

Analiza stanu i przyczyny zagrożenia tąpaniami w kopalniach węgla kamiennego w latach 2015–2024

dr hab. inż. Zbigniew BURTAN¹, prof. AGH
dr hab. inż. Dariusz CHLEBOWSKI, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
dr inż. Zbigniew RAWICKI
Wyższy Urząd Górniczy w Katowicach

TREŚĆ: W artykule przedstawiono stan zagrożenia sejsmicznego i tąpaniami w kopalniach węgla kamiennego. W oparciu o zdefiniowane wskaźniki sejsmiczności oraz wypadkowości w wyniku tąpiń i odprężeń, odnoszące się do całkowitego wydobycia i wydobycia z pokładów zagrożonych tąpaniami, przeprowadzono analizę zmian poziomu zagrożenia tąpaniami w latach 2015–2024. Wskazując na przyczyny wysokiego poziomu tego zagrożenia, odniesiono się do warunków geologiczno-górnictwowych, takich jak: głębokość eksploatacji, grubowarstwowa budowa górotworu, zaburzenia geologiczne, zaszłości eksploatacyjne i obszary resztkowe. Zwrócono uwagę na wpływ odwadniania likwidowanych zbiorników wodnych w sąsiedztwie prowadzenia robót górniczych na aktywność sejsmiczną górotworu.

SŁOWA KLUCZOWE: górnictwo węgla kamiennego, sejsmiczność i zagrożenie tąpaniami, wypadkowość, warunki geologiczno-górnictwowe

1. Wstęp

Przez zagrożenia naturalne w górnictwie rozumie się zagrożenia, których źródłem są naturalne cechy i właściwości górotworu, a ich ujawnienie w wyrobiskach górniczych, w tym w atmosferze kopalnianej, jest wynikiem prowadzenia robót górniczych. Polskie górnictwo węgla kamiennego charakteryzuje się występowaniem wszystkich typowych dla górnictwa podziemnego zagrożeń naturalnych. Jak wynika z ustawy – Prawo geologiczne i górnicze [1], należą do nich zagrożenia: tąpaniami, metanowe, wyrzutami gazów i skał, wybuchem pyłu węglowego, klimatyczne, wodne i substancjami promieniotwórczymi. Jakkolwiek przepisy górnicze nie uwzględniają pośród zagrożeń naturalnych zagrożenia pożarami endogenicznymi, to przytoczona definicja zagrożeń naturalnych i źródła tego zagrożenia, w tym naturalna skłonność węgla do samozapalenia, pozwala również rozpatrywać to zagrożenie jako naturalne [2].

Jedno z wiodących zagrożeń naturalnych w polskich kopalniach węgla kamiennego, obok metanowego i pożarami endogenicznymi, stanowi zagrożenie tąpaniami, które w ostatnich latach, tak pod względem liczby

zdarzeń, jak i wypadków śmiertelnych, jest najbardziej katastrofogeniczne (tab. 1 i 2) [3, 4].

W latach 2020–2024 w wyniku ujawniania się zagrożeń naturalnych miało miejsce 48 niebezpiecznych zdarzeń, do których należały: zapalenia i wybuchy metanu (10), tąpięcia i odprężenia (25) oraz pożary endogeniczne (13). Spowodowały one łącznie 172 wypadki, w tym najwięcej w wyniku tąpiń i odprężeń (116).

Zagrożenie tąpaniami to możliwość wystąpienia w górotworze lub skałach skłonnych do tąpań wstrząsu, odprężenia lub tąpięcia w wyrobisku lub w jego otoczeniu w rezultacie niekorzystnych warunków górniczo-geologicznych. Zagrożenie to jest następstwem występowania zagrożenia sejsmicznego, stąd tąpięcie lub odprężenie w wyrobisku jest zjawiskiem dynamicznym spowodowanym wstrząsem górotworu, w wyniku którego wyrobisko uległo zniszczeniu lub uszkodzeniu. Innymi słowy, tąpięcie lub odprężenie to szczególny przypadek wstrząsu, ze skutkami w wyrobisku górniczym. Miarą wielkości wstrząsu jest wartość wyemitowanej energii sejsmicznej, zaś miarą tąpięcia lub odprężenia – wielkość skutków w wyrobisku i stopień pogorszenia bezpieczeństwa jego użytkowania. Tąpięcie charakteryzuje się zniszczeniem wyrobiska lub jego uszkodzeniem powodującym utratę funkcjonalności lub całkowite albo znaczne pogorszenie bezpieczeń-

¹ burtan@agh.edu.pl

► **Tab. 1. Niebezpieczne zdarzenia spowodowane zagrożeniami naturalnymi w kopalniach węgla kamiennego w latach 2020–2024**

► **Table 1. Hazardous events resulting from natural hazards in Polish hard coal mines in the years 2020–2024**

Zagrożenie naturalne	Liczba zdarzeń niebezpiecznych					
	2020	2021	2022	2023	2024	2020–2024
metanowe	1	3	4	1	1	10
tąpaniami	3	3	6	2	11	25
pożarami endogenicznymi	2	2	5	0	4	13

► **Tab. 2. Wypadki spowodowane zagrożeniami naturalnymi w kopalniach węgla kamiennego w latach 2020–2024**

► **Table 2. Accident rates resulting from natural hazards in Polish hard coal mines in the years 2020–2024**

Zagrożenie naturalne	Rodzaj wypadku			
	ogółem	śmiertelne	ciężkie	lekkie ¹
metanowe	56	16	7	33
tąpaniami	116	19	2	95
pożarami endogenicznymi	0	0	0	0

¹ wypadki powodujące czasową niezdolność do pracy

stwa użytkowania. Z kolei w przypadku odprężenia wyrobisko ulega uszkodzeniu niepowodującemu lub powodującemu nieznaczną utratę funkcjonalności lub pogorszenie bezpieczeństwa [5]. Im większa energia wstrząsu i mniejsza odległość jego ogniska od wyrobiska górniczego, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia tąpania lub odprężenia.

Wysoki poziom zagrożenia sejsmicznego i tąpaniami w polskich kopalniach węgla kamiennego wynika w dużej mierze z prowadzenia robót górniczych w trudnych i skrzepowanych warunkach geologiczno-górniczych. Coraz większa głębokość eksploatacji, sąsiedztwo zaburzeń sedimentacyjnych i tektonicznych, a także rejon oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych często stanowią przyczynę występowania wysokoenergetycznych wstrząsów, które niejednokrotnie skutkowały tąpaniami i odprężeniami [3, 6]. Ujawnianie się oraz zwiększanie poziomu sejsmiczności i zagrożenia tąpaniami może mieć miejsce również w rejonie odwodnienia zbiorników wodnych, w tym niżej zalegających warstw skalnych. Zagrożenie tąpaniami, współwystępując z zagrożeniami metanowym i pożarami endogenicznymi, w wyniku koincydencji może spowodować wzrost ich stanu oraz zainicjować niebezpieczne zdarzenia, niejednokrotnie skutkujące wypadkami, w tym wypadkami śmiertelnymi [3].

2. Skala występowania zagrożenia sejsmicznego i tąpaniami

W 2024 r. w Polsce wydobyto 43,7 mln Mg węgla kamiennego pochodzącego z 19 kopalń, z których 18 znajduje się w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) [10]. Wskutek szczyptywania się złóż węgla kamiennego, a co za tym idzie – ograniczenia możliwości produkcyjnych kopalń, a także z uwagi na spadek cen węgla, wzrost kosztów wydobycia oraz mniejsze zapotrzebowanie gospodarki krajowej, będące efektem transformacji energetycznej, wydobycie w Polsce sukcesywnie spada, zmniejszeniu ulega również liczba kopalń (tab. 3) [4].

Zagrożenie tąpaniami występuje aktualnie w 15 kopalniach GZW, spośród których 10 eksploatuje pokłady zaliczone do najwyższego, czyli II stopnia zagrożenia. Wzmiankowany spadek wielkości wydobycia i liczby kopalń nie przekłada się jednak na zmniejszenie notowanej skali zagrożenia sejsmicznego i tąpaniami (tab. 4, rys. 1 i 2) [4].

W 2024 r. wydobycie z pokładów zagrożonych tąpaniami wyniosło 23,8 mln Mg (54,4% całkowitego wydobycia), w tym 5,6 mln Mg (12,6% całkowitego wydobycia) z pokładów w II, najwyższym stopniu zagrożenia [4].

► **Tab. 3. Wydobycie i liczba kopalń węgla kamiennego w latach 2015–2024**

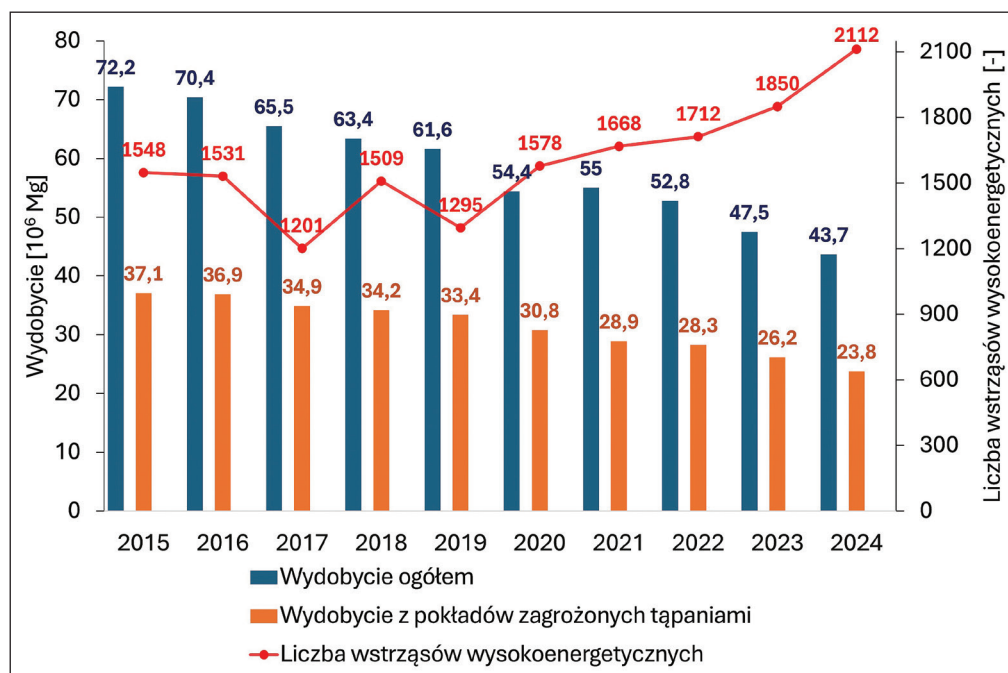
► **Table 3. Coal production and number of Polish hard coal mines in the years 2015–2024**

Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Wydobycie 10 ⁶ [Mg]	72,2	70,4	65,5	63,4	61,6	54,4	55,0	52,8	47,5	43,7
Liczba kopalń	30	23	21	20	20	21	20	20	19	19

► Tab. 4. Wydobycie z pokładów zagrożonych tąpnięciami oraz sejsmiczność w latach 2015–2024

► Table 4. Production from rock burst hazard coal seams and seismic activity in the years 2015–2024

Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Wydobycie 10^6 [Mg]	37,1	36,9	34,9	34,2	33,4	30,8	28,9	28,3	26,2	23,8
Udział w całkowitym wydobyciu [%]	51,5	52,4	53,3	53,9	54,2	56,6	52,5	53,5	55,2	54,4
Liczba wstrząsów o energii $\geq 10^5$ [J]	1548	1531	1201	1509	1295	1578	1668	1712	1850	2012
Energia wstrząsów jako mnożenie $\cdot 10^9$ [J]	9,70	1,88	2,11	8,74	2,21	6,44	2,45	2,48	2,85	2,90



► Rys. 1. Liczba wstrząsów wysokoenergetycznych na tle wydobycia w latach 2015–2024

► Fig. 1. Number of high-energy tremors relative to mining in the years 2015–2024

Pomimo postępującego spadku rocznego całkowitego wydobycia oraz wydobycia z pokładów zagrożonych tąpnięciami wysokoenergetyczna aktywność sejsmiczna (decydująca o wielkości zagrożenia tąpnięciami) wyraźnie wykazuje tendencję wzrostową. W ostatnich latach zagrożenie tąpnięciami objawiło się liczbą ponad 1500 wysokoenergetycznych (o energii $\geq 10^5$ J) wstrząsów oraz kilkoma tąpnięciami i odprężeniami rocznie (rys. 1) [4].

W latach 2015–2024 odnotowane tąpnięcia i odprężenia stanowiły średnio 0,3% wysokoenergetycznych wstrząsów, a wszystkie tąpnięcia wywołane były wstrząsami o energiach $>10^6$ J. W 2024 r. odnotowano największą od lat liczbę wysokoenergetycznych wstrząsów (2112) o sumarycznej energii 2,9 GJ [4].

Najwyższe sumaryczne energie wstrząsów wyemitowane w latach 2015, 2018 i 2020 były wynikiem wystąpienia wstrząsów o energii $>10^9$ J, odpowiednio w kopalniach: KWK „Wujek” ruch Śląsk ($4 \cdot 10^9$ J – tąpnięcie), KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” ruch Zofiówka ($2 \cdot 10^9$ J – tąpnięcie) i KWK „Budryk” ($3 \cdot 10^9$ J – bez skutków) [2]. Trzeba zaznaczyć, że wstrząs o energii $4 \cdot 10^9$ J był najsilniejszym odnotowanym dotychczas w polskim górnictwie węgla kamiennego [4].

3. Analiza zmian poziomu zagrożenia sejsmicznego

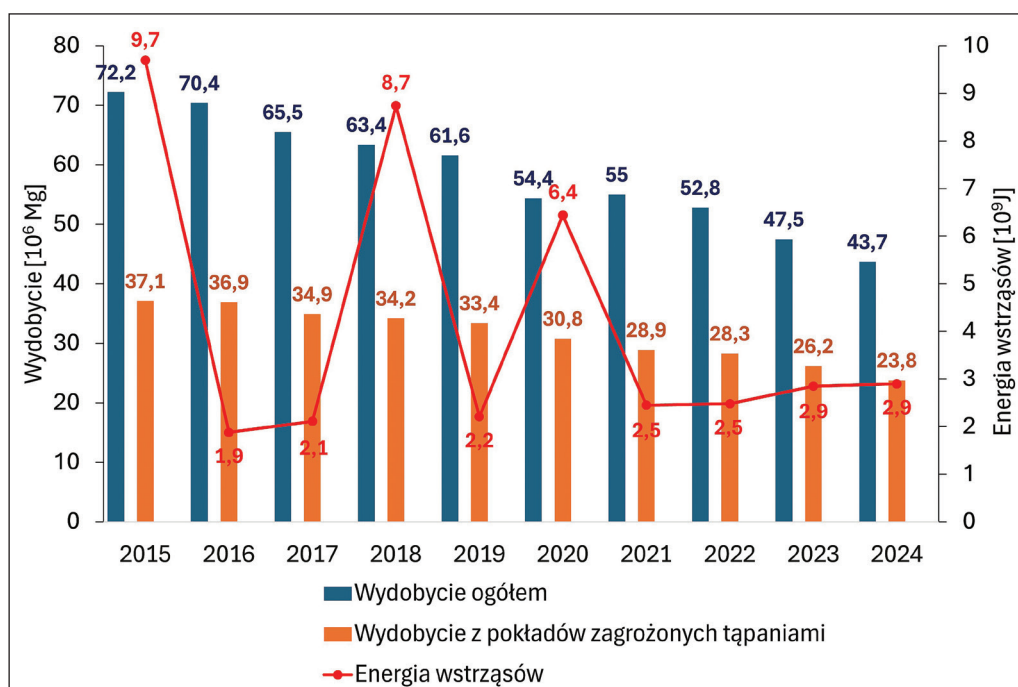
Wielkość zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami w polskich kopalniach węgla kamiennego analizowano w oparciu o:

- wskaźnik częstości wstrząsów [$-/10^6$ Mg] zdefiniowany liczbą wstrząsów wysokoenergetycznych względem odpowiednio: całkowitego wydobycia i wydobycia z pokładów zagrożonych tąpnięciami w danym roku;
- wskaźnik energii wstrząsów [J/Mg] zdefiniowany wielkością sumarycznej energii sejsmicznej względem odpowiednio: całkowitego wydobycia i wydobycia z pokładów zagrożonych tąpnięciami w danym roku.

Wartości tych wskaźników w latach 2015–2024 zestawiono w tab. 5, a ich zmienność zilustrowano na rys. 3 i 4.

Na podstawie analizy zmienności wskaźników sejsmiczności w latach 2015–2024 można stwierdzić:

- liczba wysokoenergetycznych wstrząsów w odniesieniu do wydobycia sukcesywnie wzrasta. Wzrost ten jest większy w odniesieniu do wydobycia z pokładów



► Rys. 2. Energia sejsmiczna wstrząsów na tle wydobywania w latach 2015–2024

► Fig. 2. Seismic energy of tremors relative to mining in the years 2015–2024

zagrożonych tąpnięciami aniżeli względem całkowitego wydobywania;

- sumaryczna wielkość wyemitowanej energii w odniesieniu do wydobywania w ostatnich czterech latach (2021–2024) sukcesywnie wzrasta (rys. 5). Wzrost ten jest większy w odniesieniu do wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami aniżeli względem całkowitego wydobywania. Duże wartości wskaźników energii w latach 2015, 2018 i 2020 są efektem wystąpienia wstrząsów o energii $>10^9$ J;
- pomimo spadku zarówno całkowitego wydobywania, jak i wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami wielkość zagrożenia sejsmicznego, a tym samym zagrożenia tąpnięciami rośnie.

4. Analiza wypadkowości w wyniku tąpnięć i odprężeń

Zagrożenie tąpnięciami w ostatnich latach spowodowało najwięcej wypadków śmiertelnych w kopalniach

węgla kamiennego oraz najwięcej wypadków pośród wszystkich zagrożeń naturalnych. W latach 2015–2024 wystąpiły 22 tąpnięcia i 29 odprężeń, w wyniku których zaistniały 222 wypadki ogółem, w tym 34 śmiertelne (tab. 6, rys. 6). W 2024 r. wystąpiły 3 tąpnięcia i 8 odprężeń, w wyniku których zaistniało 69 wypadków, w tym 7 śmiertelnych [4].

Wypadkowość w wyniku tąpnięć i odprężeń analizowano w oparciu o:

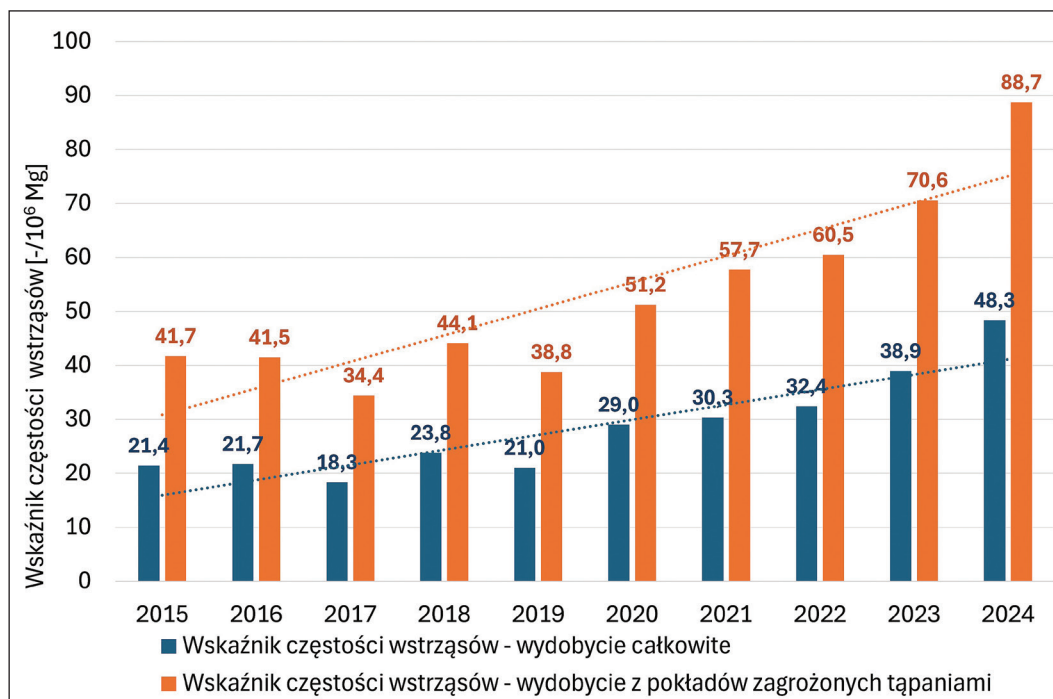
- wskaźnik częstości wszystkich wypadków [$-/10^6$ Mg] zdefiniowany liczbą wszystkich wypadków względem odpowiednio: całkowitego wydobywania i wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami w danym roku;
- wskaźnik częstości wypadków śmiertelnych [$-/10^6$ Mg] zdefiniowany liczbą wypadków śmiertelnych względem odpowiednio: całkowitego wydobywania i wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami w danym roku.

Wartości tych wskaźników w latach 2015–2024 zestawiono w tab. 7, a ich zmienność zilustrowano na rys. 7 i 8.

► Tab. 5. Wskaźniki częstości i energii wstrząsów w latach 2015–2024

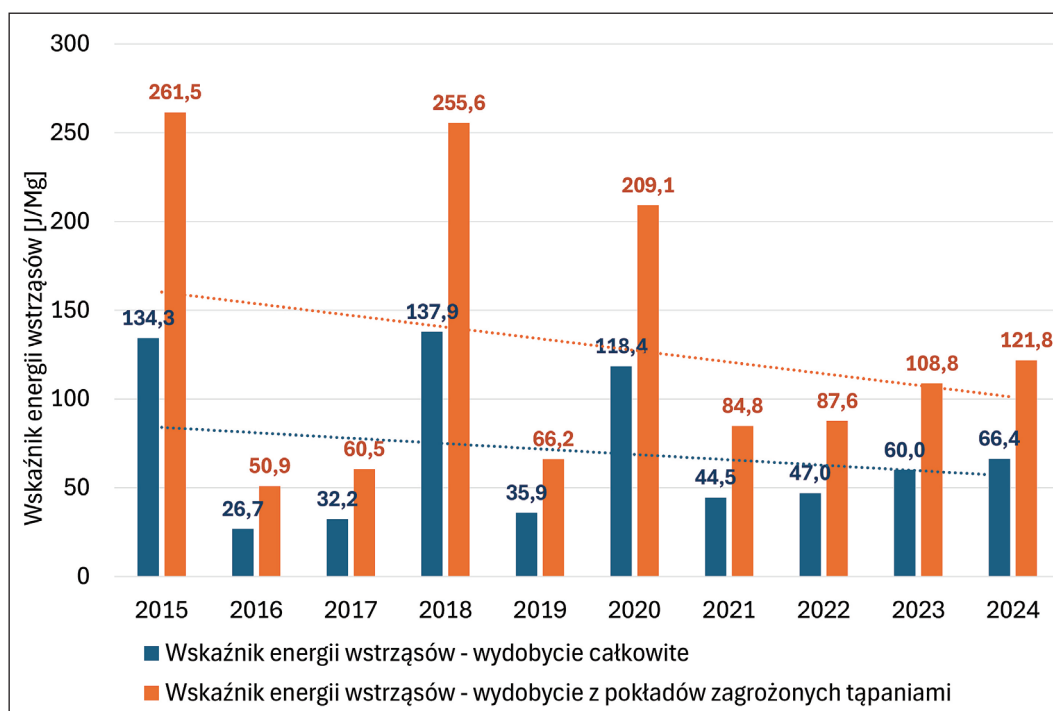
► Table 5. Tremors frequency and energy rates in the years 2015–2024

Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Wskaźnik częstości wstrząsów (wydobywanie całkowite) [$-/10^6$ Mg]	21,4	21,7	18,3	23,8	21,0	29,0	30,3	32,4	38,9	48,3
Wskaźnik częstości wstrząsów (wydobywanie z pokładów zagrożonych tąpnięciami) [$-/10^6$ Mg]	41,7	41,5	34,4	44,1	38,8	51,2	57,7	60,5	70,6	88,7
Wskaźnik energii wstrząsów (wydobywanie całkowite) [J/Mg]	134,3	26,7	32,2	137,9	35,9	118,4	44,5	47,0	60,0	66,4
Wskaźnik energii wstrząsów (wydobywanie z pokładów zagrożonych tąpnięciami) [J/Mg]	261,5	50,9	60,5	255,6	66,2	209,1	84,8	87,6	108,8	121,8



► Rys. 3. Wskaźniki częstości wstrząsów w latach 2015–2024

► Fig. 3. Tremors frequency rates in the years 2015–2024



► Rys. 4. Wskaźniki energii wstrząsów w latach 2015–2024

► Fig. 4. Seismic energy rates in the years 2015–2024

Na podstawie analizy wskaźników częstości wypadków wskutek tąpnięć i odprężeń w latach 2015–2024 można stwierdzić:

- wskaźniki częstości wszystkich wypadków i wypadków śmiertelnych w poszczególnych latach charakteryzuje zróżnicowana wielkość,
- pomimo spadku w ostatnich latach zarówno całkowitego wydobywania, jak i wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami wypadkowość wskutek tąpnięć

i odprężeń wzrasta. Dotyczy to zwłaszcza wypadków śmiertelnych, gdzie wzrost jest znacznie większy.

5. Przyczyny wysokiego poziomu sejsmiczności i zagrożenia tąpnięciami

Wielopokładowa, w coraz większym stopniu zaawansowana eksploatacja złóż węgla kamiennego prowadzona jest w skrupowanych warunkach geologiczno-gór-

► Tab. 6. Liczba tąpnięć i odprężeń oraz wypadkowość wskutek tych zdarzeń w latach 2015–2024

► Table 6. Number of rock bursts and stress-relief events, and the accident rate resulting from these incidents in the years 2015–2024

Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Liczba tąpnięć/odprężeń	2/3	1/3	3/4	2/2	4/2	1/2	2/1	3/3	1/1	3/8
Wypadki ogółem tąpnięcia/odprężenia	2/15	4/11	5/13	14/6	31/5	5/8	4/3	15/6	6/0	48/21
Wypadki śmiertelne tąpnięcia/odprężenia	2/1	1/0	0/0	6/0	5/0	0/0	1/0	10/0	1/0	5/2

niczych wpływających na ujawnianie się oraz wielkość zagrożenia sejsmicznego i tąpnięć. Roboty górnicze prowadzone są na coraz większych głębokościach, w otoczeniu grubych o dużej wytrzymałości warstw potencjalnie wstrząsogennych, w rejonach różnego rodzaju zaburzeń geologicznych, w obszarach oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych oraz resztkowych partiach złoża [3, 6]. Również odwadnianie likwidowanych zbiorników wodnych w sąsiedztwie prowadzonych robót górniczych może mieć wpływ na ujawnienie się i wzrost aktywności sejsmicznej górotworu.

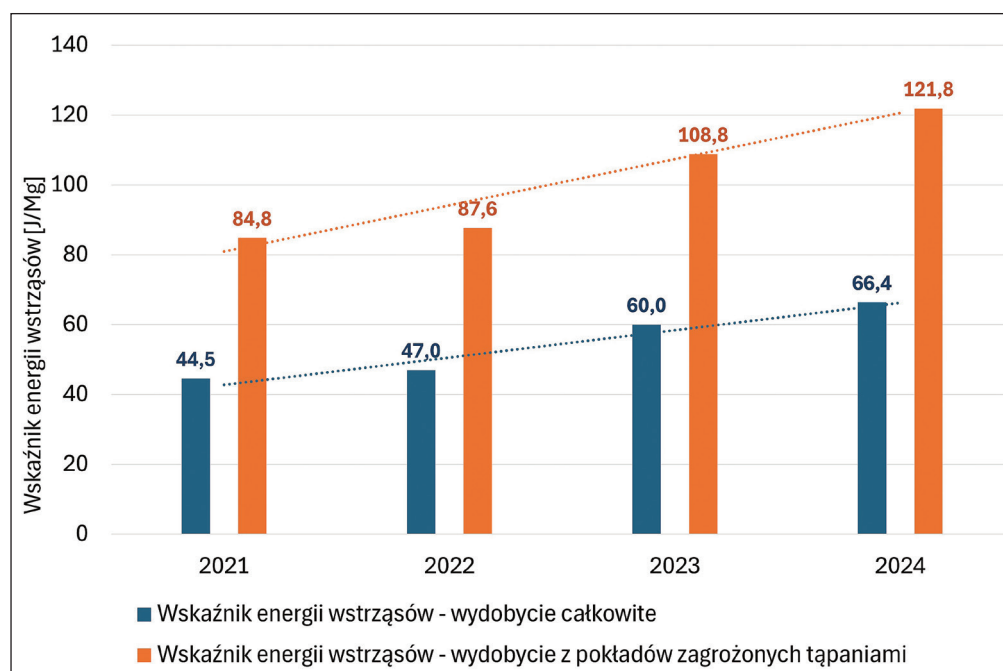
5.1. Głębokość eksploatacji

Eksploatacja węgla kamiennego prowadzona jest na coraz większych głębokościach, w KWK „Budryk” aktualnie sięgających 1290 m. Około 90% wydobywania uzyskiwane jest z głębokości ponad 500 m, a połowa kopalń prowadzi eksploatację poniżej 1000 m. Średnia głębokość robót górniczych wynosi ok. 800 m, zwiększając się w ostatnich latach o ok. 10 m rocznie. Wraz ze zwiększającą się głębokością ma miejsce wzrost wielkości naprężeń pierwotnych w górotworze, a także parametrów wytrzymałości skał otaczających pokłady,

co wynika m.in. z kompaktacji skał pod wpływem ciśnienia grawitacyjnego.

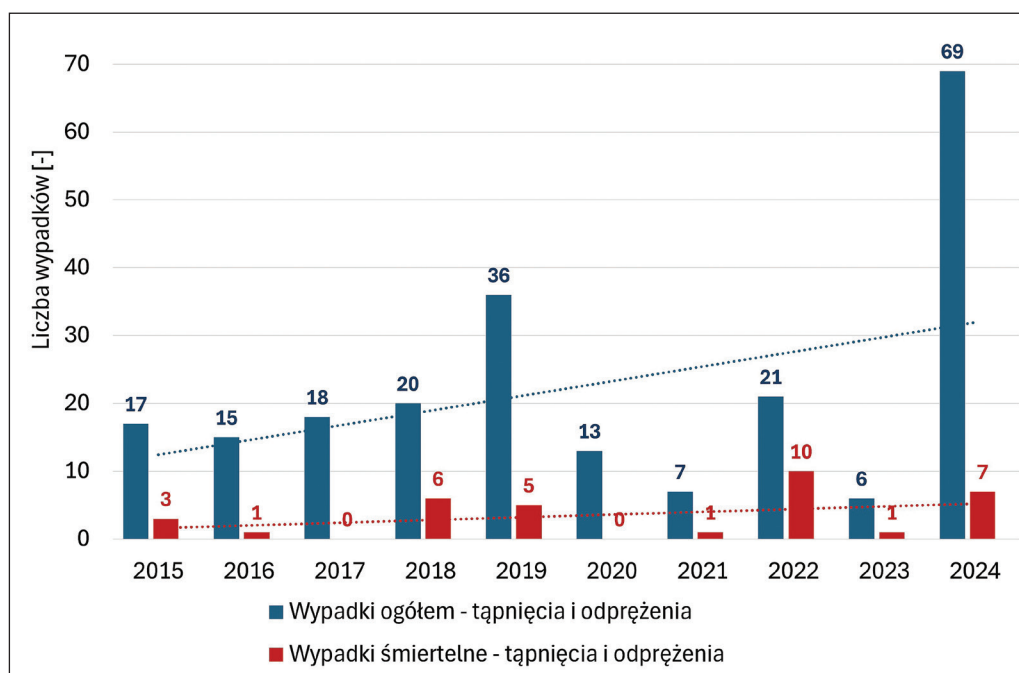
Roboty górnicze w kopalniach GZW prowadzone są w warstwach karbonu produktywnego, pod względem litologicznym wykształconego jako kompleks łupków ilastych i piaszczystych oraz piaskowców z pokładami węgla. Właściwości wytrzymałościowe większości węgla wskazują na ich spadek wraz z głębokością. Przeciwnie, w skałach otaczających pokłady z głębokością zaznacza się nierównomierny, wyraźniejszy w piaskowcach niż w łupkach ilastych, wzrost ich wytrzymałości [7].

Wysokie wartości składowych stanu naprężenia w pokładach i skałach otaczających (tzw. strefy koncentracji naprężeń), zwłaszcza w warstwach charakteryzujących się dużymi wartościami parametrów wytrzymałościowych, są jedną z przyczyn występowania aktywności sejsmicznej górotworu. Stąd im większa głębokość eksploatacji, tym większa sejsmiczność górotworu i zagrożenie tąpnięć, w tym prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia lub odprężenia. W efekcie średnia głębokość eksploatacji pokładów zagrożonych tąpnięciami oraz wystąpienia tąpnięć i odprężeń jest większa od średniej głębokości eksploatacji wszystkich pokładów [8, 9].



► Rys. 5. Wskaźniki energii wstrząsów w latach 2021–2024

► Fig. 5. Seismic energy rates in the years 2021–2024



► Rys. 6. Wypadkowość w wyniku tąpnięć i odprężeń w latach 2015–2024

► Fig. 6. Accident rate resulting from rock bursts and stress-relief events in the years 2015–2024

5.2. Grubowarstwowa budowa górotworu

Charakterystyczna dla rodzimych złóż węgla kamiennego grubowarstwowa budowa górotworu przejawia się występowaniem pokładów o znacznych miąższościach oraz zalegających w ich sąsiedztwie grubych (kilkunasto-kilkudziesięciometrowych) wytrzymałych warstw piaskowców i/lub łupków piaszczystych, zdolnych do kumulowania energii sprężystej, określanych mianem warstw potencjalnie wstrząsogennych. Eksploatacja pokładów grubych wskutek podbierania warstw nadległych powoduje większe deformacje skał, które w wyniku pękania, zwłaszcza w przypadku warstw wstrząsogennych, generują wysokoenergetyczne wstrząsy, decydujące o skali zagrożenia tąpnięciami. Dotyczy to również wybierania pokładów na warstwy w aktualnie wyłącznie stosowanej kolejności, czyli wybierania z góry na dół. W takim układzie wykonanie wyrobisk przygotowaw-

czych i prowadzenie eksploatacji po spodku węglowym może w przypadku tąpnięć czy odprężeń prowadzić, poprzez procesy zniszczenia węgla w niewybranych niżej leżących warstwach, do gwałtownego wypiętrzania spodku węglowego do wyrobisk.

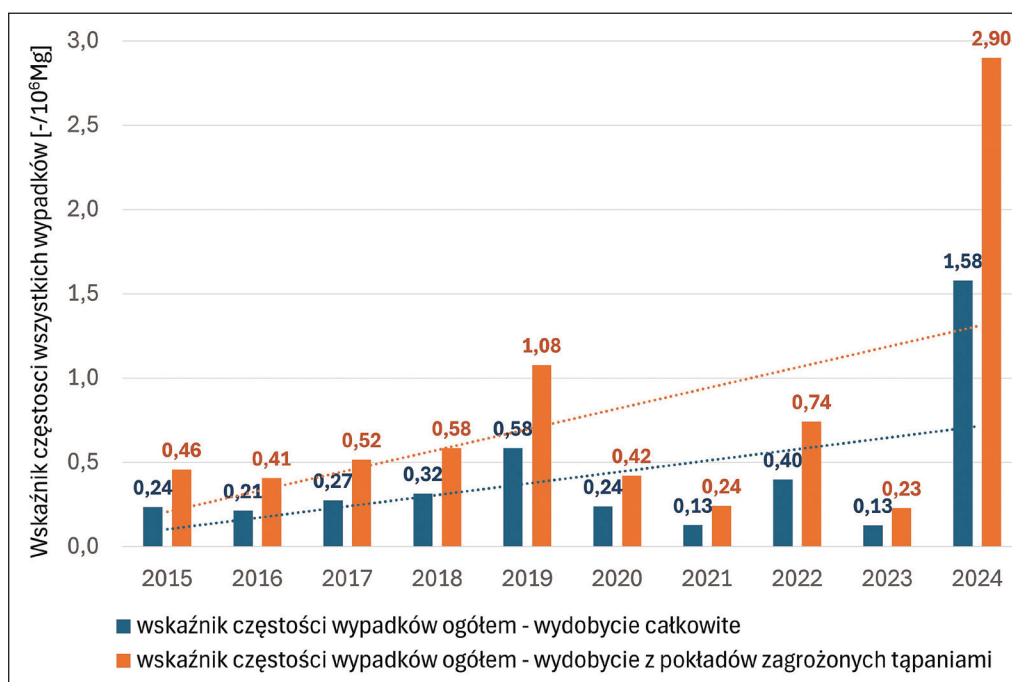
5.3. Zaburzenia geologiczne

Złoże węgla kamiennego w obszarze GZW charakteryzują liczne zaburzenia geologiczne. Do najczęściej spotykanych, a zarazem najbardziej uciążliwych przy prowadzeniu robót górniczych należą zaburzenia sedymentacyjne i tektoniczne, które wywołują niekorzystne zmiany w kształtowaniu się stanu naprężenia w górotworze, a w konsekwencji wzrost zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami. Zaburzenia sedymentacyjne występują zazwyczaj w postaci: ścienień, wymyć, zaników oraz anomalii miąższości pokładów i odległości między nimi.

► Tab. 7. Wskaźniki częstości wypadków w wyniku tąpnięć i odprężeń w latach 2015–2024

► Table 7. Accident frequency rates resulting from rock bursts and stress-relief events in the years 2015–2024

Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Wskaźnik częstości wszystkich wypadków (całkowite wydobyte) [-/10 ⁶ Mg]	0,24	0,21	0,27	0,32	0,58	0,24	0,13	0,40	0,13	1,58
Wskaźnik częstości wypadków śmiertelnych (całkowite wydobyte) [-/10 ⁶ Mg]	0,04	0,01	0,00	0,09	0,08	0,00	0,02	0,19	0,02	0,16
Wskaźnik częstości wszystkich wypadków (wydobyte z pokładów zagrożonych tąpnięciami) [-/10 ⁶ Mg]	0,46	0,41	0,52	0,58	1,08	0,42	0,24	0,74	0,23	2,90
Wskaźnik częstości wypadków śmiertelnych (wydobyte z pokładów zagrożonych tąpnięciami) [-/10 ⁶ Mg]	0,08	0,03	0,00	0,18	0,15	0,00	0,03	0,35	0,04	0,29



► Rys. 7. Wskaźnik częstości wszystkich wypadków wskutek łąpanieć i odprężeń w latach 2015–2024

► Fig. 7. Frequency rate of all accidents resulting from rock bursts and stress-relief events in the years 2015–2024

Niejednokrotnie decydują one, również w trakcie prowadzenia robót górniczych, o zmianach w projektach eksploatacji, w tym podejmowaniu decyzji o pozostawieniu resztek czy fragmentarycznym zupełnym lub czasowym zaniechaniu wybierania, co może się przełożyć na ujawnienie lub wzrost zagrożenia łąpaniami.

Występowanie i przebieg zaburzeń tektonicznych, zwłaszcza uskoków o znacznych amplitudach zrzutu (od kilkunastu do kilkuset metrów), które niejednokrotnie wyznaczają granice partii, rejonów i pól eksploatacyjnych, stwarzają konieczność wydzielania resztek złoża. Eksploatacja w sąsiedztwie uskoków o dużych zrzutach może prowadzić do ich uaktywniania (przerwania ciągłości i poślizgu warstw na płaszczyźnie uskokuwej) i generowania wysokoenergetycznej aktywności sejsmicznej. Zarejestrowane dotychczas w kopalniach GZW wstrząsy o maksymalnych wartościach energii oraz towarzyszące im łąpania i odprężenia niejednokrotnie miały miejsce w otoczeniu takich uskoków [3, 6].

5.4. Zaszłości eksploatacyjne

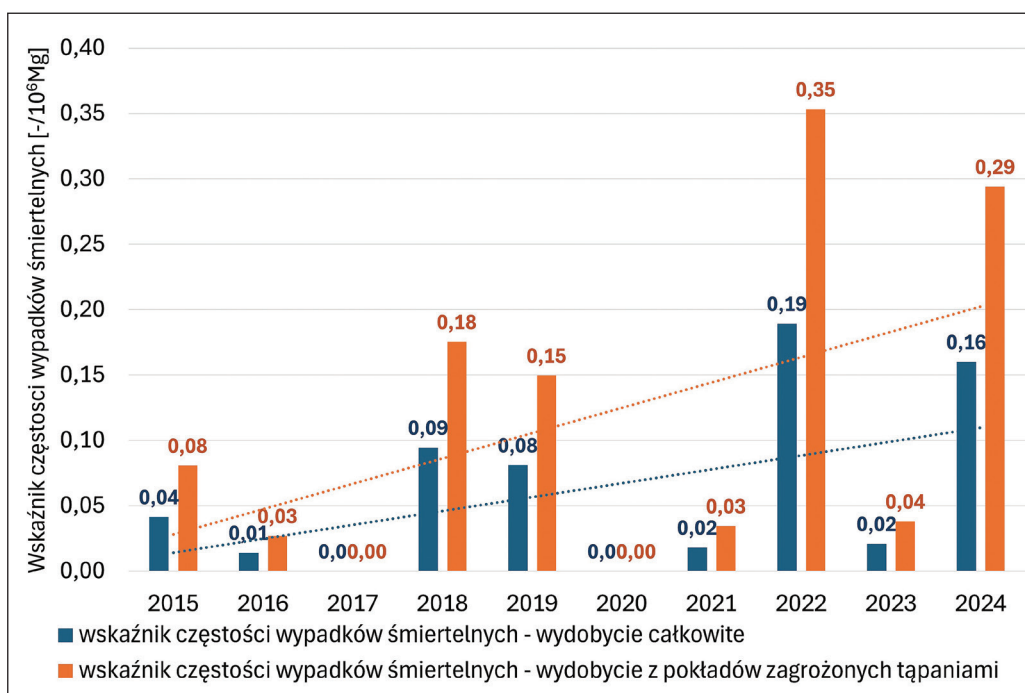
Wielopokładowy charakter złoża węgla kamiennego powoduje, iż istotną cechą prowadzonej eksploatacji jest występowanie różnego rodzaju zaszłości eksploatacyjnych, czyli swego rodzaju zmian w stanie złoża (górotworu) będących konsekwencją podejmowanych i planowo lub wskutek nieprzewidzianych zdarzeń zaniechanych robót górniczych. Oddziaływanie określonych mianem zaszłości eksploatacyjnych zrobów, krawędzi eksploatacyjnych i filarów resztkowych wywołuje w górotworze nierównomierny rozkład stanu naprężenia, powodując spadek wartości naprężeń w otoczeniu zrobów (strefy odprężone) oraz ich wzrost w rejonach krawędzi i niewybranych calizn węglowych (strefy koncentracji

naprężeń). Występowanie krawędzi eksploatacyjnych i filarów resztkowych przez negatywnie oddziaływanie na otaczający górotwór może w wyniku procesów pęknięcia uaktywnić zalegające w stropie pokładów warstwy potencjalnie wstrząsogenne. Z kolei ich wpływ na wyżej lub niżej zalegające pokłady może sprzyjać energetycznemu przygotowaniu calizn węglowych do łąpania [10].

Z rozkładów lokalizacji ognisk wstrząsów rejestrowanych w trakcie eksploatacji pokładów zagrożonych łąpaniami w rejonie zarówno bliskiego, jak i odległego sąsiedztwa krawędzi eksploatacyjnych i filarów resztkowych, a zwłaszcza ich superpozycji, jednoznacznie wynika, że wzmożona aktywność sejsmiczna, w tym występowanie wysokoenergetycznych wstrząsów, była wynikiem oddziaływania tych zaszłości. Wielokrotnie jedną z przyczyn zaistniałych w kopalniach GZW łąpanieć i odprężeń było również oddziaływanie krawędzi eksploatacyjnych i filarów resztkowych.

5.5. Resztkowe partie złoża

Istotnym problemem większości kopalń węgla kamiennego w GZW, zwłaszcza tych, które w znacznej mierze szarpały swoje zasoby, jest konieczność wybierania nieregularnych partii resztkowych, usytuowanych w filarach ochronnych likwidowanych szybów oraz filarach oporowych wyrobisk kapitalnych, w tym także części pokładów pozostawionych w wyniku decyzji o zaniechaniu eksploatacji. Będące konsekwencją stopnia wyeksploatowania złoża prowadzenie robót górniczych w obszarach resztkowych zwiększa zagrożenie sejsmiczne i łąpaniami, głównie z uwagi na lokalną koncentrację naprężeń, potęgowaną często superpozycją wpływów krawędzi eksploatacyjnych i filarów resztkowych pokładów sąsiednich [3].



► Rys. 8. Wskaźnik częstości wypadków śmiertelnych wskutek tąpnięć i odprężeń w latach 2015–2024

► Fig. 8. Frequency rate of fatal accidents resulting from rock bursts and stress-relief events in the years 2015–2024

5.6. Odwadnianie zbiorników wodnych

Do metod zwalczania zagrożenia pożarami endogenicznymi zaliczane są rekonsolidacja i nawilżanie rumowiska zawalowego oraz uszczelnianie zrobów. Metody te realizowane są poprzez doprowadzenie do zrobów mieszaniny wodno-popiołowej lub podsadzki. W wyniku podejmowanych działań oraz często występującego dopływu naturalnego powstają podziemne zbiorniki wodne, wielokrotnie o znacznych pojemnościach. Tworzenie się i utrzymywanie zbiornika wodnego powoduje zawodnienie niżej zalegających warstw skalnych. Zawodnienie skał, wywołujące ich „osłabienie” poprzez m.in. zmniejszenie wytrzymałości i obniżenie wartości modułów sprężystości skał, ogranicza ich zdolność do kumulowania naprężeń [7].

Powstanie zbiornika wodnego, związane ze wzrostem zagrożenia wodnego, w istotny sposób wpływa na możliwości i warunki prowadzenia robót górniczych w jego sąsiedztwie. Stąd rozpoczęcie wykonywania wyrobisk górniczych w kierunku zbiornika wodnego powoduje konieczność jego odwodnienia wraz z postępowaniem drążenia. Doświadczenia kopalń wskazują, że w takich sytuacjach, w trakcie prowadzenia robót górniczych obserwowana jest podwyższona aktywność sejsmiczna górotworu, a tym samym wzrost zagrożenia tąpnięciami. Sejsmiczność ta generowana jest w stropowych warstwach piaskowca zalegających poniżej zbiornika wodnego, co wynika z ich osuszania, a w konsekwencji ponownej, odwrotnej przy ich zawodnieniu, zmiany własności odkształceniowych zwiększającej ich zdolność do kumulacji energii sprężystej i generowania w procesach zniszczenia wysokoenergetycznych wstrząsów.

Drążenia wyrobisk korytarzowych prowadzone równocześnie z odwadnianiem zbiornika wodnego potwier-

dzają wpływ odwadniania górotworu na wzrost poziomu zagrożenia sejsmicznego. Większość takich przypadków dotyczyło robót górniczych prowadzonych w pokładach rudzkich i siódłowych, w których stropach występowały grube warstwy piaskowca, a wzrost aktywności sejsmicznej miał miejsce w środkowej i końcowej fazie oraz po zakończeniu odwadniania zbiorników wodnych.

6. Podsumowanie

Zagrożenie tąpnięciami jest jednym z wiodących, a w ostatnich latach najbardziej katastroficznych zagrożeń naturalnych w kopalniach węgla kamiennego. Ujawnianie się go może być nie tylko przyczyną tąpnięć czy odprężeń, skutkując wypadkami pracowników, ale także powodować ograniczenie, okresowe zatrzymanie, a nawet zaniechanie eksploatacji, tym samym wpływając na zmniejszenie wydobywania, a w niektórych przypadkach prowadząc do skrócenia czasu funkcjonowania kopalni. Zagrożenie tąpnięciami, współwystępując z zagrożeniami metanowym i pożarami endogenicznymi, może powodować wzrost ich stanu, inicjując wypływy metanu czy pożary endogeniczne.

Z analizy stanu zagrożenia tąpnięciami w latach 2015–2024, w tym zmienności zdefiniowanych wskaźników sejsmiczności oraz wypadkowości wskutek tąpnięć i odprężeń, wynika, że pomimo spadku wydobywania z pokładów zagrożonych tąpnięciami zarówno wielkość zagrożenia tąpnięciami, jak i wypadkowość spowodowana ujawnianiem się tego zagrożenia wzrasta.

Odnotowane w ostatnich latach wysokoenergetyczne wstrząsy oraz towarzyszące im tąpnięcia i odprężenia jednoznacznie wskazują, że przyczynami wysokiego poziomu sejsmiczności i zagrożenia tąpnięciami jest prowadzenie robót górniczych w coraz większym stopniu zaawansowania i skrepowania eksploatacji. Roboty górnicze prowadzone są

w trudnych warunkach geologiczno-górnich, takich jak: duża głębokość zalegania złoża, grubowarstwowa budowa górotworu, zaburzenia uskokowe, zaszczości eksploatacyjne oraz resztkowe partie złoża. Ujawnianie się oraz wzrost aktywności sejsmicznej górotworu ma również miejsce w trakcie prowadzenia robót górniczych w rejonie odwodniania zbiorników wodnych.

Wzrost w ostatnich latach zagrożenia sejsmicznego i tąpniętami, w tym liczby zaistniałych tąpnięć i odprężeń, wskazuje na potrzebę zintensyfikowania działań zmierzających do poprawy, oceny i zwalczania tego zagrożenia, zwłaszcza w odniesieniu do robót górniczych prowadzonych w skrzepowanych warunkach geologiczno-górnich.

Analysis of the state and causes of rock burst hazards in hard coal mines in the years 2015–2024

Abstract: The article presents the current state of seismicity and rock burst hazard in hard coal mines. Based on the defined, extraction-related seismicity indicators (frequency and energy of high-energy tremors) and accident rates (frequency and severity of accidents) resulting from rock bursts and stress relief in rock mass, an analysis of changes in the level of tremors and rock burst hazard in the years 2015–2024 was carried out. The analysis of the variability of these indicators clearly shows that despite the decline in extraction, the magnitude of the seismic hazard and the accident rate resulting from rock bursts and stress reliefs is gradually increasing. This increase is greater in relation to extraction from seams at risk of rock bursts than in relation to total extraction.

During identification of the causes of the high level of seismic and rock burst hazard, reference was made to geological and mining conditions such as mining depth, thick-layered rock mass structure, geological disturbances, mining operations, and residual areas. Attention was also drawn to the impact of draining liquidated water reservoirs in the vicinity of mining operations on the seismic activity of the rock mass.

The increase in the level of seismic and rock burst hazard in recent years, including the number of rock bursts and stress relief, indicates the need to intensify actions to improve, assess and combat this hazard, especially in relation to conducting mining works in restricted geological and mining conditions.

Literatura

1. Prawo geologiczne i górnicze – ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. (Dz.U. z 2024 r. poz. 1290, z późn. zm.).
2. Burtan Z., Nowak-Senderowska D., Szczepański P., Methodology for identification of occupational hazards using their characteristic features in hard coal mining. "Applied Sciences" 2025, 15, 7079. doi: 10.3390/app15137079.
3. Burtan Z., Znaczenie skojarzonych zagrożeń naturalnych w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. „Przegląd Górniczy”, nr 11/2016, s. 21–29.
4. Wyższy Urząd Górniczy, Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2019 r. (2020 r., 2021 r., 2022 r., 2023 r., 2024 r.). Katowice 2020–2025.
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. z 2021 r. poz. 1617).
6. Rawicki Z., Stępień A., Rożek E., Błaszczuk A. Zagrożenia tąpniętami w polskim górnictwie w latach 1980–2015. „Przegląd Górniczy”, nr 4/2016, s. 38–47.
7. Bukowska M., Ćmiel S., Charakterystyka zmian właściwości skał karbońskich w strefach tektoniki nieciągłej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. „Górnictwo i Geoinżynieria”, r. 35, z. 2, 2011, s. 111–119.
8. Sokół-Szewiła V., Jarczyk P., Aktywność sejsmiczna indukowana eksploatacją złóż węgla kamiennego względem głębokości eksploatacji. [w:] P. Bańka i V. Sokół-Szewiła (praca zb.), Górnictwo i ochrona środowiska – wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2025, s. 324–342.
9. Mirek A., Dzik G., Błaszczuk A., Głębokość eksploatacji a poziom generowanej wydobywaniem aktywności sejsmicznej w kopalniach węgla kamiennego w latach 2005–2020. „Przegląd Górniczy”, nr 1/2022, s. 26–36.
10. Burtan Z., Chlebowski D., The effect of mining remnants on elastic strain energy arising in the tremor-inducing layer. Energies 2022, 15, 6031. doi: 10.3390/en15166031.