



Wydział Górnictwa, Inżynierii
Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej

75 75 lat
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOBROCI



Uproszczona numeryczna symulacja zachowania się górotworu o budowie blokowej w otoczeniu wyrobiska ścianowego w kontekście wybranych analiz teoretycznych i pomiarów rozkładu ciśnienia eksploatacyjnego w sąsiedztwie czoła ściany

Simplified numerical simulation of the behaviour of the block rock mass near to the longwall in the context of selected theoretical analyses and measurements of the exploitation stress distribution in the vicinity of the longwall face

Dr inż. Krzysztof Tomiczek

Krzysztof.Tomiczek@polsl.pl

Tel.: +48 32 2372169, t.k.: +48 737994564

Skype/e-mail: k.tomiczek@hotmail.com



1. Wprowadzenie

Poznanie stanu naprężenia w przypadku wyrobisk eksploatacyjnych jest zadaniem skomplikowanym (Kłeczek, 1994).

„Wynika to przede wszystkim z wymiarów wyrobisk wybierkowych i ich zasięgu w rozpatrywanym obszarze górotworu. Różnorodność skał i ich własności geomechaniczne w otoczeniu wyrobiska wybierkowego czynią problematycznym założenie odnośnie jednorodności, izotropowości i często też ciągłości analizowanego masywu górotworu”.

1. Wprowadzenie

Problem rozkładu naprężeń w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego jest na tyle złożony, że brak jest uniwersalnej teorii, która wykazuje pełną zgodność wyników dla różnych warunków geologiczno-górnictwowych z obserwacjami rzeczywistymi.

Szczególnie złożony jest problem stateczności warstw stropowych i w przypadku ich wysokiej wytrzymałości - zawieszenie stropu w zrobach.

Pod koniec XIX wieku Fayol (1885) opublikował wyniki badań nad zachowaniem się stosów oporowych w układzie pojedynczym podpierających strop wyrobiska. Po raz pierwszy używa pojęcia „arch”³ w odniesieniu do obciążenia warstw stropowych „pressure arch”.

Ruppenejt w 1954 opracował teorię przeginięcia warstw.

W 1968 roku Sałustowicz rozwija myśl Budryka z 1933r. o zastosowaniu teorii ugięcia belki na sprężystym podłożu do rozwiązywania zagadnień rozkładu naprężeń przy eksploatacji pokładów węgla systemem ścianowym z zawałem warstw stropowych. W tym rozwiązaniu zakłada się, że strop bezpośredni pokładu tworzy nad nim płytę wspornikową, która podparta wzdłuż ściany podlega zgięciu walcowemu.

1. Wprowadzenie

W takim przypadku stosuje się teorię ugięcia belek prostych.

Natomiast „wg teorii fali ciśnień warstwę stropową uważamy za belkę spoczywającą na sprężystym podłożu, którym jest eksploatowany pokład. Z góry działa na tę belkę ciśnienie pierwotne $p_z = \gamma h$, pochodzące od ciężaru nadkładu. W takich warunkach następuje ugięcie belki; wspornik ugina się ku dołowi, natomiast część belki leżąca nad pokładem przyjmuje kształt linii falistej [...]. Wystający wspornik, wywierający dodatkowy nacisk na pokład, powoduje w nim przyrost ciśnienia w stosunku do pierwotnej wartości p_z , to zwiększone ciśnienie nazywamy ciśnieniem eksploatacyjnym. [...] Ugięcie stropu, jak i rozkład ciśnienia w pokładzie, następuje według linii falistej.” (Kłeczek, 1994)

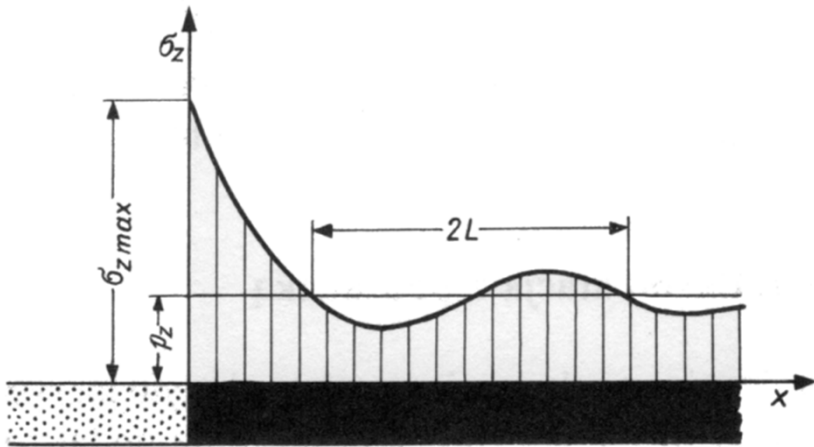
Przy rozpatrywaniu zagadnienia ciśnienia eksploatacyjnego zastosowanie znalazły dwie, powszechnie znane teorie: teoria fali ciśnień i teoria belki na podłożu sprężystym.

2. Podstawowe rozwiązania analityczne.

2.1. Teoria fali ciśnień.

Generalnie, w tym rozwiązaniu strop o grubości h obciążony jest równomiernie rozłożonym ciśnieniem nadkładu p_z , a pokład traktowany jest jako podłoże sprężyste (winklerowskie).

Belka stropu nad wyeksploatowaną przestrzenią tworzy wspornik o długości l .



Długość fali ciśnień

$$2 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{c_1}}$$

Ciśnienie eksploatacyjne

$$\sigma_{z \max} = p_z \cdot \left(\frac{\pi \cdot l}{L} + 1 \right)^2$$

$$\sigma_{z \max} = p_z \cdot \left(l \cdot \sqrt[4]{\frac{c_1}{4 \cdot E \cdot I}} + 1 \right)^2$$

Rozkład naprężeń w pokładzie eksploatowanym z zawalem warstw stropowych dla teorii fali ciśnień. (Kłeczek, 1994)

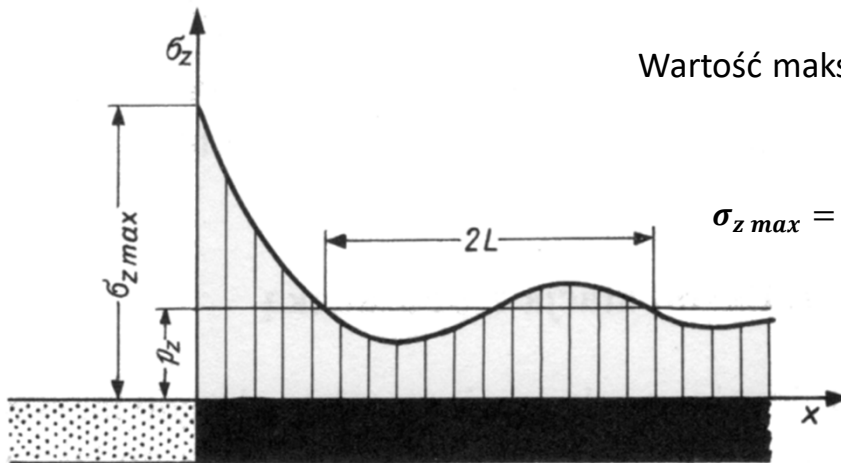
2. Podstawowe rozwiązania analityczne.

2.2. Teoria belki na podłożu sprężystym.

Rozkład naprężeń w pokładzie

$$\sigma_z = p_z + \frac{E_{c1}}{m} \cdot (A_2 \cdot e^{r_2 x} + A_4 \cdot e^{r_4 x})$$

gdzie:
 A_2, A_4 – stałe całkowania,
 E_{c1} – współczynnik sprężystości węgla,
 r_2, r_4 – pierwiastki rzeczywiste równania charakterystycznego linii ugięcia stropu.

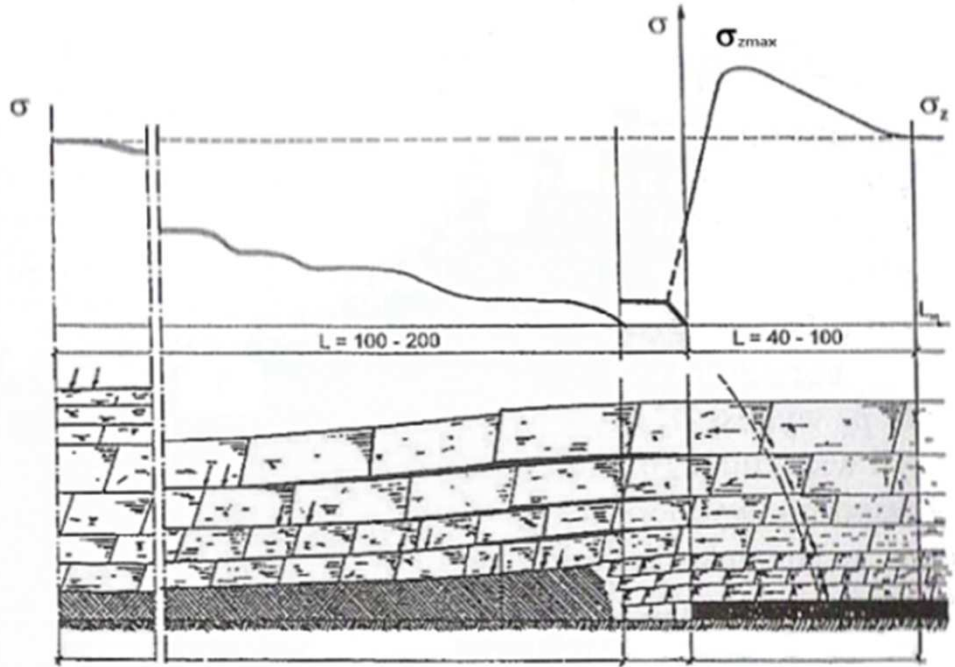
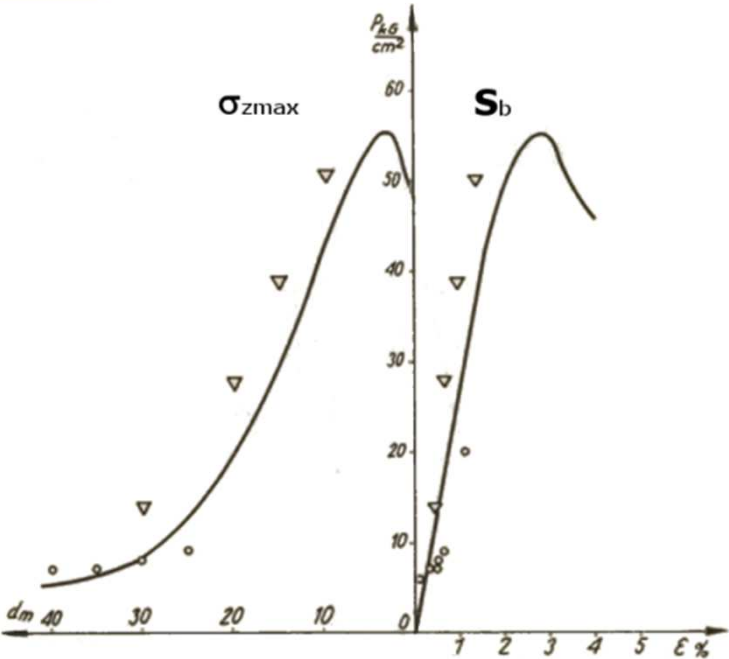


Wartość maksymalna ciśnienia eksploatacyjnego w czole ściany:

$$\sigma_{z \max} = p_z \left\{ 1 + l \left[\sqrt{\frac{3 \cdot E_{c1}}{E \cdot m \cdot h^3} - \frac{0.6 \cdot (1 + \vartheta) \cdot E_{c1}}{E \cdot m \cdot h}} + l \left(\sqrt{\frac{3 \cdot E_{c1}}{E \cdot m \cdot h^3} - \frac{1.2 \cdot (1 + \vartheta) \cdot E_{c1}}{E \cdot m \cdot h}} \right) \right] \right\}$$

Rozkład naprężeń w pokładzie eksploatowanym
z zawałem dla zastosowanej teorii ugięcia belki na podłożu sprężystym
(Kłeczek, 1994)

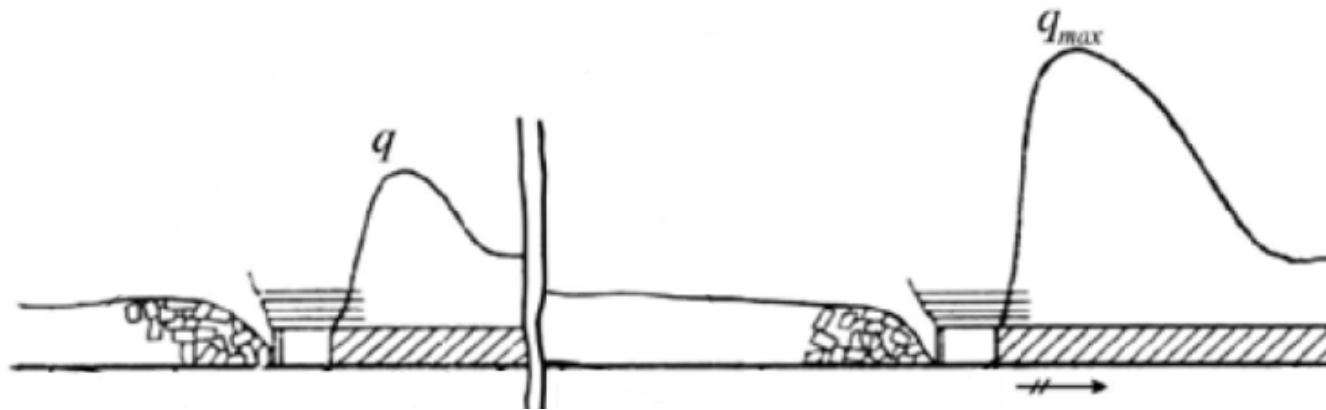
3. Rzeczywiste rozkłady naprężeń w sąsiedztwie czoła ściany na podstawie pomiarów naprężeń.



Vertical stress in the coal seam in front of the longwall face of σ_{zmax} (left side of the graph) and load-support characteristics of the stratum S_b ; d - distance from the longwall face, ϵ - vertical strains of the stratum (in the nonexploited part) according to Biliński (1968). This distribution was made for a single longwall mining at a depth of 250m. The value of the exploitation stress σ_{zmax} was about 55kG/cm² (5.4MPa) - the largest was at a distance of about 5m from the longwall face and it was equal to the coal seam support S_b .

Distribution of vertical stresses σ_{zmax} in the coal seam subjected to caving exploitation; L - length of selected zones in m according to Majcherczyk (2006), after Borecki and Chudek (1973).

3. Rzeczywiste rozkłady naprężeń w sąsiedztwie czoła ściany na podstawie pomiarów naprężeń.



8

Distribution of high stresses and unstressed zones along the longwall before exploitation (left side) and during exploitation (right side); $q = \sigma_z$ according to Konopko (2014). Assuming that the proportions in the figure have been kept, the maximum exploitation stress is 4÷8m in front of the longwall face.

4. Blokowa struktura masywu skalnego.

We wczesnych latach 60-tych ubiegłego wieku dochodzi do serii katastrof budowli inżynierskich oraz w kopalniach, obejmujących zarówno ośrodki gruntowe, jak i skalne. Terzaghi (uznawany za ojca mechaniki gruntów) i Voight (1979) piszą, że: „przekroczone zostały granice możliwości prognozowania konsekwencji [naruszania stanu równowagi w ośrodkach gruntowych i skalnych poprzez działania inżynierskie]”. (Hoek, 2017)



Zniszczona betonowa zapora w Malpasset, Francja (Diederichs, 2003). W 1959r. Katastrofa spowodowała śmierć 450 ludzi.



Zbiornik w Vajont po osunięciu się fragmentu góry Mount Toc. 100-metrowa fala przelewową pochłonęła 2500 ofiar miasteczka Longarone, Włochy. (Hoek, 2017)

4. Blokowa struktura masywu skalnego.

Do tragicznych katastrof dochodzi również w kopalniach, m.in. w Coalbrook (RPA) w 1960r. ginie 432 górników. W następstwie tąpnięć, śmierć ponoszą górnicy w kopalniach złota w prowincji Witwatersrand (RPA) i w kopalniach Kolar (Indie), w kopalniach niklu w zagłębiu Sudbury (Kanada), w kopalniach rejonu Coeur d'Alene w Idaho (USA), w kopalniach prowincji Kalgoorlie (Australia).



Skutki tąpnięcia w kopalni w wyrobisku w otoczeniu skał kruchych poddanych bardzo dużym naprężeniom. (Hoek, 2017)

4. Blokowa struktura masywu skalnego.

Dziesiątki katastrof w kopalniach prowadzących wydobycie surowców i budowli naziemnych prowadzą do wniosku naukowców oraz badaczy, że wyczerpały się możliwości analizy problemów geoinżynierskich na bazie istniejących rozwiązań teoretycznych opartych na teorii sprężystości i traktowania ośrodków skalnych (i gruntowych) jako quasi-jednorodnych, ciągłych i izotropowych.

Do projektowania i oceny jakości górotworu zaczynają być stosowane klasyfikacje oparte na opisie geologicznej jakości masywu skalnego z uwzględnieniem jego nieciągłości, podzielności i anizotropii.

Jednym z przykładów jest GSI (*Geological Strength Index*), będący podstawą wielu innych rozwiązań oceny stateczności i stanu uszkodzenia (lub zniszczenia) masywu skalnego, np. kryterium Hoeka-Browna (Hoek et al. 2002, Hoek and Corkum, 2015).

WSKAŹNIK GSI Na podstawie struktury i opisu jakości powierzchni skały należy wybrać przeciętną wartość GSI. Kryterium oznaczania GSI można stosować, gdy bloki skalne są małe w stosunku do wykopu	BARDZO DOBRA szorstka, świeża, niezwietrzała powierzchnia	DOBRA szorstka, lekko zwietrzała, zazełaziona powierzchnia	SLABA gładka, średnio zwietrzała i zmieniona powierzchnia	ZŁA poślizgowa, silnie zwietrzała powierzchnia z wypełnieniem zwartym, ostrokrawędzistym macieriałem	BARDZO ZŁA poślizgowa, silnie zwietrzała z wypełnieniami ilastymi
NIENARUSZONA ALBO MASYWNA nienaruszone próbki skalne albo masyw in situ z bardzo małą ilością odległych nieciągłości	90	80			
BLOKOWA bardzo dobrze pozazębiane bloki skalne złożone z regularnych brył, uformowanych przez trzy prostopadłe komplety nieciągłości		70	60		
BARDZO BLOKOWA pozazębiany, częściowo zaburzony masyw z wielościennymi, ostrokrawędzistymi bryłami, uformowanymi przez cztery lub więcej komplety nieciągłości			50		
BLOKOWA / ZABURZONA zafałdowana i/lub spękana z ostrokrawędzistymi blokami, uformowanymi przez wiele przecinających się zespołów spękań			40	30	
ROZLUŹNIONA Złe zazębiony, mocno pokruszony z mieszaniną regularnych i nieregularnych odłamków skalnych				20	
UWARSTWIONA / ROZWARSTWIONA pofałdowany tektonicznie, pościerany masyw skalny; złupkowacenie przeważa nad innymi zespołami nieciągłości, zupełny brak bloczności					10
					5






Diagram oceny masywu skalnego na podstawie *Geological Strength Index* (GSI). (Pinińska 2001 za Hoekiem, 1999)

4. Blokowa struktura masywu skalnego.

Innym przykładem jest klasyfikacja oparta na wskaźniku uszkodzenia (naruszenia) masywu skalnego D . Dla skał nienaruszonych, *dziewicznych* $D=0$, a dla silnie naruszonych, spękanych, niemal pokruszonych $D=1$. (Hoek and Corkum, 2015)

12

Przewodnik do oceny wskaźnika uszkodzenia masywu skalnego D . (Hoek and Corkum, 2015)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation



Politechnika
Śląska

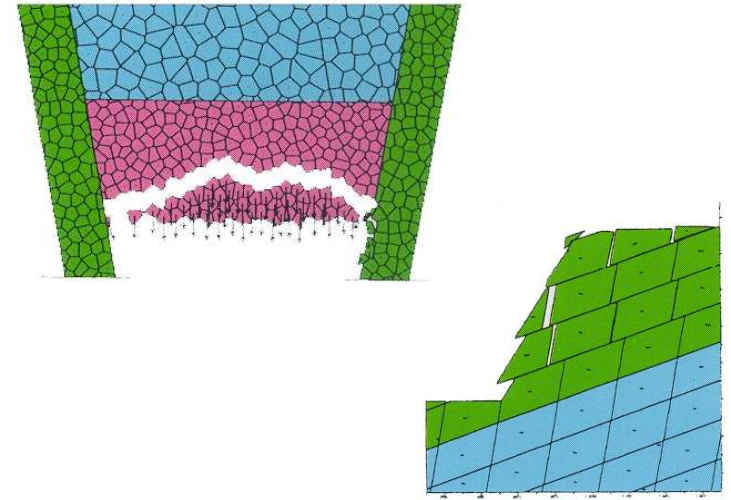


5. Metoda Elementów Odrębnych.

5.1. Metody modelowania numerycznego stosowane w geomechanice.

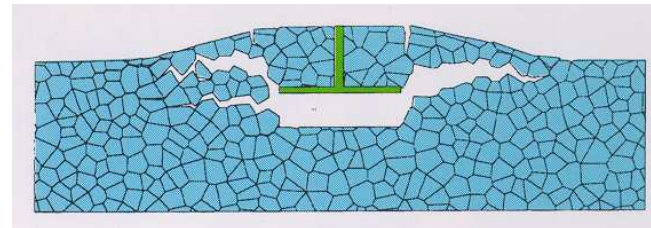
Najważniejsze (i najszerzej stosowane) metody modelowania numerycznego stosowane w geoinżynierii:

- metoda elementów skończonych – *Finite Element Method (FEM)*,
- metoda elementów brzegowych – *Boundary Element Method (BEM)*,
- metoda różnic skończonych – *Finite Difference Method (FDM)*,
- metoda elementów odrębnych – *Distinct Element Method (DEM)*,
- metoda elementów dyskretnych – *Discrete Element Method (DEM)*.



Metoda Elementów Dyskretnych

- skończone przemieszczenia i rotacje dyskretnych ciał,
- możliwość całkowitego rozdzielenia dyskretnych ciał,
- rozpoznawanie nowych kontaktów pomiędzy przemieszczającymi się ciałami w miarę postępujących obliczeń.



(Itasca, 1998)

5. Metoda Elementów Odrębnych.

5.2. Metoda Elementów Odrębnych i program UDEC.

Distinct Element Method, DEM (Peter A. Cundall, 1971)

- ciała odrębne połączone są ze sobą wiązaniami,
- ciała odrębne mogą ulegać przemieszczaniu, rotacji, odrywać się od siebie i stykać na nowo,
- styki pomiędzy ciałami są odkształcalne,
- ciała mogą być sztywne lub odkształcalne,
- stosowany jest bezpośredni, krokowy schemat rozwiązywania równań ruchu.

Programy *DEM* to np.: TRUBAL, DIBS, 3DSHEAR, UDEC, 3DEC, PFC2D i PFC3D.

Założenia Metody Elementów Odrębnych:

- CUNDALL P. A., A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol. 1 No. II-8, Nancy 1971,
- CUNDALL P. A. and STRACK O. D. L., A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, Vol. 29 No. 1, 47-65, 1979,
- CUNDALL P. A. and HART R. D., Numerical modeling of discontinua. In (J. A. Hudson, ed.) Comprehensive Rock Engineering. Principles, Practice & Projects. Vol. 2, 231-243, Pergamon Press, Oxford 1993.



(Itasca, 1998)

5. Metoda Elementów Odrębnych.

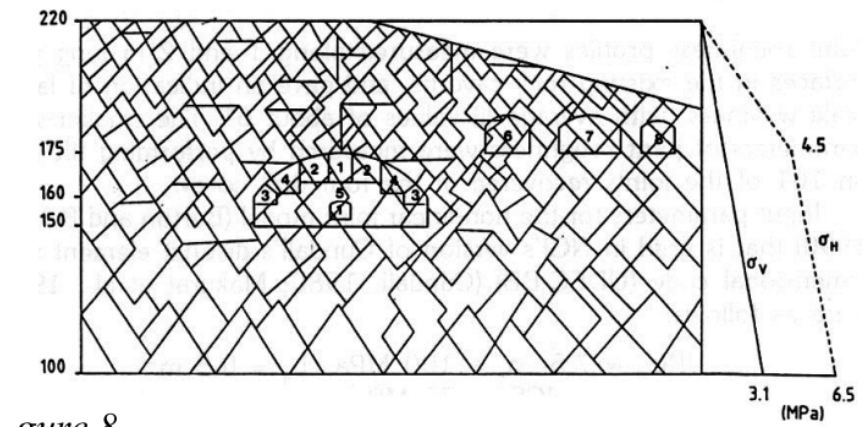
5.2. Metoda Elementów Odrębnych i program UDEC.

Podstawy metody elementów odrębnych (DEM - *Distinct Element Method*) opracowane zostały przez Cundalla (1971). Początkowo metoda ta używana była do rozwiązywania zadań mechaniki skał i mechaniki gruntów (Cundall i Strack, 1979). Szerzej założenia tej metody zostały opisane przez Cundalla (1988), Harta i in. (1988), Cundalla i Harta (1993), Harta (1993) oraz w dokumentacjach programów bazujących na metodzie DEM – UDEC, PFC2D, PFC3D i 3DEC (Itasca, 1994).

W ogólnym przypadku DEM zakłada, że cząsteczki w kształcie wielokątów ulegają deformacjom. Oddziaływanie ziaren lub bloków jest traktowane jako proces dynamiczny stanów ośrodka, zmieniających się pod wpływem zmian sił wewnętrznych.

Siły styków, przemieszczenia agregatów elementów odrębnych i ich odkształcenia zależą od przemieszczeń pojedynczych cząsteczek. Ruch ścian, cząsteczek i siły masowe powodują przemieszczenia.

Program UDEC był już opisywany wielokrotnie, również przez samych twórców (Itasca, 1989). Generalnie, w programie UDEC modele zbudowane są z wielokątów - elementów odrębnych, które mogą mieć różny kształt i wielkość. Mogą być sztywne lub odkształcalne poprzez ich podział na elementy skończone.



(Barton et al., 1999)

5. Metoda Elementów Odrębnych.

5.2. Metoda Elementów Odrębnych i program UDEC.

Symulowano już numerycznie, m.in.: zachowanie się górotworu w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego (Kwaśniewski, 1997), próby jednoosiowego ściskania skał (Kwaśniewski, 1997), próby jednoosiowego ściskania skał anizotropowych (Kwaśniewski i Tomiczek, 1998), zachowanie się górotworu o budowie blokowej poddanego eksploatacji podziemnej (Kwaśniewski, 1999), badano stateczność masywu skalnego w sąsiedztwie podziemnego stadionu hokejowego w Gjovik w Norwegii (Barton et al. 1999), mostu Nishida w Japonii (Jiang and Esaki, 2002), zjawisko eksplozyjnego urabiania skał (Chen, Zhao and Zhou, 2010), zjawisko migracji metanu z warstw spągowych (Kwaśniewski i Lasek, 2007), właściwości procesu osiadania terenu górniczego w czasie (Smolnik, 2008), prowadzono podstawowe analizy z dziedziny budownictwa (Lemos, 2016), symulowano zjawisko ugięcia beleczki (Tomiczek, 2017) i badano zachowanie się warstw stropowych w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego (Tomiczek, 2018).

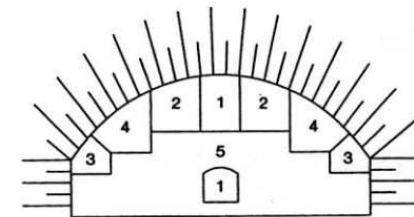
16



(Jiang and Esaki, 2002)



(Barton et al., 1999)



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI



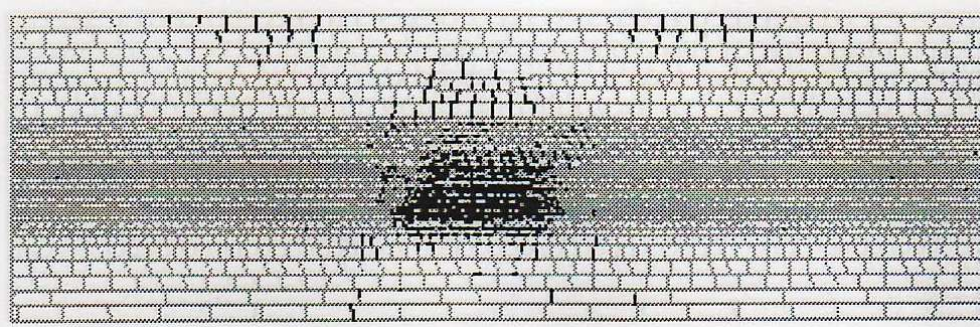
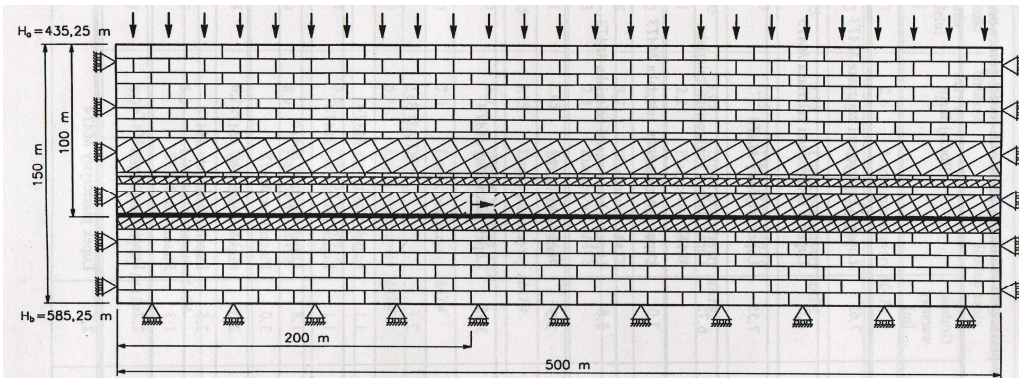
75 75 lat
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

5. Metoda Elementów Odrębnych.

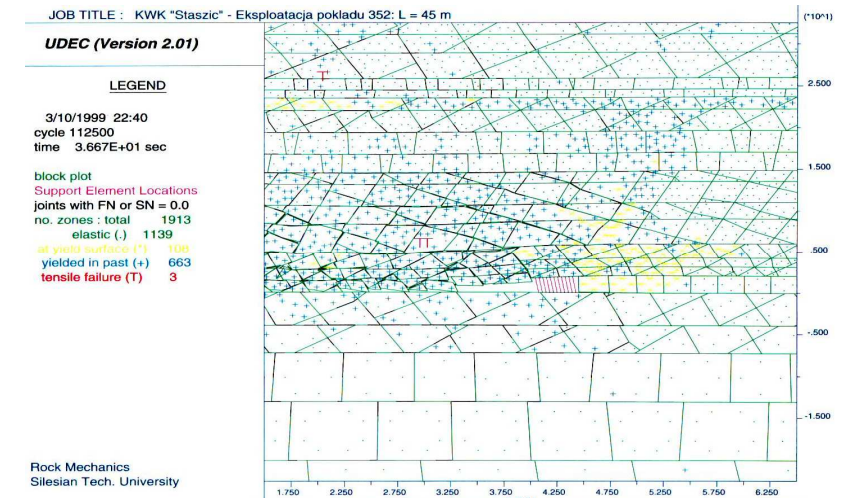
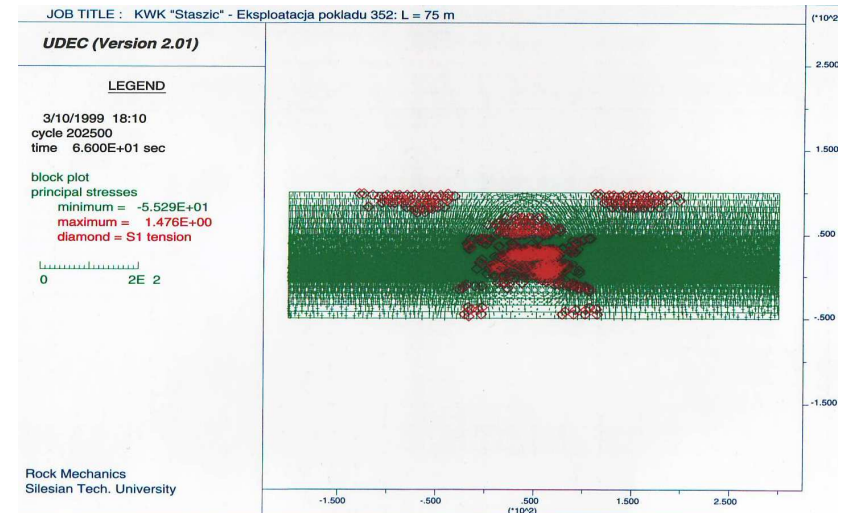
5.2. Metoda Elementów Odrębnych i program UDEC.

Modelowanie numeryczne górotworu o budowie warstwowo-blokowej i badanie deformacji nieciągłych towarzyszących eksploatacji ścianowej prowadzonej z zawałem stropu (Kwaśniewski, 1999)

17



(Kwaśniewski, 1999)



(Kwaśniewski, 1999)



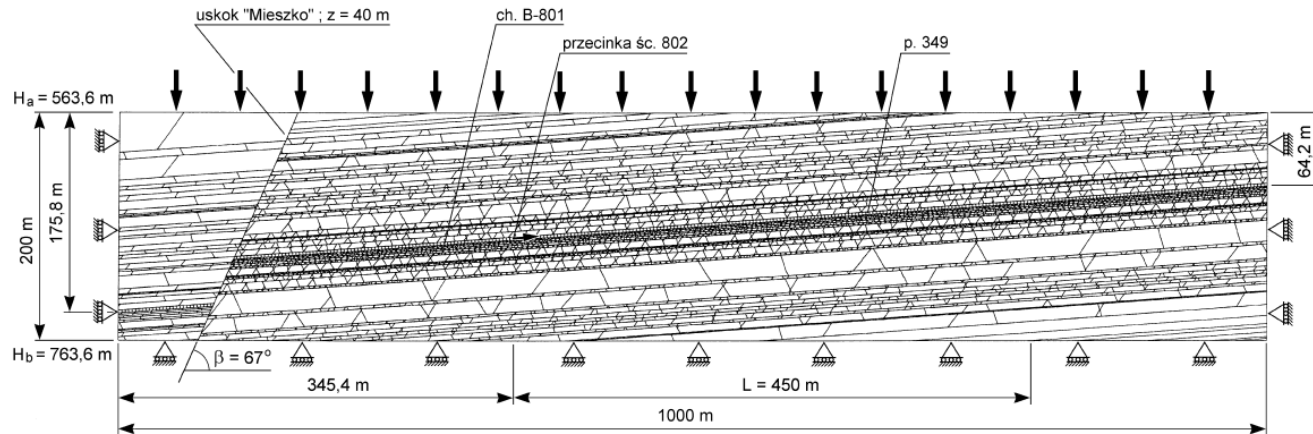
Politechnika
Śląska



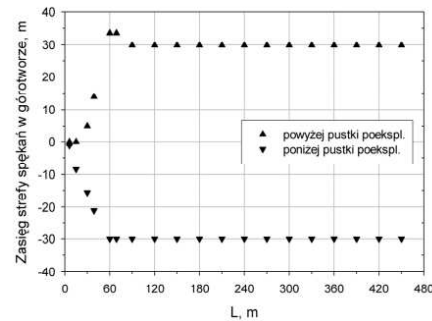
5. Metoda Elementów Odrębnych.

5.2. Metoda Elementów Odrębnych i program UDEC.

Analiza numeryczna migracji metanu z warstw spągowych do wyrobiska ścianowego (Kwaśniewski i Lasek, 2007)



18



(Kwaśniewski i Lasek, 2007)

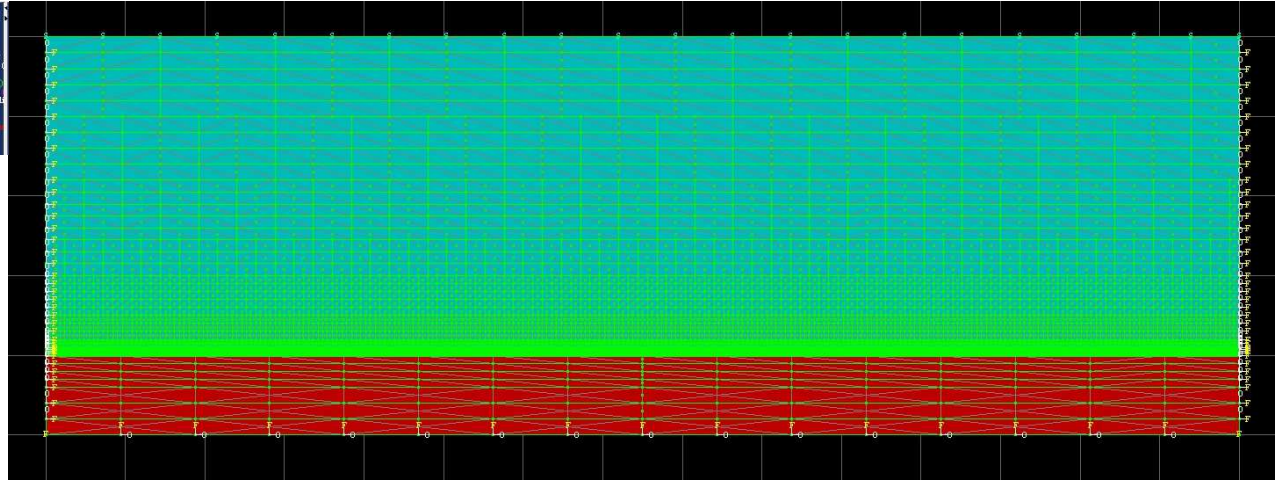
6. Numeryczna symulacja eksploatacji prowadzonej systemem ścianowym dla górotworu o strukturze blokowej

Model zbudowano używając programu UDEC v. 5.0 (Itasca C.G.):

- Tarcza modelu miała wymiary 1500m×500m ($w \times h$).
- Nad pokładem węgla o miąższości $h_c=3.0$ m w stropie zamodelowano 29 warstw skalnych o miąższościach $h_r=2.0, 2.5; 5.0$ m; 10,0m; 15.0m i 20.0m. W spągu leżało sześć warstw skalnych o miąższościach $h_f=10.0$ m.
- Eksploatację symulowano etapami na odcinku o całkowitej długości $L=400.0$ m.
- Wszystkim warstwom nadano cechy skał karbońskich i przypisano warunek Coulomba-Mohra.
- Krawędzie boczne modelu miały swobodę przemieszczania się wzdłuż osi pionowej, a punkty na krawędzi dolnej miały skrępowaną możliwość przemieszczania się wzdłuż osi pionowej i poziomej.
- Założono, że spąg pokładu leży na głębokości $H=-800$ m. W celu uproszczenia modelu przyłożono składową pionową σ_v równą 10MPa do górnej krawędzi modelu.
- W modelu założono, że płaszczyzny osłabienia – pęknięcia o rozwartości (szerokości) $d_w=0.0$ m biegną pod kątem $\delta=90^\circ$ do warstw skalnych i poziomo ($\delta=0^\circ$), oddzielając poszczególne warstwy.
- Odległość pomiędzy pęknięciami pionowymi d_v jest różna, od 2.0 do 144.0m.
- Samym blokom nadano cechy materiałów odkształcalnych.

6. Numeryczna symulacja eksploatacji prowadzonej systemem ścianowym dla górotworu o strukturze blokowej

Schematy modelu

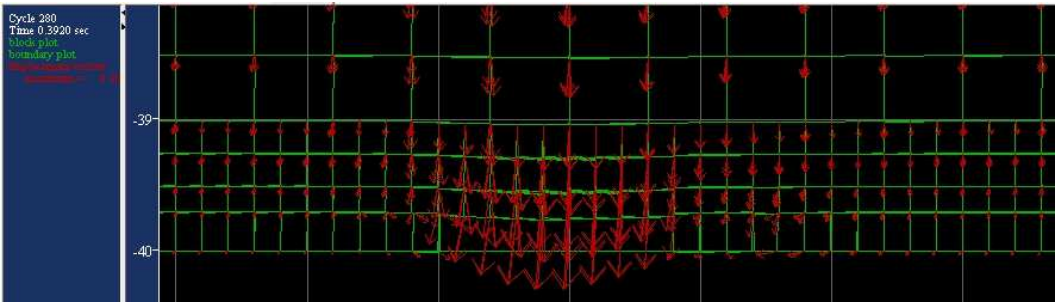
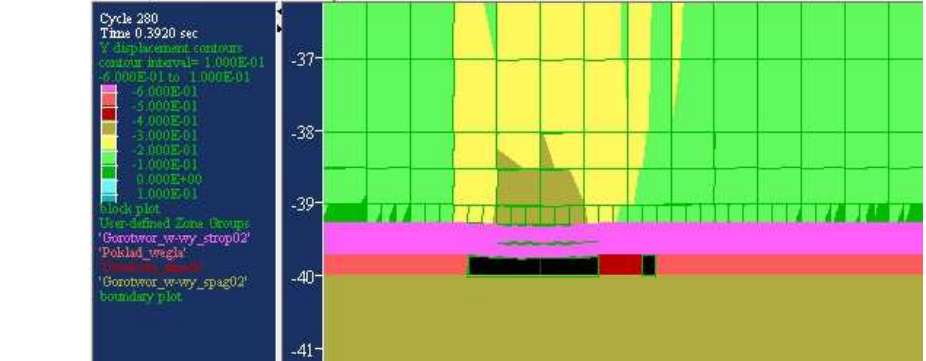
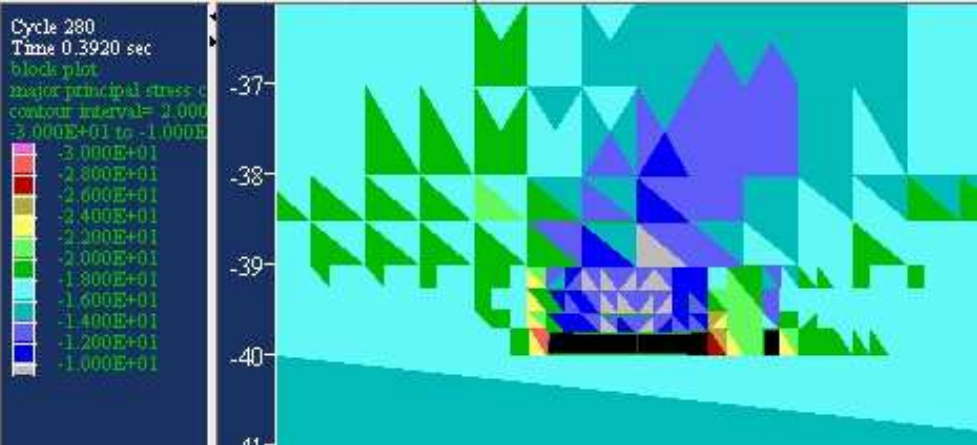
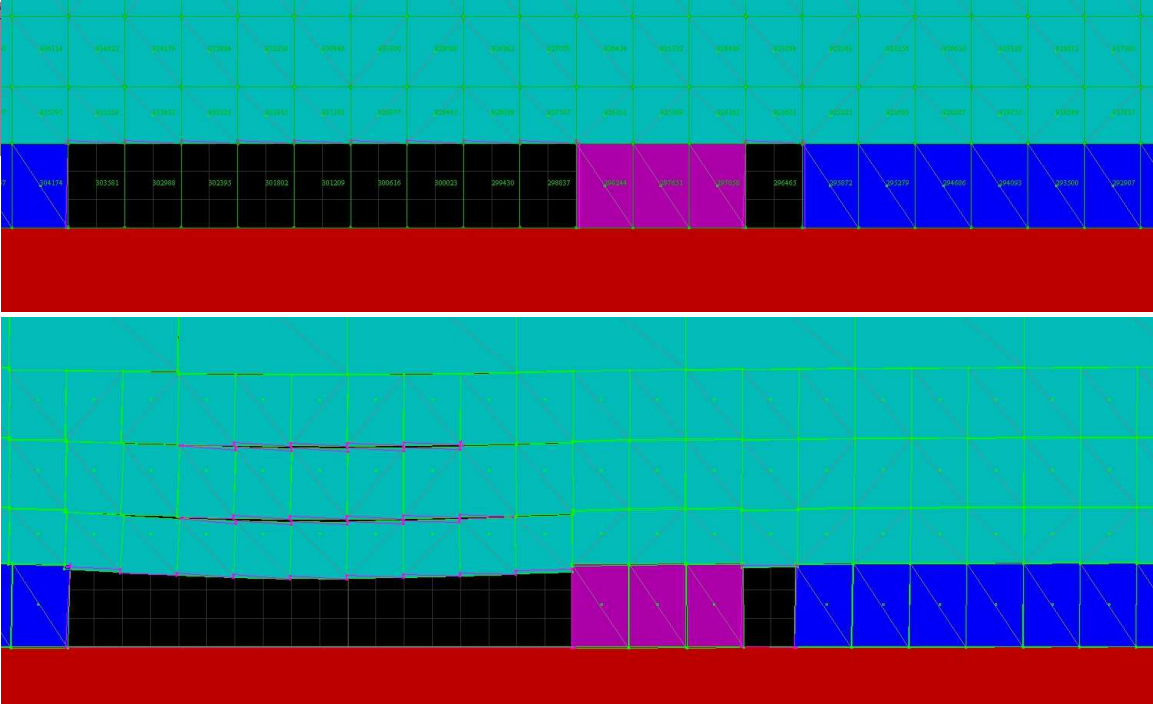


1978616	1977001	1973500	1973885	1973384	1979769	1969268	1967833	1966150	1964339	6601																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1976293	1976678	1973177	1973562	1972061	1970446	1968943	1967530	1965829	1964324	6392																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1975970	1976353	1974834	1973239	1971738	1970123	1968622	1967007	1965306	1963801	6183																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1975647	1976032	1974513	1972916	1971415	1969800	1968299	1966684	1965183	1963678	5974																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1975320	1975709	1974094	1972593	1971092	1969477	1967962	1966351	1964846	1963345	5765																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1963002	1961610	1959028	1957734	1956442	1955150	1953858	1952566	1951274	1949982	1948690	1947398	1946106	1944814	1943522	1942230	1940938	1939646	1938354	1937062	1935770	1934478	1933186	1931894	1930602	1929310	1928018	1926726	1925434	1924142	1922850	1921558	1920266	1918974	1917682	1916390	1915098	1913806	1912514	1911222	1909930	1908638	1907346	1906054	1904762	1903470	1902178	1900886	1899594	1898302	1897010	1895718	1894426	1893134	1891842	1890550	1889258	1887966	1886674	1885382	1884090	1882798	1881506	1880214	1878922	1877630	1876338	1875046	1873754	1872462	1871170	1869878	1868586	1867294	1866002	1864710	1863418	1862126	1860834	1859542	1858250	1856958	1855666	1854374	1853082	1851790	1850498	1849206	1847914	1846622	1845330	1844038	1842746	1841454	1840162	1838870	1837578	1836286	1834994	1833702	1832410	1831118	1829826	1828534	1827242	1825950	1824658	1823366	1822074	1820782	1819490	1818198	1816906	1815614	1814322	1813030	1811738	1810446	1809154	1807862	1806570	1805278	1803986	1802694	1801402	1800110	1798818	1797526	1796234	1794942	1793650	1792358	1791066	1789774	1788482	1787190	1785898	1784606	1783314	1782022	1780730	1779438	1778146	1776854	1775562	1774270	1772978	1771686	1770394	1769102	1767810	1766518	1765226	1763934	1762642	1761350	1760058	1758766	1757474	1756182	1754890	1753598	1752306	1751014	1749722	1748430	1747138	1745846	1744554	1743262	1741970	1740678	1739386	1738094	1736802	1735510	1734218	1732926	1731634	1730342	1729050	1727758	1726466	1725174	1723882	1722590	1721298	1720006	1718714	1717422	1716130	1714838	1713546	1712254	1710962	1709670	1708378	1707086	1705794	1704502	1703210	1701918	1700626	1699334	1698042	1696750	1695458	1694166	1692874	1691582	1690290	1689000	1687708	1686416	1685124	1683832	1682540	1681248	1680000	1678708	1677416	1676124	1674832	1673540	1672248	1670956	1669664	1668372	1667080	1665788	1664496	1663204	1661912	1660620	1659328	1658036	1656744	1655452	1654160	1652868	1651576	1650284	1648992	1647700	1646408	1645116	1643824	1642532	1641240	1639948	1638656	1637364	1636072	1634780	1633488	1632196	1630904	1629612	1628320	1627028	1625736	1624444	1623152	1621860	1620568	1619276	1617984	1616692	1615400	1614108	1612816	1611524	1610232	1608940	1607648	1606356	1605064	1603772	1602480	1601188	1600000	1598708	1597416	1596124	1594832	1593540	1592248	1590956	1589664	1588372	1587080	1585788	1584496	1583204	1581912	1580620	1579328	1578036	1576744	1575452	1574160	1572868	1571576	1570284	1568992	1567700	1566408	1565116	1563824	1562532	1561240	1559948	1558656	1557364	1556072	1554780	1553488	1552196	1550904	1549612	1548320	1547028	1545736	1544444	1543152	1541860	1540568	1539276	1537984	1536692	1535400	1534108	1532816	1531524	1530232	1528940	1527648	1526356	1525064	1523772	1522480	1521188	1519896	1518604	1517312	1516020	1514728	1513436	1512144	1510852	1509560	1508268	1506976	1505684	1504392	1503100	1501808	1500516	1499224	1497932	1496640	1495348	1494056	1492764	1491472	1490180	1488888	1487596	1486304	1485012	1483720	1482428	1481136	1479844	1478552	1477260	1475968	1474676	1473384	1472092	1470800	1469508	1468216	1466924	1465632	1464340	1463048	1461756	1460464	1459172	1457880	1456588	1455296	1454004	1452712	1451420	1450128	1448836	1447544	1446252	1444960	1443668	1442376	1441084	1439792	1438500	1437208	1435916	1434624	1433332	1432040	1430748	1429456	1428164	1426872	1425580	1424288	1422996	1421704	1420412	1419120	1417828	1416536	1415244	1413952	1412660	1411368	1410076	1408784	1407492	1406200	1404908	1403616	1402324	1401032	1399740	1398448	1397156	1395864	1394572	1393280	1391988	1390696	1389404	1388112	1386820	1385528	1384236	1382944	1381652	1380360	1379068	1377776	1376484	1375192	1373900	1372608	1371316	1370024	1368732	1367440	1366148	1364856	1363564	1362272	1360980	1359688	1358396	1357104	1355812	1354520	1353228	1351936	1350644	1349352	1348060	1346768	1345476	1344184	1342892	1341600	1340308	1339016	1337724	1336432	1335140	1333848	1332556	1331264	1329972	1328680	1327388	1326096	1324804	1323512	1322220	1320928	1319636	1318344	1317052	1315760	1314468	1313176	1311884	1310592	1309300	1308008	1306716	1305424	1304132	1302840	1301548	1300256	1298964	1297672	1296380	1295088	1293796	1292504	1291212	1289920	1288628	1287336	1286044	1284752	1283460	1282168	1280876	1279584	1278292	1277000	1275708	1274416	1273124	1271832	1270540	1269248	1267956	1266664	1265372	1264080	1262788	1261496	1260204	1258912	1257620	1256328	1255036	1253744	1252452	1251160	1249868	1248576	1247284	1245992	1244700	1243408	1242116	1240824	1239532	1238240	1236948	1235656	1234364	1233072	1231780	1230488	1229196	1227904	1226612	1225320	1224028	1222736	1221444	1220152	1218860	1217568	1216276	1214984	1213692	1212400	1211108	1209816	1208524	1207232	1205940	1204648	1203356	1202064	1200772	1199480	1198188	1196896	1195604	1194312	1193020	1191728	1190436	1189144	1187852	1186560	1185268	1183976	1182684	1181392	1180100	1178808	1177516	1176224	1174932	1173640	1172348	1171056	1169764	1168472	1167180	1165888	1164596	1163304	1162012	1160720	1159428	1158136	1156844	1155552	1154260	1152968	1151676	1150384	1149092	1147800	1146508	1145216	1143924	1142632	1141340	1140048	1138756	1137464	1136172	1134880	1133588	1132296	1131004	1129712	1128420	1127128	1125836	1124544	1123252	1121960	1120668	1119376	1118084	1116792	1115500	1114208	1112916	1111624	1110332	1109040	1107748	1106456	1105164	1103872	1102580	1101288	1100000	1098708	1097416	1096124	1094832	1093540	1092248	1090956	1089664	1088372	1087080	1085788	1084496	1083204	1081912	1080620	1079328	1078036	1076744	1075452	1074160	1072868	1071576	1070284	1068992	1067700	1066408	1065116	1063824	1062532	1061240	1059948	1058656	1057364	1056072	1054780	1053488	1052196	1050904	1049612	1048320	1047028	1045736	1044444	1043152	1041860	1040568	1039276	1037984	1036692	1035400	1034108	1032816	1031524	1030232	1028940	1027648	1026356	1025064	1023772	1022480	1021188	1019896	1018604	1017312	1016020	1014728	1013436	1012144	1010852	1009560	1008268	1006976	1005684	1004392	1003100	1001808	1000516	999224	997932	996640	995348	994056	992764	991472	990180	988888	987596	986304	985012	983720	982428	981136	979844	978552	977260	975968	974676	973384	972092	970800	969508	968216	966924	965632	964340	963048	961756	960464	959172	957880	956588	955296	954004	952712	951420	950128	948836	947544	946252	944960	943668	942376	941084	939792	938500	937208	935916	934624	933332	932040	930748	929456	928164	926872	925580	924288	922996	921704	920412	919120	917828	916536	915244	913952	912660	911368	910076	908784	907492	906200	904908	903616	902324	901032	899740	898448	897156	895864	894572	893280	891988	890696	889404	888112	886820	885528	884236	882944	881652	880360	879068	877776	876484	875192	873900	872608	871316	870024	868732	867440	866148	864856	863564	862272	860980	859688	858396	857104	855812	854520	853228	851936	850644	849352	848060	846768	845476	844184	842892	841600	840308	839016	837724	836432	835140	833848	832556	831264	830000	828708	827416	826124	824832	823540	822248	820956	819664	818372	817080	815788	814496	813204	811912	810620	809328	808036	806744	805452	804160	802868	801576	800284	798992	797700	796408	795116	793824	792532	791240	789948	788656	787364	786072	784780	783488	782196	780904	779612	778320	777028	775736	774444	773152	771860	770568	769276	767984	766692	765400	764108	762816	761524	760232	758940	757648	756356	755064	753772	752480	751188	749896	748604	747312	746020	744728	743436	742144	740852	739560

6. Numeryczna symulacja eksploatacji prowadzonej systemem ścianowym dla górotworu o strukturze blokowej

Wybieg ściany $L=25\text{m}$.

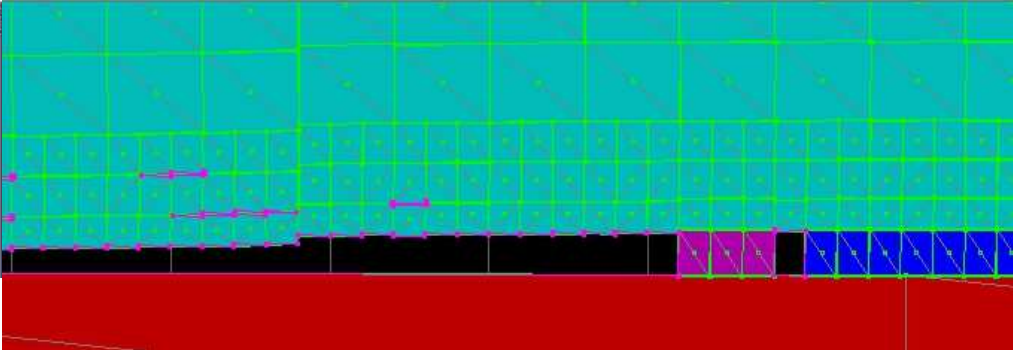
Projektmodel_gull.plt
Tab: Simulation
Zone materials:
Wypni (1500)
Wypni_sposob_p2
Wypni_poglow_z1
Zones (15076)
Block boundary (2330)
X & Y Boundary cond
0 - Free
S - Stress (free)
M - Magnitude
F - Fixed Velocity



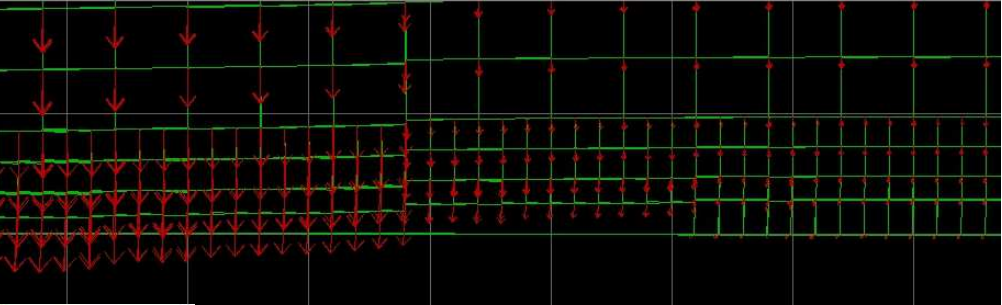
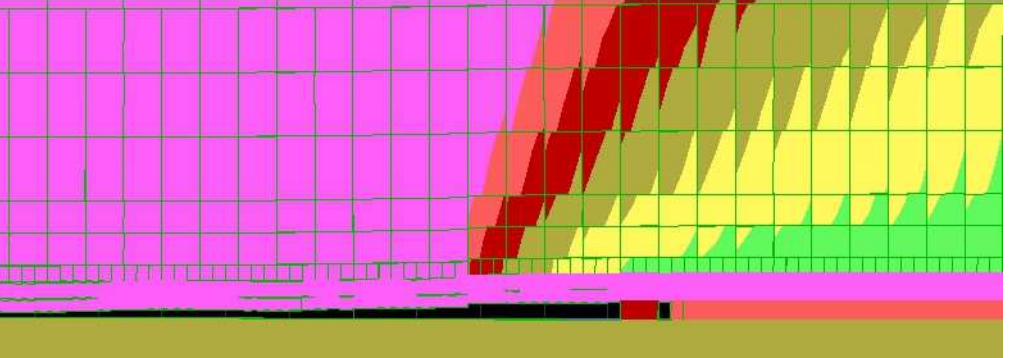
6. Numeryczna symulacja eksploatacji prowadzonej systemem ścianowym dla górotworu o strukturze blokowej

Wybieg ściany $L=250\text{m}$.

```
Project: model_full.prj
Title: Simulation
-----
Zone materials:
  Wągiel (1500)
  Wwy_stropowe_gr2
  Wwy_spagowe_gr1
Zones (12678)
Block boundary (5350)
Preservation boundaries
X & Y Boundary condit
  O - Free
  S - Stress (force)
  F - Fixed Velocity
  F - Fixed Velocity
```

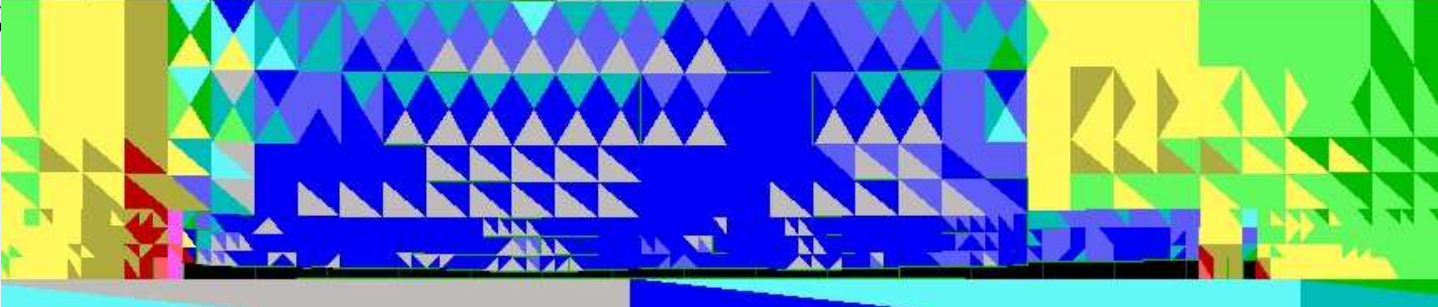


```
Cycle 1270
Time 1.7862 sec
Y displacement contour
contour interval= 7.500E-02
-6.000E-01
-3.250E-01
-4.500E-01
-3.750E-01
-3.000E-01
-2.250E-01
-1.500E-01
-7.500E-02
0.000E+00
7.500E-02
block plot
User-defined Zone Groups
'Górotwór wwy_strop02'
'Pokład_wągiel'
'Górotwór wwy_spag02'
boundary plot
```



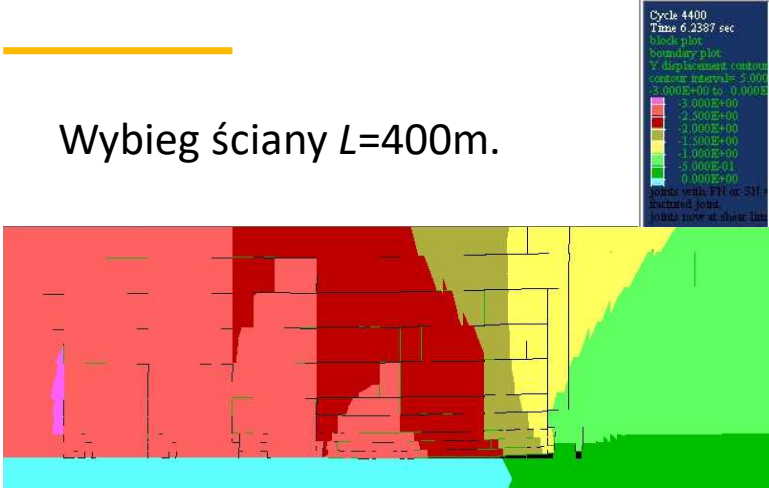
```
Cycle 1270
Time 1.7862 sec
block plot
boundary plot
'Górotwór wwy_strop02'
'Pokład_wągiel'
'Górotwór wwy_spag02'
```

```
Cycle 1270
Time 1.7862 sec
block plot
major principal stress
contour interval= 2.000E+01
-3.000E+01 to -1.000E+01
-3.000E+01
-2.800E+01
-2.600E+01
-2.400E+01
-2.200E+01
-2.000E+01
-1.800E+01
-1.600E+01
-1.400E+01
-1.200E+01
-1.000E+01
```



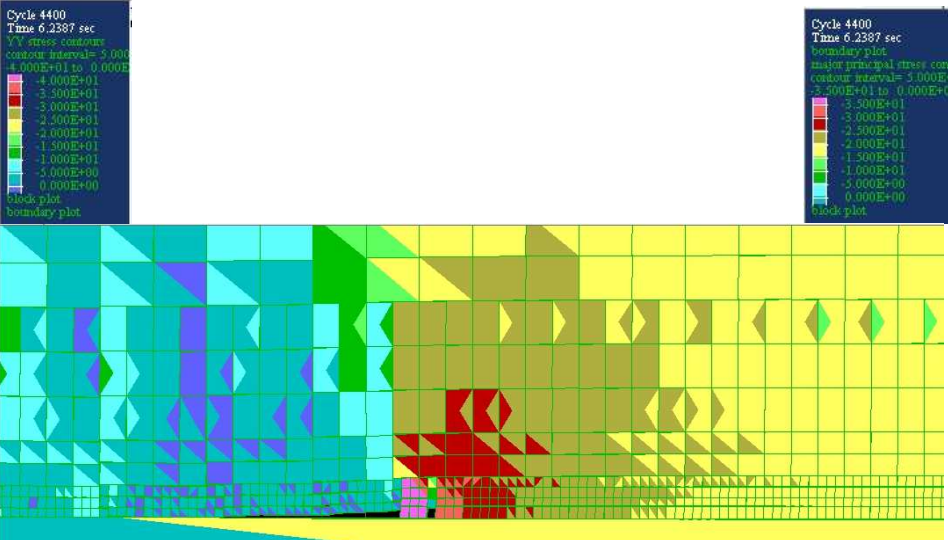
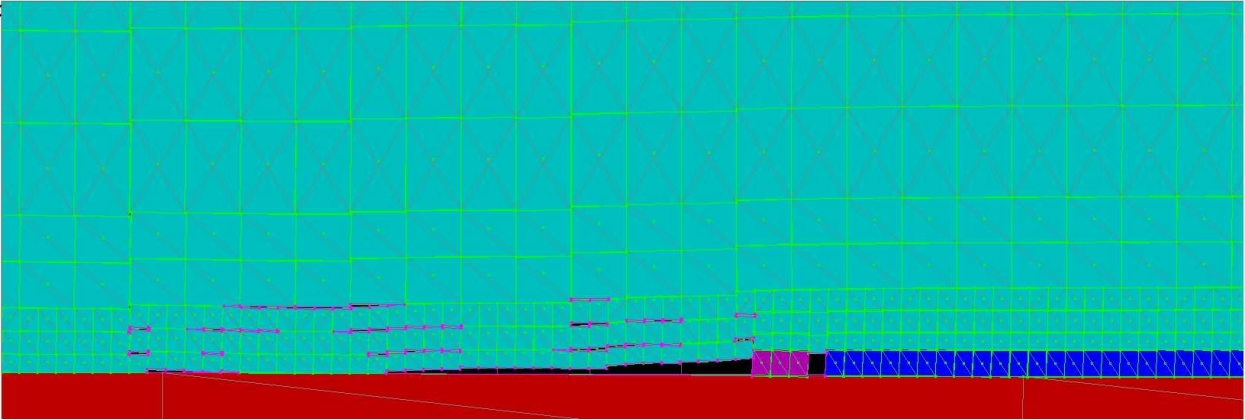
6. Numeryczna symulacja eksploatacji prowadzonej systemem ścianowym dla górotworu o strukturze blokowej

Wybieg ściany L=400m.



Project model fill.ppt
Title: Simulation

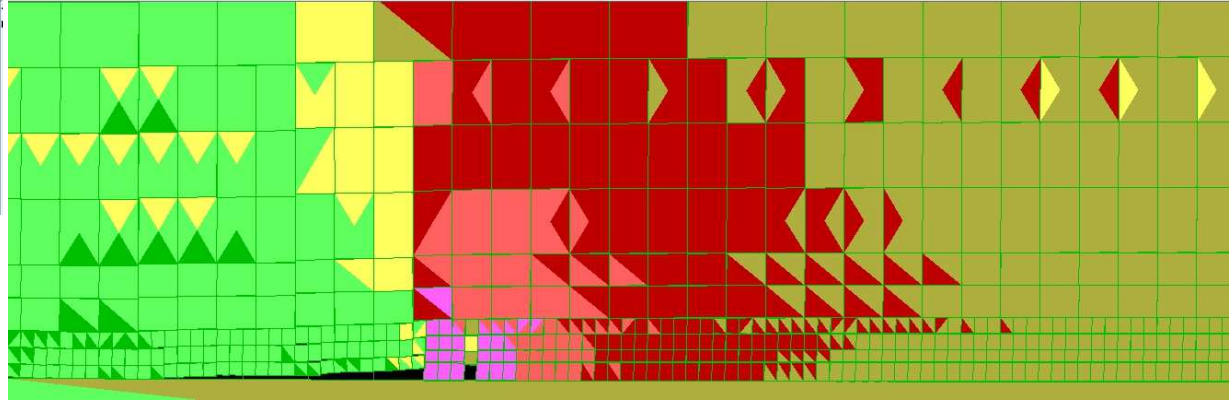
Zone materials:
Węgiel (1500)
Wąwy stropowe_gr2
Wąwy spągowe_gr1.0
Zones (12678)
Block boundary (53350)
Excavation boundaries
X & Y Boundary condit
O - Free
S - Stress (force)
N - Nodology Scales
V - Velocity
F - Fixed Velocity



Cycle 4400
Time 6.2387 sec
major principal stress cont
contour interval= 2.000E+00
3.500E+01 to 0.000E+00

- 3.500E+01
- 3.000E+01
- 2.500E+01
- 2.000E+01
- 1.500E+01
- 1.000E+01
- 5.000E+00
- 0.000E+00

block plot



7. Podsumowanie i wnioski końcowe.

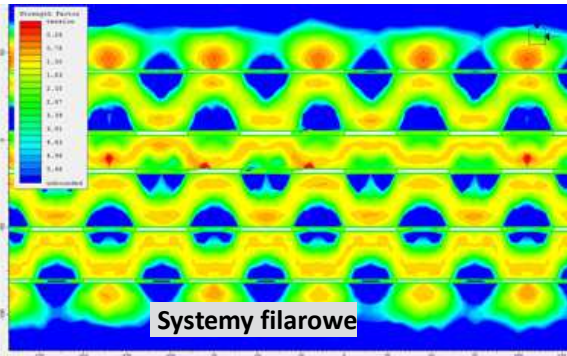
Przedstawiono wybrane wyniki symulacji zachowania się spękanego masywu skalnego w rejonie wyrobiska ścianowego. Użyto programu opartego na Metodzie Elementów Odrębnych (DEM, *Distinct Element Method*) UDEC (*Universal Distinct Element Code*, Itasca C.G.). Zamodelowano płaski model fragmentu górotworu o wymiarach 1500m×500m ($w \times h$). Nad pokładem węgla leżącym na głębokości $h_z = -800\text{m}$ i o miąższości $h_c = 3,0\text{m}$ zamodelowano warstwy stropowe, a pod - spągowe. Zamodelowano pionowe i poziome sieci spękań w warstwach spągowych, stropowych i w pokładzie węgla. Wyrobisko ścianowe było zabezpieczone obudową. Eksploatacja była prowadzona etapami, a jej całkowity wybieg $L = 400\text{m}$.

Uzyskano poprawny, tzn. zgodny z rozwiązaniami analitycznymi rozkład i wielkość naprężeń oraz przemieszczeń. W odróżnieniu od analiz numerycznych, opartych na MES uzyskano *rzeczywisty* obraz strefy zawałowej. Bloki opadały w dół, w wybraną przestrzeń, a następnie zawał ulegał uszczelnianiu. Cechy programu UDEC czynią go dobrym uzupełnieniem istniejących rozwiązań analitycznych i systemów modelowania numerycznego, opartych np. na Metodzie Elementów Skończonych.

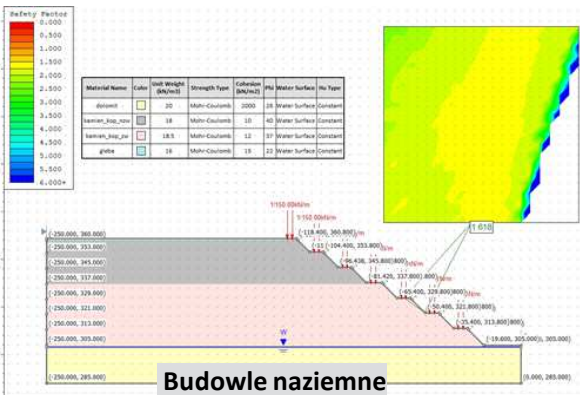
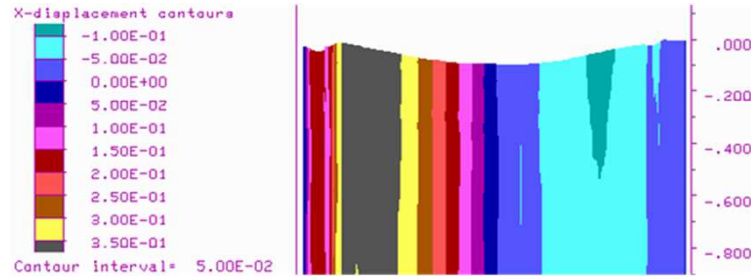
Narzędzie to mogłoby być wykorzystane, np. w obliczeniach obciążenia obudowy zmechanizowanej wynikającego z tworzenia się strefy zniszczenia w warstwach stropowych, lub odpajania się węgla w czole ściany w wyniku oddziaływania organu urabiającego.

6. Literatura i materiały źródłowe (wybór)

1. Biliński A.: Przejawy ciśnienia górotworu w polach eksploatacji ścianowej w pokładach węgla, ZN nr 221, s. Górnictwo z. 31, Politechnika Śląska, Gliwice (1968)
2. Borecki M. i Chudek M.: Mechanika Górotworu. Skr. Uczel. nr 208, Pol. Śl., Gliwice (1968, 1973)
3. Fayol M.: Sur Bul. de la Société de l'industrie minière, II série, Tome 14, p. 818 (1885)
4. Hoek E. and Brown E.T.: Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035 (1980)
5. Hoek, E. and Brown, E.T.: The Hoek-Brown failure criterion and GSI e2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 1-19 (2018)
6. Hoek E. and Corkum B.: Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Conference Paper, January 2002
7. Itasca Consulting Group, Inc., PFC2D, PFC3D, UDEC, 3DEC (Manuals and articles) 1997-2004
8. Kłeczek Z.: Geomechanika Górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994
9. Konopko W.: Przegląd Górniczy, Miesięcznik Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa, Nr 2(1095), Tom 70 (LXX), pp. 1÷11 (2014)
10. Kwaśniewski M. i Wang J.-A.: Analiza numeryczna stanu przemieszczenia w otoczeniu wyrobiska ścianowego w górotworze spękanym. Numerical analysis of the state of displacement in the vicinity of the longwall face in a cracked rock mass. Prace IGbPiOP Politechniki Śląskiej, PC nr 231/CS6-9/92-94136s., Gliwice 1994
11. Kwaśniewski M.: Modelowanie numeryczne i badanie zachowania się górotworu o budowie warstwowo-blokowej w sąsiedztwie wyrobisk górniczych. Numerical modeling and study of the behaviour of a rock mass with a layer-block structure in the vicinity of mining excavations. Prace KGBPiOP Politechniki Śląskiej, BW-490/RG-4/96
12. Kwaśniewski M.: Modelowanie numeryczne górotworu o budowie warstwowo-blokowej i badanie deformacji nieciągłych towarzyszących eksploatacji ścianowej prowadzonej z zawalem stropu. Numerical modeling of a rock mass with a layered-block structure and the study of discontinuous deformations resulting from longwall exploitation with roof caving. XXII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Karpacz, marzec 1999
13. Kwaśniewski M. and Lasek S.: Numerical analysis of methane migration from floor strata to a longwall face. Journal of Coal Science and Engineering (China), Vol. 15, Is. 2, pp. 113÷119 (2009)
14. Kwaśniewski M. i Tomiczek K.: Uproszczona symulacja eksploatacji pokładu z zawalem warstw stropowych za pomocą programu UDEC (v. 1.83, edukacyjna). Mechanika górotworu - zajęcia projektowe. Simplified simulation of the lonwall of the seam with caved roof layers using the UDEC code (v. 1.83, educational). Rock mass mechanics - project classes with sudents.KGBPiOP, WGiG, Gliwice 1998
15. Majcherczyk T., Szaszenko A. i Sdwiżkowa E.: Podstawy geomechaniki. UWND AGH, Kraków 2006
16. Pinińska J.: Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i maszywów skalnych. Engineering-geological valuation systems for rock and rock massif classification. Prz. Geol., 49: 804-814 (2001)
17. Ruppenajt K.V.: Nekotoryje woprosy mechaniki gornych porod. Ugletechnizdat, Moskwa 1954
18. Sałustowicz A.: Mechanika górotworu. Cz. 1. Mechanika górotworu. Górnictwo t. III, Wydawnictwo Górnictwo-Hutnicze, Katowice 1955
19. Smolnik G.: Analiza numeryczna metodą elementów odrębnych deformacji powierzchni terenu wywołanych eksploatacją ścianową. Numerical analysis using the Distinct Element Method of land surface deformation under longwall mining. Materiały XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu „Geotechnika i budownictwo specjalne 2004”, t. II., Kraków, Wydawnictwo Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH 2004, 1023–1033
20. Smolnik G.: Właściwości procesu osiadania terenu górniczego w czasie. Properties of the mining area subsidence phenomena in time. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, 288 s., Gliwice 2008
21. Tomiczek K.: Modeling of sandstone rock samples using PFC2D code. In: Numerical modeling in micromechanics via particle methods, Proc. of the 1st International PFC Symposium, Gelsenkirchen, Germany, 6-8 November 2002. Ed. by Heinz Konietzky. Lisse : Balkema, pp. 233-239 (2003)
22. Tomiczek K.: Numeryczna symulacja próby jednoosiowego ściskania przestrzennego modelu próbki skalnej. Numerical simulation of the uniaxial compression test of a 3D model of a rock sample. Prace Naukowe Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, BW- 472/RG - 4/2007, Gliwice 2007
23. Tomiczek K.: Numeryczna analiza wpływu własności skał stropowych na możliwości ograniczenia ich opadu w wyrobisku ścianowym. Numerical analysis of the influence of roof layers properties on the possibilities of the rockfall reduction in the longwall working space. Syst. Wspomag. Inż. Prod. 2017 vol. 6 iss. 3, s. 274-284, 2017
24. Tomiczek K.: A note on the application of the distinct element method (DEM) to geomechanics. In monograph: Resources and resource-saving technologies in mineral mining and processing, Petrosani: Universitas Publishing, pp. 128÷149, Romania 2018
25. Tomiczek K.: Numeryczna analiza zachowania się nieciągłego masywu skalnego w sąsiedztwie czoła wyrobiska ścianowego przy zastosowaniu programu opartego na Metodzie Elementów Odrębnych (MEO) w kontekście rozwiązań analitycznych teorii ugięcia belki na podłożu sprężystym i teorii fali ciśnień. A brief analysis of behaviour possibility of a joined rock mass near to longwall excavation face simulation using Distinct Elements Method (DEM) in the context of the Beam on Elastic Foundation (BEF) theory. In: 5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining, Kraków, Poland, January 17-18, 2019, Pilecka, Tatara and Kogut Eds., Les Ulis: EDP Sciences, pp. 1-11, ref. 17, E3S Web of Conferences ; vol. 106 2267-1242



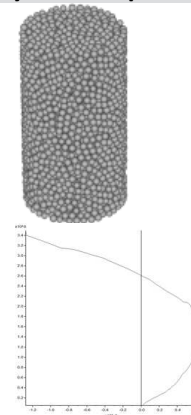
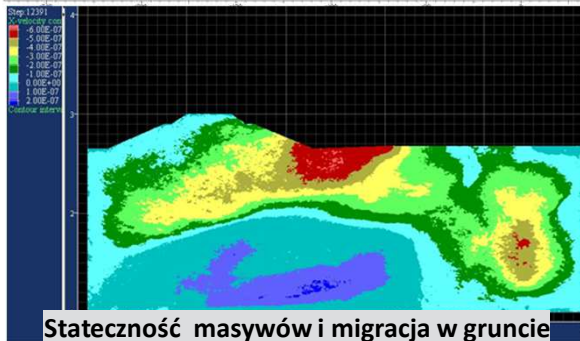
Dziękuję za uwagę!



Numeryczne symulacje badań laboratoryjnych zachowania się maszywów skalnych pod wpływem eksploatacji



Własności skał, gruntów i materiałów ziarnistych



Numeryczne symulacje badań laboratoryjnych



All Rights Reserved ©

