



Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią  
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 97, s. 145–162

Zbigniew BURTAN\*, Dariusz CHLEBOWSKI\*, Jerzy CIEŚLIK\*, Andrzej ZORYCHTA\*\*

## **Analiza parametrów sejsmiczności indukowanej górotworu w rejonach eksploatacyjnych O/ZG Rudna**

Streszczenie: Aktualny poziom zagrożenia tąpnięciami w kopalniach LGOM jest konsekwencją towarzyszącej robotom górniczym sejsmiczności górotworu, a większość dotychczas odnotowanych tąpnięć i odprężeń była spowodowana wstrząsami o najwyższych energiach. Z analizy aktywności sejsmicznej odnotowanej w ostatnich latach wynika, że spośród tych kopalń sejsmicznie najbardziej aktywną jest O/ZG Rudna.

Artykuł zawiera ocenę kształtowania się sejsmiczności górotworu w O/ZG Rudna w latach 2006–2015 w całym obszarze kopalni oraz jej poszczególnych rejonach. W ramach parametrów sejsmiczności analizą objęto liczbę rejestrowanych zjawisk, łączną wartość emisji energii oraz wskaźnik jednostkowego wydatku energetycznego. Przeanalizowano także zmienność współczynników rozkładu Gutenberga-Richtera oraz odniesiono się do lokalizacji epicentrow ognisk względem frontu eksploatacyjnego, wyodrębniając nisko- ( $10^3 \leq A_s < 10^5 \text{J}$ ) i wysokoenergetyczne ( $A_s \geq 10^5 \text{J}$ ) wstrząsy usytuowane przed frontem, w rejonie robót rozczinkowych oraz w zrobach.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że zagrożenie wysokoenergetycznymi wstrząsami w kopalni Rudna utrzymuje się na wysokim, porównywalnym w kolejnych latach poziomie, a zróżnicowana aktywność w wydzielonych rejonach może być między innymi funkcją zmiennej wysokości furty eksploatacyjnej oraz miąższości wstrząsogennych warstw węglanowych zalegających w stropie złoża. Analiza rozmieszczenia ognisk wstrząsów względem frontu eksploatacyjnego wskazuje, że niezależnie od wielkości energii sejsmicznej zdecydowanie najwięcej wstrząsów lokalizuje się w strefie robót rozczinkowych. W następnej kolejności wstrząsy niskoenergetyczne lokalizują się w obszarach zrobowych, a wstrząsy wysokoenergetyczne – przed frontem eksploatacji. Tym samym przedstawiona ocena kształtowania się aktywności sejsmicznej w O/ZG Rudna potwierdza związek ilości rejestrowanych wstrząsów oraz wielkości generowanej energii sejsmicznej z określonymi cechami lokalnych uwarunkowań geologiczno-górnich, w tym elementami stosowanych systemów komorowo-filarowych.

Słowa kluczowe: górnictwo podziemne, eksploatacja rud miedzi, zagrożenie sejsmiczne

\* Dr hab. inż., \*\* Prof. dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: burtan@agh.edu.pl

## **The analysis of induced seismicity of the rock strata in the stope regions in the Rudna mine**

**Abstract:** The current rockburst hazard conditions in the copper mines are the consequence of mining-induced seismicity of the rock strata whilst the majority of registered rockbursts have been caused by high-energy seismic events. The analysis of seismic activity in recent years indicates that the region of the Rudna mine is the region of the highest seismic activity.

This paper is an attempt at evaluating the seismicity levels in the Rudna mine in the period from 2006-2015, within the entire mine and in its particular sections. Key parameters of seismic activity include the number of registered seismic events, total energy emission levels, and a unit energy factor. The variability of Gutenberg-Richter (GR) parameters are analyzed and the epicenters' locations are investigated with respect to the stope position. The distinction is made between low-energy ( $10^3 \leq A_s < 10^5$  J) and high-energy ( $A_s \geq 10^5$  J) seismic events ahead of the stope, in the opening-up cross-throughs and in the gob areas.

It appears that the risk level of a high-energy event occurrence in the Rudna mine has not changed in recent years and has remained on a high level whilst the differences in seismic activity, in particular mine sections, are attributed to the varied extraction height and varied thickness of rockburst-prone carbonate layers in the roof of the copper ore deposit. The analysis of the epicenters' locations with respect to the stope reveals that no matter what the seismic energy levels, the largest number of rockbursts are registered in the opening-up cross-through zone. Low-energy tremors are mostly located in the gob areas, high-energy events occur mostly ahead of the stope. Thus, the evaluation of the seismicity conditions in the Rudna mine seems to positively verify the relationship between the number of registered events and the levels of generated seismic energy, taking the local geological and mining conditions and the specificity of the room and pillar mining method into account

**Keywords:** underground mining, copper mining, seismic hazard

### **Wprowadzenie**

Głównym zagrożeniem w polskim górnictwie rud miedzi jest zagrożenie wstrząsami i tąpnięciami. Odnotowane dotychczas w kopalniach LGOM tąpnięcia były konsekwencją wysokoenergetycznych wstrząsów, a aktualny poziom zagrożenia tąpnięciami wynika z towarzyszącej robotom górniczym sejsmiczności górotworu (Materiały... 2006–2015). Decydujące o wielkości zagrożenia tąpnięciami wysokoenergetyczne wstrząsy są genetyczną właściwością złoża rud miedzi kopalń LGOM, wynikającą z występowania nad eksploatowanym złożem wstrząsogennych utworów skalnych (Butra i in. 2009; Chlebowski 2011), jak też z okresowego uaktywniania się zaburzeń uskokowych (Goszcz 2004; Burtan 2011), zaś prowadzona eksploatacja sprzyja ujawnianiu się tych cech ośrodka skalnego (Zorychta i in. 2005). Biorąc pod uwagę jednoznaczny związek między zdarzeniem sejsmicznym a możliwością wystąpienia tąpnięcia, oczywistym jest, że poziom zagrożenia sejsmicznego jednoznacznie przekłada się na wielkość zagrożenia tąpnięciami.

Z analizy aktywności sejsmicznej odnotowanej w ostatnich latach w obszarze LGOM wynika, że sejsmicznie najbardziej aktywną kopalnią jest O/ZG Rudna. Taki stan rzeczy jest rezultatem zarówno uwarunkowań naturalnych, których wyrazem jest przede wszystkim duża głębokość eksploatacji, grubowarstwowa budowa górotworu i występowanie zaburzeń tektonicznych, jak też konieczność wybierania parcel w rejonach o znacznym stopniu zaangażowania górniczego.

## 1. Możliwości pomiarowe kopalnianego systemu sejsmicznego

Kopalniana stacja geofizyki górniczej usytuowana jest na terenie O/ZG Rudna w rejonie Rudna Główna (Dębowski i in 2016). Pomiary aktywności sejsmicznej górotworu realizowane są za pomocą kopalnianego systemu sejsmicznego, służącego do prowadzenia obserwacji górotworu w paśmie częstotliwościowym (do 150Hz). Na dole kopalni, na poziomie złoże zbudowano specjalne komory, w których zainstalowane zostały czujniki (sejsmometry) do pomiaru prędkości drgań górotworu. Transmisja sygnałów na powierzchnię odbywa się teletechniczną siecią kablową za pomocą modulacji częstotliwościowej. Sygnały sejsmiczne zostają następnie zdemodulowane i przesłane do odpowiedniego przetwornika, by w efekcie poddać je wstępnemu przetwarzaniu realizowanemu z wykorzystaniem sprzężonych komputerów przemysłowych. Proces rejestracji sygnałów sejsmicznych nadzoruje dedykowane oprogramowanie sterujące, którego zadaniem jest kontrola działania systemu, detekcja wstrząsów, rejestracja zjawisk sejsmicznych, wizualizacja pracy poszczególnych kanałów sejsmicznych oraz przesyłanie danych do analizatora sejsmicznego.

System rejestracji drgań i sejsmiczności górotworu wykorzystuje 32 kanały sejsmiczne do lokalizacji wstrząsów. Obejmują one cały obszar eksploatowanego złoże, przy czym dodatkowo wybudowanych jest kilkanaście stanowisk rezerwowych, które w szczególnych przypadkach (awaria stanowiska, potrzeba rozszerzenia obszaru obserwacji) mogą stanowić uzupełnienie funkcjonującej sieci sejsmicznej. Stanowiska te w połączeniu z aparaturą sejsmiczną na powierzchni pozwalają na:

- rejonizację, wczytywanie i powiadamianie o wystąpieniu zdarzenia,
- lokalizację epicentrow (ognisk) wstrząsów o energii powyżej  $1,0\text{--}10^3$  J (z właściwą wizualizacją na mapach górniczych),
- określanie energii zjawisk sejsmicznych (na podstawie całki kwadratu amplitudy prędkości drgań gruntu oraz czasu trwania zjawiska),
- wstępną ocenę charakteru ogniska wstrząsu opartą na znakach pierwszych wejść fali P (podłużnej),
- automatyczne uzupełnianie bazy danych (wypisu) z parametrami charakteryzującymi odnotowane zjawiska sejsmiczne.

Dla poprawy dokładności wyznaczania składowej pionowej ognisk w szybach kopalnianych (około 450–700 m ponad złożem) zainstalowano dodatkowe stanowiska sejsmiczne, które wykorzystuje się do lokalizacji hipocentrow wstrząsów.

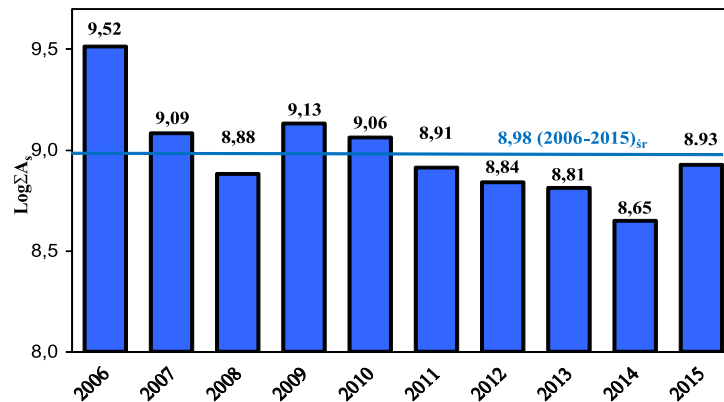
## 2. Kształtowanie się parametrów aktywności sejsmicznej w rejonach eksploatacyjnych

Do analizy aktywności sejsmicznej w O/ZG Rudna i porównania jej wielkości w kolejnych latach przyjęto okres 2006–2015 (Materiały... 2006–2015). Poziom tej aktywności wyrażony liczbą wstrząsów  $N$  dla poszczególnych klas energii ( $A_s > 10^3$  J)  $A_s$ , sumaryczną (łącznie) ilością wstrząsów i sumaryczną wielkością wyzwolonej energii sejsmicznej przedstawia tabela 1. Z kolei obraz kształtowania się wielkości sumarycznej energii sejsmicznej przypadającej na poszczególne lata rozpatrywanego okresu  $\Sigma A_s$  ilustruje rysunek 1.

TABELA 1. Poziom aktywności sejsmicznej w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

TABLE 1. Seismic activity in the Rudna mine over the years 2006–2015

Rok / $N / A_s$ [J]	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$	$\Sigma N$	$\Sigma A_s$ [J]
2006	1904	467	187	73	19	2	1	2 653	$3,28 \cdot 10^9$
2007	1760	543	229	87	21	2	–	2 642	$1,22 \cdot 10^9$
2008	1773	700	231	70	12	1	–	2 787	$7,65 \cdot 10^8$
2009	1528	598	214	78	33	1	–	2 452	$1,36 \cdot 10^9$
2010	1248	510	193	55	27	2	–	2 035	$1,16 \cdot 10^9$
2011	1454	629	212	70	23	–	–	2 388	$8,18 \cdot 10^8$
2012	1304	678	187	47	20	–	–	2 236	$6,95 \cdot 10^8$
2013	1639	730	200	57	10	1	–	2 637	$6,51 \cdot 10^8$
2014	1828	739	235	56	6	–	–	2 864	$4,45 \cdot 10^8$
2015	1674	722	232	55	3	2	–	2 688	$8,47 \cdot 10^8$
$(2006-2015)_{sr}$	1611	631,6	212	64,8	17,4	1,1	0,1	2538,1	$1,12 \cdot 10^9$



Rys. 1. Wykres sumarycznej energii sejsmicznej w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

Fig. 1. Distribution of total seismic energy in the Rudna mine over the years 2006–2015

Kształtowanie się aktywności sejsmicznej w obszarze górnictwa O/ZG Rudna rozpatrywano w odniesieniu do wielkości wydobycia, analizując następujące parametry:

- wartość wyemitowanej energii sejsmicznej odpowiadająca wydobyciu w całej kopalni w  $i$ -tym roku  $A_s^{(i)}$  [J],
- wskaźnik wydatku energetycznego  $J^{(i)}$ :

$$J^{(i)} = \frac{A_s^{(i)}}{W_w^{(i)}} \quad [\text{J/Mg}]$$

gdzie:

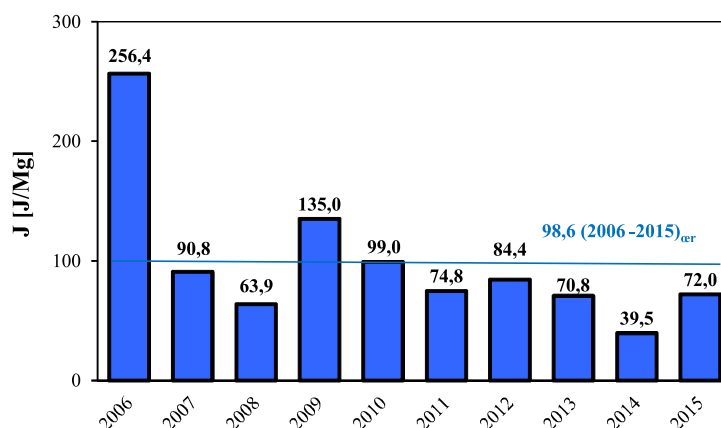
$W_w^{(i)}$  – wielkość wydobycia [Mg] w  $i$ -tym roku.

Wartości wskaźnika wydatku energetycznego  $J$  dla kopalni Rudna w poszczególnych latach (2006–2015) wraz z uśrednionym wydatkiem dla tego okresu  $J_{sr}^{2006-2015}$  zestawiono w tabeli 2, a porównanie tych wartości ilustruje rysunek 2.

TABELA 2. Wartości wskaźnika wydatku energetycznego w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

TABLE 2. Energy factor in the Rudna mine over the years 2006–2015

Okres	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
$J$ [J/Mg]	256,4	90,8	63,9	135,0	99,0	84,8	86,7	70,9	39,5	72,0
$J_{sr}$ (2006–2015) [J/Mg]						98,6				



Rys. 2. Wykres wskaźnika wydatku energetycznego w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

Fig. 2. Distribution of the energy factor in the Rudna mine over the years 2006–2015

Z zaprezentowanych danych wynika, że w kopalni Rudna w latach 2006–2015 utrzymywał się wysoki, porównywalny w ostatnich latach, poziom zagrożenia wstrząsami utożsamiany z wielkością wszystkich analizowanych parametrów sejsmiczności indukowanej, przy czym wartościami ponadprzeciętnymi charakteryzują się kolejno lata:

- 2014, 2008 i 2015 z punktu widzenia ilości całej populacji notowanych zjawisk (tab. 1),
- 2006, 2009 i 2007 (2010) z punktu widzenia łącznej emisji energii z górotworu (tab. 1, rys. 1),
- 2006, 2009 i 2010 z punktu widzenia wskaźnika sumarycznego wydatku energetycznego (tab. 2, rys. 2).

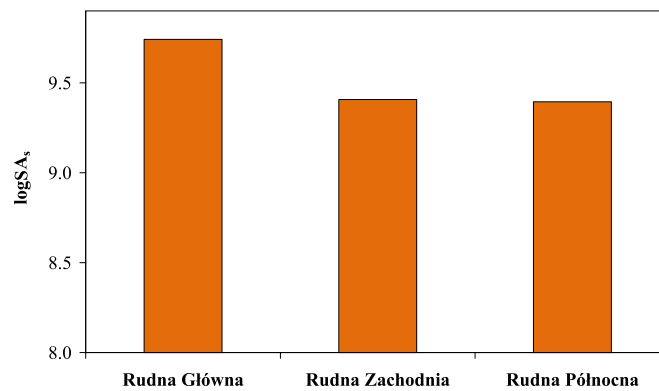
Analizę kształtowania się aktywności sejsmicznej w O/ZG Rudna (Materiały... 2006–2015) prowadzono również w odniesieniu do wydzielonych organizacyjnie rejonów eksploatacyjnych: Rudna Główna, Rudna Zachodnia (R-IX) i Rudna Północna. Poziom aktywności sejsmicznej odnotowanej w poszczególnych rejonach w latach 2006–2015 wyrażony liczbą wstrząsów  $N$  w odpowiednich klasach energetycznych, sumaryczną liczbą wstrząsów  $\Sigma N$  i sumaryczną energią sejsmiczną  $\Sigma A_s$ , oraz wielkością wydatku energetycznego  $J$  przedstawia tabela 3.

TABELA 3. Poziom aktywności sejsmicznej w rejonach eksploatacyjnych O/ZG Rudna w latach 2006–2015

TABLE 3. Seismic activity in the stope regions in the Rudna mine over the years 2006–2015

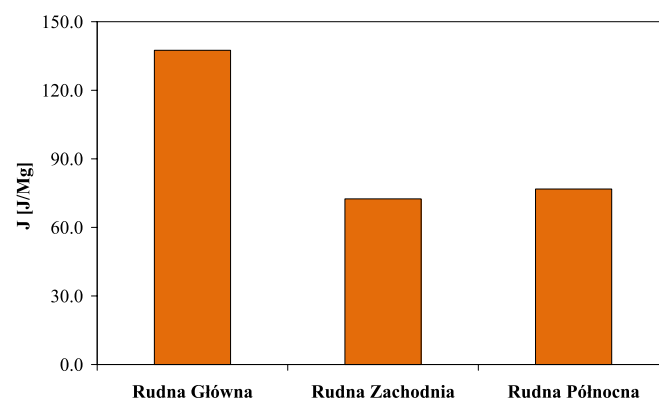
Rejon	Liczba wstrząsów $N$ [-]							$\Sigma N$	$\Sigma A_s$	$J$
	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$	–	GJ	J/Mg
Rudna Główna	6 188	2 294	816	283	57	5	1	9 644	5,7	137,5
Rudna Zachodnia	5 272	2 236	738	194	54	2	–	8 496	2,6	72,5
Rudna Północna	3 363	1 509	492	157	55	3	–	5 579	2,5	76,8

Wielkość sumarycznej energii sejsmicznej oraz wydatku energetycznego w rozważanych rejonach kopalni zilustrowano odpowiednio na rysunku 3 oraz rysunku 4.



Rys. 3. Wykres sumarycznej energii sejsmicznej w rejonach O/ZG Rudna w latach 2006–2015

Fig. 3. Distribution of total seismic energy in the sections of the Rudna mine over the years 2006–2015



Rys. 4. Wykres wskaźnika wydatku energetycznego w rejonach O/ZG Rudna w latach 2006–2015

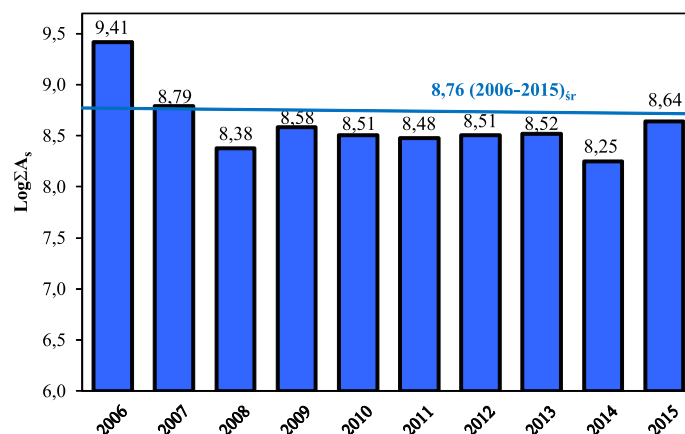
Fig. 4. Distribution of the energy factor in sections of the Rudna mine over the years 2006–2015

Jak wynika z zamieszczonych zestawień poszczególne rejony kopalni w latach 2006–2015 charakteryzowały się zróżnicowanym – niejednokrotnie znacząco – poziomem zagrożenia sejsmicznego. Niezależnie od analizowanego parametru sejsmiczności zdecydowanie najwyższy poziom zagrożenia miał miejsce w rejonie Rudnej Głównej, niższy zaś (ilościowo i energetycznie) odpowiednio w rejonach Rudnej Zachodniej (R-IX) i Rudnej Północnej, przy czym w kontekście jednostkowego wydatku energetycznego kolejność dwóch ostatnich rejonów byłaby odwrotna (Rudna Północna, Rudna Zachodnia). W tabeli 4 przedstawiono wielkość sumarycznej energii sejsmicznej  $\Sigma A_s$ , przypadającej na kolejne lata rozpatrywanego okresu, oraz ich wartości uśrednione. Graficznie relacje te w rozbiu na poszczególne rejony odpowiednio ilustrują: rysunek 5 (Rudna Główna), rysunek 6 (Rudna Zachodnia) i rysunek 7 (Rudna Północna).

TABELA 4. Wartości sumarycznej energii sejsmicznej w rejonach O/ZG Rudna w latach 2006–2015

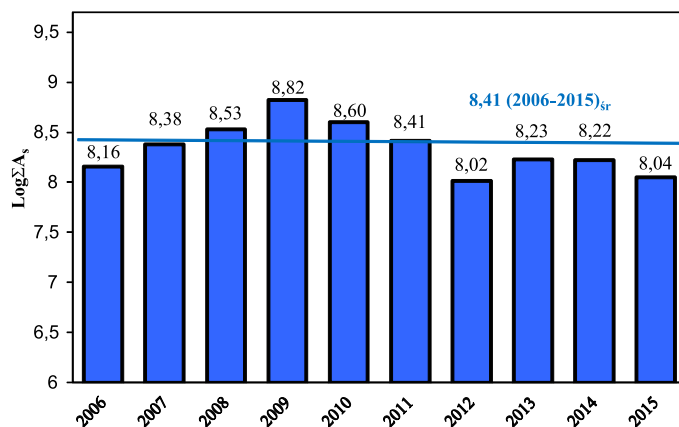
TABLE 4. Total seismic energy in the regions in the Rudna mine over the years 2006–2015

Lata / $\Sigma A_s$ [J]	Rudna Główna	Rudna Zachodnia	Rudna Północna
2006	$2,6 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^8$
2007	$6,2 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^8$
2008	$2,4 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$
2009	$3,8 \cdot 10^8$	$6,6 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^7$
2010	$3,2 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,4 \cdot 10^8$
2011	$3,0 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^8$
2012	$3,2 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^8$
2013	$3,3 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$
2014	$1,8 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$
2015	$4,4 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$
$\Sigma A_s^{sr} (2006-2015)$ [J]	$5,7 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$



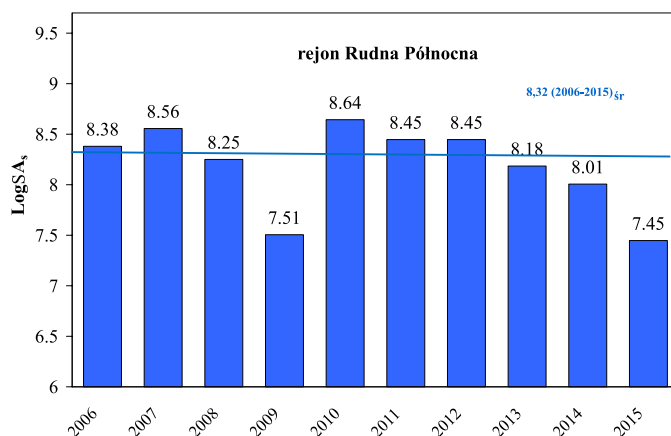
Rys. 5. Wykres sumarycznej energii sejsmicznej w rejonie Rudna Główna w latach 2006–2015

Fig. 5. Distribution of the total seismic energy in the area of Rudna Główna, over the years 2006–2015



Rys. 6. Wykres sumarycznej energii sejsmicznej w rejonie Rudna Zachodnia w latach 2006–2015

Fig. 6. Distribution of the total seismic energy in the area of Rudna Zachodnia, over the years 2006–2015



Rys. 7. Wykres sumarycznej energii sejsmicznej w rejonie Rudna Północna w latach 2006–2015

Fig. 7. Distribution of the total seismic energy in the area of Rudna Północna, over the years 2006–2015

Z kolei w tabeli 5 zestawiono wartości wskaźnika jednostkowego wydatku energetycznego  $J$  w kolejnych latach (2006–2015) oraz uśredniony wydatek dla tego okresu. Porównanie tych wartości w rejonach przedstawiają: rysunek 8 (Rudna Główna), rysunek 9 (Rudna Zachodnia) oraz rysunek 10 (Rudna Północna). Przytoczone dane zbiorcze wskazują, że w rejonie:

- Rudna Główna; największą sumaryczną energię zarejestrowano w latach 2006, 2007, 2015, natomiast największym wydatkiem charakteryzował się rok 2006, 2007 (analogicznie jak w przypadku energii) oraz 2013 (tab. 4–5, rys. 5, rys. 8),
- Rudna Zachodnia (R-IX); najbardziej aktywnymi tak z punktu widzenia emisji energii wyzwolonej, jak i wartości wydatku energetycznego były lata 2009, 2010, 2008 (tab. 4–5, rys. 6, rys. 9),



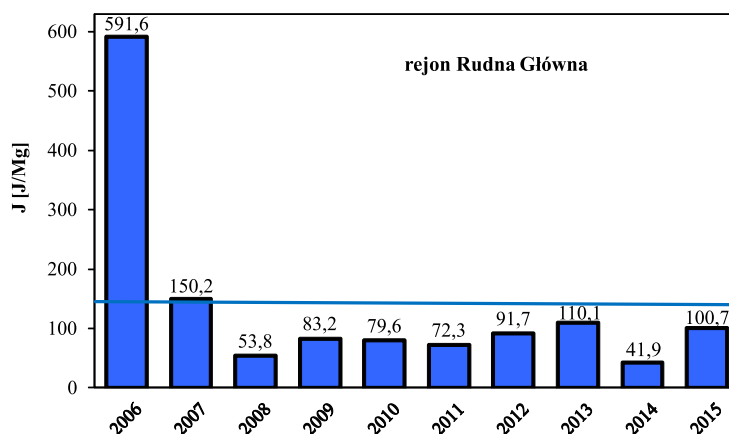
- Rudna Północna; najbardziej aktywnymi w ujęciu energetycznym były kolejno lata 2010, 2007, 2011 (2012), natomiast największy wydatek odnotowano odpowiednio w latach 2009, 2012 i 2010 (tab. 4–5, rys. 7, rys. 10),

przy czym z najmniej zróżnicowanymi, pozbawionymi większych zmian skokowych, przebiegami obu analizowanych parametrów mamy do czynienia (z wyjątkiem roku 2006) w przypadku Rudnej Głównej. W nawiązaniu do ostatnich lat rozpatrywanego okresu nadal utrzymuje się wysoki poziom zagrożenia sejsmicznego w rejonie Rudna Główna, natomiast zaznacza się tendencja spadkowa poziomu zagrożenia w rejonach Rudna Północna i Rudna Zachodnia (R-IX), bardziej widoczna jednakże na wykresach ilustrujących zmienność wartości jednostkowego wydatku energii (rys. 9, rys. 10).

TABELA 5. Wartości wskaźnika wydatku energetycznego w rejonach O/ZG Rudna w latach 2006–2015

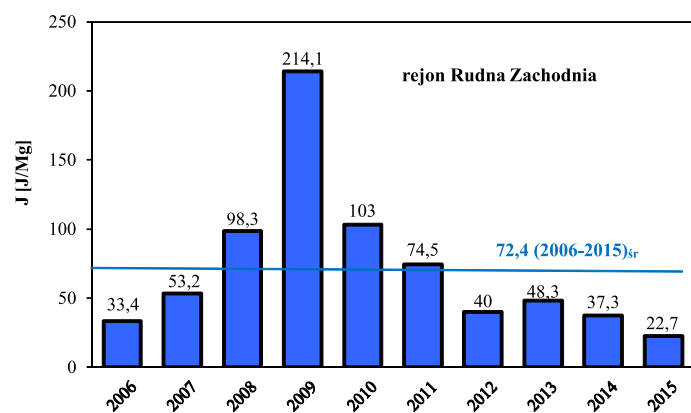
TABLE 5. Energy factor in the regions of the Rudna mine over the years 2006–2015

J [J/Mg]	Rudna Główna	Rudna Zachodnia	Rudna Północna
2006	591,6	33,4	56,9
2007	150,2	53,2	88,9
2008	53,8	98,3	53,4
2009	83,2	214,1	132,9
2010	79,6	103,0	118,6
2011	72,3	74,5	83,0
2012	91,7	40,0	129,1
2013	110,1	48,3	54,7
2014	41,9	37,3	39,6
2015	100,7	22,7	11,4
$J_{sr}$ (2006–2015)	137,5	72,5	76,8



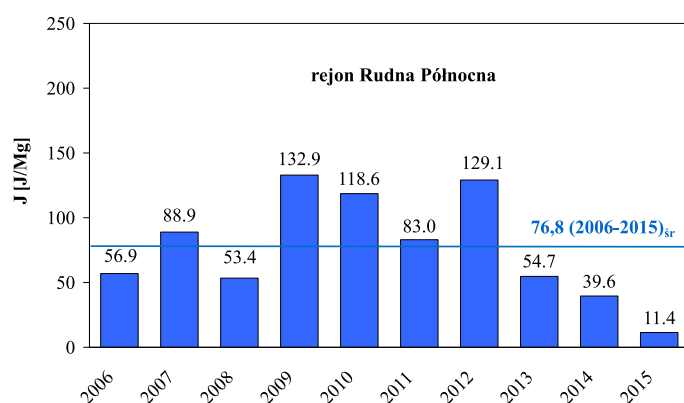
Rys. 8. Wykres wskaźnika wydatku energetycznego w rejonie Rudna Główna w latach 2006–2015

Fig. 8. Distribution of the energy factor in the area of Rudna Główna, over the years 2006–2015



Rys. 9. Wykres wskaźnika wydatku energetycznego w rejonie Rudna Zachodnia w latach 2006–2015

Fig. 9. Distribution of the energy factor in the area of Rudna Zachodnia, over the years 2006–2015



Rys. 10. Wykres wskaźnika wydatku energetycznego w rejonie Rudna Północna w latach 2006–2015

Fig. 10. Distribution of the energy factor in the area of Rudna Północna, over the years 2006–2015

Istotną informację o wielkości zagrożenia sejsmicznego podaje wykorzystywany w seismologii rozkład Gutenberga-Richtera (energetyczny rozkład wstrząsów) (Gutenberg i Richter 1954) opisujący relację pomiędzy liczbą wstrząsów zarejestrowanych w poszczególnych klasach energetycznych a wielkością wyemitowanej energii sejsmicznej:

$$\text{Log}N = a - b \text{Log}A_s$$

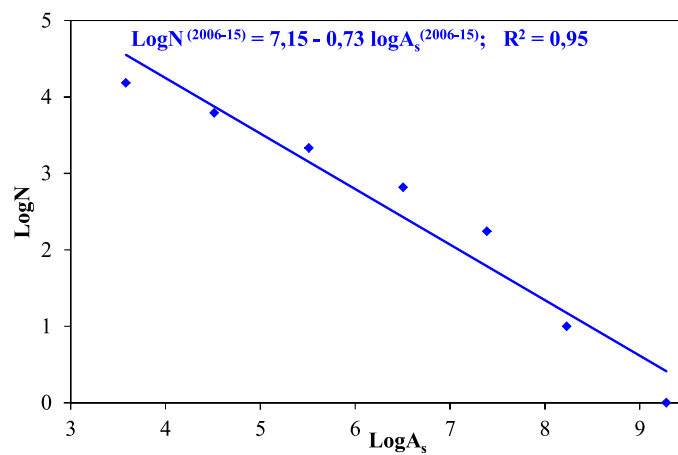
gdzie:

- $N$  – liczba wstrząsów o energii  $\geq A_s$ ,
- $a$  i  $b$  – parametry rozkładu.

Parametr  $a$  jest miarą poziomu aktywności sejsmicznej, a parametr  $b$  opisuje względny stosunek liczby wstrząsów silnych do wstrząsów słabych. Mniejsza wartość parametru  $b$

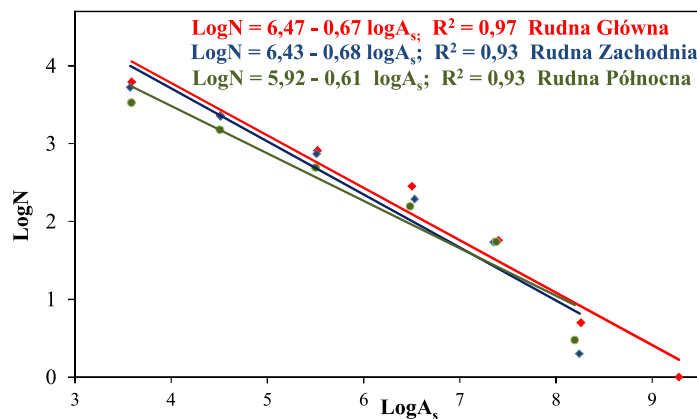
(współczynnika kierunkowego), a tym samym mniejsze nachylenie prostej ( $b = \operatorname{tg}\alpha$ ) opisywanej przez rozkład Gutenberga-Richtera, wskazując na większy udział silnych wstrząsów, świadczy o większym zagrożeniu sejsmicznym, a w konsekwencji zagrożeniu zjawiskami dynamicznymi wiążącymi się ze skutkami w wyrobiskach podziemnych. Porównanie za pomocą rozkładu Gutenberga-Richtera aktywności sejsmicznej z różnych okresów czy rejonów eksploatacji pozwala na ocenę różnic wielkości zagrożenia sejsmicznego, w tym zmian aktywności w zakresie występowania zjawisk o wysokich energiach.

Rozkłady Gutenberga-Richtera i opisujące je równania dla wstrząsów o energiach sejsmicznych  $A_s \geq 10^3 \text{J}$  zarejestrowanych w latach 2006–2015 w całym obszarze górniczym i poszczególnych rejonach kopalni Rudna przedstawiają rysunki 11 i 12, zaś parametry tych rozkładów zestawiono w tabeli 6.



Rys. 11. Rozkład Gutenberga-Richtera w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

Fig. 11. GR parameters in the Rudna mine over the years 2006–2015



Rys. 12. Rozkłady Gutenberga-Richtera w rejonach O/ZG Rudna w latach 2006–2015

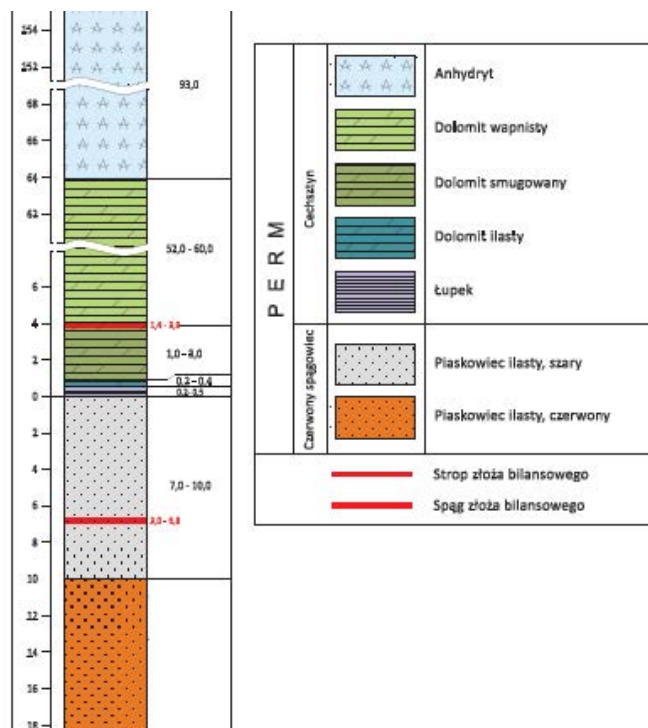
Fig. 12. GR parameters in particular sections of the Rudna mine over the years 2006–2015

TABELA 6. Parametry rozkładów Gutenberga-Richtera w O/ZG Rudna w latach 2006–2015

TABLE 6. GR parameters distribution in the mine over the years 2006–2015

Obszar/rejon	Parametry rozkładu Gutenberga-Richtera	
	$a$ [-]	$b$ [-]
Kopalnia Rudna	7,15	0,73
Rejon Rudna Główna	6,47	0,67
Rejon Rudna Zachodnia	6,43	0,68
Rejon Rudna Północna	5,92	0,61

Na podstawie przedstawionych relacji można stwierdzić, że wartości współczynników kierunkowych opisujących poszczególne rejonu eksploatacyjne zmieniają się w niewielkim zakresie, dla Rudnej Głównej i Zachodniej są niemal identyczne, natomiast wartości ekstremalne dotyczą Rudnej Północnej oraz całego obszaru górniczego kopalni. Zważywszy na nieznaczną zmienność omawianych parametrów w połączeniu z najlepszym dopasowaniem linii trendu (najkorzystniejszy współczynnik determinacji) oraz analizowanymi wcześniej dużymi wartościami parametrów sejsmiczności dla rejonu Rudna Główna, przytoczone rozkłady Gutenberga-Richtera nie pozwalają – przez wzgląd na brak jednoznacznych przesłanek – na formułowanie wniosków o mniejszym zagrożeniu w rejonie Rudnej Północnej.



Rys. 13. Przykładowy profil geologiczny złoża w O/ZG Rudna

Fig. 13. Geological profile of the copper ore deposit in the Rudna mine

W celu podjęcia próby poszukiwania przyczyn sygnalizowanej niejednoznaczności przeprowadzonych analiz odniesiono się do uwarunkowań geologicznych w kontekście stratygraficznego układu warstw skalnych w najbliższym otoczeniu prowadzonych robót. Przykładowy profil geologiczny złoża w kopalni Rudna ilustruje rysunek 13, a miąższości furty eksploatacyjnej oraz przybranej i pozostałej warstwy dolomitu w polach aktualnie eksploatowanych (w 2015 roku) w rejonach Rudna Główna, Rudna Zachodnia (R-IX) i Rudna Północna zestawiono w tabeli 7 (Materiały... 2006–2015).

TABELA 7. Miąższości furty eksploatacyjnej w rejonach O/ZG Rudna

TABLE 7. Extraction height in particular sections of the Rudna mine

Rejon	Oddział	Pole eksploatacyjne	Furta [m]	Przybrany dolomit [m]	Pozostały dolomit [m]
Rudna Główna	G-1	XII/1	14,1	2,5	87,5
		XII/2	12,4	0,6	86,9
	G-2	XVII/1 lewe skrzydło frontu	12,9	0,8	71,1
		XVII/2 prawe skrzydło frontu	8,3	1,5	72
		XI/1	10,7	3,4	60
		G-15/10	5,1	1,8	40
	G-3	G-3/4	13,6	2,9	77
		G-1/7 Blok A	16,5	1,2	95
	G-7	G-7/5	16,1	2	70
		XIV/2	9	2	85
Rudna Zachodnia	G-11	XIX/1	5,7	1,6	17,7
	G-12	XIX/2	4	1,4	17,9
	G-14	XXV/2	4,4	1,2	9,8
	G-15	XVI/1	14,6	1,4	57,6
		XV/2	4	0,8	57,2
		XXV/1	3,7	1	14
	G-17	XV/1	4,9	2,3	18,6
		XV/4	4,5	1,9	12,5
		XV/5	3,7	0,8	10
Rudna Północna	G-23	XXI/1	5,6	0	54,4
		XXI/2	11,7	0,2	67
	G-24	XXIII/2	4,6	1,4	18,7
	G-25	XXVIII/1	2,8	0,3	15,7
	G-26	XXIII/3	18,3	3,7	45
		XXIII/4	7,4	2,7	30

Z analizy reprezentatywnych profili geologicznych w połączeniu z przeglądem dotychczasowej eksploatacji wynika (tab. 7), iż rzeczywista wysokość furty powyżej okruszco-

wania bilansowego w poszczególnych polach (w rozdzieleniu na rejon) wynosi odpowiednio:

- od 5,1 do 16,5 m (średnio 11,9 m) w rejonie Rudna Główna,
- od 3,7 do 14,6 m (średnio 5,5 m) w rejonie Rudna Zachodnia,
- od 2,8 do 18,3 m (średnio 8,4 m) w rejonie w Rudna Północna,

natomiast miąższość pozostałej warstwy dolomitu kształtuje się w przedziałach:

- w Rudnej Głównej od 40 do 95 m (średnio 74,5 m),
- w Rudnej Zachodniej od 9,8 do 57,6 m (średnio 23,9 m),
- w Rudnej Północnej od 15,7 do 67 m (średnio 38,5 m).

Jakkolwiek dla uzyskania bardziej wiarygodnego obrazu w zakresie możliwych przyczyn zmian aktywności górotworu w obszarze górniczym kopalni konieczne byłoby uwzględnienie m.in. informacji o zaangażowaniu tektonicznym parcel (Burtan i in. 2010), lokalnych parametrach geomechanicznych (wytrzymałościowych i odkształceniowych) ośrodka skalnego (Chlebowski 2011) oraz stosowanych systemach wybierania (w tym kierowania stropem) (Zorychta i in. 2005). Najwyższy poziom sejsmiczności zarejestrowany w rejonie Rudna Główna, a niższy w rejonach Rudna Zachodnia i Rudna Północna może pozostawać w bezpośrednim związku z różnymi wysokościami furt eksploatacyjnych oraz zmiennymi miąższościami tzw. wstrząsogennych warstw węglanowych zalegających w stropie zasadniczym złoża.

### 3. Lokalizacja ognisk wstrząsów względem frontu robót rozcinkowych

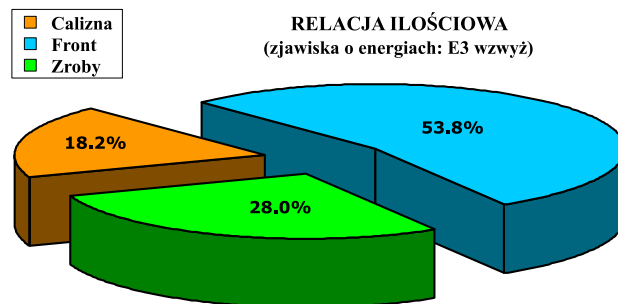
Wyposażenie i sieć pomiarowa stacji geofizyki górniczej kopalń LGOM (w tym również O/ZG Rudna) współpracujące z dedykowanym, specjalistycznym oprogramowaniem komputerowym pozwala na lokalizowanie ognisk rejestrowanych wstrząsów nie tylko w przestrzennym układzie współrzędnych kartezjańskich, ale również na weryfikację ich epicentrow w stosunku do położenia frontu eksploatacyjnego na dzień zdarzenia. W tym kontekście w ramach sukcesywnie uzupełnianej bazy danych dokumentowane są wypisy zjawisk sejsmicznych, których wystąpienie daje się odnieść (poza współrzędnymi hipo- lub epicentrum) do usytuowania w:

- całźnie furty eksploatacyjnej, czyli przed frontem robót rozcinkowych,
- bezpośrednim sąsiedztwie linii frontu rozcinki lub strefie roboczej (otwarcia stropu),
- zrobach, a zatem za frontem w przestrzeni zlikwidowanej.

Zakładając zbliżony poziom błędu pomiarowego współrzędnych epicentrum ogniska oraz lokalizacji w stosunku do wymienionych elementów (parametrów) systemu eksploatacji (calizna, front, zroby) dokonano analizy aktywności sejsmicznej górotworu w całej kopalni (łącznie we wszystkich trzech rejonach eksploatacyjnych) za lata 2006–2015 w ujęciu ilości zjawisk oraz sumarycznej energii wyzwolonej, dodatkowo z rozróżnieniem na zjawiska nisko- (w klasach  $10^3$ – $10^4$  J) i wysokoenergetyczne (rzędu  $10^5$  J wzwyż).

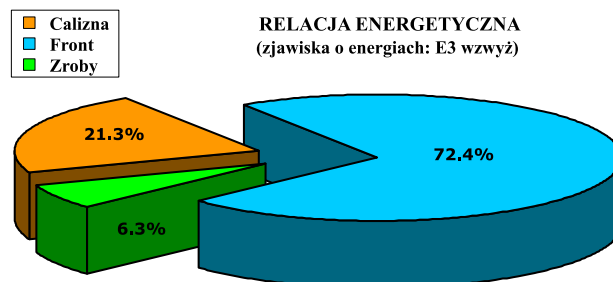
Rezultaty przeprowadzonych analiz (rys. 14–19) wyraźnie wskazują, że niezależnie od rozpatrywanego rzędu energii i analizowanego wariantu, zdecydowana większość źródeł odnotowanych wstrząsów sytuowała się w strefie robót rozcinkowych (na froncie), przy czym ich udział zmieniał się w przedziale:

- ilościowo: od 52,6% dla zjawisk niskoenergetycznych (rys. 15) do 62,4% dla wysokoenergetycznych (rys. 18), przy ogólnej średniej odnoszącej się do całej populacji na poziomie 53,8% (rys. 14),
- energetycznie: od 54,0% dla zjawisk o niskich energiach (rys. 16) do 72,9% dla energii wysokich (rys. 19), przy ogólnej średniej odnoszącej się do całej populacji na poziomie 72,4% (rys. 15).



Rys. 14. Ilościowy rozkład wstrząsów względem frontu robót rozcinkowych

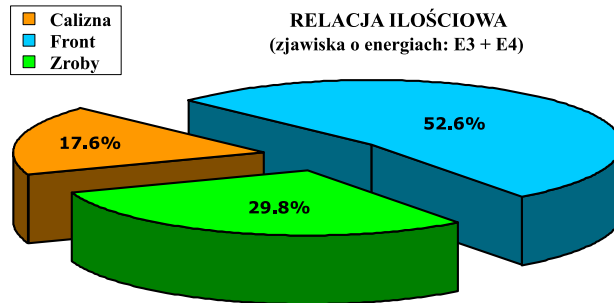
Fig. 14. The number of rockburst events in relation to the stope during the cutting-through operations



Rys. 15. Energetyczny rozkład wstrząsów względem frontu robót rozcinkowych

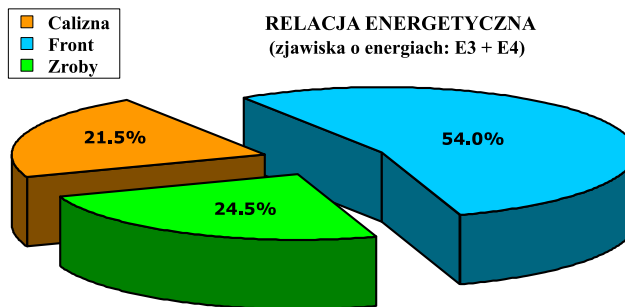
Fig. 15. Energy levels of rockburst events in relation to the stope during the cutting-through operations

Znamienną cechą prezentowanych w postaci wykresów kołowych relacji jest zarówno ilościowa jak i energetyczna nierównomierność poszczególnych rozkładów. Warto przy tym zaznaczyć, że z uwagi na potencjalną możliwość wystąpienia skutków w wyrobiskach górniczych – te są przede wszystkim funkcją wstrząsów wysokoenergetycznych i odległości hipocentralnych – duży udział (72,9%) energii emitowanej w bliskim otoczeniu obszaru roboczego przekłada się bezpośrednio na wysoki poziom zagrożenia zjawiskami dynamicznymi (tąpnięcia, odprężenia). Choć dla pełnej oceny stanu zagrożenia konieczne byłoby dodatkowo dysponowanie danymi o zjawiskach samoistnych i sprowokowanych, niemniej jednak obserwowany wynik stanowić może istotną informację dla służb kopalnianych w kontekście



Rys. 16. Ilościowy rozkład wstrząsów niskoenergetycznych względem frontu robót rozcinkowych

Fig. 16. The number of low-energy events in relation to the stope during the cutting-through operations



Rys. 17. Energetyczny rozkład wstrząsów niskoenergetycznych względem frontu robót rozcinkowych

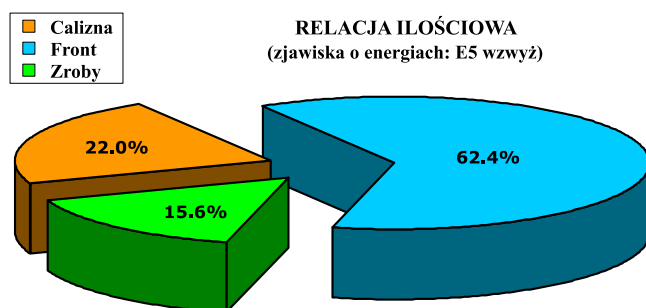
Fig. 17. Energy levels of low-energy events in relation to the stope during the cutting-through operations

kierunków stosowania odpowiednich metod i środków profilaktyki tąpniowej, w tym organizacyjno-technicznej i aktywnej.

W odniesieniu do pozostałych elementów systemu eksploatacji (calizna, zroby) wyniki statystyk nie są już tak jednoznaczne. Rozpatrując bowiem zagadnienie z punktu widzenia udziałów poszczególnych klas (grup) energii sejsmicznej okazuje się, że najmniej ognisk wstrząsów niskoenergetycznych (rzędu  $10^3$ – $10^4$  J) lokalizowano w caliznie na przedpolu frontu (17,6% ilościowo, 21,5% energetycznie, rys. 15–16), zaś wstrząsów wysokoenergetycznych (powyżej  $10^5$  J) – w zrobach (15,6% ilościowo, 5,8% energetycznie, rys. 17–18).

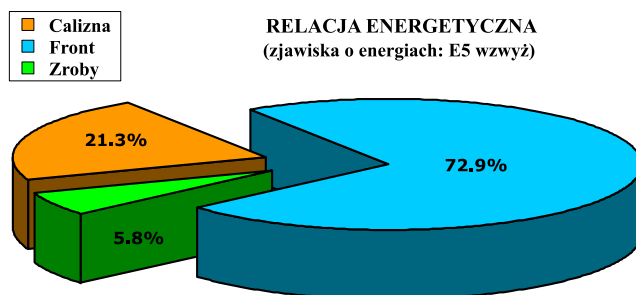
Odmienne natomiast kształtują się właściwe rozkłady dla całej bazy obejmującej wszystkie zarejestrowane wstrząsy od klasy rzędu  $10^3$  J wzwyż. Wyniki analiz w ujęciu ilościowym ilustrują sytuację odwrotną w porównaniu do sumarycznej energii wyemitowanej z górotworu. Wskazują one mianowicie, że ilościowo najmniej z całej populacji rozpatrywanych ognisk wstrząsów lokalizowało się w caliznie (18,2%, rys. 14), a energetycznie – w zrobach (głównie własnych) za frontem eksploatacji (6,3%, rys. 15).





Rys. 18. Ilościowy rozkład wstrząsów wysokoenergetycznych względem frontu robót rozcinkowych

Fig. 18. The number of high-energy events in relation to the stope during the cutting-through operations



Rys. 19. Energetyczny rozkład wstrząsów wysokoenergetycznych względem frontu robót rozcinkowych

Fig. 19. Energy levels of high-energy events in relation to the stope during the cutting-through operations

### Podsumowanie i wnioski

Ocena sejsmiczności górotworu w O/ZG Rudna za okres 2006–2015 pozwala na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- W całym obszarze górniczym kopalni utrzymywał się wysoki, porównywalny w ostatnich latach, poziom zagrożenia sejsmicznego utożsamianego z liczbą rejestrowanych wstrząsów, sumaryczną energią sejsmiczną wyzwoloną z górotworu oraz wielkością jednostkowego wydatku energetycznego.
- Średnioroczna wartość emitowanej energii sejsmicznej okresowo waha się, przy czym generalnie zaznacza się jej tendencja spadkowa, a kluczowe znaczenie dla wartości tej energii ma występowanie bardzo silnych wstrząsów o energiach rzędu  $10^8$  i  $10^9$  J. Do 2010, rocznie wyemitowana energia generalnie kształtowała się na poziomie powyżej 1 GJ, przy czym od 2009 roku obserwuje się spadek wydatkowanej rocznej energii, która w 2014 osiągnęła najniższy poziom w analizowanym okresie i wyniosła 0,45 GJ.

- W odniesieniu do poszczególnych klas silnych wstrząsów rzędu  $10^5$  i  $10^6$  J, ich liczba w kolejnych latach zasadniczo utrzymuje się na zbliżonym poziomie. Natomiast od 2007 roku zauważalny jest spadek liczby wstrząsów rzędu  $10^8$  J, przy braku występowania zjawisk rzędu  $10^9$  J; dodatkowo począwszy od 2009 rejestruje się również mniej wstrząsów rzędu  $10^7$  J.
- Poszczególne rejony kopalni Rudna charakteryzowały się zróżnicowanym poziomem sejsmiczności górotworu. Mniejsza aktywność sejsmiczna w rejonach Rudnej Zachodniej i Rudnej Północnej może być pochodną mniejszego zaangażowania tektonicznego, mniejszych wysokości furt eksploatacyjnych w polach tych rejonów, a także różnych miąższości utworów dolomitowych zalegających w stropie wybieranego złoża rudy miedzi.
- Zauważalny jest wyraźny związek liczby wstrząsów oraz wielkości ich energii z rozmieszczeniem ognisk względem frontu eksploatacyjnego. Niezależnie od rzędu energii sejsmicznej wstrząsu zdecydowanie najczęściej zjawisk lokalizuje się na froncie w strefie robót rozcinkowych. Uwzględniając udziały poszczególnych klas (przedziałów) energii najmniej ognisk w grupie wstrząsów niskoenergetycznych lokalizuje się w caliznie na przedpolu frontu, zaś w grupie wstrząsów wysokoenergetycznych – w zrobach eksploatowanych pól. Należy jednak mieć na uwadze, że tego rodzaju statystyki mają swoje ograniczenia ze względu na rzeczywiste wielkości ogniska wstrząsu, które dla silniejszych wstrząsów mogą mieć rozmiary powyżej kilkudziesięciu metrów

Artykuł zrealizowano w ramach prac statutowych AGH nr 11.11.100.005.

## Literatura

- Butra i in. 2009 – Butra, J., Dębkowski, R. i Szpak, M. 2009. Przyczyny i profilaktyka zagrożenia zjawiskami dynamicznymi w kopalniach rud miedzi. *Materiały Międzynarodowego Kongresu Górnictwa Rud Miedzi* t. 2, Lubin.
- Burtan, Z. 2011. Kształtowanie się zagrożenia sejsmicznego w trakcie eksploatacji rud miedzi w rejonie strefy uskoku Biedrzychowa. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Górnictwo i Środowisko* nr 4/2, s. 34–42.
- Chlebowski, D. 2011. Energetyczna ocena możliwości wystąpienia procesów pękania w utworach anhydrytowych na przykładzie oddziału G-22 O/ZG Rudna. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Górnictwo i Środowisko* nr 4/2, s. 43–51.
- Dębkowski, R. i in. 2016. *Kompleksowy projekt eksploatacji złoża w warunkach zagrożenia tąpnięciami na lata 2017–2022*. KGHM Polska Miedź S.A. Oddział ZG Rudna. Praca niepublikowana KGHM „Cuprum”, Wrocław.
- Goszcz, A. 2004. Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami kopalniach podziemnych. Biblioteka Szkoły Podziemnej Eksploatacji Złóż. Kraków: Wydawnictwo Nauka-Technika.
- Gutenberg, B. i Richter, C.F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomene*. 2nd ed. Princeton University Press. Nowy Jork.
- Zorychta i in. 2005 – Zorychta, A., Burtan Z. i Chlebowski, D. 2005. Wpływ warunków górniczych na kształtowanie się stanu zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami. *Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud „Cuprum”* nr 3 (36), s. 33–42, Wrocław: Wydawnictwo KGHM Cuprum Sp. z o.o. CBR.
- Materiały źródłowe dotyczące aktywności sejsmicznej górotworu w KGHM Polska Miedź S.A. Oddział ZG Rudna w latach 2006–2015. KGHM Polska Miedź S.A. Oddział ZG Rudna.