

Numeryczne modelowanie wpływu eksploatacji na powierzchnię ze szczególnym uwzględnieniem uwarstwienia górotworu

KRZYSZTOF TAJDUŚ, JAN WALASZCZYK

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono próbę określenia wpływu warstwowej budowy górotworu, na kształt niecki osiadania powstałej w wyniku przejścia podziemnej eksploatacji. W tym celu wykonano obliczenia numeryczne przy pomocy programów metody elementów skończonych.

Słowa kluczowe: wpływ eksploatacji górniczej na powierzchnię, modelowanie numeryczne, mes

1. Wstęp

W wyniku przejścia podziemnej eksploatacji w górotworze tworzą się trzy strefy osłabienia – strefa zawału, strefa spękań i strefa ugięcia. Strefa zawału występuje bezpośrednio nad eksploatowanym polem i charakteryzuje się całkowitym zniszczeniem skał. Na początku, w miarę wzrostu powierzchni wybrania, wysokość strefy zawału wzrasta. Po wybraniu określonej powierzchni, wysokość strefy praktycznie nie ulega większym zmianom. Wynika to z faktu, że niszczące się skały dzielą się na odrębne bloki różnej wielkości, które w sposób chaotyczny wypełniają wybraną przestrzeń, doznając przemieszczeń poziomych, pionowych i obrotów. Powoduje to znaczne zwiększenie objętości zniszczonych skał zawału. Powyżej strefy zawału w stropie zasadniczym występuje strefa spękań. W tej strefie skały ulegają spękanom, często dzielącymi skały na bloki o znacznych wymiarach. W strefie spękań występują duże przemieszczenia poziome i pionowe bloków skalnych przy stosunkowo niewielkich ich obrotach. Powyżej strefy spękań znajduje się strefa łagodnego, ciągłego ugięcia warstw skalnych, sięgająca aż do powierzchni terenu.

Przez wiele lat próbowano określić wysokości występowania stref osłabienia, spękań (h_s) i zawału (h_z). Badacze tacy jak Ropski (1964, 1973), Lama (1973), Piechota (1989), Kwiatek (1997), Tajduś i Mazurkiewicz (1997), Palchik (2002), Das'a (2000), Peng & Chaing (1984) w różny sposób próbowali określić wysokość tych stref. Najnowsze badania ukazują że wysokość strefy zawału można szacować jako $2\div 6g$ gdzie g jest to grubość wybranego pokładu natomiast strefę spękań można szacować jako od $15\div 60g$ (Heasley). Oczywiście w dużej mierze wysokości te zależą od cech wytrzymałościowych górotworu (Das, 2000).

Gdy eksploatacja obszaru złoża prowadzona jest na głębokości większej od ($H > h_z + h_s$), wówczas na powierzchni terenu występują deformacje ciągłe i przy odpowiedniej wielkości wybrania tworzy się pełna niecka osiadań. Na temat obliczania parametrów takiej niecki istnieje odpowiednia różnorodna literatura naukowo-techniczna. W Polsce wśród badaczy, którzy zajmowali się tym zagadnieniem należy wymienić: Sałustowicza (1980), Budryka (1980), Knothego (1980, 1984), Kochmańskiego (1980), Kowalczyka (1980), Popiołka (1983). Największą popularność zyskała teoria Budryka-Knothego (1980, 1984). Jest ona powszechnie używana do określenia wpływu eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu. Teoria ta oparta jest na założeniu, że każdemu punktowi górotworu przypisuje się tzw. funkcję wpływów o rozkładzie gaussowskim (normalnym) o takiej właściwości, że całka z tej funkcji rozciągnięta na pewien obszar jest miarą końcowych przemieszczeń pionowych tego punktu, wywołanych uprzednią eksploatacją złoża w tym

obszarze. W tej teorii zasięg wpływu eksploatacji określa parametr rozproszenia wpływów głównych „ r ”. Jest to odległość od krawędzi eksploatacji, w której przemieszczenia pionowe nie przekraczają 1% maksymalnych przemieszczeń pionowych w_{\max} . Zależność pomiędzy promieniem zasięgu wpływów głównych r a głębokością eksploatacji H określa się z prostego wzoru (rys.1):

$$r = \frac{H}{\operatorname{tg}\beta} \quad (1)$$

gdzie:

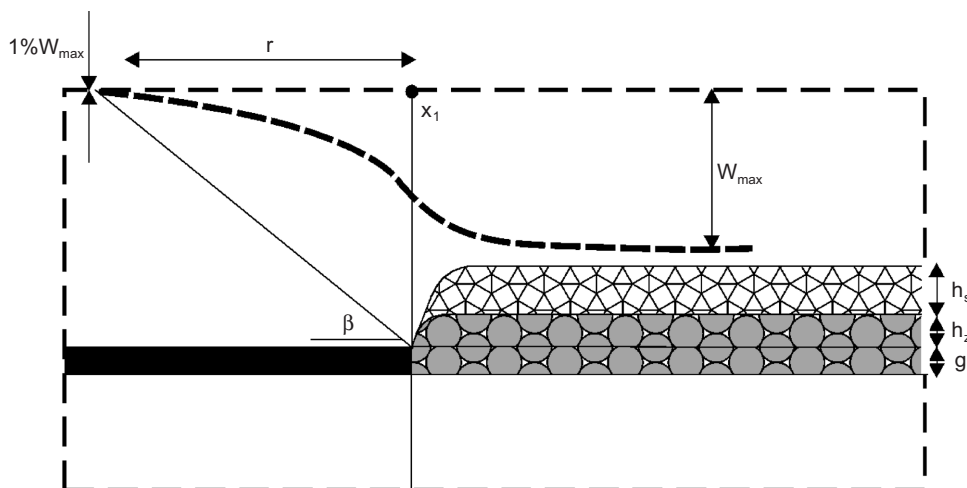
H – głębokość eksploatacji
 β – kąt zasięgu wpływów głównych

Maksymalne przemieszczenia pionowe w pełni wykształconej niecki wynoszą:

$$w_{\max} = a \cdot g \quad (2)$$

gdzie:

a – współczynnik eksploatacji zależny od sposobu likwidowania przestrzeni wybranej i rodzaju materiału wypełniającego. W przypadku, gdy materiałem wypełniającym jest podsadzka $a = 0,1 \div 0,2$. Natomiast gdy przestrzeni wybranej nie wypełniamy materiałem (eksploatacja na zawał) wówczas $a = 0,7 \div 0,8$.



Rys. 1. Schemat niecki obniżenia

Zarówno ta, jak również większość teorii nie uwzględnia w obliczeniach czynników geologicznych takich jak: uwarstwienie, zawodnienie, uskoki, sieci spękań itd. wpływających w sposób znaczny na charakter niecki.

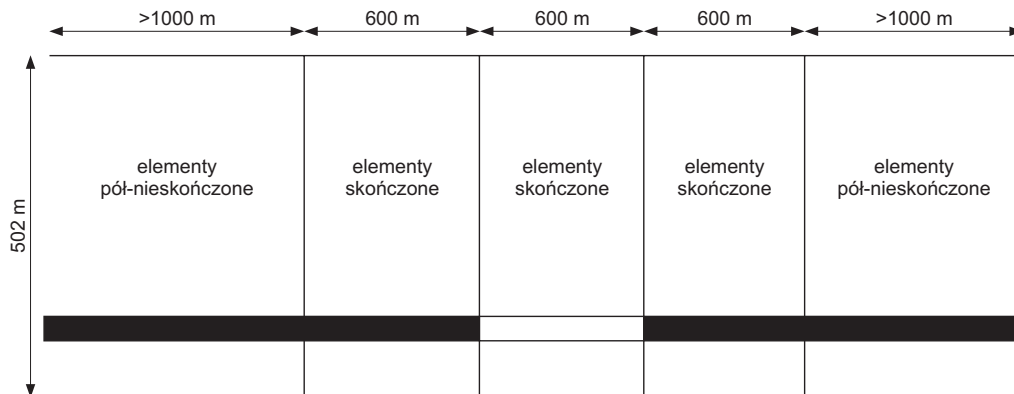
W pracy wykorzystując metodę MES (metoda elementów skończonych), podjęto próbę analizy kilku ważnych czynników wpływających na kształt niecki obniżenia oraz na wartość jej parametrów. Analizowano wpływ:

- występowania warstwy o znacznie wyższych parametrach odkształceniowych i wytrzymałościowych w porównaniu do warstw otaczających. Dla ułatwienia opisu warstwę tę w dalszej części pracy będziemy w skrócie nazywać warstwą „mocną”;
- grubości „mocnej” warstwy,
- położenia „mocnej” warstwy w stosunku do powierzchni terenu.

2. Obliczenia numeryczne

2.1. Wpływ uwarstwienia na kształt niecki obniżeń

Celem obliczeń było zbadanie wpływu „mocnej” warstwy skalnej o znacznie wyższych parametrach odkształceniowych i wytrzymałościowych w porównaniu do warstw otaczających, na kształt niecki obniżeń. Do obliczeń przyjęto model, który stanowi sprężysta tarcza o wymiarach 3800×502 [m] (rys. 2), zbudowana z elementów skończonych oraz pół-nieskończonych.



Rys. 2. Schemat modelu obliczeniowego

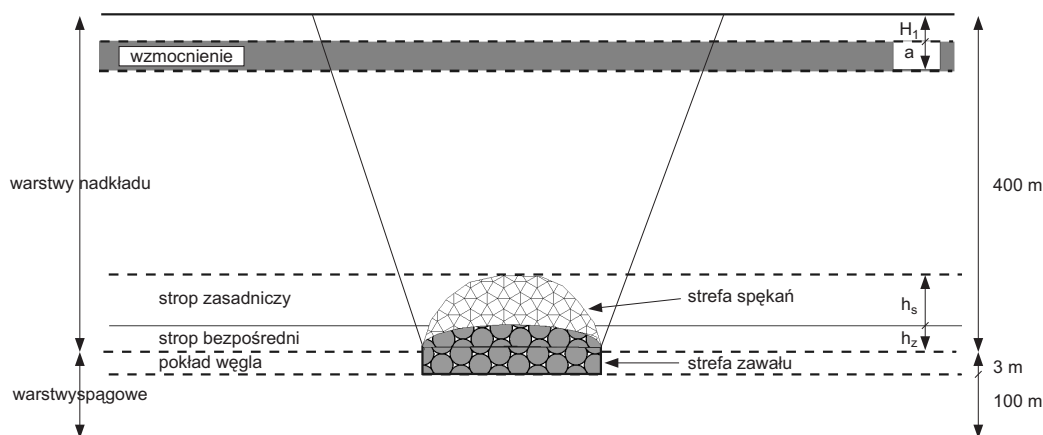
Tarcza składa się z kilkunastu warstw skalnych. Każda i -ta warstwa skalna jest traktowana jako izotropowa i jednorodna, a jej własności odkształceniowe opisują dwie stałe, a mianowicie moduł sprężystości E oraz liczba Poissona ν . W tarczy zamodelowano wyeksploatowany pokład oraz wytworzone nad nim strefy zawału i spękań. Wiadomo, że przyjęcie sprężystego i uwarstwowanego modelu górotworu pozwala na znaczne uproszczenie aparatu matematycznego i w wielu przypadkach daje zadawalające wyniki (Salamon, 1968; Evans, 1941; Berry, 1993; Hobbs, 1968; Niandoum, 1993; Roy i Rajagopalan, 1997). Matematyczny opis stref zawału i spękań jest bardzo trudnym zagadnieniem i dlatego dla celów uzyskania odpowiedniego rozwiązania postanowiono go uprościć. Według wielu badaczy (Goodman i Duncan, 1971; Kuhlavy, 1978; Priest i Hudson, 1981; Amadei i Savage, 1991; Priest, 1993; Dawson i Cundall, 1995; Huang i in., 1995) zachowanie się górotworu nieciągłego można opisać za pomocą ekwiwalentnego modelu ciągłego, którego własności wytrzymałościowe i odkształceniowe są kombinacją własności górotworu oraz nieciągłości. Koncepcja ekwiwalentnego continuum posiada znaczne zalety umożliwiające zastosowanie do analizy stanu naprężenia i wyężenia znanych i relatywnie prostych metod modelowania numerycznego i analitycznego. Z tego względu strefy spękań i zawału, które składają się z materiału skalnego zniszczonego i spękanego, modelowano jako sprężyste o odpowiednio ekwiwalentnych własnościach odkształceniowych i wytrzymałościowych.

Numeryczny model górotworu składał się z następujących części:

- nadkładowych warstw skalnych, w których znajdowała się warstwa sztywna. Dla warstw skalnych przyjęto stałe wartości ekwiwalentnych parametrów odkształceniowych: modułu sprężystości E_0 oraz współczynnika ν_0 . Jedyne warstwa „mocna” miała znacznie wyższe parametry odkształceniowe E_m . Warstwa ta znajdowała się w odległości H_1 od powierzchni, a jej grubość wynosiła a ,
- pokładu węgla o grubości 3m znajdującego się na głębokości 400m od powierzchni,
- strefy zawału wysokiego o wysokości: $h_z = 3 \cdot g$ (g – grubość pokładu),
- strefy spękań o wysokości $h_s = 25 \cdot g$,
- skał spagowych.

Schemat przyjętej do obliczeń tarczy pokazuje rys. 3.

Parametry sprężyste warstw skalnych oraz skał znajdujących się w strefach zawału i spękań określano wykorzystując klasyfikację GSI Hoeka i Browna. Dobrane parametry sprężyste górotworu dla modelu pierwszego (który dla porównania nie zawierał warstwy „mocnej”) podano w tabeli 1. Obliczenia wykonano dla 109 modeli różniących się między sobą parametrami warstwy „mocnej”, jej grubością oraz głębokością jej zalegania.



Rys. 3. Tarcza modelowa przyjeta do obliczeń numerycznych

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano przemieszczenia pionowe na powierzchni terenu (nieckę osiadań). Porównywano wyniki w trzech charakterystycznych punktach niecki osiadań, a mianowicie: przemieszczenia maksymalne nad przestrzenią wybraną, przemieszczenia pionowe w charakterystycznej odległości $0,4 r$ od krawędzi eksploatacji, a także określano wartość r – promienia zasięgu wpływów głównych (odległość od krawędzi eksploatacji, w której wartość przemieszczeń pionowych wynosi $w = 0,01 w_{\max}$). Dla modelu pierwotnego (bez warstwy usztywniającej) maksymalne przemieszczenie pionowe wyniosło $w_{\max} = -1,044$ m, przemieszczenie w odległości $0,4 r$ od krawędzi eksploatacji miało wartość $w = -0,361$ m, natomiast $r = 410,5$ m czyli kąt zasięgu wpływów głównych wynosił $\tan \beta = 0,97$ ($\beta = 44,29$).

Tab. 1. Parametry sprężyste warstw skalnych dobrane dla modelu 1

Rodzaj skał	Moduł sprężystości [GPa]	Liczba Poissona	Gęstość [kg/m^3]
Warstwy nadkładu	4	0,32	2200
Pokład węgla	3,5	0,3	2000
Warstwy spągowe	6	0,32	2200
Strefa spekań	0,4	0,3	2200
Strefa zawalu	0,04	0,3	2000

Kolejne obliczenia prowadzono podnosząc odpowiednio ekwiwalentny parametr sprężystości w warstwie „mocnej” (nazwany: stopniem sztywności) zgodnie z zależnościami:

$$\frac{E_m}{E_0} = 2, \quad \frac{E_m}{E_0} = 5, \quad \frac{E_m}{E_0} = 10, \quad \frac{E_m}{E_0} = 20 \quad (3)$$

gdzie:

E_0 – wartość ekwiwalentnego modułu sprężystości dla warstw nadkładowych,

E_m – wartość ekwiwalentnego modułu sprężystości dla warstwy „mocnej”.

W obliczeniach zmieniano również grubość warstwy „mocnej” – „ a ” oraz jej odległość od powierzchni terenu „ H_1 ”. W tabeli 2. przedstawiono wpływ warstwy „mocnej” o grubości 25 m na tangens kąta zasięgu wpływów β , w zależności od usytuowania tej warstwy w górotworze oraz w zależności od wartości stopnia sztywności. Te same wyniki zostały przedstawione w tabeli 3 dla warstwy mocnej o grubości 50 m. Obliczenia pokazują, że tangens kąta zasięgu wpływów zmienia się w niewielkim zakresie wraz ze wzrostem stopnia sztywności (E_m/E_0), nie zależy również istotnie od położenia warstwy „mocnej” w nadkładzie (zmiana stosunku H_1/H). Dotyczy to zarówno modeli o grubości warstwy „mocnej” $a = 25$ m oraz 50 m.

Największe wartości promienia zasięgu wpływów otrzymujemy dla położenia warstwy „mocnej” w odległości $H_1 = 125 \div 150$ m od powierzchni zarówno dla grubości $a = 25$ m jak i 50 m, a najmniejsze natomiast dla położenia w niedalekiej odległości od powierzchni lub w miarę zbliżania się do eksploatawanego pokładu.

Tab. 2. Wpływ warstwy „mocnej” o grubości 25 m na tangens kąta zasięgu wpływów β , w zależności od jej sztywności oraz umiejscowienia w górotworze

Głębokość warstwy mocnej [m]	$\frac{E_m}{E_0}$			
	2	5	10	20
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	0.96	0.93	0.92	0.91
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	0.97	0.96	0.96	0.96
$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	0.98	0.98	0.99	1.00
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	0.98	1.00	1.02	1.03
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	0.98	1.00	1.02	1.04
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	0.98	1.00	1.03	1.05
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	0.98	1.00	1.03	1.04
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	0.98	0.99	1.02	1.03
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	0.98	0.99	1.00	1.02
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	0.97	0.98	0.99	1.00
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	0.97	0.97	0.97	0.98
$H_1 = 300; \frac{H_1}{H} = 0,75$	0.89	0.97	0.96	0.95
$H_1 = 300; \frac{H_1}{H} = 0,75$	0.89	0.96	0.94	0.93

Tab. 3. Wpływ warstwy „mocnej” o grubości 50 m na tangens kąta zasięgu wpływów β , w zależności od jej sztywności oraz umiejscowienia w górotworze

Głębokość warstwy mocnej [m]	$\frac{E_m}{E_0}$			
	2	5	10	20
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$	$\text{tg}\beta$
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	0.96	0.95	0.93	0.92
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	0.97	0.98	0.97	0.97
$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	0.98	1.00	1.01	1.01
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	0.98	1.00	1.01	1.01
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	0.99	1.02	1.03	1.03
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	0.99	1.02	1.03	1.03
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	0.99	1.02	1.03	1.04
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	0.99	1.02	1.03	1.04
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	0.99	1.02	1.03	1.04

$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	0.98	1.01	1.02	1.04
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	0.98	1.00	1.01	1.02
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	0.98	0.99	1.00	1.01
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	0.97	0.98	0.99	0.99
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	0.97	0.97	0.97	0.96
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	0.97	0.96	0.94	0.94

W dalszej kolejności sprawdzono jak zmieniają się maksymalne przemieszczenia pionowe w_{\max} oraz przemieszczenia pionowe „ w_1 ” w odległości $0.4 r$ wraz ze zmianą stopnia sztywności i położenia warstwy „mocnej”. Wybrane charakterystyczne punkty opisują przebieg niecki osiadania. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4 ($a = 25$ m) i tabeli 5 ($a = 50$ m).

Tab. 4. Wyniki obliczeń dla warstwy „mocnej” o grubości 25 m, przedstawione dla charakterystycznych punktów opisujących nieckę obniżeń

	$\frac{E_m}{E_0}$							
	2		5		10		20	
Głębokość warstwy mocnej [m]	w dla $0,4 r$ [m]	W_{\max} [m]	w dla $0,4 r$ [m]	W_{\max} [m]	w dla $0,4 r$ [m]	W_{\max} [m]	w dla $0,4 r$ [m]	W_{\max} [m]
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	-0.360	-1.014	-0.357	-0.967	-0.355	-0.934	-0.353	-0.909
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	-0.359	-1.024	-0.355	-0.993	-0.351	-0.969	-0.349	-0.948
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	-0.359	-1.030	-0.354	-1.010	-0.350	-0.995	-0.347	-0.981
$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	-0.359	-1.032	-0.354	-1.019	-0.350	-1.010	-0.347	-1.001
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	-0.359	-1.032	-0.354	-1.023	-0.350	-1.018	-0.347	-1.014
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	-0.359	-1.031	-0.354	-1.024	-0.349	-1.023	-0.346	-1.021
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	-0.358	-1.030	-0.353	-1.024	-0.348	-1.024	-0.345	-1.023
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	-0.357	-1.030	-0.351	-1.023	-0.347	-1.023	-0.343	-1.022
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	-0.356	-1.029	-0.350	-1.022	-0.345	-1.020	-0.341	-1.019
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	-0.355	-1.028	-0.348	-1.020	-0.343	-1.017	-0.339	-1.013
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	-0.354	-1.028	-0.347	-1.017	-0.342	-1.011	-0.337	-1.005
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	-0.353	-1.026	-0.345	-1.011	-0.340	-1.001	-0.335	-0.991
$H_1 = 300; \frac{H_1}{H} = 0,75$	-0.354	-1.026	-0.347	-1.006	-0.341	-0.991	-0.335	-0.977

Tab. 5. Wyniki obliczeń dla warstwy „mocnej” o grubości 50 m, przedstawione dla charakterystycznych punktów opisujących nieckę obniżeń

Głębokość warstwy mocnej [m]	$\frac{E_m}{E_0}$							
	2		5		10		20	
	w dla 0,4 r [m]	W_{max} [m]	w dla 0,4 r [m]	W_{max} [m]	w dla 0,4 r [m]	W_{max} [m]	w dla 0,4 r [m]	W_{max} [m]
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	-0.359	-0.533	-0.355	-0.517	-0.354	-0.509	-0.356	-0.503
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	-0.358	-1.011	-0.353	-0.969	-0.352	-0.940	-0.353	-0.911
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	-0.358	-1.017	-0.353	-0.986	-0.351	-0.963	-0.352	-0.939
$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	-0.358	-1.018	-0.353	-0.993	-0.350	-0.976	-0.351	-0.955
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	-0.358	-1.017	-0.352	-0.996	-0.349	-0.982	-0.349	-0.963
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	-0.356	-1.016	-0.350	-0.996	-0.347	-0.983	-0.347	-0.966
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	-0.355	-1.014	-0.348	-0.994	-0.345	-0.982	-0.343	-0.964
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	-0.353	-1.013	-0.345	-0.991	-0.341	-0.978	-0.339	-0.960
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	-0.351	-1.011	-0.342	-0.987	-0.337	-0.973	-0.334	-0.953
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	-0.349	-1.010	-0.338	-0.983	-0.332	-0.966	-0.328	-0.943
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	-0.347	-1.009	-0.335	-0.977	-0.328	-0.955	-0.322	-0.928
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	-0.347	-1.007	-0.333	-0.970	-0.325	-0.945	-0.318	-0.917

Wprowadzenie warstwy „mocnej” doprowadza do zmiany wartości przemieszczeń pionowych oraz zaburzeń w rozkładzie naprężeń (co nie było przedmiotem analizy). Wraz ze wzrostem stosunku E_m/E_0 przemieszczenia pionowe ulegają zmniejszeniu. Również wpływ na zmianę przemieszczenia pionowego ma miejsce położenia warstwy „mocnej”. Z tabel 4, 5 wynika, że warstwa „mocna” znajdująca się w pobliżu powierzchni lub bezpośrednio nad eksploatowanym pokładem znacznie zmniejsza wartości przemieszczeń pionowych. Wartości przemieszczeń pionowych maleją także wraz ze wzrostem grubości warstwy „mocnej”.

Aby lepiej zobrazować wpływ warstwy „mocnej” na maksymalne przemieszczenia pionowe dokonano procentowej oceny zmian wartości przemieszczenia pionowego w_{max} w zależności od parametru jej sprężystości, położenia i grubości, przy pomocy wzoru:

$$K_{\%} = \left(1 - \frac{w_{max}^m}{w_{max}}\right) \cdot 100\% \tag{4}$$

gdzie:

- w_{max} – maksymalna wartość przemieszczenia pionowego dla górotworu bez warstwy „mocnej”,
- w_{max}^m – maksymalna wartość przemieszczenia pionowego dla górotworu zawierającego warstwę „mocną”,
- $K_{\%}$ – współczynnik podający procentowe zmiany przemieszczeń maksymalnych.

Dla obu rozpatrywanych grubości warstwy „mocnej”, największe procentowe zmiany przemieszczeń pionowych następują dla położenia $H_1/H = 0 \div 0,0625$ oraz $H_1/H = 0,6875 \div 0,75$ wynoszą one $K_{\%} = 6 \div 16\%$.

Pomiędzy tymi skrajnymi przypadkami zmiany w_{\max} zależą od grubości warstwy „mocnej”; dla $a = 25$ m wynoszą one średnio $K_{\%} = 1,8 \div 2,9\%$, natomiast dla $a = 50$ m, $K_{\%} = 4,6 \div 8,7\%$ (tabela 6 dla $a = 25$ i tabela 7 dla $a = 50$).

Tab. 6. Wpływ warstwy „mocnej” o grubości 25 m na współczynnik $K_{\%}$, w zależności od jej sztywności oraz umiejscowienia w górotworze

	$\frac{E_m}{E_0}$			
	2	5	10	20
Głębokość warstwy mocnej [m]	Wartość procentowa stosunku $K_{\%}$ [%]			
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	2.86	7.37	10.51	12.96
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	1.87	4.91	7.21	9.15
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	1.36	3.27	4.74	6.07
$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	1.20	2.44	3.29	4.09
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	1.17	2.03	2.45	2.86
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	1.22	1.88	2.05	2.21
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	1.30	1.89	1.94	1.98
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	1.37	1.99	2.03	2.07
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	1.44	2.14	2.26	2.40
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	1.49	2.34	2.62	2.94
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	1.55	2.62	3.16	3.75
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	1.68	3.15	4.08	5.05
$H_1 = 300; \frac{H_1}{H} = 0,75$	1.73	3.65	5.04	6.39

Tab. 7. Wpływ warstwy „mocnej” o grubości 50 m na współczynnik $K_{\%}$, w zależności od jej sztywności oraz umiejscowienia w górotworze

	$\frac{E_m}{E_0}$			
	2	5	10	20
Głębokość warstwy mocnej [m]	Wartość procentowa stosunku $K_{\%}$ [%]			
$H_1 = 0; \frac{H_1}{H} = 0$	4.32	9.79	13.19	16.17
$H_1 = 25; \frac{H_1}{H} = 0,0625$	3.12	7.21	10.00	12.73
$H_1 = 50; \frac{H_1}{H} = 0,125$	2.58	5.60	7.74	10.08

$H_1 = 75; \frac{H_1}{H} = 0,1875$	2.48	4.87	6.53	8.55
$H_1 = 100; \frac{H_1}{H} = 0,25$	2.54	4.60	5.95	7.74
$H_1 = 125; \frac{H_1}{H} = 0,3125$	2.69	4.63	5.81	7.48
$H_1 = 150; \frac{H_1}{H} = 0,375$	2.86	4.82	5.97	7.63
$H_1 = 175; \frac{H_1}{H} = 0,4375$	3.01	5.10	6.33	8.08
$H_1 = 200; \frac{H_1}{H} = 0,5$	3.13	5.42	6.83	8.76
$H_1 = 225; \frac{H_1}{H} = 0,5625$	3.23	5.81	7.50	9.71
$H_1 = 250; \frac{H_1}{H} = 0,625$	3.39	6.44	8.53	11.10
$H_1 = 275; \frac{H_1}{H} = 0,6875$	3.50	7.04	9.48	12.19

3. Wnioski końcowe

W pracy przeprowadzono obliczenia wpływu warstw „mocnych” na przebieg przemieszczeń pionowych powierzchni terenu. Szczegółową analizę uzyskanych wyników przedstawiono w poszczególnych rozdziałach. Ogólnie obliczenia pokazują, że tangens kąta zasięgu wpływów zmienia się nieznacznie wraz ze wzrostem stopnia sztywności, dodatkowo nie zależy również istotnie od położenia warstwy „mocnej” w nadkładzie. Natomiast wprowadzenie warstwy „mocnej” doprowadza do zmiany wartości przemieszczeń pionowych nawet do kilkunastu centymetrów. Wraz ze wzrostem stopnia sztywności przemieszczenia pionowe ulegają zmniejszeniu. Również wpływ na zmianę przemieszczenia pionowego ma miejsce położenia warstwy „mocnej”. Położenie jej w pobliżu powierzchni lub bezpośrednio nad eksploatowanym pokładem znacznie zmniejsza wartości przemieszczeń pionowych.

Literatura

- Greń K., Popiołek E., 1983: *Wpływ eksploatacji górniczej na powierzchnię i górotwór*, Kraków.
- Amadei B., Savage W.Z., 1964: *Determination of the Elastic Properties of Anisotropic Rock Masses from In-Situ Expansion Test*, Proc. of 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics.
- Berry D.S., 1993: *The Ground Considered as a transversely Isotropic Material*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 1.
- Das S.K., 2000: *Observations and classification of roof strata behaviour over longwall coal mining panels in India*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.
- Dawson E.M., Cundall P.A., 1995: *Cosserat Plasticity for Modelling Layered Rock*, Proceedings of the Conf. on Fractured and Jointed Rock masses. Rotterdam.
- Evans W.H., 1941: *The Strength of Undermined Strata*, Trans. Inst. Mining & Metallurgy U.K., Vol. 50.
- Goodman R.E., Duncan J.M., 1971: *The Role of Structure and Soil Mechanics in the Design of Surface and Underground Excavations in Rock*, Proc. of Symposium on Structure, Solid Mech. And Engin. Design. Part II.
- Hobbs D.W., 1968a: *Scale Model Studies of Strata Movement Around Mine Roadways*. Part I, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 5.
- Hobbs D.W., 1968b: *Scale Model Studies of Strata Movement Around Mine Roadways*. Part II, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol 5.
- Hoek E., Karzulovic A., 2000: *Rock-Mass Properties for Surface Mines*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC.

- Hunag T.H., Chang C.S., Yang Z.Y., 1995: *Elastic Modul for Fractured Rock Mass*, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 28.
- Knothe S., 1984: *Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej*, Wyd. Śląsk.
- Kwiatkiewicz J., 1997: *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*, Katowice.
- Kuhavy F., 1978: *Geomechanical Model for Rock Foundations Settlement*, Geotech. Eng. Div. ASCE.
- Lama R.D., Ropski S., 1973: *Subsidence in the near-vicinity of a longwall face*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.
- Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A., 1997: *Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych*, Kraków.
- Niandou H., Shao J.F., Henry J.P., 1993: *Anisotropic Yield and Failure of Shale*, Proc. of Int. Conference on Assessment and Prevention of failure Phenomena in Rock Eng.
- Palchik V., 2002: *Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines*, Environmental Geology.
- Peng S.S., Chaing H.S., 1984: *Longwall mining*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Piechota S., 1989: *Technologia podziemnej eksploatacji złóż rud*, Kraków.
- Pries S.D., Hudson J.A., 1981: *Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 18.
- Pries S.D., 1993: *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London.
- Praca zbiorowa 1980: *Ochrona powierzchni przed uszkodzeniami górniczymi*, Wyd. Śląsk.
- Ropski S., 1964: *Stan pełnego i wysokiego zawalu oraz strefy osiadania stropu za ścianę, na podstawie pomiarów w kopalni „Wesoła” w pokładzie 329*, Praca doktorska, Kraków.
- Roy S., Rajagopalan A.B., 1997: *Analysis of Rockbolt Reinforcement Using Beam-Column Theory*, Int. J. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics Vol. 21.
- Salamon M.G.D., 1968a: *Two-Dimensional Treatment of Problem Arising from Mining Tabular Deposit in Isotropic or Transversely Isotropic Ground*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 5.
- Salamon M.G.D., 1968b: *Elastic Moduli of Stratified Rock Mass*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 5.
- Tajduś A., Tajduś K., 2004: *Próba wykorzystania sprężystego uwarstwionego modelu górotworu dla oszacowania wpływu eksploatacji na powierzchnię*, ZMiG, Szklarska Poręba.

Numerical modeling the influence of the mining exploitation to the surface, taking into consider the strata bedding structure

Abstract

The paper present the discussion of the influence the strata bedding structure to the shape of subsidence trough, formation, as a result of underground exploitation. In that purpose authors made some calculations using finite element modeling.

Keywords: subsidence trough, numerical modeling, finite element modeling

Recenzent: Prof. dr. hab. inż. *Edward Popiolek*, Akademia górniczo-Hutnicza