

Symulacja obniżeń górotworu spowodowana wielokrotną eksploatacją górniczą z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych

Simulation of rockmass subsidence caused by frequent mining exploitation with the use of cellular automaton theory



Dr hab. inż. Ryszard Mielimąka^{*)}



Dr inż. Paweł Sikora^{*)}

Treść: W pracy przedstawiono przykład rzeczywistej wielokrotnej eksploatacji pokładowej węgla kamiennego, która spowodowała powstanie na powierzchni terenu górniczego niecki obniżeniowej. Deformacje powierzchni objęte były systematycznymi pomiarami niwelacyjnymi wzdłuż linii pomiarowej „H”. Dla przedstawionego przykładu podziemnej eksploatacji wykonano obliczenia numeryczne z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych, a następnie porównano je z wynikami obserwacji geodezyjnych. Celem artykułu była weryfikacja założeń teoretycznych modelu i wykazanie praktycznych możliwości zastosowania przedmiotowej metody do oceny deformacji terenu górniczego.

Abstract: This paper presents an example of real multiple 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 “H”. For the illustrated example of underground mining, numerical calculations were made using the theory of cellular automata, and then compared with the results of geodetic observations. The aim of the paper was to verify the theoretical assumptions of the model and to demonstrate the practical possibilities of applying this method to assess the deformation of the mining area.

Słowa kluczowe:

obniżenia, górotwór, automat komórkowy

Keywords:

subsidence, rock mass, cellular automaton

1. Wprowadzenie

Prognozowanie deformacji terenów górniczych, spowodowanych podziemną eksploatacją złóż pokładowych odbywa się poprzez zastosowanie metod, które współcześnie można podzielić głównie na:

- metody oparte na przyjętych aksjomatach, które wykorzystują teorię geometryczno-całkową do opisu rozkładu deformacji,
- metody oparte na modelach ośrodków ciągłych, gdzie stan naprężeń i przemieszczeń określa układ równań różniczkowych i równanie stanu zależne od przyjętego modelu ośrodka.

Wyniki badań dotyczących możliwości zastosowania automatów komórkowych w dziedzinie mechaniki górotworu,

wielokrotnie publikowanych, pozwalają sądzić, że do wymienionego grona wkrótce będzie można dołączyć jeszcze jedną, odrębną grupę metod:

- metody wykorzystujące teorię automatów komórkowych.

Podstawową zaletą stosowania automatów komórkowych jest ogromna złożoność wyników w stosunku do prostoty ich działania (Schiff, Joel 2011). W poprzednich publikacjach wykazano (Białek, Sikora 2012, Sikora 2010, 2011, Sikora 2013), że stosując automaty komórkowe można w prosty sposób zamodelować górotwór poprzez jego dyskretyzację w postaci siatki ściśle do siebie przylegających komórek o jednakowych kształtach i rozmiarach. Poprzez przypisanie komórkom odwzorowywanych w rzeczywistości rozmiarów można w modelu odwzorować parcelę eksploatacyjną. W modelu symulowane jest wypełnianie się pustki poeksploatacyjnej przez rumosz skalny z warstw nadległych, poprzez tzw. wpływ pewnej objętości odpowiadającej pustce do komórek z warstwy nadległej w układzie i stosunku okre-

^{*)} Politechnika Śląska, Gliwice

ślonym przez tzw. sąsiedztwo komórkowe i funkcję przejścia – algorytm będący „sercem” automatu komórkowego. W poprzednich artykułach przedstawiono podstawową charakterystykę modelu pozwalającą na praktyczne stosowanie metody. W przypadku dwuwymiarowego modelu górotworu wykazano także, że w naturalny i bezpośredni sposób można uwzględniać w modelu niejednorodną budowę górotworu oraz nieliniowe własności sumowania się wpływów górniczych. Otrzymywane wyniki symulacji są zgodne z wynikami otrzymywanymi z zastosowaniem m.in. teorii geometryczno-całkowej (dla odpowiadających parametrów). Większość przedstawionych przykładów dotyczyła jednak modelu płaskiego.

W literaturze (Sikora 2014) została także przedstawiona podstawowa charakterystyka modelu trójwymiarowego. Koncepcja budowy modelu przestrzennego zakłada uzupełnienie siatki automatu o jeden wymiar. Jak się jednak okazuje, przyjmowana funkcja rozkładu nie prowadzi do takiej samej charakterystyki rozkładu obniżenia jak w przypadku modelu płaskiego. Oznacza to, że przedstawione dla wariantu dwuwymiarowego zależności matematyczne nie znajdują praktycznego zastosowania w tym przypadku. Konieczne było ponowne opisanie podstawowych właściwości modelu. Podstawowa charakterystyka wiążąca główne parametry modelu trójwymiarowego, tj. odwzorowywane wymiary komórki, głębokość eksploatacji z wielkością maksymalnego obniżenia i maksymalnego nachylenia (w przypadku niecki pełnej) została przedstawiona w poprzednim artykule. Wykazano również na prostym, abstrakcyjnym przykładzie, że metoda pozwala uzyskiwać wyniki zbieżne z metodą geometryczno-całkową.

W poniższym artykule, bazując na dotychczasowych doświadczeniach, zastosowano metodę wykorzystującą teorię

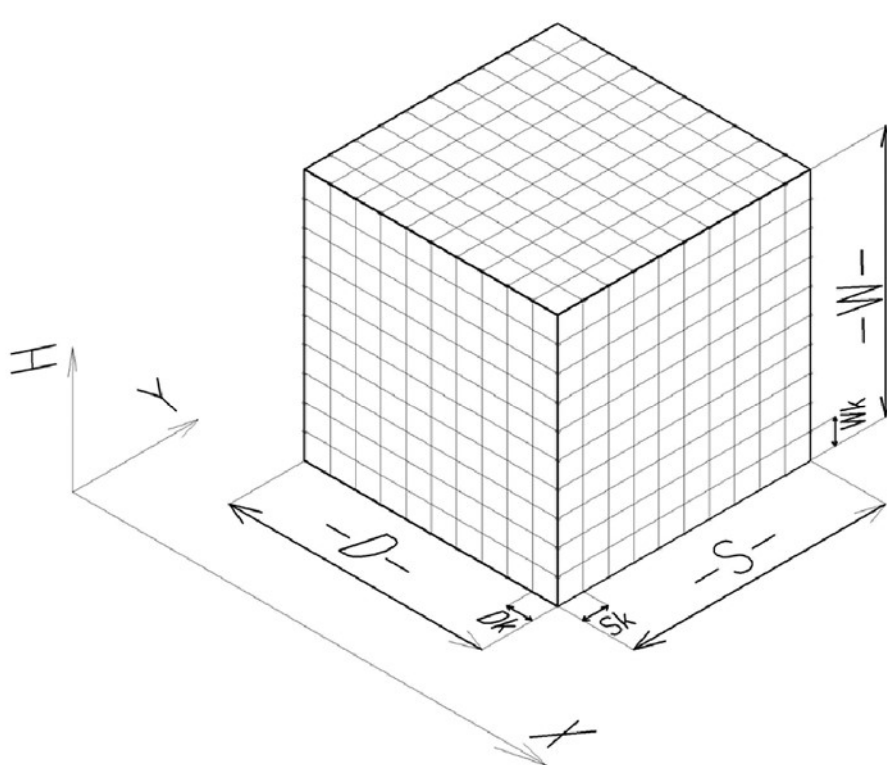
automatów komórkowych do symulacji końcowych deformacji terenu górniczego w oparciu o rzeczywisty przypadek wielokrotnej podziemnej eksploatacji węgla kamiennego. Wyniki obliczeń numerycznych zostały porównane z wynikami obserwacji geodezyjnych.

2. Budowa i zasada działania automatu komórkowego jako model górotworu

Budowa automatu komórkowego opiera się w głównej mierze na zdefiniowanej siatce komórek. Siatka musi spełniać dwa podstawowe warunki, tj. komórki muszą ściśle do siebie przylegać i mieć taki sam kształt i rozmiar (Wolfram 2002). W siatce wyróżnia się poziomy (W) zgodnie z kierunkiem głębokości. Natomiast każdy poziom składa się z komórek ułożonych w określonej liczbie kolumn (D) i wierszy (S) (rys. 1).

Każdej komórce przypisuje się jednakowe odwzorowywane w rzeczywistości wymiary (rys. 1): długość (D_k), szerokość (S_k) i wysokość (W_k). Rozmiary pozwalają przeskalować rzeczywiste wymiary górotworu oraz odwzorować w modelu dokonaną eksploatację poprzez przypisanie odpowiednim komórkom w automacie wielkości będącej ekwiwalentem powstałej pustki poeksploatacyjnej (Sikora 2011, Sikora 2014).

W automacie symulowany jest wysyp rumoszu skalnego do powstałej pustki poeksploatacyjnej. Odbywa się to poprzez rozkład przypisanej wielkości pustki w danej komórce do komórek z nadległego poziomu. Rozkład odbywa się w ściśle określony sposób, o którym decyduje tzw. sąsiedztwo komórkowe oraz przyjęta funkcja rozkładu będąca podstawą działania automatu komórkowego.



Rys. 1. Przestrzenna siatka automatu komórkowego o określonej ilości wierszy (W) i kolumn (D x S). Komórkom można przypisać odwzorowywane w rzeczywistości wymiary: długość (D_k), szerokość (S_k) oraz wysokość (W_k) (Sikora 2014)

Fig. 1. Spatial cell grid of a cellular automaton with determined number of levels (W), rows and columns (D x S). The cells can be ascribed with real dimensions: length (D_k), width (S_k) and the height (W_k). (Sikora 2014)

Działanie automatu komórkowego polega na jednoczesnym wykonaniu określonej funkcji na wszystkich komórkach (Wolfram 2002). W praktyce do wykonania symulacji wymagane jest zastosowanie narzędzi programistycznych. Działanie automatu oparte jest na prostej pętli programowej (Sikora 2011). Po wykonaniu procedury sprawdza się, czy osiągnięty został stan końcowy określony warunkiem brzegowym. Jeżeli nie, powtarza się wykonanie tej samej procedury w taki sam sposób aż do uzyskania warunku brzegowego. W przypadku symulacji rozkładu obniżeń stanem końcowym będzie stan, w którym suma obniżeń na poziomie odpowiadającym powierzchni terenu górniczego będzie równa sumie wartości objętości pustek przypisanej do odpowiednich komórek odwzorowujących wybrane pokłady (na etapie początkowym). Zakłada się, że rozkład wartości pustki do komórek nadległych odbywa się bezstratnie. Rozkład określony funkcją deterministyczną lub losową z każdej komórki w cyklu działania automatu oparty jest o ściśle zdefiniowane sąsiedztwo komórkowe. Określa ono, do jakich komórek przekazana będzie wartość pustki z danej komórki rozpatrywanej w danej iteracji. Dana komórka rozpatrywana w danej iteracji nazywana jest komórką bazową.

W rozpatrywanym modelu górotworu przyjęto sąsiedztwo komórkowe ograniczone względem komórki bazowej do 5 komórek zalegających na poziomie wyższym w układzie przedstawionym na poniższym rysunku (rys. 2), tj. do komórki położonej bezpośrednio nad komórką bazową oraz 4 komórek położonych w wierszu i kolumnie niżej i wyżej.

W trakcie trwania symulacji, z każdej komórki bazowej przekazywana jest cała wielkość obniżenia (ekwiwalent pustki) zapisanej w komórce do komórek z sąsiedztwa komórkowego w ściśle określonych proporcjach (dla modelu deterministycznego). Procedura ta nazywana jest funkcją przejścia i w głównej mierze decyduje o charakterystyce

rozkładu obniżeń w modelu górotworu. Wielkość pustki przekazywana do komórki zalegającej bezpośrednio nad komórką bazową nazywana jest przejściem głównym i oznaczana jest symbolem P (rys. 2). Wielkość P jest parametrem modelu i przyjmuje wartość z zakresu (0 - 1). Determinuje wielkość obniżenia przypisanego danej komórce bazowej, która zostanie przekazana do komórki zalegającej bezpośrednio nad nią. Reszta „obniżenia” jest przekazywana do pozostałych komórek z sąsiedztwa komórkowego w równym udziale. W najprostszym modelu górotworu wartość parametru P jest ustalana przed symulacją i jest wartością stałą.

Podstawą do praktycznego stosowania modelu górotworu, 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} (1) (Sikora 2014).

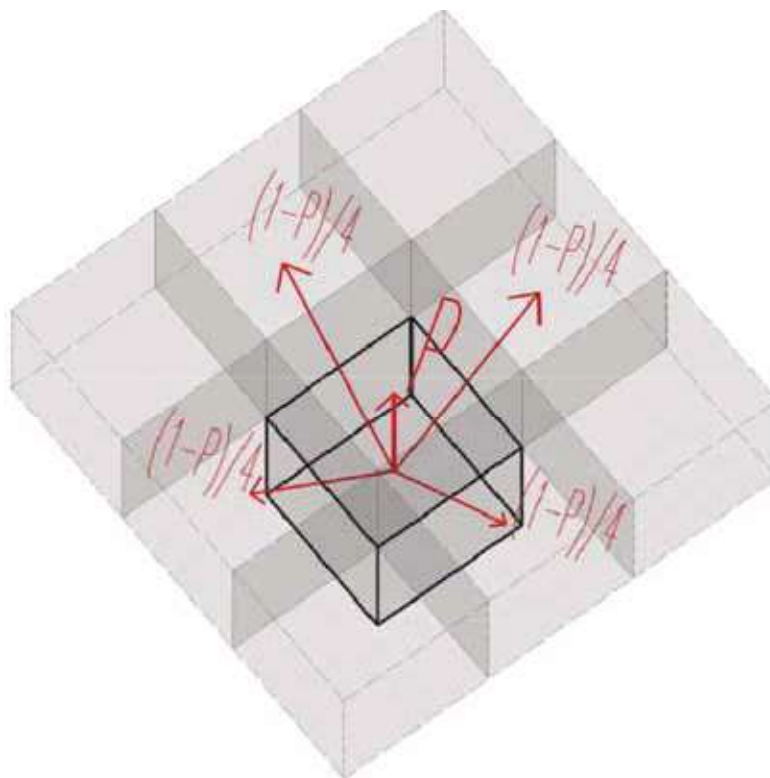
$$T_{max(x)} = A \frac{ag}{H} \left(\frac{W_k}{D_k} \right) \left(\frac{W_k}{H} \right)^{-0.5} \left[\frac{mm}{m} \right] \quad (1)$$

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

Przedstawiony powyżej algorytm prowadzi do charakterystyki rozkładu obniżeń, zgodnego z rozkładem dla teorii ośrodka stochastycznego J. Litwiniuszyna (1954).

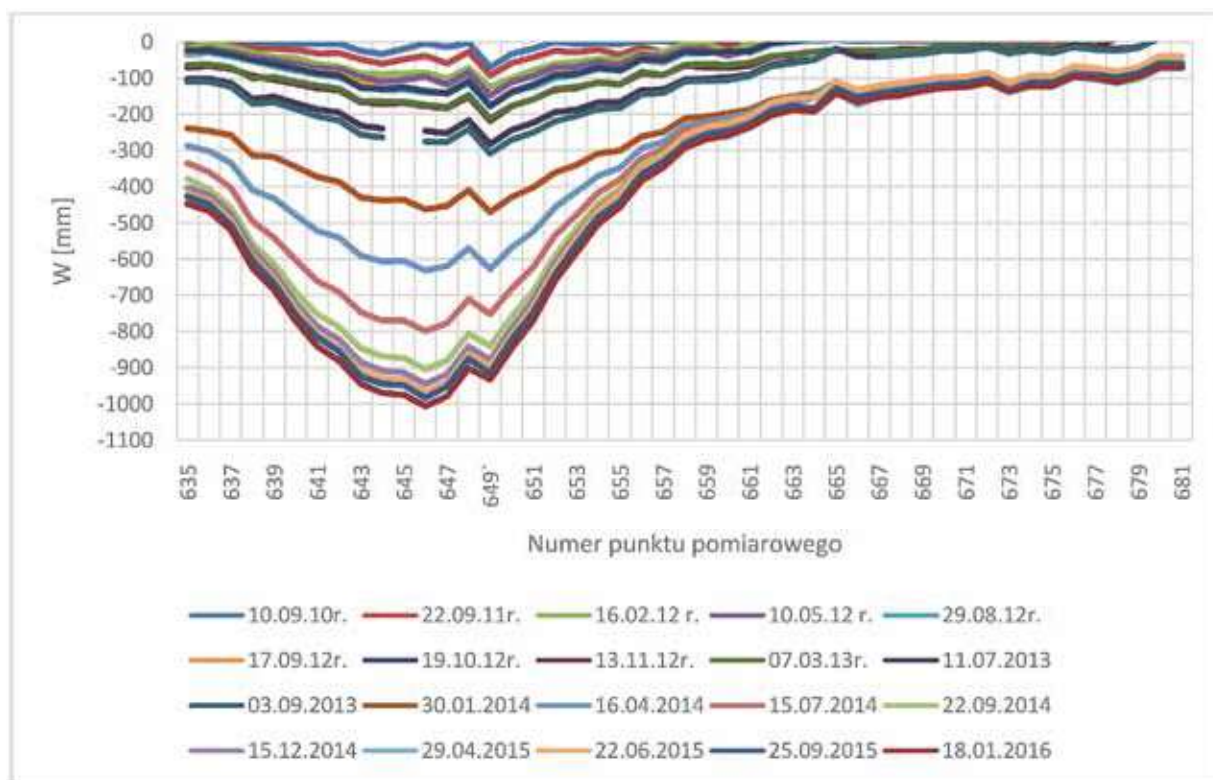
3. Opis podziemnej eksploatacji węgla kamiennego w rejonie linii pomiarowej „H”

Linia pomiarowa „H”, o łącznej długości wynoszącej ok. 1,4 km, złożona jest z 47 punktów o numerach 635 – 681 (zgodnie z kierunkiem linii). Punkty położone są w odległościach ok. 30 m. Linia przebiega z północy na południe.



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

Fig. 2. Cellular neighborhood and the characteristics of the propagation function based on the partial transition P from the main cell to the overhanging cell



Rys. 3. Wykres przyrostów obniżenia W [mm] na linii „H” w poszczególnych cyklach pomiarowych w odniesieniu do pomiaru bazowego

Fig. 3. Diagram of subsidence increments W [mm] in the line „H” for particular measurement cycles with reference to the base measurement

Pomiary niwelacyjne wykonano 24-krotnie w okresie od kwietnia 2010 r. (pomiar bazowy służący jako odniesienie) do września 2016 r. Wyniki obserwacji niwelacyjnych w poszczególnych cyklach zestawiono na rys. 3.

Z przedstawionych na powyższym wykresie danych wynika, że w poszczególnych cyklach pomiarowych następował sukcesywny przyrost obniżenia powierzchni terenu górniczego. Szczególnie intensywny przyrost deformacji miał miejsce w okresie między 11 a 15 cyklem pomiarowym, tj.: wrześniem 2013 r. a wrześniem 2014 r. Ostatecznie na linii pomiarowej wykształciła się niepełna niecka obniżeniowa, w której maksymalne obniżenia wyniosły ok. 1008 mm w rejonie punktu 646.

Przyrost obniżenia na linii pomiarowej spowodowany był dokonaną eksploatacją 2 wyrobisk ścianowych: ściana nr 1 i 2 w pokładzie 506. Położenie konturów wymienionych parcel w stosunku do linii pomiarowej „H” przedstawiono na rysunku 4.

Poniżej zestawiono najważniejsze dane górniczo-geologiczne dotyczące eksploatacji przedmiotowych wyrobisk ścianowych w okresie obejmującym cykle pomiarowe na linii pomiarowej „H”:

Jak wynika z powyższych danych ściana nr 1 eksploatowana była w okresie od 10 marca 2010 r. do 1 czerwca 2012 r., natomiast ściana nr 2 w okresie od 21 sierpnia 2012 r. do 24 stycznia 2015 r. Eksploatacja odbywała się z kierunku poł-

udniowo-zachodniego na północny wschód. Wybieg ściany nr 1 wyniósł ok. 766 m, wysokość furty eksploatacyjnej wynosiła średnio 2,2 m, a jej długość ok. 280 m. Parcela była eksploatowana na średniej głębokości ok. 1060 m (zakres głębokości mieści się w przedziale od 1039 m do 1078 m). Po zakończeniu eksploatacji ściany nr 1 rozpoczęto eksploatację ściany nr 2. Położenie ściany nr 2 jest równoległe do ściany nr 1, rozdziela je pas calizny o szerokości ok 15 m. Wybieg ściany nr 2 wyniósł ok. 990 m, furta eksploatacyjna wynosiła średnio 2,5 m, średnia długość wyrobiska ok. 280 m, a średnia głębokość eksploatacji ok. 1040 m (zakres głębokości mieści się w przedziale od 1012 m do 1066 m).

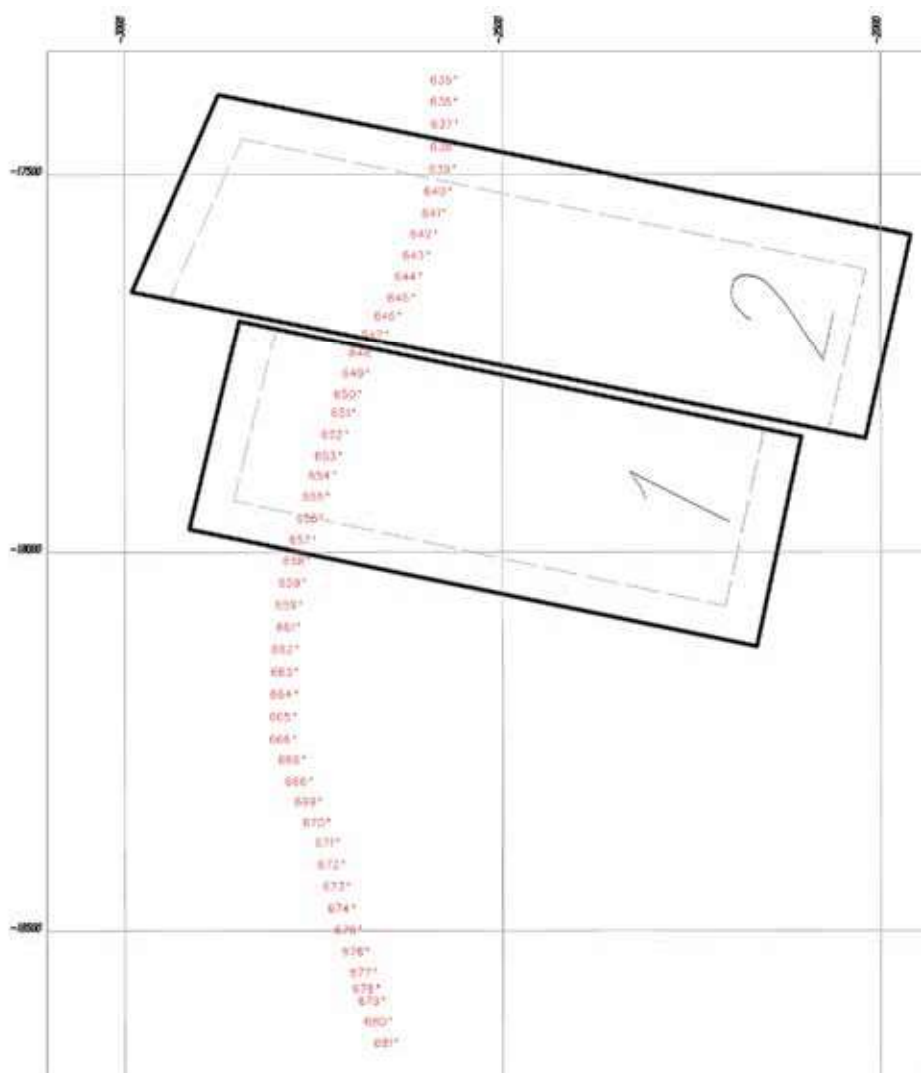
Na wielkość deformacji powierzchni w rejonie linii pomiarowej „H” z pewnością wpływ miała wcześniejsza intensywna eksploatacja, głównie zawałowa. W rejonie linii pomiarowej „H” roboty górnicze prowadzone były już od roku 1940. W bezpośrednim sąsiedztwie punktów linii pomiarowych wyeksploatowano przynajmniej 80 wyrobisk ścianowych.

4. Wyniki symulacji rozkładu obniżenia z zastosowaniem teorii automatów komórkowych

Do wykonania symulacji rozkładu końcowych obniżenia spowodowanych eksploatacją ściany 1 i 2 w pokładzie 506

Lp	Pokład	Ściana	a *)	g[mm]	Tp	Wybieg	Tk	Hmin	Hmax
1	506	1	0,80	2200	110.0310	766	112.0601	1039	1078
2	506	2	0,80	2500	112.0821	989	115.01.24	1012	1066

*) a – współczynnik eksploatacyjny, g – wysokość furty eksploatacyjnej pokładu, Tp – czas początku eksploatacji (format programu EDN-OPN), Tk – czas zakończenia eksploatacji (format programu EDN-OPN), H – głębokość eksploatacji



Rys. 4. Kontury parceli 1 i 2 w pokładzie 506 na tle linii pomiarowej „H”. Linia przerywana przedstawia kontury parcel pomniejszone o obrzeże eksploatacyjne $d=50$ m. Mapa opracowana na podstawie mapy w skali 1:5000

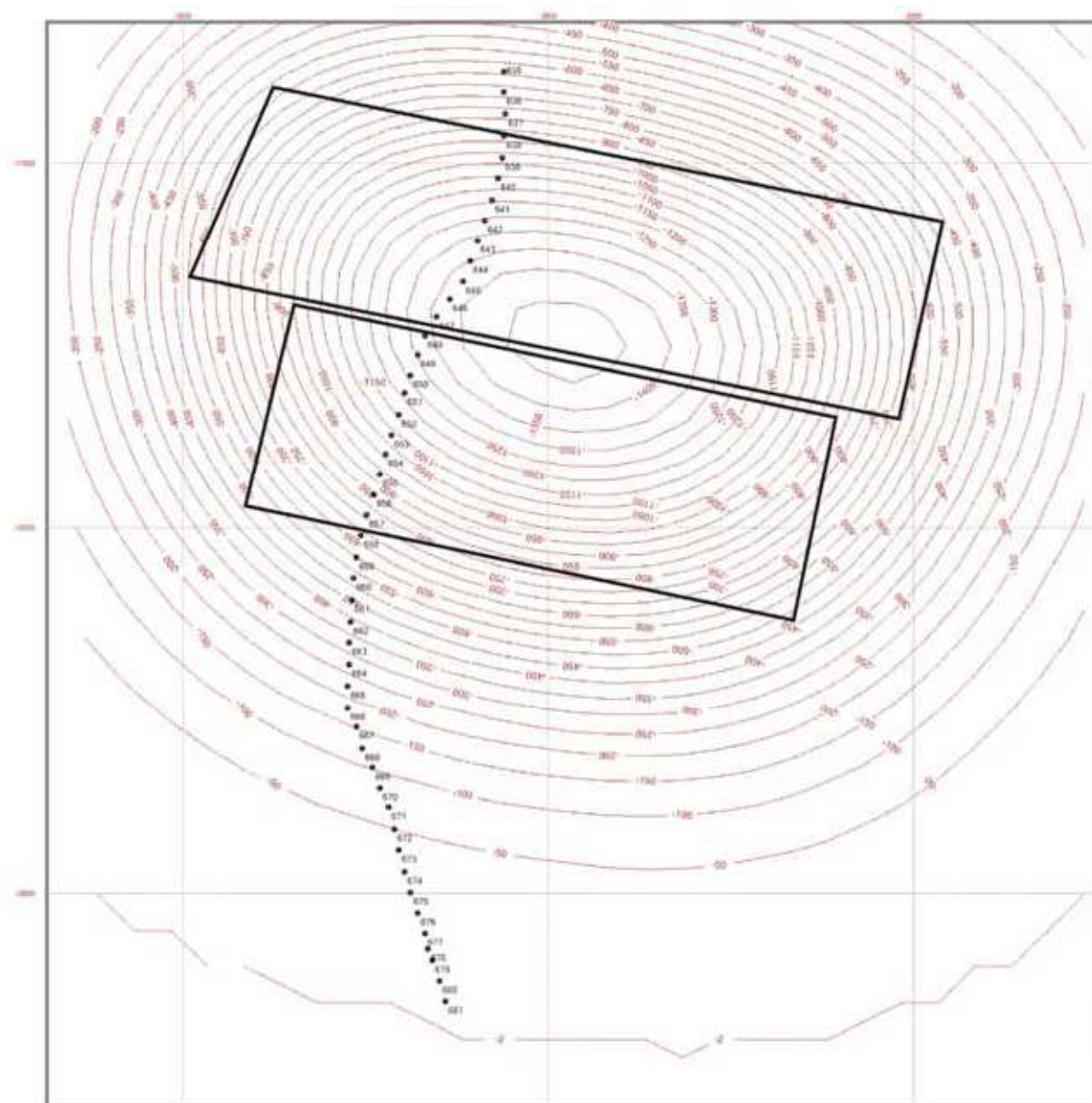
Fig. 4. Contours of longwalls no. 1 and 2 in the seam no. 506 against the background of the measurement line „H”. The dashed line represents the contours of the longwalls minus the perimeter $d = 50$ m (exploitation rim). The map has been developed on the basis of a 1:5000-scale map

wykorzystano autorskie oprogramowanie CA3D. Zasada działania programu opiera się na pętli programowej, która realizuje podstawowe założenie automatu komórkowego, czyli jednoczesnego poddania ewaluacji wszystkich komórek (w oparciu o przyjętą funkcję rozkładu) w trakcie pojedynczego cyklu działania symulacji. Dobór podstawowych parametrów automatu odbywa się w oparciu o dane górniczo – geologiczne parcel eksploatacyjnych oraz podstawową charakterystykę modelu określoną wzorem (1). Warto przypomnieć (Sikora 2013), że w modelu opartym na działaniu automatu komórkowego wielkość parametru maksymalnego nachylenia αT , będącego odpowiednikiem parametru $\tan \beta$ teorii S. Knothego (1953), jest zmienna w stosunku do głębokości zalegania pokładu. W przypadku konieczności odwzorowania eksploatacji wielościannowej, w jednej siatce automatu komórkowego można się odnieść np. do średniej głębokości zalegania. W przypadku znacznych różnic głębokości można wykonać symulację rozkładu obniżeń dla poszczególnych parcel oddzielnie, a wyniki sumować w tablicy niezależnej poprzez interpolację poszczególnych siatek. W opisywanym przypadku przyjęto do obliczeń średnią wartość głębokości.

Działanie symulacji rozpoczyna się od utworzenia siatki komórek, która odzwierciedla dokonaną eksploatację poprzez przypisanie komórkom odwzorującym rzeczywiste położenie parceli w górotworze wielkości powstałej pustki poeksploatacyjnej (ekwiwalent maksymalnego obniżenia dla niecki pełnej) jako iloczyn furty eksploatacyjnej i współczynnika kierowania stropem.

W pierwszej kolejności wykonano symulację rozkładu końcowych obniżeń dla typowej wielkości parametru maksymalnego nachylenia $\alpha T=2,0$. Dla rozpatrywanej eksploatacji wyznaczono następujące parametry modelu: wymiary komórek: $Sk=30$ m, $Dk=30$ m, $Wk=5$ m oraz parametr przejścia głównego $P=0,645$. Przyjęte wielkości komórek zapewniają kompromis pomiędzy rozdzielczością modelu i wymaganymi zasobami pamięci operacyjnej komputera niezbędnymi do wykonania symulacji oraz odpowiadają średniej odległości między punktami pomiarowymi linii „H”.

W wyniku przeprowadzonej symulacji otrzymano rozkład końcowych obniżeń w całej siatce automatu. Wielkości obniżeń zapisane są w poszczególnych komórkach o określonych wymiarach, przyjmuje się jednak, że odnoszą się do jej środka



Rys. 5. Mapa warstwiczna końcowych obniżień terenu [mm] na tle konturów wyeksploatowanych parcel i linii pomiarowej „H” – bez uwzględnienia obrzeża eksploatacyjnego. Interpolacja wykonana w programie CA3D. Źródło własne.

Fig. 5. Contour map of the final land subsidence [mm] against the contours of the extracted longwalls and the measurement line „H” - excluding exploitation rim. Interpolation performed in CA3D program by P. Sikora. (own source).

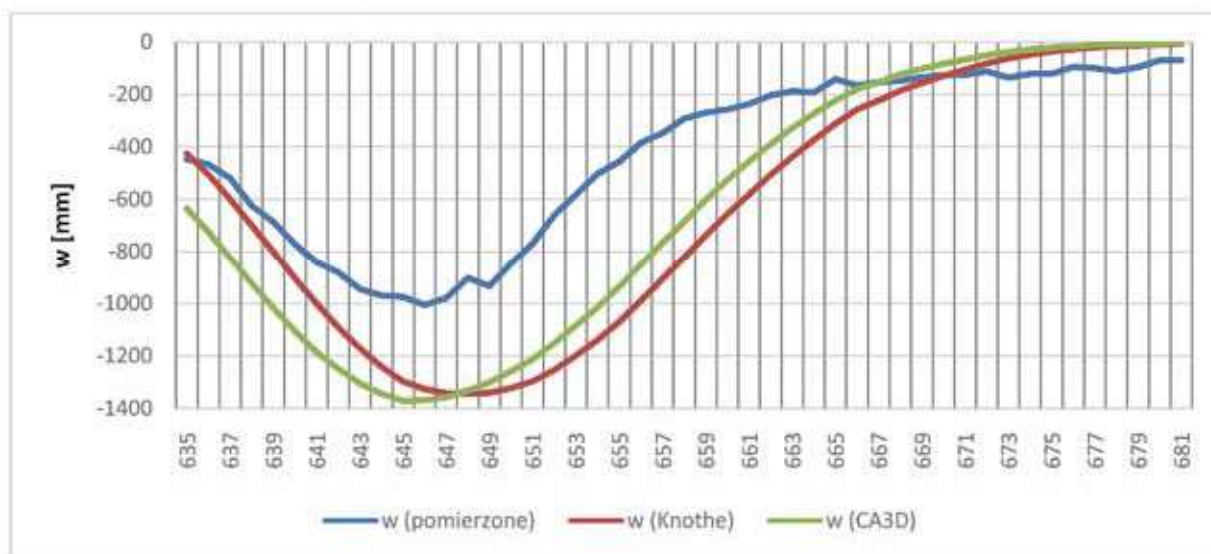
geometrycznego. Na rys. 5 przedstawiono wyinterpolowaną mapę warstwicową obniżień [mm] dla powierzchni modelu.

Wyniki z tablicy zostały także wyinterpolowane dla punktów linii pomiarowej „H”. Dodatkowo wyniki zostały porównane z wynikami obliczeń wykonanych z wykorzystaniem klasycznej teorii S. Knothe (1953), przyjmując wielkość parametru $\text{tg}\beta=2,0$ oraz współczynnik nachylenia pokładu $k=0,7$. Porównanie wyników przedstawiono na poniższym wykresie (rys. 6).

Z powyższych danych wynika, że otrzymane wielkości z obliczeń są mocno przeszacowane. Maksymalne wielkości obniżień w przypadku automatu komórkowego są o ok. 36% większe. Przeszacowanie dotyczy obu metod obliczeniowych. Wynika to w głównej mierze z braku uwzględnienia obrzeża eksploatacyjnego, które w opisywanym przypadku należałoby

uwzględnić m.in. z uwagi na wymiary pola eksploatacyjnego względem dużej głębokości eksploatacji. Potrzebę uwzględnienia przesunięcia krawędzi eksploatacyjnej dostrzegano już wielokrotnie, m.in. w pracach W. Batkiewicza (1968), S. Szpetkowskiego (1995), B. Drzęźli (1978), J. Białka (2003) czy A. Kowalskiego (2007).

W celu podniesienia dokładności opisu w symulacji uwzględniono obrzeże w sposób geometryczny (rys. 4). Wielkość została wyznaczona w oparciu o dopasowanie do wyników pomiarów geodezyjnych metodą najmniejszych kwadratów, która ostatecznie wyniosła 50 m. Przyjęcie wartości mniejszej niż przeciętna wyznaczona m.in. za pomocą zależności J. Białka (2003) czy A. Kowalskiego (2007) wynika ze znacznego stopnia naruszenia górotworu wcześniejszą eksploatacją (Sikora 2014).



Rys. 6. Profil niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej „H” wyznaczony w oparciu o pomiary niwelacyjne i obliczenia komputerowe bez uwzględnienia obrzeża eksploatacyjnego

Fig. 6. Subsidence trough profile along the measurement line „H” determined on the basis of leveling measurements and computer calculations without taking into account the exploitation rim

Wyniki obliczeń, wykonanych z zastosowaniem podobnie wyznaczonych parametrów (z uwagi na nieznacznie inną średnią głębokość po uwzględnieniu obrzeża $P=0,505$), przedstawiono w formie mapy warstwicznej końcowych obniżeń (rys. 7).

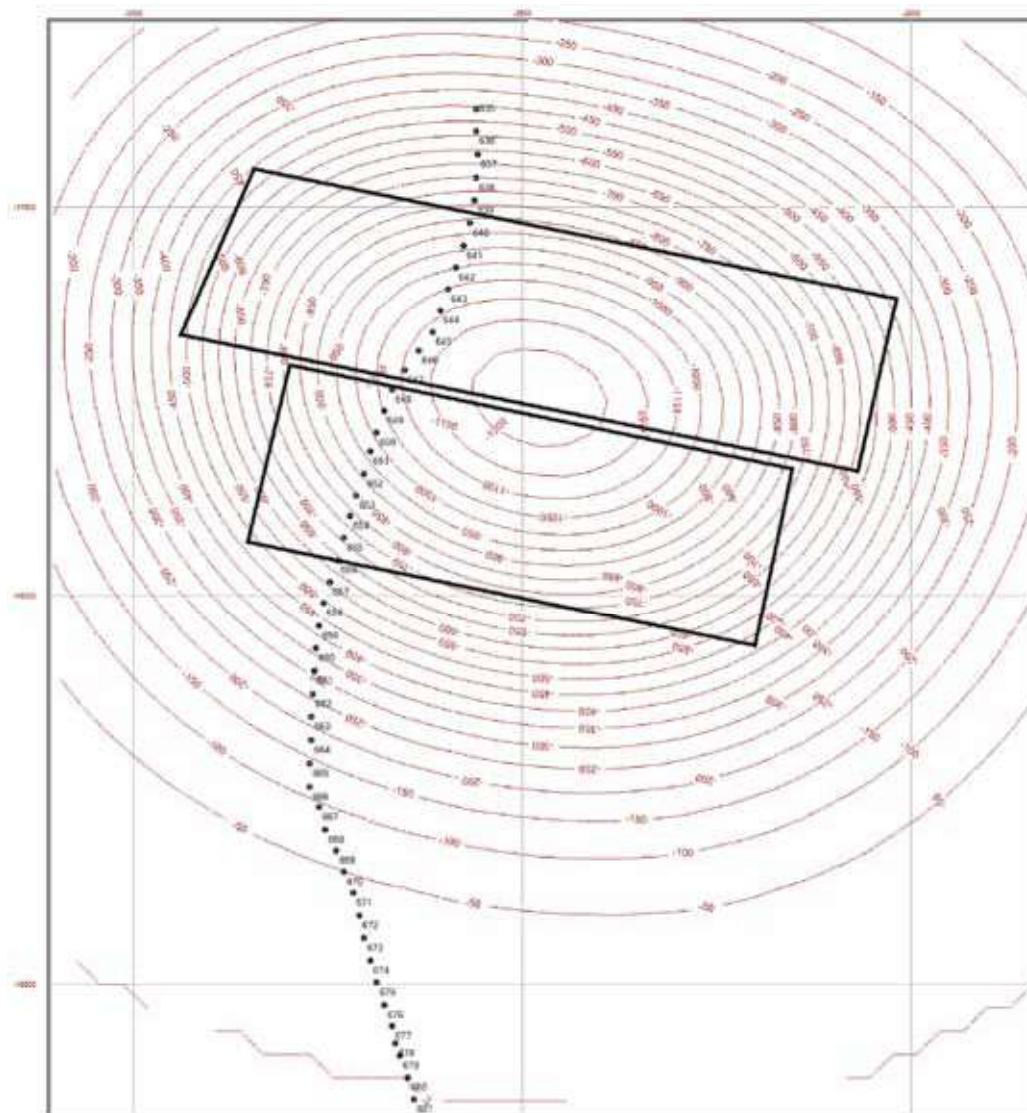
W dalszej kolejności wyinterpolowano wielkości końcowych obniżeń i sumarycznych przyrostów nachyleń dla punktów linii pomiarowej „H”. Dodatkowo wykonano obliczenia programem EDN-OPN z uwzględnieniem obrzeża eksploatacyjnego. Wyniki przedstawiono na poniższych wykresach (rys. 8, 9).

Z powyższych danych wynika, że uwzględnienie obrzeża eksploatacyjnego znacznie poprawiło dokładność opisu profilu niecki obniżeniowej oraz sumarycznych przyrostów nachyleń. Maksymalne pomierzone obniżenie wzdłuż linii pomiarowej wyniosło 1008 mm, w przypadku teorii geometryczno-całkowej 1001 mm, a metody opartej na teorii automatów komórkowych 1114 mm. Oznacza to, że w przypadku automatu komórkowego błąd względny procentowy dla wartości maksymalnej wyniósł ok. 10%. W przypadku pomiarów oraz obliczeń z wykorzystaniem automatu komórkowego wielkości maksymalne były zlokalizowane w rejonie odcinka między punktami 646 – 645, natomiast w przypadku obliczeń z wykorzystaniem teorii geometryczno – całkowej w rejonie punktu 648. W przypadku części brzeżnej niecki obniżeniowej znacznie lepszy opis wpływów dalekich uzyskano przy zastosowaniu obliczeń z zastosowaniem wzorów rozszerzonych autorstwa J. Białka (rysunek 8). Opis sumarycznych przyrostów nachyleń również należy uznać za dobry w obu przypadkach obliczeniowych, mimo że maksymalne wartości pomierzone były maksymalnie o ok. 15% większe. Jest to wielkość błędu mieszcząca się w granicach średniej wartości zmienności wskaźników deformacji wg J. Kwiatka (Kwiatk 2006), uwzględniającego współczynnik zniszczenia górotworu wcześniejszą, intensywną eksploatacją zawałową. Z przebiegu dopasowania nachyleń można też zauważyć, że w opisywanym przypadku nieznacznie lepsze wyniki dała metoda oparta na teorii automatów komórkowych (rys. 9).

5. Podsumowanie

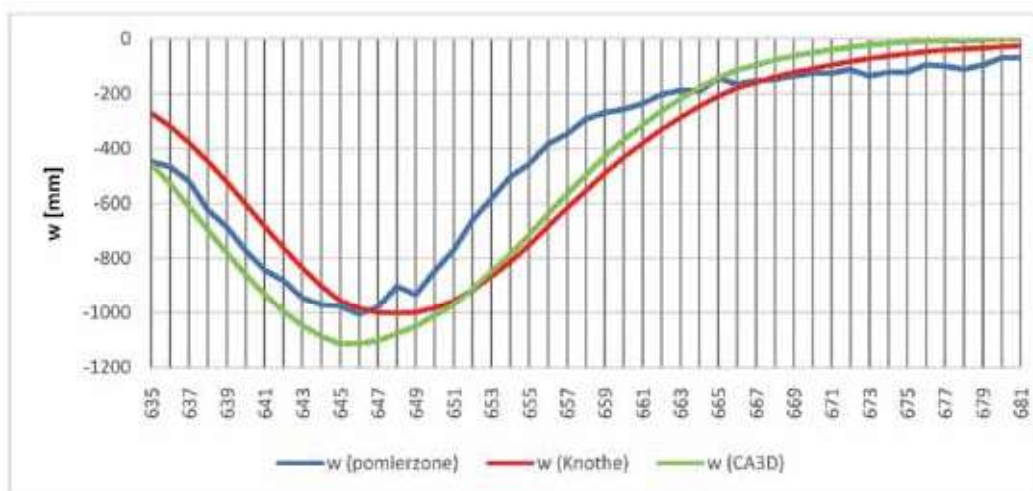
W artykule przedstawiono przykład podziemnej eksploatacji węgla kamiennego prowadzonej systemem ścianowym z zawałem stropu. W okresie między latami 2010 – 2015 wybrano 2 parcele, w konsekwencji czego na powierzchni terenu górniczego ujawniła się niepełna niecka obniżeniowa. W celu monitorowania deformacji powierzchni wykonano serię 24 pomiarów niwelacyjnych w rejonie prowadzonej eksploatacji. Przebieg linii pomiarowej był prostopadły do wybiegu obu wyrobisk ścianowych. Pomiary niwelacyjne obejmowały okres od początku eksploatacji, w jej trakcie i rok po zakończeniu wydobywania w obu ścianach. Wcześniej w rejonie linii pomiarowej miała miejsce intensywna eksploatacja prowadzona już od 1940 r.

Celem artykułu była weryfikacja założeń teoretycznych metody prognozowania deformacji powierzchni z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych na przykładzie rzeczywistej, wielokrotnej eksploatacji. W celu wykonania obliczeń prognostycznych dobrano parametry metody na podstawie podstawowej charakterystyki modelu wyznaczonej na podstawie wielokrotnych symulacji. Do obliczeń zastosowano typową, średnią wielkość parametru maksymalnego nachylenia $aT=2,0$. Wielkość ta jest odpowiednikiem parametru $t\theta$ w teorii geometryczno-całkowej S. Knothe (1953), którą także wykorzystano do porównania wyników obliczeń. Pierwsze wyniki obliczeń wskazały na znaczne przeszacowanie wielkości obniżeń. Wynikało to z powodu nieuwzględnienia obrzeża eksploatacyjnego, które z uwagi na rozmiar pola eksploatacyjnego oraz znaczną głębokość z pewnością wystąpiło. W dalszej kolejności powtórzono symulację z uwzględnieniem 50-metrowego obrzeża eksploatacyjnego. Wielkość została dobrana na podstawie dopasowania metodą najmniejszych kwadratów. W tym przypadku uzyskany z obliczeń końcowy profil niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej był już dobry. Maksymalny błąd względny procentowy w przypadku maksymalnych obniżeń wyznaczonych metodą automatów komórkowych nie przekroczył 10%. Wyznaczony z obliczeń rozkład nachyleń również był satysfakcjonujący i zgodny z rzeczywistym.



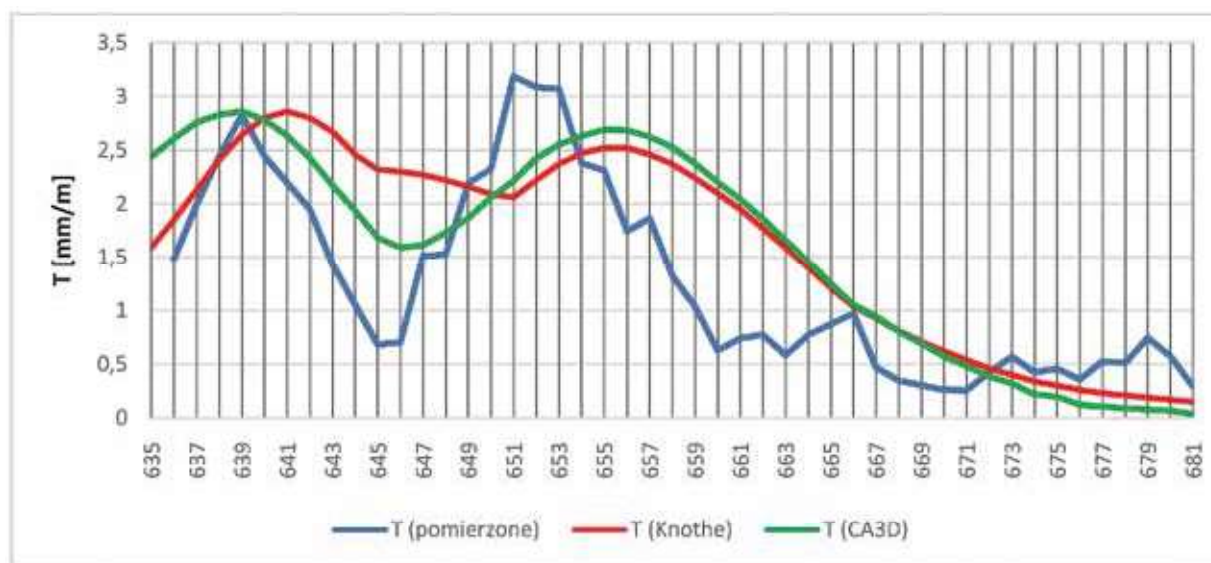
Rys. 7. Mapa warstwiczna końcowych obniżzeń terenu [mm] na tle konturów wyeksploatowanych parcel (z uwzględnieniem 50-metrowego obrzeża) i linii pomiarowej „H”. Interpolacja wykonana w programie CA3D. Źródło własne.

Fig. 7. Contour map of the final land subsidence [mm] against the background of the extracted longwalls (including 50 m exploitation rim) and the measurement line „H”. Interpolation performed in CA3D program (own source)



Rys. 8. Profil niecki obniżeniowej wzdłuż linii pomiarowej „H” wyznaczony w oparciu o pomiary niwelacyjne i obliczenia komputerowe z uwzględnieniem 50-metrowego obrzeża eksploatacyjnego

Fig. 8. Subsidence trough profile along the measurement line „H” determined on the basis of leveling measurements and computer calculations taking into account the exploitation rim (50 m)



Rys. 9. Sumaryczny przyrost nachyleń terenu [mm/m] wyznaczony w oparciu o pomiary geodezyjne oraz obliczenia numeryczne z uwzględnieniem 50-metrowego obrzeża eksploatacyjnego

Fig. 9. Total increase of inclination T [mm/m] determined on the basis of leveling measurements and computer calculations taking into account the exploitation rim (50 m)

W przypadku nachyleń tylko na jednym z odcinków wielkości pomierzone znacząco odbiegały od wyznaczonych z obliczeń i były o ok. 15% większe.

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych rozkładu końcowych obniżzeń modelu górotworu (a w tym jego powierzchni) na przykładzie rzeczywistej wielokrotnej eksploatacji wskazują na poprawność założeń teoretycznych i praktyczną przydatność metody opartej na teorii automatów komórkowych. W pracy przedstawiono prosty przypadek skończonego automatu deterministycznego. Należy jednak podkreślić, że opisana metoda posiada znaczny potencjał dalszego rozwoju, m.in. poprzez możliwość bezpośredniego uwzględniania nieliniowych własności sumowania się wpływów oraz wpływu niejednorodnej budowy górotworu na rozkład deformacji. Ponadto metoda nie wymaga specjalistycznej wiedzy matematycznej do jej stosowania, wobec czego ma szansę być w przyszłości praktycznie stosowana.

Literatura

- BATKIEWICZ W. 1968 - Obliczenie wskaźników poeksploatacyjnych deformacji terenu. Wydawnictwo Śląsk. Katowice.
- BIAŁEK J. 2003 - Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice.
- BIAŁEK J., SIKORA P. 2012 - Symulacja wpływu nachylenia pokładu i szczeliny uskokowej na rozkład obniżzeń za pomocą metody automatów komórkowych, „Przeгляд Górniczy” nr 8, s. 160-165.
- DRZEŻLA B. 1978 - Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, s. „Górnictwo” z. 91.

- KNOTHE S. 1953 - Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. „Archiwum Górnicztwa i Hutnictwa”, t. 1, z. 1.
- KOWALSKI A. 2007 - Nieustalone górnicze deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz. Studia – Rozprawy – Monografie Nr 871. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnicztwa. Katowice.
- KWIATEK J. 2006 - Probabilistyczna ocena niezawodności obiektów budowlanych na terenach górniczych. WARSZTATY 2006 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie. Mat. Symp. IGSMiE PAN, s. 205-214.
- LITWINISZYN J. 1954 - Przemieszczenia górotworu w świetle teorii prawdopodobieństwa. „Archiwum Górnicztwa i Hutnictwa” t. 2, z. 1.
- SCHIFF, JOEL L. 2011 - Cellular Automata: A Discrete View of the World. Wiley & Sons, Inc. ISBN 9781118030639.
- SIKORA P. 2010 - Wykorzystanie deterministycznego automatu skończonego do wyznaczania profilu linii obniżzeń terenu spowodowanych podziemną eksploatacją. „Przeгляд Górniczy” nr 10, s. 141-143.
- SIKORA P. 2011 - Opis obniżzeń górotworu pod wpływem podziemnej eksploatacji z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
- SIKORA P. 2013 - Wpływ nieliniowego sumowania wpływów na kształt profilu niecki obniżeniowej opisywanej przez deterministyczny model górotworu zbudowany w oparciu o teorię automatów komórkowych, „Przeгляд Górniczy” nr 8, s. 195-199.
- SIKORA P. 2014 - Wykorzystanie przestrzennego automatu deterministycznego do symulowania obniżzeń terenu spowodowanych podziemną eksploatacją. „Przeгляд Górniczy” nr 8, s. 131-136.
- SZPETKOWSKI S. 1995 - Prognozowanie wpływów eksploatacji złóż pokładowych na górotwór i powierzchnię terenu. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice.
- WOLFRAM S. 2002 - A new kind of science. Wolfram Media. ISBN 1-57955-008-8.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2017
Artykuł akceptowano do druku 10.11.2017