

Bernard DRZEŻŁA, Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

DZIAŁANIE ZASADY DE SAINT-VENANTA PRZY NIEKTÓRYCH GEOMETRIACH SYSTEMÓW EKSPLOATACJI STOSOWANYCH W KOPALNIACH LGOM W ŚWIETLE OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Streszczenie. W przedstawionym artykule przeprowadzono symulację komputerową eksploatacji komorowo-filarowej pod kątem ustalenia liczbowych danych charakteryzujących sposób przejawiania się zasady de Saint-Venanta w warunkach LGOM. Dla wybranych parametrów systemu eksploatacji wykonano analizę zmian naprężeń pionowych w warstwach stropowych i wyznaczono odległość od złoża, powyżej której stan naprężenia może być traktowany jako jednorodny.

MANIFESTATION OF THE DE SAINT-VENANT'S PRINCIPLE WITH SOME GEOMETRIES OF EXTRACTION SYSTEMS USED IN POLISH COPPER MINES IN THE LIGHT OF NUMERICAL CALCULATIONS

Summary. Computer simulation of the partial extraction has been carried out in the article to provide numerical data which characterize the way of manifestation of the de Saint-Venant's principle in the conditions of polish copper mines (LGOM). For some parameters of the partial extraction system an analysis of stress changes in the roof strata has been made and the distance from the seam has been determined above which the stress state can be regarded as an homogeneous one.

1. Wprowadzenie

Jednym z kryteriów podziału systemów wybierania złóż pokładowych jest zakres wykorzystania złoża. Z tego punktu widzenia eksploatację możemy dzielić na pełną (całkowitą) lub częściową. Eksploatacja pełna odbywa się na ogół z zastosowaniem systemów ścianowych. Eksploatacja częściowa natomiast polega na mniej lub bardziej regularnym

rozmieszczeniu naprzemianległych pasów wybierania i pozostawianych (na zawsze lub tymczasowo, tj. wybieranych później, chociaż na ogół w niepełnym zakresie) pasów calizny.

Dwie główne kopaliny wydobywane w Polsce, tj. węgiel i miedź (ruda miedzi) wydobywane są odpowiednio według tych dwu ogólnych schematów.

Rozważania geomechaniczne zmierzające do opisu takich czy innych zjawisk w górotworze wywołanych eksploatacją górnictw, są, ze zrozumiałych względów, zdecydowanie bardziej zaawansowane w odniesieniu do eksploatacji ścianowej. Eksploatacja częściowa, z uwagi na jej złożoną geometrię, znacznie trudniej poddaje się opisowi geomechanicznemu, zarówno na etapie rozważań teoretycznych, jak i później, na etapie obliczeń numerycznych, które wymagają bardziej skomplikowanych programów komputerowych i większego nakładu pracy na przygotowanie danych do obliczeń.

Złożona geometria schematów eksploatacji częściowej jest powodem, że do opisu pewnych zjawisk geomechanicznych nią wywołanych stosuje się często rozwiązania wypracowane w odniesieniu do systemów ścianowych. W podejściu tym abstrahuje się od szczegółowego rozpatrywania wszystkich drugorzędnych, drobnych elementów geometrii wybierania (z podziałem na komory i pasy calizny), a uwzględnia się tylko generalne – główne elementy tej geometrii z wprowadzeniem zastępczych wartości niektórych parametrów, jak np. współczynnik eksploatacyjny. U niektórych „purystów” geomechaniki, a bardziej u ludzi nieświadomych pewnych faktów, może to wywoływać sprzeciw, jako rzekomo błędne podejście. Okazuje się jednak, że podejście takie wcale nie musi być błędne, a nawet jest w pełni poprawne, jeśli rozważania nasze i obliczenia odnosimy do odpowiednich partii górotworu.

Poprawność omawianego podejścia w odniesieniu do pewnych partii górotworu wynika z działania zasady de Saint-Venanta, która w przełożeniu na rozpatrywane zagadnienie, mówiłaby, że w miarę oddalania się od eksploatowanego złoża, obserwowany stan naprężenia i deformacji górotworu w coraz mniejszym stopniu odzwierciedla szczegółowy stan wybrania złoża z podziałem na komory i pasy calizny, a za to w coraz większym stopniu odpowiada generalnym zakresom wybrania złoża, czyli głównym (pierwszorzędnym) cechom geometrii wybrania. W przypadku zaś eksploatacji w kształcie długich, naprzemianległych pasów wybrania i calizny, tworzącej w kierunku poprzecznym do pasów stan obniżenia, odkształcenia, krzywizny i naprężenia w postaci „pralki”, amplituda tej „pralki” maleje w miarę oddalania się od pokładu, aż do wyzerowania się odkształceń i krzywizn, ustalenia się równomiernego (stałego) obniżenia na poziomie wynikającym z procentowego zakresu

wybrania złoża i ustaleniu się naprężenia na poziomie naprężeń naturalnych wynikających z głębokości danego horyzontu.

Z różnych powodów, zarówno teoretycznych, jak i praktycznych, wskazane byłoby wiedzieć, czy i w jakiej odległości od pokładu wybranego częściowo pasami z pozostawieniem naprzemianległych pasów calizny następuje opisane wyżej wyrównanie deformacji i naprężeń.

Pierwszy z autorów zetknął się z tym problemem, gdy próbował przenieść na grunt kopalń miedzi swoje rozważania dotyczące wpływu prędkości wybierania i postojów frontów wybierania na stan naprężenia górotworu (B. Drzęźła 1995, 1996, 2002). Zrodziło się wtedy pytanie, czy przeniesienie tych rozważań ma w ogóle sens. Okazało się, że tak. Ma to sens właśnie z uwagi na dość szybkie wyrównywanie się deformacji i naprężeń górotworu w kierunku poprzecznym do komór w miarę oddalania się od eksploatowanego złoża. Fakt ten jest już zresztą dość dawno wykorzystywany przy prognozowaniu deformacji powierzchni wywołanych eksploatacją kopalń miedzi.

2. Model górotworu

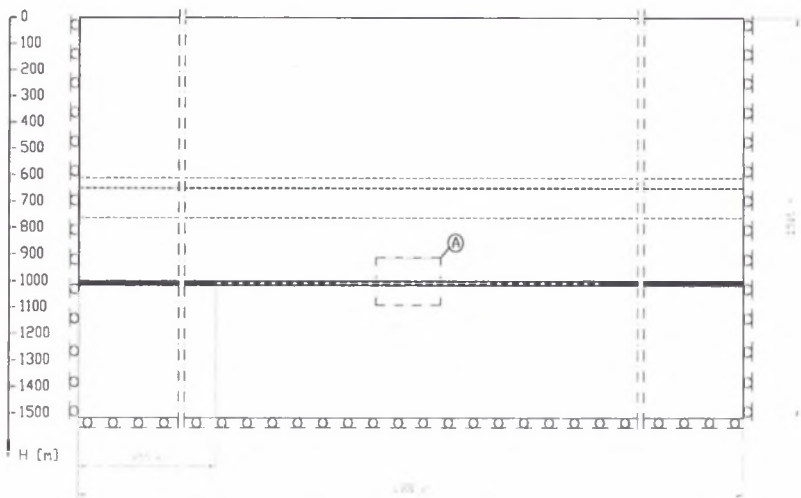
W celu oceny stanu naprężeń w warstwach stropowych stanowiących bezpośrednie otoczenie wyrobisk komorowych zbudowano numeryczny model ośrodka skalnego. Przedstawia on płaską tarczę o wymiarach 2500 m w kierunku poziomym oraz 1500 m w kierunku pionowym. Na głębokości 1000 m (głębokość stropu złoża) zamodelowano furty eksploatacyjną o wysokości 10 m. Strop furty eksploatacyjnej stanowi kolejno: warstwa anhydrytu o miąższości 150 m, dolomit wapnisty o miąższości 70 m oraz dolomit wapnisty z gipsem o miąższości 25 m. Pozostałą część górotworu odwzorowano za pomocą jednorodnej warstwy zastępczej o miąższości 755 m.

Spąg opisano za pomocą pojedynczej warstwy piaskowca o miąższości 500 m. Każda z wyodrębnionych w modelu warstw stanowi jednorodny i niezaburzony ośrodek liniowo-sprężysty. Założenie takie pozwoli uprościć proces budowy modelu górotworu przy zachowaniu najistotniejszych cech rzeczywistego ośrodka skalnego. Schemat modelu górotworu przedstawia rys. 1.

Opierając się na przedstawionym powyżej modelu rozpatrywano najprostszą sytuację obejmującą końcowy stan po wybraniu szeregu komór w centralnej parceli złoża o szerokości

1000 m. Skrajne części modelu o szerokości 500 m zostały wyłączone spod bezpośredniej eksploatacji górniczej.

Parametry odkształceniowe warstw skalnych przyjęte do obliczeń zestawiono w tabelicy 1.



Rys. 1. Model górotworu

Fig. 1. Rockmass model

Tablica 1

Parametry odkształceniowe warstw

(przyjęto według: A. Mirek, A. Zorychta 2004, A. Kidybiński 1984)

Rodzaj skały	G [GPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]
Anhydryt	37,5	0,15	2500
Dolomit wapnisty	39,9	0,16	2500
Dolomit wapnisty z gipsem	27,4	0,16	2500
Furta eksploatacyjna	30,0	0,15	2500
Piaskowiec o spoiwie anhydrytowym	35,8	0,11	2450
Zastępczy strop	30,0	0,15	2500

Przedstawiony powyżej model podzielony został siatką elementów prostokątnych oraz trójkątnych. W bezpośrednim otoczeniu wyrobisk komorowych (150 m powyżej i poniżej furty) model opisano elementami prostokątnymi o wymiarach 1×1 m. W pozostałych częściach modelu zastosowano elementy trójkątne o większych wymiarach. Rozwiązanie takie umożliwi dokładniejszy opis ośrodka skalnego przy wykorzystaniu dostępnej liczby elementów (B. Drzęźła, M. Wesołowski 1999).

Budując siatkę elementów modelu górotworu przyjęto zasadę, że punkty węzłowe znajdujące się na skrajnych krawędziach bocznych tarczy mogą przemieszczać się jedynie

wzdłuż osi Z (pionowa oś głębokości). Punkty węzłowe, które znajdują się na dolnej krawędzi tarczy, mogą natomiast przemieszczać się jedynie wzdłuż kierunku wyznaczonego przez poziomą oś X. Pozostałe węzły przynależne do modelu mogą swobodnie przemieszczać się w dowolnym kierunku płaszczyzny X-Z (H. Filcek, J. Walaszczyk, A. Tajduś 1994, M. Wesołowski 2001).

Określając warunki brzegowe założono, że wartość pierwotnych naprężeń w górotworze pochodzi jedynie od sił grawitacyjnych. W przypadku górotworu niezaburzonego tektonicznie, założenie takie jest warunkiem wystarczającym do określenia początkowych warunków symulowanej eksploatacji (J. Białek, R. Mielimąka, M. Wesołowski 2004).

Uwzględniając powyższe założenie przyjęto, że pionowe naprężenie pierwotne σ_z stanowi sumę sił masowych, których wartość zależna jest jedynie od ciężaru poszczególnych warstw. Poziome naprężenie pierwotne σ_x zostało natomiast wyznaczone na podstawie klasycznej teorii sprężystości i stanowi ułamek właściwy naprężenia pionowego (zależny od liczby Poissona) (M. Kwaśniewski, J. Wang 1996).

3. Założenia do obliczeń i ich wyniki

Na bazie opisanego powyżej modelu górotworu przeprowadzona została symulacja numeryczna eksploatacji górniczej dla przyjętych wariantów obliczeń. Po wybraniu pola eksploatacyjnego systemem komorowo-filarowym o długości 1000 m analizowano zmiany naprężeń na poszczególnych wysokościach od stropu komór. Ze względu na ograniczenia wynikające z zastosowanego modelu numerycznego oraz przyjętego do obliczeń programu komputerowego COSMOS/M, analizowano jedynie składową pionową naprężeń σ_z . Jako granicę oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych przyjęto wartość naprężeń pionowych σ_z , dla której spełniony został warunek:

$$\frac{|\sigma_z(h)|_{\max} - |\sigma_{zp}(h)|}{|\sigma_{zp}(h)|} \leq 0,05$$

gdzie:

$|\sigma_z(h)|_{\max}$ – wartość naprężeń na wysokości h od stropu furty eksploatacyjnej,

$|\sigma_{zp}(h)|$ – wartość naprężeń pierwotnych na wysokości h od stropu furty eksploatacyjnej

Obliczenia numeryczne prowadzone zostały w kilku wariantach dla następujących parametrów systemu eksploatacyjnego:

- szerokość komór $L=6-10$ m
- szerokość filarów $S=6-10$ m
- wysokość komór $H=10$ m

Po przeprowadzeniu pełnego cyklu obliczeń dla przyjętych wariantów wyznaczono graniczne wysokości oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych w stropie wyrobisk komorowych. Wyznaczone z obliczeń zależności przedstawiono w tablicy 2 oraz na rysunkach 2 i 3. Na rysunku 4 przedstawiono natomiast przykładowy rozkład naprężeń pionowych w warstwach stropowych w kierunku prostopadłym do komór.

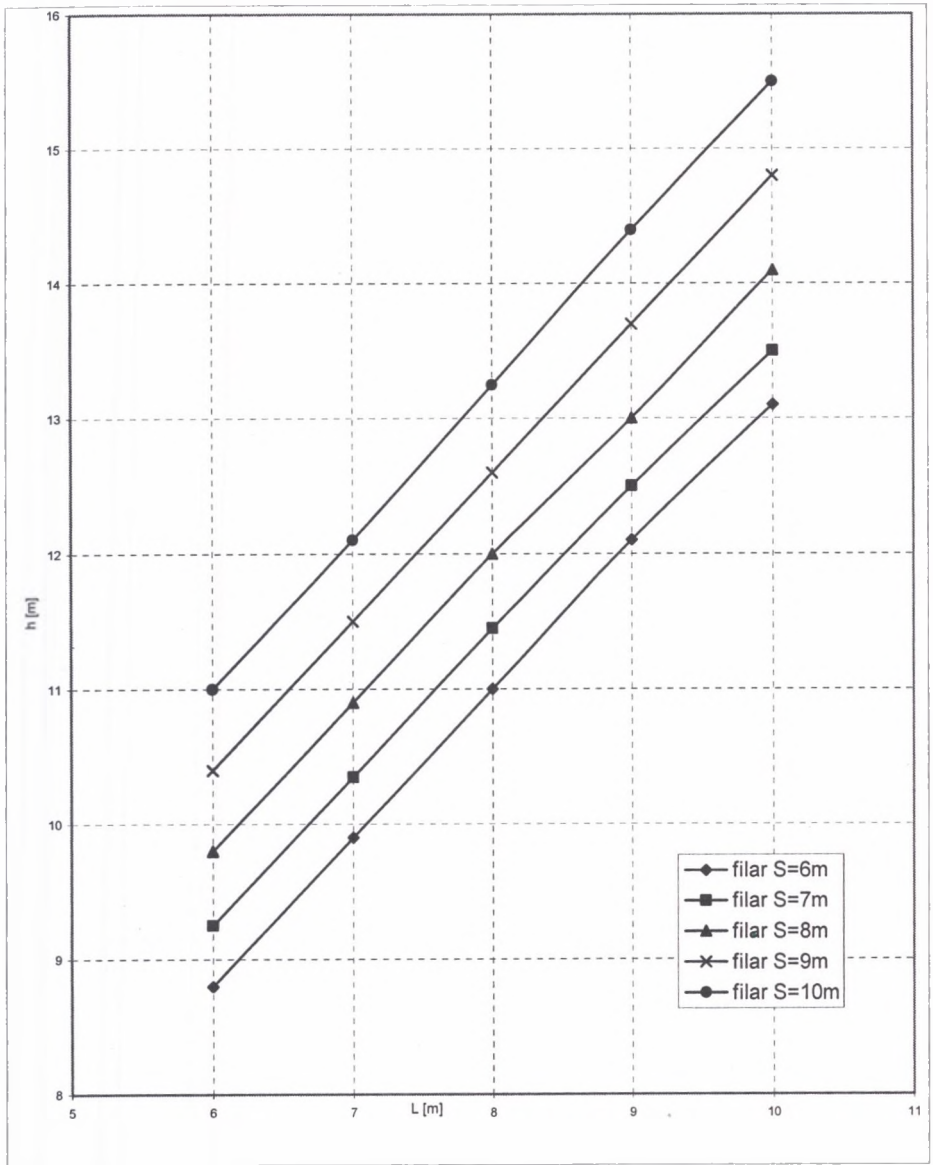
Tablica 2

Wysokość oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych
wyznaczona dla przyjętych wariantów obliczeniowych

		Szerokość filara S				
		6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
Szerokość komór L	6 m	8,80	9,25	9,80	10,40	11,00
	7 m	9,90	10,35	10,90	11,50	12,10
	8 m	11,00	11,45	12,00	12,60	13,25
	9 m	12,10	12,50	13,00	13,70	14,40
	10 m	13,10	13,50	14,10	14,80	15,50

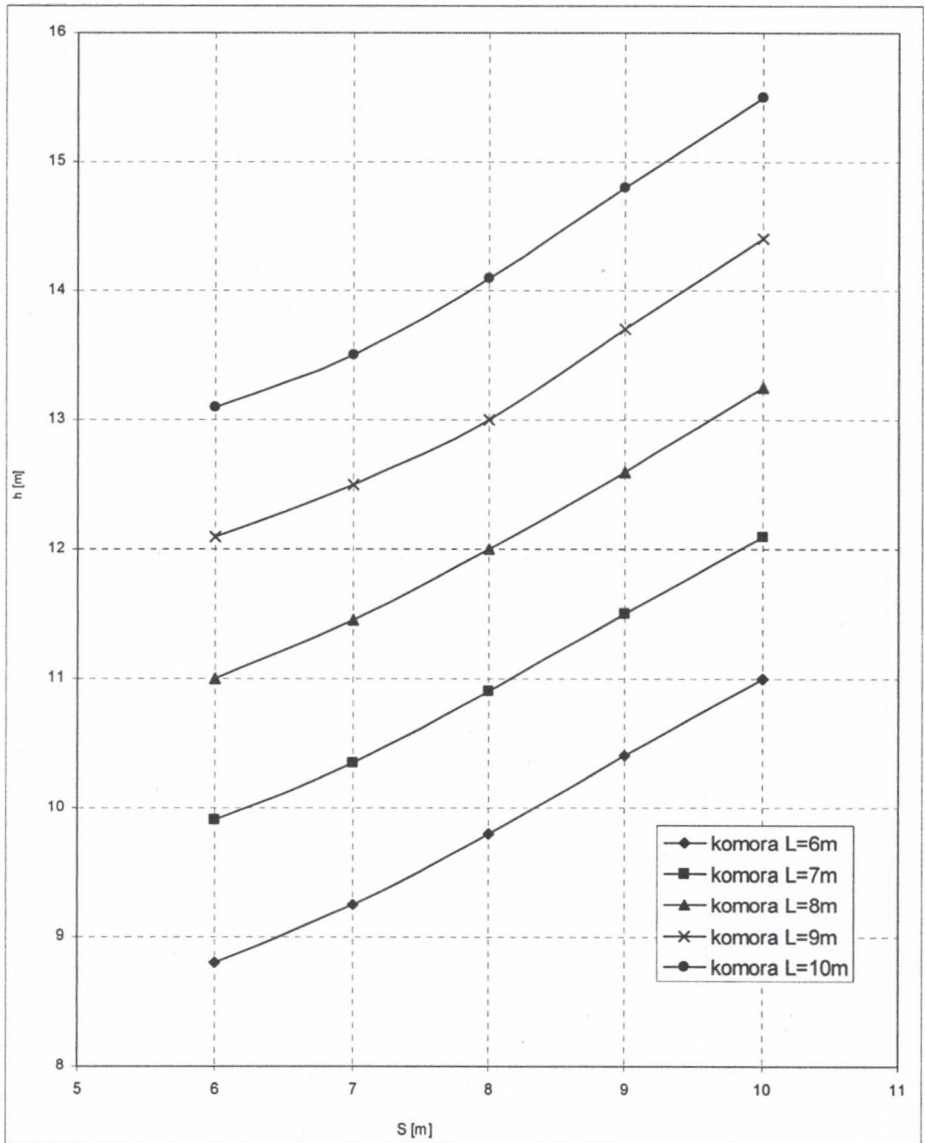
Opierając się na uzyskanych wynikach symulacji komputerowej można stwierdzić że:

1. Pionowy zasięg oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych dla przyjętego systemu wybierania złoża zmienia się wprost proporcjonalnie do szerokości wyrobisk komorowych (rys. 2). Wyznaczony zasięg dla rozpatrywanych szerokości wyrobiska komorowego zmienia się w zakresie od 8,7 m do 15,5 m. Stosunkowo niewielka wysokość oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych jest spowodowana dużą sztywnością warstw stropowych.
2. Zmiana zasięgu oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych przy stałej szerokości komór i zwiększaniu szerokości pasa calizny ma charakter nieliniowy. W przedziale szerokości filara 6 ÷ 8 m zmiana zasięgu jest stosunkowo powolna. Powyżej 8 m zmiana wysokości oddziaływania jest szybsza, a charakter tej zmiany jest prawie liniowy (rys. 3).
3. Wstępne obliczenia numeryczne (nie prezentowane w pracy) wykazały, że głębokość eksploatacji oraz wysokość furty eksploatacyjnej nie wpływa na zmianę wysokości oddziaływania naprężeń, a jedynie na bezwzględną wartość naprężeń.



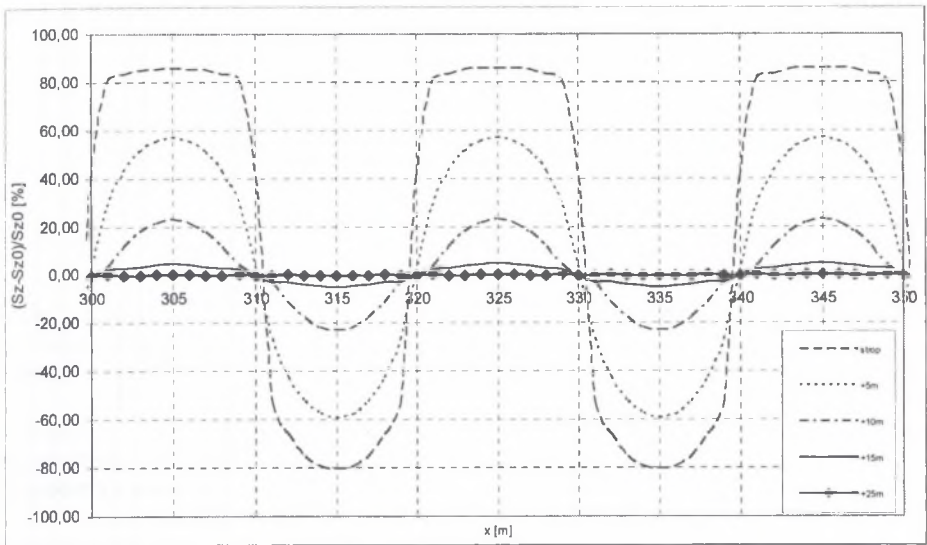
Rys. 2. Graniczne wysokości oddziaływania pionowych naprężeń eksploatacyjnych w zależności od szerokości komór (L) przy ustalonych szerokościach filarów (S)

Fig. 2. Limits height influence of vertical stresses exploitation depending on the width of chambers (L) designated wide of pillars (S)



Rys. 3. Graniczne wysokości oddziaływania pionowych naprężeń eksploatacyjnych w zależności od szerokości filarów (S) przy ustalonych szerokościach komór (L)

Fig. 3. Limits height influence of vertical stresses exploitation depending on the width of pillars (L) designated wide of pillars (S)



Rys. 4. Przykładowy rozkład naprężeń pionowych w kierunku prostopadłym do komór w obszarze bezpośrednich oddziaływań elementów eksploatacji. Szerokość filarów $S=10$ m, szerokość komór $l=10$ m

Fig. 4. Exemplary of distribution stresses vertical in the direction perpendicular to chambers in area of directly influences elements exploitation. The width of pillars $S=10$ m, the width of chambers $l=10$ m

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone dla celów pracy obliczenia wskazują, że zasięg oddziaływań naprzemianległych pasów wybierania (komór) i calizny jest w przypadku kopalń miedzi niewielki i wynosi do kilkunastu metrów. Wynika to z dużej sztywności skał górotworu. Powyżej strefy zasięgu stan naprężenia górotworu jest bardziej jednorodny, bo nie posiada już charakteru „pralki” odpowiadającej naprzemianległym pasom wybrania i calizny, odzwierciedlając jedynie główne cechy geometrii wybrania. Obszar górotworu, w którym wykresy naprężeń mają charakter „pralki” spowodowanej oddziaływaniem naprzemianległych pasów calizny i komór będziemy dalej nazywać obszarem bezpośrednich oddziaływań tych elementów eksploatacji.

Obliczając deformacje i naprężenia górotworu w obszarze poza zasięgiem bezpośredniego oddziaływania pasów calizny i komór uwzględniamy w obliczeniach, przy dominującym obecnie w KGHM systemie eksploatacji, tylko trzy zasadnicze obszary: obszar (ściślej) calizny, obszar upodatniony wykonaniem komór z odpowiednim zastępczym

współczynnikiem eksploatacyjnym i obszar zrobów z innym współczynnikiem eksploatacyjnym. W przypadku występowania obszarów z różnymi stopniami upodatnienia należałoby ten fakt odpowiednio uwzględnić w obliczeniach.

LITERATURA

1. Białek J., Mielimąka R., Wesołowski M.: Ein linear, transversal-anisotropisches Gebirgsmodell zur Modellierung abbaubedingter Gebirgsbewegungen. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiburg, heft 1, 2002.
2. Drzęźła B.: Ewolucja poglądów na temat wpływu prędkości wybierania na wielkość szkód górniczych na powierzchni oraz kierunki aktualnych prac badawczych w tym zakresie. Mat. konf. „III Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych” zorg. przez Pol. Śl. i in., 1995, str. 219 ÷ 242.
3. Drzęźła B.: Wpływ prędkości wybierania i zmian prędkości wybierania (postojów ścian) na obiekty powierzchni w świetle przyjętych modeli teoretycznych. Mat. Szkoły Ekspl. Podz. '96, CPPGSMiE PAN, 1996, str. 107 ÷ 117.
4. Drzęźła B.: Geomechaniczne i ekonomiczne aspekty przerw w eksploatacji górniczej. Mat konf. nt. „Problemy ochrony terenów górniczych” zorg. przez GIG, Katowice 2002, str. 85 ÷ 93.
5. Drzęźła B., Wesołowski M.: Określenie stref deformacji w górotworze w czasie rozruchu wyrobiska ścianowego. Część I: Ogólne zasady numerycznego modelowania górotworu. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice 1999. Z. 239.
6. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
7. Kidybiński A.: Podstawy Geotechniki Kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk 1982.
8. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej '96. Kraków 1996.
9. Mirek A., Zorychta A.: Wpływ systemu z szerokim otwarciem na zagrożenie wstrząsami wysokoenergetycznymi w kopalniach LGOM. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Kraków 2004.
10. Wesołowski M.: Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i jej oddziaływania na obiekty. Praca doktorska (niepublikowana) Gliwice 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński