terenu na punktach linii pomiarowej "1" oraz obliczone wielkości nachyleń**

Nr punktu	w [mm] (śc.1)	w [mm] (śc.1+śc.2)	T [mm/m] (śc.1)	T [mm/m] (śc.1+śc.2)	Nr punktu	w [mm] (śc.1)	w [mm] (śc.1+śc.2)	T [mm/m] (śc.1)	T [mm/m] (śc.1+śc.2)
101	-1	-2	-0,05	-0,05	121	-512	-909	-2,07	-6,80
102	-3	-4	-0,03	-0,03	122	-563	-1077	-0,52	-5,28
103	-4	-5	-0,04	-0,04	123	-575	-1198	1,50	-3,04
104	-5	-6	0,00	-0,20	124	-536	-1277	2,79	-1,28
105	-5	-15	-0,09	0,11	125	-473	-1306	3,49	-0,20
106	-9	-10	-0,05	-0,07	126	-313	-1315	3,02	0,76
107	-11	-13	-0,04	-0,04	127	-177	-1281	1,38	1,03
108	-12	-14	-0,06	-0,06	128	-118	-1237	0,91	2,99
109	-14	-16	-0,04	-0,04	129	-83	-1122	0,67	4,09
110	-16	-18	0,00	-0,04	130	-53	-939	0,13	5,52
111	-16	-19	0,00	-0,06	131	-41	-416	0,19	3,73
112	-16	-20	-0,13	-0,15	132	-36	-319	0,21	2,34
113	-21	-26	-0,37	-0,54	133	-29	-239	0,15	2,20
114	-34	-45	-0,13	-0,30	134	-21	-119	0,20	0,98
115	-37	-52	-0,45	-0,81	135	-11	-70	0,13	0,79
116	-53	-81	-0,83	-1,53	136	-5	-32	0,07	0,11
117	-83	-136	-1,85	-2,98	137	-2	-27	0,02	0,10
118	-127	-207	-2,09	-3,29	138	-1	-22		0,08
119	-229	-368	-3,68	-6,47	139		-17		0,02
120	-421	-706	-3,36	-7,48	140		-16		

Z wyników pomiarów niwelacyjnych wynika, że na powierzchni terenu górniczego powstała niepełna niecka obniżeniowa. Po wybraniu pierwszej ściany maksymalne pomierzone obniżenia wyniosły 575 mm, natomiast po wybraniu drugiej ściany 1315 mm. Na uwagę zasługują wielkości obliczonych przyrostów nachyleń terenu. Po wybraniu pierwszej ściany maksymalne nachylenia wyniosły ok. 3,5 mm/m. Wartości były podobne nad obiema krawędziami eksploatacyjnymi. Można uznać, że niecka była symetryczna. Po wybraniu drugiej ściany nachylenia nad krawędziami pola eksploatacyjnego były już różne. Nad krawędzią po stronie ściany pierwszej wyniosły ok. 7,5 mm/m, nad krawędzią ściany drugiej ok. 5,5 mm/m. Asymetria niecki obniżeniowej spowodowana była nieliniowym sumowaniem się wpływów wynikającym z eksploatacji pierwszej ściany [11].

## SYMULACJA OBNIŻEŃ GÓROTWORU WSKUTEK EKSPLOATACJI ŚCIANY 1 I 2 W POKŁADZIE 338/2 Z WYKORZYSTANIEM TEORII AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Symulację obniżeń górotworu spowodowaną eksploatacją ściany 1 i 2 w pokładzie 338/2 wykonano autorskim oprogramowaniem CA3D. Metodą najmniejszych kwadratów dopasowano podstawowe parametry górniczo-geologiczne, które przyjęły następujące wielkości:

- Parametr górotworu  $a_T = 2,3$
- Współczynnik kierowania stropem  $a = 0,8$
- Obrzeże eksploatacyjne  $A_{obr} = 0,07H$ .
- Współczynnik proporcjonalności przemieszczeń poziomych do pionowych  $B = 0,32 r$ .

Można uznać, że są to wielkości typowe (przeciętne) dla rejonu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wystąpienie obrzeża eksploatacyjnego założono z uwagi na fakt, że przedmiotowa eksploatacja była pierwszą w tym rejonie górotworu oraz z uwagi na znaczną głębokość zalegania pokładu w stosunku do rozmiaru pola eksploatacyjnego. Dla przyjętych parametrów górniczo-geologicznych wyznaczono, w oparciu o wzór 1 parametry automatu komórkowego, które zestawiono w poniższej tabeli:

- Przyjęto jednakową szerokość i długość komórki  $S_k = D_k = 20$  m.
- Wysokość komórki  $W_k = 4$  m.
- Parametr przejścia głównego  $P = 0,53$ .

Na rysunku 4 przedstawiono mapę warstwicową końcowych przyrostów obniżeń spowodowanych eksploatacją obu ścian.

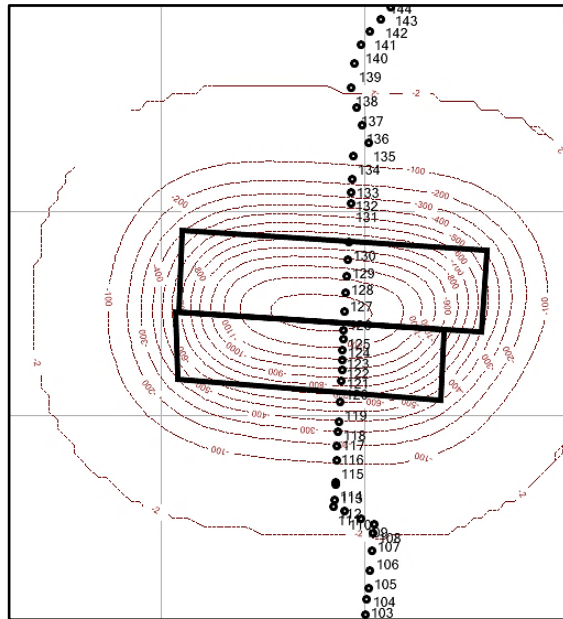
W dalszej kolejności wyinterpolowano wielkości obniżeń oraz nachyleń w punktach linii pomiarowej „1”. Dodatkowo uwzględniono wariant obliczeniowy obejmujący wyłącznie deformacje spowodowane eksploatacją pierwszej ściany.

Na poniższych wykresach (rysunek 5 i 6) przedstawiono profil niecki obniżeniowej i sumarycznego przyrostu nachyleń terenu spowodowanych wybraniem ściany pierwszej. Na wykresie przedstawiono również profile będące wynikiem pomiarów niwelacyjnych.

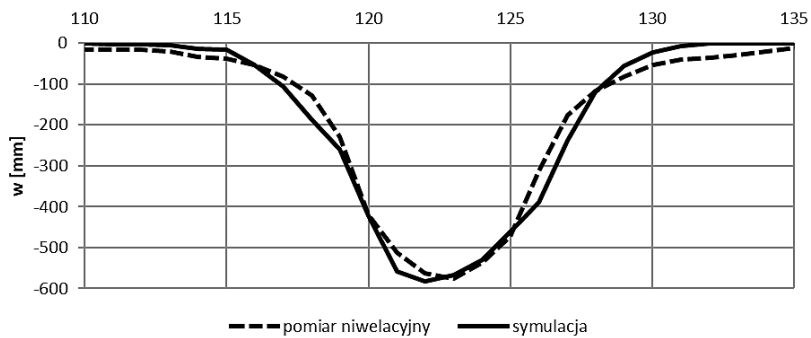
Z przedstawionych danych wynika, że otrzymane wyniki dobrze korelują z wynikami pomiarów niwelacyjnych [6, 8]. Dotyczy to zarówno opisu jakościowego jak i ilościowego. Wielkości ekstremalne – zarówno obniżeń jak i nachyleń – są do siebie bardzo zbliżone. W przypadku nachyleń maksymalne wartości różniły się o niecałe 0,4 mm/m, co stanowi ok. 10% różnicy w stosunku do wyników pomiarów.

W dalszej kolejności, w analogiczny sposób zestawiono wyniki pomiarów i obliczeń dla wariantu obejmującego deformacje spowodowane eksploatacją obu ścian.

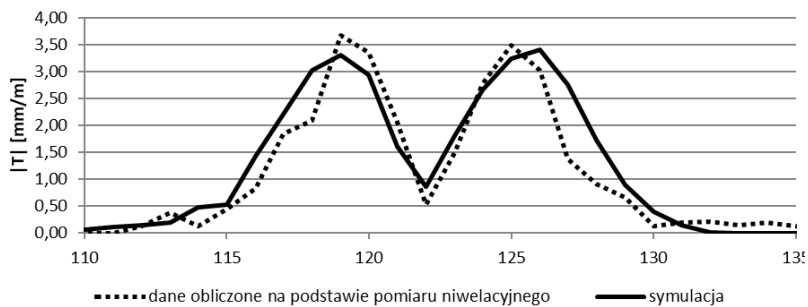




Rys. 4 Końcowa niecka obniżeniowa [mm] wyznaczona z symulacji programem CA3D (eksploatacja ściany pierwszej i drugiej w pokładzie 338/2 z uwzględnieniem obrzeża eksploatacyjnego) na tle linii pomiarowej "1". Skala 1:5000.

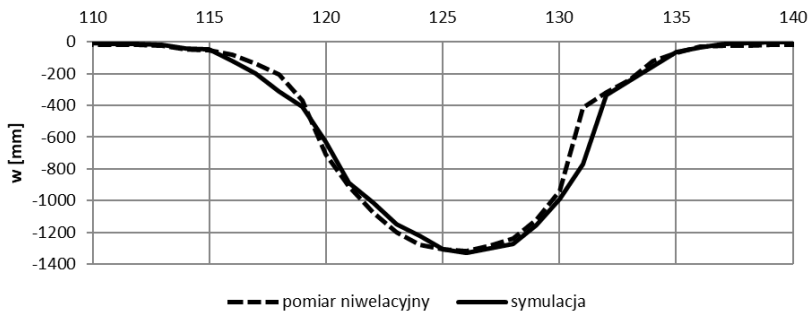


Rys. 5 Obliczony i pomierzony profil niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej "1" powstały wskutek eksploatacji ściany pierwszej

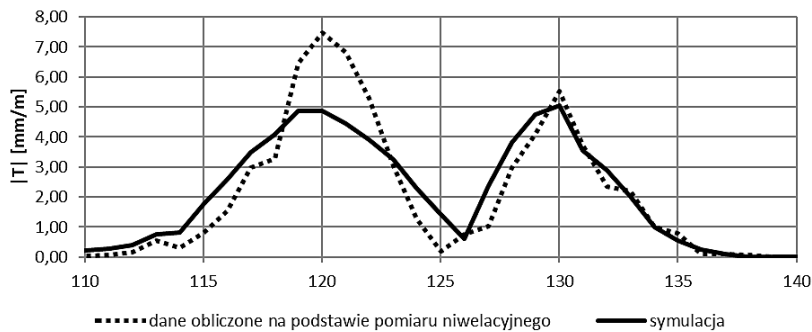


Rys. 6 Obliczone i wyznaczone z pomiarów sumaryczne przyrosty nachyleń terenu  $T$  [mm/m] wzdłuż linii pomiarowej "1" powstałe wskutek eksploatacji ściany pierwszej.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono odpowiednio profil niecki obniżeniowej i wielkości sumarycznych przyrostów nachyleń (dla punktów pomiarowych linii „1”).



Rys. 7 Obliczony i pomierzony profil niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej "1" powstały wskutek eksploatacji ściany pierwszej i drugiej



Rys. 8 Obliczone i wyznaczone z pomiarów sumaryczne przyrosty nachyleń terenu T [mm/m] wzdłuż linii pomiarowej "1" powstałe wskutek eksploatacji ściany pierwszej i drugiej

Otrzymane wyniki w przypadku obniżeń pozwalają stwierdzić dużą zbieżność z wynikami pomiarów, w szczególności w kwestii wielkości oraz miejsca wystąpienia maksymalnych obniżeń. Natomiast w przypadku obliczonych wielkości nachyleń można zauważyć sporą [8], bo dochodzącą do ok. 33% różnicę między maksymalnymi wielkościami nad południową krawędzią pola eksploatacyjnego (obejmującego obie ściany). Nad północną krawędzią wielkości maksymalne nachyleń są w zasadzie jednakowe. Różnica między otrzymanymi wielkościami nachyleń nad krawędzią południową wynika z aktywacji zrobów spowodowanych początkową eksploatacją ściany pierwszej [11]. Przyjęty do symulacji algorytm – funkcja przejścia – zakłada liniowe sumowanie się wpływów. Otrzymane w wyniku symulacji nachylenia charakteryzują się w związku z tym symetrią.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule podjęto kolejną próbę zamodelowania górotworu oraz dokonanej w nim eksploatacji złoża pokładowego z wykorzystaniem teorii automatów komór-

kowych. Przedstawiony przykład rzeczywistej eksploatacji dotyczył dwóch wyrobisk ścianowych w pokładzie 338/2 wybranych jako pierwsze w tym rejonie górotworu jedno po drugim. Roboty górnicze prowadzone były w okresie między marcem 1994 r. a majem 1995 r. Na podstawie podstawowej charakterystyki modelu górotworu jako deterministyczny skończony automat komórkowy odwzorowano przykład dokonanej eksploatacji oraz wykonano symulację rozkładu obniżeń wewnątrz modelu. Do symulacji przyjęte zostały typowe wartości parametrów górniczo – eksploatacyjnych. W konsekwencji uzyskano na powierzchni modelu niepełną nieckę obniżeniową. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami obserwacji geodezyjnych prowadzonych cyklicznie na linii pomiarowej przebiegającej nad przedmiotowym polem eksploatacyjnym. Po wybraniu pierwszej ściany zgodnie z harmonogramem dokonanej eksploatacji wyniki otrzymane z obliczeń numerycznych w zakresie obniżeń jak i końcowych przyrostów nachyleń były jakościowo i ilościowo zgodne. Powstała niecka obniżeniowa charakteryzowała się symetrią względem wartości maksymalnego obniżenia. Maksymalne wartości nachyleń wystąpiły nad krawędziami eksploatacyjnymi i były równe. Natomiast po wybraniu drugiej ściany uzyskano również zadowalające wyniki w zakresie rozkładu obniżeń, natomiast nachylenia nad krawędzią północną – tj. krawędzią pola eksploatacyjnego od strony ściany pierwszej nachylenia pomierzone były ok. 33% większe od tych wyznaczonych z symulacji. Nachylenia nad drugą krawędzią były zbieżne w zakresie pomiaru i obliczeń numerycznych. Różnica nad pierwszą krawędzią była wynikiem nieliniowego sumowania się wpływów, które w przedstawionej funkcji rozkładu nie zostało odwzorowane.

Mimo pewnych rozbieżności, należy uznać, że uzyskane wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają zasadność dotychczasowych założeń teoretycznych przedmiotowej metody. W przypadku modelu płaskiego wykazano już wcześniej, wzorując się na podobnych rozwiązaniach J. Litwiniszyna, że w modelu górotworu zbudowanym jako automat komórkowy możliwe jest symulowanie wpływu nieliniowego sumowania się wpływów na rozkład obniżeń. Na tej podstawie można stwierdzić, że należy kontynuować prace związane z opracowaniem podobnego rozwiązania dla modelu przestrzennego.

## LITERATURA

1. Białek J., Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2003.
2. Białek J., Sikora P., 2012. Symulacja wpływu nachylenia pokładu i szczeliny uskokowej na rozkład obniżeń za pomocą metody automatów komórkowych, Przegląd Górniczy, 8/2012, ISSN 0033-216X, str. 160-165.
3. Chopard B., Luthi P.O., Querez P-A.: Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network. Journal of Physics A 29:2325-2336. 1996.
4. Gruszczyński W.: Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania deformacji górniczych. Przegląd Górniczy t. 66 nr 7-8, s. 7-11, 2010.

5. Knothe S., 1953. Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa*, t. I, z. 1.
6. Kowalski A., Nieustalone górnicze deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz. *Studia – Rozprawy – Monografie Nr 871*. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa. Katowice 2007.
7. Kratzsch H.: *Mining Subsidence Engineering*. Springer Verlag, New York 1983.
8. Kwiatek J., Probabilistyczna ocena niezawodności obiektów budowlanych na terenach górniczych. *WARSZTATY 2006 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie*. Mat. Symp. str. 205–214. IGSMiE PAN, 2006.
9. Janusz, W., Mielimąka, R., Niezabitowski, M., Orwat, J., Sikora, P.: „Surface monitoring of water basins based on use of autonomous flying robots”, *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje (Poland) 24-27.08.2015*, pp. 376-381, ISBN 978-1-4799-8701-6
10. Litwiniszyn J., 1954. Przemieszczenia górotworu w świetle teorii prawdopodobieństwa. *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t. 2, z. 1*.
11. Mielimąka R.: Wpływ kolejności i kierunku eksploatacji prowadzonej frontami ścianowymi na deformacje terenu. *Monografia*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2009.
12. Mielimąka R., Sikora P.: Symulacja obniżenia górotworu spowodowana wielokrotną eksploatacją górniczą z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. *Przegląd Górniczy*, 12/2017, ISSN 0033-216X, str. 84-92.
13. Neumann J., Morgenstern O.: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 1944.
14. Niemiec R., Niemiec T.: Błądzenie losowe i jego zastosowanie do modelowania deformacji górotworu powodowanych eksploatacją górniczą. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa „Górnictwo i Środowisko” Katowice*. 2008.
15. Orwat, J., Mielimąka, R.: „Approximation of average course of measured curvatures of mining area with reference to their forecast values by Bialek’s formulas”, *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodes (Greece) 19-25.09.2016*, pp. 130003-1 - 130003-4, ISBN 978-0-7354-1538-6; *AIP Conference Proceedings*, Volume: 1863
16. Schiff, Joel L., 2011. *Cellular Automata: A Discrete View of the World*. Wiley & Sons, Inc. ISBN 9781118030639.
17. Sikora P., 2010. Wykorzystanie deterministycznego automatu skończonego do wyznaczania profilu linii obniżenia terenu spowodowanych podziemną eksploatacją. *Przegląd Górniczy 2010 nr 10*, s. 141-143.
18. Sikora P., 2011. Opis obniżenia górotworu pod wpływem podziemnej eksploatacji z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. *Praca doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice.
19. Sikora P., 2013. Wpływ nieliniowego sumowania wpływów na kształt profilu niecki obniżeniowej opisywanej przez deterministyczny model górotworu zbudowany w oparciu o teorię automatów komórkowych, str. 195-199, *Przegląd Górniczy 2013 nr 8*, ISSN 0033-216X.
20. Sikora P., 2014. Wykorzystanie przestrzennego automatu deterministycznego do symulowania obniżenia terenu spowodowanych podziemną eksploatacją, str. 131-136, *Przegląd Górniczy 2014 nr 8*, ISSN 0033-216X.
21. Wesołowski M.: Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i oddziaływania eksploatacji na obiekty. *Praca doktorska niepublikowana*. Gliwice 2001.
22. Wolfram S., 2002. *A new kind of science*. Wolfram Media. ISBN 1-57955-008-8.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 03.2018  
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 04.2018

## **SYMULACJA OBNIŻEŃ GÓROTWORU SPOWODOWANYCH EKSPLOATACJĄ KOLEJNYCH ŚCIAN Z WYKORZYSTANIEM TEORII AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH**

**Streszczenie:** *W pracy przedstawiono przykład rzeczywistej eksploatacji pokładowej węgla kamiennego kolejnych dwóch ścian. Eksploatacja spowodowała powstanie na powierzchni terenu górniczego niepełnej niecki obniżeniowej. Deformacje powierzchni objęte były systematycznymi pomiarami niwelacyjnymi wzdłuż linii pomiarowej „1”. Dla przedstawionego przykładu podziemnej eksploatacji wykonano obliczenia numeryczne z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych a następnie porównano je w wynikami obserwacji geodezyjnych. Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja założeń teoretycznych przyjętych dla przestrzennego modelu górotworu jako deterministycznego skończonego automatu komórkowego.*

**Słowa kluczowe:** *obniżenia, górotwór, automat komórkowy*

## **SIMULATION OF ROCK MASS SUBSIDENCE DUE TO SUBSEQUENT MINING EXTRACTION USING THE THEORY OF CELLULAR AUTOMATA**

**Abstract:** *The paper presents an example of real subsequent hard coal mining, which caused the formation of a subsidence trough on the surface of the mining area. Surface deformations were covered by systematic leveling measurements along the measurement line “1”. For the illustrated example of underground mining, numerical calculations were made using the theory of cellular automata. Calculated data were compared with the results of geodetic observations. The aim of the article was to verify the theoretical assumptions of the model and to demonstrate the practical possibilities of applying the method to assess the subsidence of the mining area.*

**Key words:** *subsidence, rock mass, cellular automaton*

**dr hab. inż. Ryszard MIELIMĄKA**  
Politechnika Śląska  
Wydział Górniczo i Geologii  
Katedra Eksploatacji Złóż  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska

**dr inż. Paweł SIKORA**  
Politechnika Śląska  
Wydział Górniczo i Geologii  
Katedra Eksploatacji Złóż  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska