

*Antoni Kidybiński*

## ZAGROŻENIE TĄPANIAMI W GÓRNICTWIE ŚWIATOWYM – ROZPOZNAWANIE I ZAPOBIEGANIE

### Streszczenie

Tąpania występują w kopalniach położonych na pięciu kontynentach, a mianowicie w Europie (Polska, Czechy, Niemcy, Francja i Słowenia), Azji (Rosja, Indie, Chiny), Ameryce (USA, Kanada, Chile), Afryce (RPA) oraz Australii (Nowa Południowa Walia, Queensland i zachodnia Australia). Aktywność sejsmiczna górotworu i tąpania są zjawiskami powszechnymi w górnictwie światowym i występują wszędzie tam, gdzie wysokie naprężenia w skorupie ziemskiej i znaczna wytrzymałość skał prowadzą do ich dynamicznego niszczenia. Aktywność sejsmiczna górotworu oraz zagrożenie tąpniętami są ogólnie przewidywalne na podstawie badania własności mechanicznych skał i pomiarów naprężeń w górotworze, mogą być także skutecznie monitorowane przy zastosowaniu regionalnej sieci sejsmometrów, lokalnego układu odbiorników seismoakustycznych (geofonów), wierceń testowych w złożu przed frontem eksploatacji, pomiarów prędkości osiadania stropu zasadniczego i innych metod. Szczególnie przydatne są metody lokalizacji położenia stref występowania wysokich naprężeń w górotworze, a mianowicie tomografia sejsmiczna oraz sejsmologiczna tomografia pasywna. W wielu zagłębiach górniczych występowanie tąpnięć miało swój początek po przekroczeniu pewnej, charakterystycznej dla skał tego zagłębia, głębokości eksploatacji. W przypadku skał osadowych formacji węglonośnych, pomimo występowania węgla nawet na wielkich głębokościach, nigdzie nie udało się wydobywać go poniżej poziomu około 1500 m, co ma bezpośredni związek ze skrajnie wysokim nasileniem tąpnięć na tej głębokości.

Współcześnie działające w skorupie ziemskiej siły tektoniczne nie mają istotnego wpływu na występowanie tąpnięć, nawet w obszarach, gdzie naprężenie poziome kilkakrotnie przewyższa składową grawitacyjną (wschodnia Australia, Anglia). Sposób eksploatacji złoża i kierowania stropem ma silny wpływ na częstość występowania oraz energię tąpnięć. Powszechnie stwierdza się korzystny wpływ łagodnego i ograniczonego opuszczania stropu (podsadzka, upodatnione filary resztkowe) na ograniczenie zagrożenia tąpniętami. Na podstawie ostatnich badań stwierdzono korzystny wpływ regularnego, całotygodniowego postępu frontu eksploatacji na ograniczenie liczby i energii wstrząsów sejsmicznych górotworu. Najbardziej powszechnym sposobem monitorowania zagrożenia tąpniętami są rejestracje lokalizacji i energii źródeł wstrząsów sejsmicznych w regionalnych bądź lokalnych sieciach sejsmologicznych. Analiza struktury naruszonego górotworu na tej podstawie uwarunkowana jest jednak należyłą dokładnością wyznaczenia lokalizacji pionowej źródeł – co często nie jest możliwe w sieciach płaskich, związanych ze złożami osadowymi. Sieci sejsmiczne należy utrzymywać przez wiele lat po zakończeniu eksploatacji złoża w danym rejonie – ze względu na sejsmiczną aktywność poeksploatacyjną i konieczność dysponowania materiałem dowodowym w przypadku procesów sądowych o odszkodowanie z tytułu szkód wyrządzonych wstrząsami.

Wśród metod aktywnej profilaktyki tąpniowej częstością stosowania wyróżniają się najtańsze metody odprężania robotami strzałowymi, o często niekontrolowanych skutkach w górotworze. Na szerokie upowszechnienie zasługują natomiast nowoczesne technologie inżynierii stropów, szczególnie ich ukierunkowane hydrauliczne szczelinowanie.

W przeciwieństwie do kopalń rud metali, w górnictwie węglowym często niedoceniana jest rola obudowy wyrobisk korytarzowych – jako środka zapobiegającego niszczącym skutkom tąpnięć. Do najbardziej zalecanych sposobów unikania wypadków związanych z tąpniętami w tych wyrobiskach należy zaliczyć przykotwianie odrzwi obudowy łukowej do górotworu oraz zamiana obudowy odrzwiowej na kotwiovą – co sprawdziło się wielokrotnie, szczególnie w kopalniach węglowych w USA oraz Francji.

## Rockburst hazard in the world mining industry – recognition and prevention methods

### Summary

Rockbursts (or coalbumps) are occurring in underground mines of five continents and namely in Europe (Poland, Czech Republic, Germany, France and Slovenia), Asia (Russia, India and China), America (USA, Canada and Chile), Africa (Republic of South Africa) and Australia (New South Wales, Queensland and Western Australia). Seismic activity of rock masses and rockbursts are therefore common phenomena and they are appearing everywhere when high stresses in the earthcrust as well as considerable strength of rocks are leading to their dynamic destruction. Generally speaking, seismicity of rock strata and rockbursts are predictable on the basis of testing mechanical properties of rocks and stress measurements and may be therefore monitored by using regional networks of seismometers, local systems of microseismic detectors (geophones), test drillings (with measuring unit drill cuttings volume) in seams being worked ahead of mining faces, measuring of roof sag gradients in time and other methods. Seismic tomography and seismologic passive tomography are most useful because they can precisely locate high stress concentration zones.

In several mining districts rockbursts occurring was preceded by trespassing by mining activity of certain characteristic for local conditions value of mining depth. For coal bearing sedimentary rocks for example never mining was possible below 1500 m level, although coal seams may occur even at lower horizons and this was caused by extremely high frequency of rockbursts occurrence at great depth. On the other hand contemporary tectonic forces in the earth crust do not have significant effect on rockbursts occurrence even in areas where horizontal stress component exceeds several times vertical stress such as eastern Australia and G. Britain. Mining system however and roof control method both have crucial effect on frequency and energy of occurring rockbursts. It has been found that limited and quiet roof subsidence due to backfilling or remnant pillars left has beneficial effect on numbers of rockbursts occurring. The latest research works have shown that regular advances of mining extraction fronts over a week also reduce number and energy of seismic events occurring.

The most popular method of monitoring seismic and rockburst hazard is to record locations and energy of seismic events through both regional and local seismic networks. Accuracy of rock mass structure analyses based on these records are highly dependent however on precision of vertical positioning of sources, which is rarely satisfactory in horizontal mining layouts due to horizontal network structure. Seismic networks should be maintained long time after closing the mines due to postmining seismicity which extends over several years and may cause damage to structures being a subject of claims.

Among methods of reducing rockburst hazard those less costly are usually preferred such as destressing by blasting, which is hard to control concerning its effect on rock masses. It is advisable therefore to more widely apply newly worked-out technologies of roof strata engineering and particularly directional hydraulic fracturing. As contrary to metal ore mines in coal mining often the role of rockbolting is undervalued in reducing the risk of roof and rib failure. It is advised to fix steel arches to adjacent rocks using resin bolts and to change generally support system in coal mines from steel arches in longwall gates and other roadways to rockbolting which proved to be successful in the USA and France in preventing accidents caused by rockbursts and roof falls.

### 1. WSTĘP

Od zarania swego istnienia górnictwo boryka się z objawami niestateczności górotworu otaczającego wyrobiska zarówno podziemne, jak i odkrywkowe. W miarę eksploatacji na coraz większych głębokościach i obejmowania eksploatacją skał o dużej wytrzymałości zjawiska te w coraz większym stopniu nabierały charakteru dynamicznego o wzrastającej energii odkształcenia. Postęp wiedzy o tąpnięciach związany z obserwacjami praktyków górniczych oraz systematycznymi badaniami naukowymi doprowadził stopniowo do zrozumienia istoty tąpnięć oraz ich typizacji

i klasyfikacji. Duży wkład w zrozumienie istoty tąpnięć wniosły szczególnie badania sejsmologiczne i sejsmiczne górotworu. W ostatnim 20-leciu – na podstawie dokonanych badań – pogłębiło się znacznie zrozumienie faktu, że tąpnięcia nie są nieuniknioną zemstą sił natury, z którą należy się pokornie pogodzić, lecz elementem eksploatacji górniczej, który może być w znacznym stopniu kontrolowany i eliminowany przez odpowiednie prowadzenie robót górniczych.

Ze względu na to, warto śledzić osiągnięcia światowego górnictwa oraz praktycznie wykorzystywać jego doświadczenia, pozwala to bowiem na szybsze wprowadzenie do praktyki sprawdzonych rozwiązań zapobiegającym skutkom tąpnięć, jak również samym tąpnięciom. Należy dodać, że znaczący wkład do poznania natury tąpnięć, jak również ich opanowywania – wniosły polska nauka i praktyka górnicza. Ze względu jednak na dobrą znajomość przez krajową górniczą kadrę inżyniersko-techniczną polskich dokonań w omawianej dziedzinie, w niniejszym opracowaniu uwaga została skupiona głównie na pracach zagranicznych. Poniżej omówiono krótko zasięg geograficzny zjawiska tąpnięć, następnie zaś przedyskutowano ważniejsze problemy i doświadczenia światowego górnictwa pod kątem poznania tąpnięć i przeciwdziałania ich skutkom.

## 2. ZASIĘG GEOGRAFICZNY ZJAWISKA TĄPŃ

Tąpnięcia występują w kopalniach położonych na pięciu kontynentach, a mianowicie: w Europie (Polska, Czechy, Niemcy, Francja i Słowenia), Azji (Rosja, Indie, Chiny), Ameryce (USA, Kanada, Chile), Afryce (RPA) oraz Australii (Nowa Południowa Walia, Queensland i Zachodnia Australia). Poniżej omówiono w skrócie najbardziej charakterystyczne cechy tąpnięć i zjawisk dynamicznych w górotworze – występujących w poszczególnych krajach.

### **Polska**

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym największe nasilenie tąpnięć w kopalniach wystąpiło w latach 1950–1960, kiedy to ich liczba wynosiła maksymalnie około 300 rocznie. W późniejszych latach – wskutek porządkowania eksploatacji oraz prowadzenia licznych prac badawczo-wdrożeniowych z zakresu geofizyki i geomechaniki, liczba tąpnięć systematycznie zmniejszała się i obecnie wynosi kilka tąpnięć w skali roku.

Drugim obszarem występowania tąpnięć są kopalnie rud miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym, gdzie towarzyszą one silnym wstrząsom górotworu, mającym swoje ogniska w mocnych skałach stropowych.

### **Czechy**

Miejscem występowania tąpnięć w Czechach są kopalnie Ostrawsko-Karwińskiego Okręgu Węglowego (OKR), stanowiącego geologicznie południową część niecki górnośląskiej. Od chwili rozpoczęcia eksploatacji pokładów węgla ponad 200 lat temu wystąpiło tam ogółem ponad 450 tąpnięć, zaś w latach 1989–1999 – łącznie 66 tąpnięć [37]. Typowa wytrzymałość na ściskanie skał tego rejonu górniczego wynosi: węgle 20÷35 MPa, ilowce 40÷60 MPa, mułowce 60÷120 MPa, piaskowce 70÷100 MPa, zlepińce 60÷80 MPa, zaś głębokość eksploatacji wynosi obecnie około 700 m.

### Niemcy

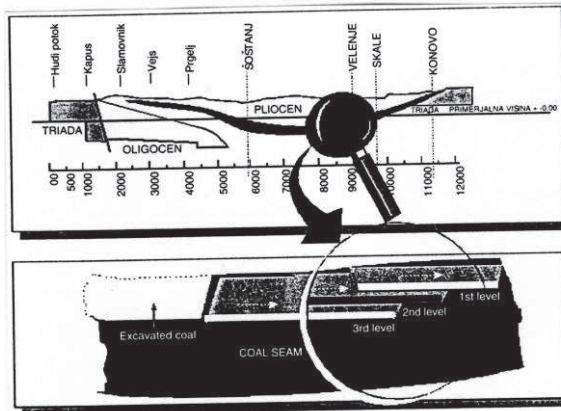
Miejszem najaktywniejszego występowania tąpnięć były i są kopalnie węgla w Zagłębiu Ruhry. W latach 1973–1992 w kopalniach tego zagłębia wystąpiło 50 tąpnięć (średnio 2-3 rocznie), w tym 9 poważnych – na głębokości eksploatacji 850÷960 m. Wydobycie w tym okresie wynosiło łącznie 1300 mln ton (średnio 65 mln t/rok) [4]. Po 1992 roku nastąpił spadek wydobycia, zaś niektóre z najbardziej zagrożonych tąpnięciami kopalń zostały zamknięte pod naciskiem opinii publicznej. W wyniku tego liczba tąpnięć znacznie zmalała i obecnie występują one sporadycznie.

### Francja

W 2001 roku tąpnięcie wystąpiło w jednej z trzech istniejących jeszcze kopalń węgla, a mianowicie, pracującej w Zagłębiu Lotaryńskim kopalni Merlebach. Było ono spowodowane wstrząsem sejsmicznym w leżącej pod pokładem Frieda 5 warstwie piaskowca i objawiło się wyrzuceniem 4-metrowej warstwy pokładu zalegającej w spodku chodnika podścianowego położonego na głębokości 1350 m [33]. Wraz z planowanym zamknięciem pozostałych kopalń węgla w 2004 roku problem tąpnięć przestanie w tym kraju istnieć.

### Słowenia

Wstrząsy sejsmiczne oraz sporadycznie tąpnięcia występują w pracującej na głębokości 60÷460 m kopalni węgla brunatnego (lignitu) Velenje [45], wydobywającej węgiel o wytrzymałości na ściskanie 5,4÷8,4 MPa (strop – do 2,5 MPa, spąg 4,9 MPa) z plioceńskiego pokładu o grubości od 20 do 160 m. Złoże eksploatowane jest warstwami z góry na dół systemem ścianowym podbierkowym z tym, że z każdej warstwy jest wybierana tylko dolna ława, górna jest zaś zestrzeliwana przez okna w obudowie osłonowej. Tąpnięcia niszczą lub uszkadzają zarówno wyposażenie wyrobiska ścianowego, jak i przyległe chodniki w stalowej obudowie kołowej – głównie przez dynamiczne wypiętrzenia spągu. Schemat eksploatacji złoże w kopalni Velenje przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Szkic systemu eksploatacji węgla brunatnego w kopalni Velenje (Słowenia) [45]

Fig. 1. Sketch of lignite mining system at Velenje mine (Slovenia) [45]

## Rosja

Po rozpadzie ZSRR w granicach Federacji Rosyjskiej znalazły się zagłębia: Kizielowskie, Prokopiewskie oraz Kuźnieckie. W zagłębiach tych, a zwłaszcza w Kizielowskim, od wielu lat występowały silne wstrząsy i tąpnięcia. W ostatnim dziesięcioleciu cały przemysł węglowy Rosji przechodził restrukturyzację i prywatyzację, wskutek czego brak jest publikacji przedstawiających systematycznie stan zagrożenia tąpnięciami w kopalniach wymienionych zagłębi węglowych.

W kopalniach rud metali działających od XVIII wieku w Altajsko-Sajańskim rejonie Syberii – w strefie sfałdowanej, charakteryzującej się silnymi wstrząsami tektonicznymi – najsilniejsze wstrząsy i tąpnięcia występują w kopalniach rejonów Tasztaoł, Szeregesz, Kaz i Abakan. W 1982 roku w złożu Tasztaoł wystąpił, spowodowany robotami górniczymi, wstrząs sejsmiczny o magnitudzie 9<sup>1</sup>, który zniszczył dwa poziomy w lokalnej kopalni [39]. W pobliskiej kopalni eksploatującej złożo Koczurinsk zarejestrowano ostatnio tąpnięcie i wstrząs o energii sejsmicznej 10<sup>9</sup> J. Ogólnie w latach 1988–2000 zarejestrowano na tym obszarze ponad 1500 zjawisk dynamicznych o energii od 10<sup>2</sup> do 10<sup>10</sup> J.

## Indie

Średnia głębokość kopalń węgla kamiennego w Indiach wynosi 180÷200 m, przede wszystkim tępnięć nie jest w nich dominujący. Jednak w kilku miejscach zagłębia Raniganj (pokład Dishergarh w kopalniach Chinakuri i Parbelia, pokłady Koithi i Poniaty w kopalni Girimint) – gdzie głębokość przekracza 300÷500 m – tępnięcia występują od lat dwudziestych XX wieku. Dotyczy to 12 kopalń w wymienionym zagłębiu, w którym w latach 1944–1964 zaistniały 94 tępnięcia ze 136 wypadkami śmiertelnymi, zaś w latach 1976–1986 zaistniało 69 wypadków śmiertelnych oraz ciężkich, spowodowanych tępnięciami [18]. W celu ograniczenia liczby tępnięć, w kopalniach tych wprowadzono wiele zmian w systemie eksploatacji, a mianowicie zastosowano podszkłę w ścianach i polach filarowych, eksploatację grubych pokładów na warstwy oraz częściowo zrezygnowano z systemu polegającego na rozszczepianiu filarów. Znaczne ograniczenie liczby tępnięć było głównie skutkiem wprowadzenia systemu ścianowego z podszkłą.

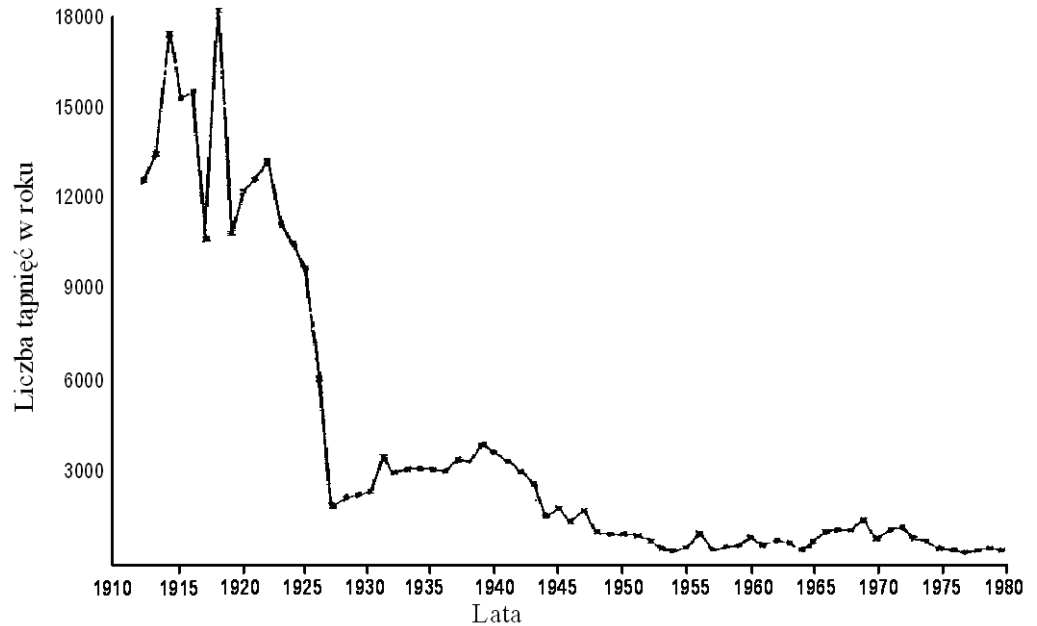
Drugim obszarem występowania tępnięć w Indiach są (a raczej były) kopalnie złota zagłębia Kolar Gold Fields (KGF), będącego jednym z nielicznych w świecie historycznych przykładów eksploatacji podziemnej prowadzonej w sposób ciągły od 2000 lat. KGF jest położone 100 km na wschód od Bangalore w stanie Karnataka w południowych Indiach. Występowanie tępnięć w kopalniach KGF notowano od początku XX wieku, a największe ich nasilenie nastąpiło z chwilą osiągnięcia maksymalnej głębokości eksploatacji – około 3200 m.

Skąły złotoosne występują w KGF w postaci stromych żył, a są to hornblenda łupkowa, pegmatyt i gnejs – ciągnące się pasem o długości 8 km, w obrębie którego znajdowały się do niedawna ostatnie trzy kopalnie (Mysore, Champion Reef i Nundydroog). Od czasu wystąpienia pierwszego tępnięcia (1898 rok, kopalnia

<sup>1</sup> Ta wartość magnitudy jest właściwa dla trzęsień Ziemi. Jest ona jednakże podana w cytowanym artykule Kurlenyi.

Oorgaum, poziom 960) obszar KGF, obok Ontario w Kanadzie i południowej Afryki, stał się centrum prac badawczych, technologicznych i metodycznych z zakresu tąpnięć, a liczne publikacje i podręczniki analizujące to zjawisko przez długi czas były wzorcem dla opracowań wydawanych na innych obszarach górniczych [43]. Charakterystyczne dla KGF jest to, że występowały tu wszystkie typy tąpnięć od naprężeniowych do wzbudzonych wstrząsem sejsmicznym, bądź będących samymi źródłem wstrząsu sejsmicznego. Zanotowano także kilka tąpnięć w szybach czynnych lub w czasie ich budowy.

Wykres przedstawiający liczbę tąpnięć i wstrząsów w kopalniach KGF w okresie 1910–1980 pokazano na rysunku 2 [38].



Rys. 2. Częstość występowania tąpnięć w kopalniach zagłębia Kolar Gold Fields w Indiach w latach 1910–1980 [38]

Fig. 2. Rockburst occurrence rate in the mines of the Kolar Gold Fields basin, India, over the years 1910–1980 [38]

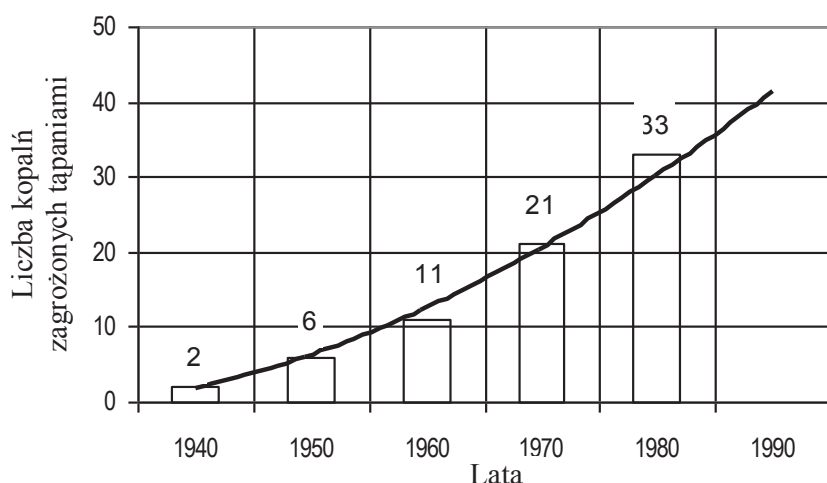
### Chiny

W górnictwie węglowym Chin pierwsze tąpnięcie wystąpiło w kopalni SL w 1933 roku, na głębokości około 200 m, zaś w ciągu 49 lat, od 1949 do 1997, zdarzyło się ponad 2000 tąpnięć. Maksymalna magnituda wstrząsu sejsmicznego związanego z tąpnięciem wynosiła 4,2. W 33 kopalniach zagrożonych obecnie tąpnięciami występują następujące warunki geologiczno-górniczne:

- głębokość eksploatacji 200÷800 m,
- minimalna głębokość występowania tąpnięć 200÷620 m,
- typ węgla: energetyczny, koksowy, gazowy, antracyt,

- grubość pokładu węgla: 0,2÷19 m,
- nachylenie pokładu: 0÷90°,
- strop: piaskowiec, wapień, łupek,
- system eksploatacji (w przewadze): ściany z podsadzką urabiane strzałowo w systemie od pola, ściany zawałowe urabiane mechanicznie w systemie od pola, system schodowy z urabianiem strzałowym (przy dużych upadach pokładu).

Na rysunku 3 pokazano wzrost liczby kopalń węgla zagrożonych tapaniami w latach 1940–1990 [62].



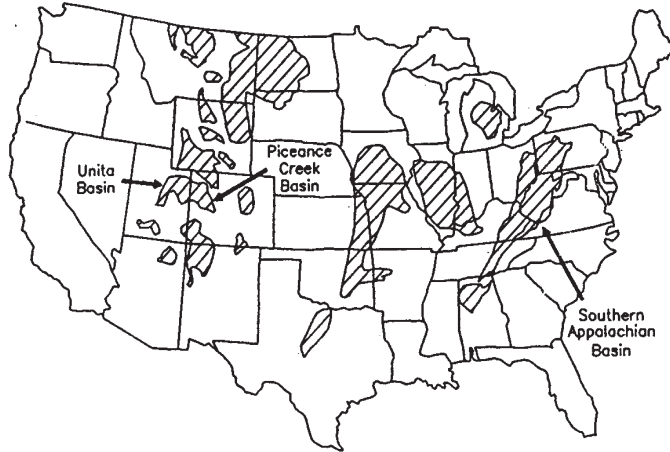
Rys. 3. Kopalnie węgla w Chinach zagrożone tapaniami w latach 1940–1980 [62]

Fig. 3. Coal mines in China endangered by rockburst hazard, over the years 1940–1980 [62]

Tapania w Chinach występują również w kopalniach rud metali [41]. Po raz pierwszy zaczęły się one pojawiać w latach siedemdziesiątych XX wieku w kopalniach rejonu północno-wschodniego, a mianowicie w kopalni rud antymonu Xikuangshan w prowincji Hunan, kopalni rud wolframu Pangushan w prowincji Jiangxi oraz kopalniach Yangjiazhangzi (rudę molibdenu) i Shizhuizi (rudę miedzi). Były to jednak zjawiska o małej energii. W ostatnich latach jednak (ok. 1990 r.) wiele kopalń rud metali nieżelaznych osiągnęło dużą głębokość – do 1000 m, na przykład kopalnia Dongguashan (miedź, 1074 m), kopalnia Hongtoushan (miedź, 1157÷1337 m – najgłębsza w Chinach) i na tych głębokościach tapania znacznie się nasiliły zarówno pod względem liczby, jak energii i zasięgu. Najgłębsze kopalnie rud cynkowo-olowiowych (Fankou w prowincji Guangdong i Huize w prowincji Yunnan) osiągnęły głębokość odpowiednio: 906 i 1009 m, zaś tapania w nich występujące stały się główną przeszkodą w produkcji. Formy tapanieć są różne od wyrzutów mas skalnych z ociosów chodników i komór do tapanieć w szybach w czasie ich budowy oraz dynamicznych wpiętrzeń spągu wyrobisk. Charakterystyczne jest występowanie tapanieć rozciąganych w czasie (wielofazowych), trwających do 20 dni.

### Stany Zjednoczone

W USA tapania występują w kopalniach węgla rejonu południowych Appalachów (stany Kentucky, Wirginia, Zachodnia Wirginia) i zagłębi zachodnich (stany Kolorado i Utah), a także w kopalniach rud ołowiu i srebra zagłębia Coeur d'Alene w stanie Idaho. Na rysunku 4 pokazano główne obszary występowania tapani w kopalniach węgla kamiennego [27].



Rys. 4. Zagłębia węglowe oraz rejony występowania tapani w USA [27]

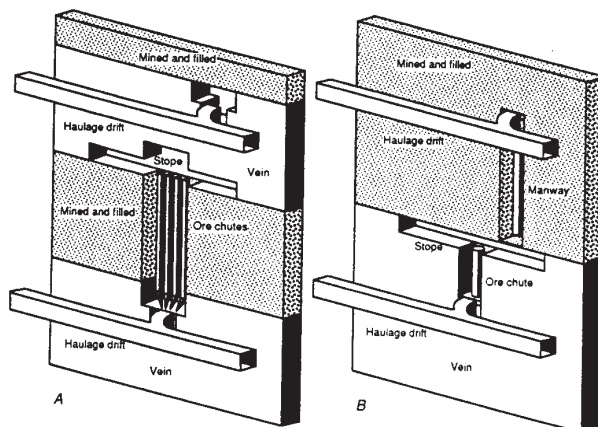
Fig. 4. Coal basins and regions of rockburst occurrences in the USA [27]

Zagrożonych tapaniami jest około 60 kopalń węglowych stosujących system filarowo-komorowy bądź ścianowy, czynnikiem zaś sprzyjającym występowaniu tapani jest obecność w stropach pokładów węglowych grubych warstw mocnych piaskowców (o wytrzymałości na ściskanie 140÷210 MPa), a także występowanie intruzji magmowych i uskoków w skałach otaczających pokłady węglowe. Pierwsze tapania zarejestrowano w kopalni Sunnyside nr 1 w stanie Utah w 1918 roku, zaś w zagłębiach wschodnich – w latach 1923–1934. Już wtedy rozróżniano tzw. **tapania ciśnieniowe** (w języku polskim – naprężeniowe) spowodowane przeciążeniem filara oraz **tapania wstrząsowe** (w języku polskim – stropowe), spowodowane pękaniem grubych warstw piaskowców stropowych. W latach 1925–1950 zarejestrowano w kopalniach węgla łącznie 177 tapani, w latach 1950–1984 tapania w kopalniach węgla spowodowały 28 wypadków śmiertelnych. Większość tapani wystąpiła na głębokości prowadzenia robót większej niż 300 m.

W zagłębiu rudnym Coeur d'Alene występują pionowe żyły kruszcowe w prekambryjskich kwarcytach i argilitach, ciągnące się wzdłuż strefy uskokowej Osburn biegnącej z zachodu na wschód na długości około 30 km. Bezpośrednio po odkryciu tych złóż (1883 r.) nastąpił intensywny rozwój górnictwa w ośmiu kopalniach (Bunker Hill, Crescent, Sunshine, Silver Summit, Galena, Calladry, Star oraz Lucky Friday). Kiedy po około pięćdziesięcioletnim okresie eksploatacji kopalnie osiągnęły głębokość około 800 m nasiliły się dynamiczne przejawy ciśnienia górotworu i przybrały



formę tąpnięć (pierwsze 2 wypadki śmiertelne w 1941 r.). Ponieważ eksploatacja prowadzona jest z zastosowaniem strzałowego sposobu urabiania, tąpnięcia zachodzą z reguły wkrótce po strzeleniu i nie powodują wielu ofiar. W niektórych przypadkach jednak znacznie większe szkody występują na powierzchni ze względu na amplifikację energii wstrząsu przechodzącego przez silnie zwięzłe kwarcyty. Obecnie maksymalna głębokość eksploatacji przekroczyła 2500 m i prowadzenie jej byłoby niemożliwe bez profilaktyki tapaniowej, którą są strzelania wstrząsowe, rozwiercanie wyprzedzające eksploatację, szczelinowanie oraz inne formy odprężania górotworu. Kopalnie zostały zmuszone do wprowadzenia tych środków od 1976 roku, kiedy maksymalna głębokość eksploatacji wynosiła około 2300 m. Na rysunku 5 pokazano dwa główne warianty stosowanego systemu eksploatacji złoża [46]. Najczęściej wysokość piętra wynosi 60 m, zaś podszatkę stanowi czysty piasek lub odpady skalne i przemysłowe.



Rys. 5. Dwa systemy wybierania złóż rudy w zagłębiu Coeur d'Alene (USA) [46]

Fig. 5. Two systems for extraction of ore deposits in Coeur d'Alene basin (USA) [46]

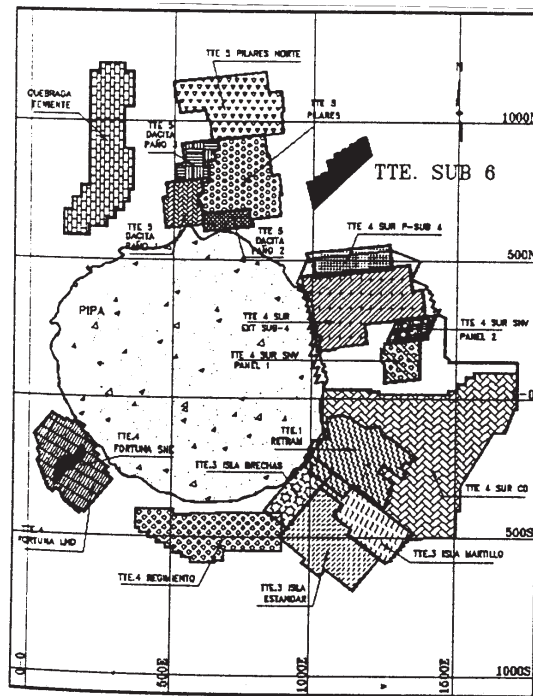
### Kanada

Pomimo istnienia czterech czynnych zagłębi węglowych (kolejno z zachodu na wschód: Rocky Mountains, Foothills, Plains i Nowa Szkocja) w kanadyjskich kopalniach węgla nie występują typowe tąpnięcia – co można wiązać z umiarkowaną maksymalną głębokością prowadzenia eksploatacji. W literaturze można jednak znaleźć wzmianki o historycznej kopalni w Nowej Szkocji, która osiągnęła głębokość eksploatacji około 1500 m i musiała w latach czterdziestych XX wieku zostać zamknięta z powodu skrajnego nasilenia tupań. Można przypuszczać, że była to najgłębsza w świecie kopalnia węgla kamiennego.

Największe kanadyjskie doświadczenia w zakresie eksploatacji złóż w warunkach zagrożenia tapaniami pochodzą z kopalń rud polimetalicznych w prowincjach Ontario (Sudbury) i Nowy Brunzwik [55]. Dotyczą one w przeważającej mierze doskonalenia obudowy wyrobisk tak, aby mogła się ona przeciwstawić istotnej części sił dynamicznych wywieranych przez skały wskutek tąpnięcia (zostały omówione w dalszej części niniejszego artykułu).

## Chile

Tapania występują wyłącznie w kopalni El Teniente eksploatującej od początku ubiegłego wieku (1906 r.) jedno z największych w świecie złóż rud miedzi związane z hydrotermalnie zmienionym bezpośrednim otoczeniem komina wulkanicznego o średnicy około 900 m (rys. 6).



Rys. 6. Mapa złoża rud miedzi kopalni El Teniente (Chile) [12]

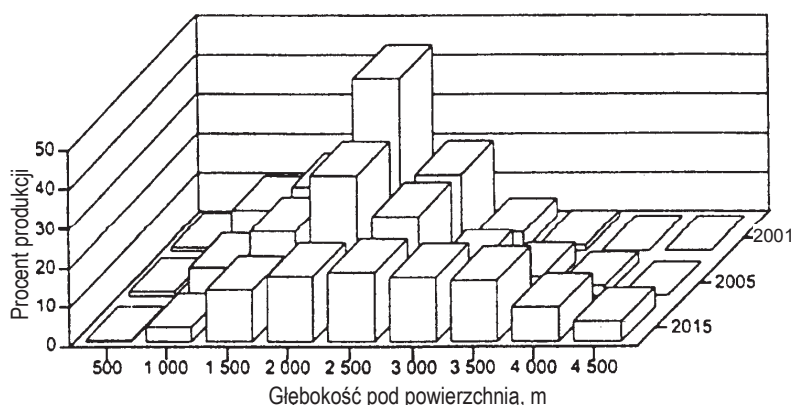
Fig. 6. Map of copper ore deposit at El Teniente mine (Chile) [12]

Kopalnia położona jest w terenie wysokogórskim w odległości około 70 km na południowy wschód od Santiago i w czasie jej istnienia wyeksploatowano 1100 mln ton rudy o średniej zawartości miedzi wynoszącej 1,1% [12]. Obecnie wydobywa i przetwarza 96 000 ton/dobę rudy złożonej głównie ze skał porfirowych, andezytów, diorytów oraz brekcji hydrotermalnej, przy czym strukturalnie złożo tworzy system wielokierunkowych żył i żyłek zcementowanych anhydrytem, kwarcem i siarczkami. W pierwszym okresie istnienia (do ok. 1975 r.) w kopalni wybierano płycej zalegające rudy wtórne – co nie pociągało za sobą zagrożenia tapaniami. Po serii badań i prób w 1982 roku przystąpiono do eksploatacji rudy pierwotnej. Od tego czasu pojawiła się wyraźna aktywność sejsmiczna górotworu oraz z tym związane występowanie tapnięć. Stworzony w trzech etapach system rejestracji sejsmicznej zarejestrował w latach 1992–2001 prawie 140 000 zjawisk dynamicznych o energii od 0,1 do  $10^8$  J, zaś praktycznie każde ze zjawisk sejsmicznych o energii wyższej niż  $10^6$  J związane jest z tapnięciem. Stosowany obecnie system komorowy z zestrzeliwaniem rudy na dno

komory prowadzi bowiem do wielkiej koncentracji naprężeń w bezpośrednim sąsiedztwie spodka komór, gdzie położone są chodniki odstawcze. Są one więc w pierwszej kolejności narażone na niszczące skutki tąpnięć, wymagają przeto specjalnej obudowy dostosowanej do lokalnych warunków.

### Republika Południowej Afryki

Od czasu odkrycia złotonośnych formacji konglomeratów i rozpoczęcia ich eksploatacji na wychodniach (1886 r.) w zagłębiu Witwatersrandu spotykano się z przejawami niestateczności skał otaczających wyrobiska górnicze, jednak miały one początkowo charakter zawałów spowodowanych bezpośrednim działaniem siły ciężenia. Kiedy w latach 1937–1938 głębokość eksploatacji osiągnęła około 1500 m zwiększyła się aktywność sejsmiczna górotworu, co doprowadziło do ustanowienia międzykopalnianej sieci obserwacji sejsmicznych (1969) [19]. Obecna maksymalna głębokość eksploatacji złóż złotonośnych w RPA sięga 4500 m, przy średniej głębokości wynoszącej około 2000÷2500 m [13] (rys. 7). Maksymalna głębokość występowania formacji złotonośnych przekracza 5000 m.

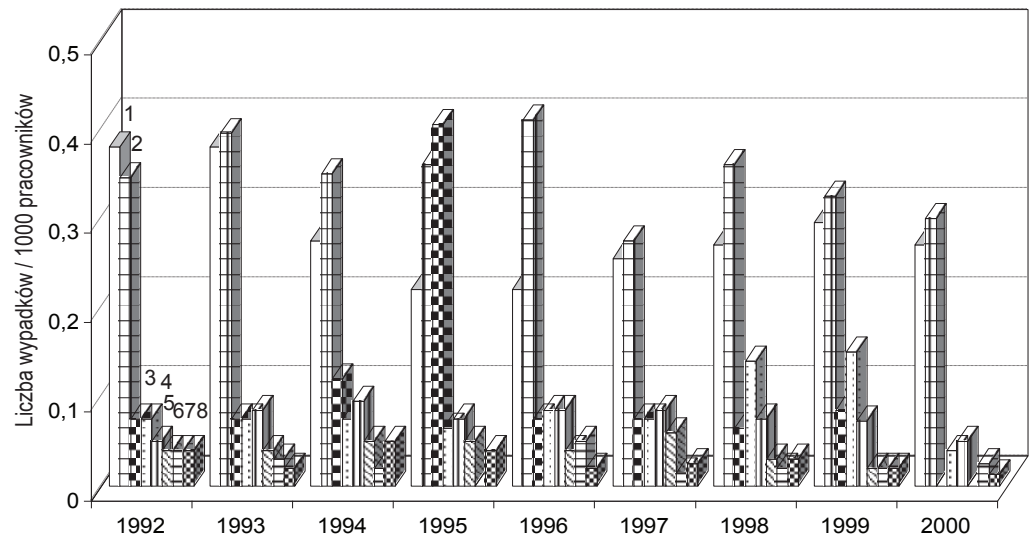


Rys. 7. Przewidywany rozkład głębokości eksploatacji rud złota w RPA (2001–2015) [13]

Fig. 7. Planned distribution of the depth of mining gold ores in RSA (2001–2015) [13]

Kopalnie złota w RPA należą do najbardziej zagrożonych tąpnięciami w świecie, czemu towarzyszy znaczna wypadkowość wyrażająca się wysokim wskaźnikiem wypadków śmiertelnych na tysiąc zatrudnionych, wynoszącym około 0,38 [1]. Na rysunku 8 przedstawiono przyczyny wypadków śmiertelnych w kopalniach złota w RPA w latach 1992–2000. Z przytoczonych na nim danych statystycznych wynika, że tąpnięcia i zawały skał stanowią równorzędne, najczęstsze przyczyny wypadków śmiertelnych w kopalniach złota, znacznie przewyższające nasileniem inne zagrożenia górnicze. Statystyka przyczyn poważnych uszkodzeń ciała w czasie wypadków wykazuje, że najwyższy wskaźnik (5–6 na 1000 zatrudnionych) charakteryzuje zawały skał, natomiast tąpnięcia powodują 1–2 wypadki na 1000 zatrudnionych. Oznacza to, że tąpnięcia powodują przede wszystkim wypadki najcięższe. Mając jednak na uwadze dużą częstość i wysoką energię wstrząsów sejsmicznych odnotowywanych w kopalniach złota, można przyjąć, że przynajmniej część wypadków zaliczonych

jako skutki zawałów skał może faktycznie wynikać z dużej aktywności sejsmicznej oraz tąpnięć, które powodują osłabienie i spękanie skał w dużym promieniu zasięgu wstrząsów.



**Rys. 8.** Wypadki śmiertelne w kopalniach rud złota RPA w latach 1992–2000 i ich przyczyny: 1 – tąpnięcia, 2 – zawały skał, 3 – transport, 4 – utopienie, 5 – upadek, 6 – gospodarka materiałami, 7 – zgarniarki, 8 – taśmociągi [1]

**Fig. 8.** Fatal accidents in gold ore mines in the RSA over the years 1992–2000, and their causes: 1 – rockburst, 2 – rock falls, 3 – transport, 4 – drowning, 5 – fall, 6 – material handling, 7 – scrapers, 8 – belt conveyor flights [1]

### Australia

Specyfiką kontynentu australijskiego z uwagi na naprężenia panujące w górotworze jest znaczna przewaga składowej poziomej naprężenia w stosunku do składowej grawitacyjnej (pionowej). Sytuacja taka występuje zarówno w zagłębiach węglowych wschodniej Australii (stany: Queensland i Nowa Południowa Walia), jak i w kopalniach rud metali Zachodniej Australii.

O ile jednak niewielki udział gruboławicowych piaskowców w budowie górotworu wschodnich zagłębi węglowych oraz niezbyt duża głębokość eksploatacji złóż węglowych w tym obszarze (do ok. 500 m) wydaje się być przyczyną rzadkiego występowania i małej energii zjawisk dynamicznych (z wyjątkiem wyrzutów węgla i gazów) w kopalniach węgla, to w zachodniej Australii, gdzie w ogromnym archeozoicznym masywie granitowo-hornblendowym (800×1000 km) znajdują się kopalnie rud metali – niejednokrotnie na dużych głębokościach – tąpnięcia stanowią istotny element kompleksu zagrożeń górniczych. Ostatnio opisano siedem przypadków tąpnięć w głębokich kopalniach rud w zachodniej Australii, zaistniałych w ciągu ubiegłych dziesięciu lat [47]. Tąpnięcia te były spowodowane wstrząsem sejsmicznym i charakteryzowały się wyrzutem skał o masie od kilku do wielu setek ton. Możliwe było wyróżnienie następujących cech charakterystycznych poszczególnych tąpnięć:

- bezpośredni związek ze wstrząsem sejsmicznym (identyczność ogniska wstrząsu z miejscem wystąpienia szkód),
- wyrzut wcześniej spękanych skał wskutek pobliskiego wstrząsu sejsmicznego o magnitudzie  $M = 2\div 3$ ,
- zniszczenie filara lub resztki eksploatacyjnej wskutek prowadzenia robót górniczych w ich bezpośrednim sąsiedztwie,
- zniszczenie filara wskutek wstrząsu sejsmicznego o ognisku położonym pod tym filarem (lub dynamiczne wciśnięcie filara w mniej wytrzymałe podłoże),
- dynamiczny poślizg na osłabiającym górotwór zaburzeniu geologicznym, takim jak uskok lub żyła.

Tapnięcia charakteryzujące się ostatnią z wymienionych cech są najsilniejsze i mają bardzo wysoką magnitudę wstrząsu sejsmicznego (do  $M = 5$ ).

Ze względu na charakter i wielkość skutków, tapnięcia w kopalniach rud w zachodniej Australii, można zaklasyfikować następująco:

- tapnięcia „bliskiego pola”, charakteryzujące się bliskim sąsiedztwem ogniska wstrząsu powstałego na znacznym zaburzeniu geologicznym, odznaczające się dużą masą wyrzuconych skał,
- tapnięcia „obtrząsające” – o mniejszej energii wstrząsów lecz dłuższym okresie ich trwania, charakteryzujące się poluzowaniem szeregu bloków skał stropowych i ociosowych, które były stateczne w warunkach braku wstrząsów,
- tapnięcia „konwergencyjne” – przy których wstrząs wywołuje tylko nieznaczne deformacje poprzecznego przekroju wyrobiska, bez zasadniczych uszkodzeń obudowy wyrobiska.

W podsumowaniu można stwierdzić, że tapnięcia są zjawiskiem powszechnym w górnictwie światowym i pojawiają się wszędzie tam, gdzie działalność człowieka i warunki naturalne stworzyły łącznie sprzyjające warunki do ich występowania. Przedział wytrzymałości skał na ściskanie w kopalniach, w których występują tapnięcia jest bardzo szeroki: od 0,85 MPa (Słowenia) do około 400 MPa (RPA), zaś głębokość położenia wyrobisk od powierzchni ziemi zmienia się od 60 do 4500 m.

### 3. WPLYW GŁĘBOKOŚCI ORAZ SEJSMICZNOŚCI GÓROTWORU

Punktem wyjścia do oceny roli głębokości jest stwierdzenie, że podstawową statyczną przyczyną występowania tupań jest koncentracja naprężeń spowodowana geometrią wyrobisk, natomiast wyjściowa wartość pionowej składowej stanu naprężenia bezpośrednio wynika z ciężaru nadkładu specyficznego dla danej głębokości prowadzenia wyrobisk. Statyczny stan wyężenia skał w bezpośrednim otoczeniu wyrobisk zależy również od pola naprężeń tektonicznych, szczególnie w obszarach, gdzie składowe poziome przewyższają wartość składowej pionowej (na przykład w zagłębieniach węglowych Wielkiej Brytanii, zagłębieniach węglowych i rudnych Australii). Znacznie mniejsze znaczenie mają zmiany siły grawitacji, wynikające z ruchu planet układu słonecznego [22], wywołujące pływy skorupy ziemskiej.

W wielu zagłębiach górniczych, w których eksploatacja trwała przez długi okres, zauważono, że tąpnięcia i aktywność sejsmiczna górotworu pojawiły się w miarę wzrostu średniej głębokości eksploatacji. Dotyczy to między innymi, zagłębia Coeur d'Alene w USA, południowoafrykańskich zagłębi złotoносnych, zagłębia Kolar Gold Fields w Indiach, Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz Zagłębia Ostrawsko-Karwińskiego.

W GZW gwałtowny wzrost liczby tąpnięć stwierdzono po II wojnie światowej, kiedy średnia głębokość eksploatacji przekroczyła około 400 m. Opracowane na podstawie długoletnich doświadczeń metody prognozowania stanu zagrożenia tąpnięciami uwzględniają – oprócz innych czynników – głębokość położenia wyrobisk górniczych [10].

W Zagłębiu Ostrawsko-Karwińskim, w miarę wzrostu głębokości eksploatacji, stwierdzono wyraźną zmianę charakteru tąpnięć. Zanikły typowe tąpnięcia naprężeniowe (pokładowe), a pojawiły się tąpnięcia zainicjowane bądź spowodowane wstrząsem sejsmicznym, powstałym wskutek załamania się grubych kompleksów piaskowcowych, występujących w stropie eksploatowanych pokładów węgla [37].

Związana z występowaniem tąpnięć aktywność sejsmiczna górotworu przejawia się jako:

- naturalna aktywność tektoniczna w strefach współczesnych ruchów skorupy ziemskiej,
- aktywność indukowana eksploatacją górniczą.

Naturalna aktywność występuje na przykład na Syberii, w fałdowym rejonie zagłębia Altajsko-Sajańskiego, gdzie od XVIII wieku zaczęły się silne trzęsienia ziemi [39]. Roboty strzałowe związane z prowadzeniem eksploatacji górniczej zaburzają pierwotny stan naprężeń w górotworze, co wymaga specjalnych badań w celu opracowania optymalnej technologii eksploatacji. W większości jednak obszarów górniczych świata pomimo, że niewątpliwie działają współczesne siły tektoniczne, nie występują warunki tak skrajne jak wspomniano powyżej i wstrząsy sejsmiczne można uważać w głównej mierze za rezultat prowadzonych robót górniczych. Badania z tego zakresu polegają więc na możliwie dokładnym wyjaśnieniu związków między parametrami eksploatacji i ewentualnych zaszłości górniczych a lokalizacją i energią wstrząsów.

Prowadzona w Głównym Instytucie Górnictwa wieloletnia statystyka tąpnięć w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wykazała, że współzależność tąpnięć i wstrząsów sejsmicznych górotworu pozwala na wydzielenie w tym obszarze, trzech typów tąpnięć, a mianowicie [31]:

1. tąpnięć pokładowych, spowodowanych przekroczeniem wytrzymałości calizny węglowej w strefie wysokiej koncentracji naprężeń,
2. tąpnięć pokładowych zainicjowanych wstrząsem sejsmicznym, lecz będących wynikiem głównie wysokiej koncentracji naprężeń w pokładzie węgla,
3. tąpnięć wstrząsowych, gdzie szkody w wyrobiskach są spowodowane w głównej mierze energią i bliskością ogniska wstrząsu sejsmicznego.

Można wysunąć hipotezę, że w miarę wzrostu średniej głębokości eksploatacji w kopalniach GZW tapania zmieniają swój charakter zgodnie z powyżej podaną klasyfikacją od 1 do 3 z tym, że obecnie tapania drugiej grupy stanowią około 70% ogółu tapanień.

Zagadnienie: w jakim stopniu wyrobisko może zostać uszkodzone lub zniszczone pod wpływem wstrząsu sejsmicznego, było przedmiotem licznych badań empirycznych w wielu krajach górniczych. Podsumowanie tych badań prowadzi do wniosku, że krytyczna wartość PPV (maksymalna prędkość ruchu cząstek skał wymuszonego wstrząsem), przy której następuje uszkodzenie wyrobiska, wynosi około 0,20 m/s, zaś zniszczenie wyrobiska – 0,60 m/s [32].

Wartość PPV oblicza się z równania tzw. skalowanej odległości – na podstawie odległości hipocentralnej oraz energii sejsmicznej (bądź magnitudy) wstrząsu.

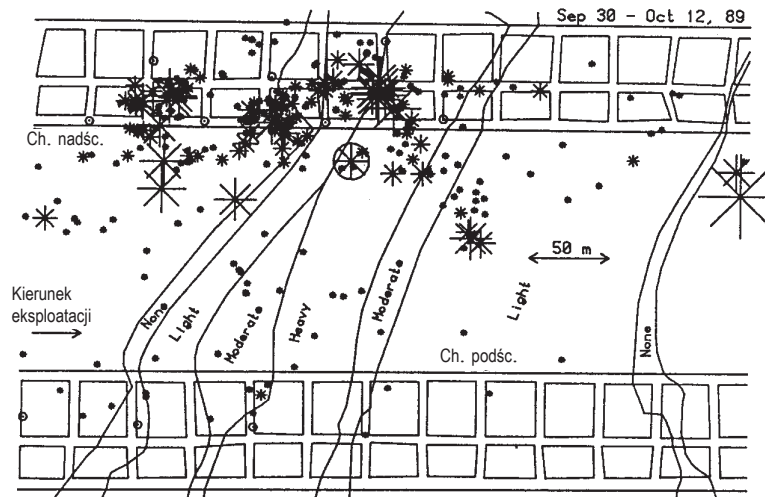
W badaniach położenia stref koncentracji naprężeń w górotworze pomocne są nowe osiągnięcia metodyczne i technologiczne z zakresu sejsmologii i sejsmoakustyki górniczej, takie jak na przykład metoda pasywnej tomografii sejsmicznej, w której wykorzystano do celów górniczych informację o prędkości „niesioną” przez wstrząsy rejestrowane przez sieć kopalnianą [9, 49].

Podstawowym zadaniem w zakresie sejsmiczności indukowanej jest ustalenie lokalizacji warstw wstrząsogennych w stropie bądź stref koncentracji naprężeń na poziomie eksploatowanego złoża – aby umożliwić ich ewentualną obróbkę geotechniczną. W kopalniach wielopoziomowych są po temu znacznie lepsze warunki ze względu na możliwość trójwymiarowego ukształtowania sieci sejsmometrycznej, co przy wykorzystaniu rejestratorów trójskładowych pozwala na dobrą dokładność lokalizacji [5].

Tradycyjne natomiast sieci płaskie, przeważające w kopalniach eksploatujących złoża jednopokładowe zarówno węgla, jak i rud metali pochodzenia osadowego – nie zapewniają na ogół zadowalającej dokładności lokalizacji pionowej, co prowadzi do przybliżonej bądź hipotetycznej lokalizacji stref koncentracji naprężeń w skałach otaczających złoża. Liczne przykłady szczegółowej lokalizacji, a następnie skutecznego strzelniczego odprężania stref skoncentrowanych naprężeń w skałach, znaleźć można w historii górnictwa rud metali w zagłębiu Coeur d’Alene [52] oraz Kolar Gold Fields [38].

Zapisy aktywności sejsmicznej górotworu towarzyszącej procesom górniczym mają ponadto inne zastosowania, a mianowicie wyjaśnienie fizycznej natury ognisk wstrząsów, kierowanie produkcją górniczą w celu zapewnienia jej bezawaryjnego przebiegu oraz bezpieczeństwa pracujących załóg górniczych (analiza ryzyka sejsmicznego oraz ryzyka tapani), wreszcie również poznanie zmienności geologicznej masywu skalnego i ustalenie lokalnych kryteriów uszkodzenia bądź zniszczenia wyrobisk górniczych w aspekcie granicznych wartości PPV [51]. Ważnym narzędziem pomocniczym w bieżącym kierowaniu eksploatacją może być również rejestracja impulsów sejsmoakustycznych w bezpośrednim sąsiedztwie prowadzonych przodków górniczych. Na rysunku 9 pokazano rozkład takich impulsów na wybiegu

ściany w kopalni węgla we wschodnim Kentucky [53], w sytuacji zbliżającego się załamania warstw stropu zasadniczego (tąpnięcia stropowego).



Rys. 9. Aktywność sejsmoakustyczna przed ścianą w kopalni węgla w Kentucky (USA) [53]

Fig. 9. Seismoacoustic activity in front of the longwall face at a coal mine, Kentucky, USA [53]

#### 4. WPLYW SPOSOBU EKSPLOATACJI I WYPEŁNIENIA ZROBÓW

Występowanie zagrożenia tąpnięciami podczas eksploatacji złóż zarówno węglowych, jak i rudnych od dawna skłaniało inżynierów górniczych do prób modyfikacji systemu wybierania tak, aby obniżyć stopień zagrożenia. W górnictwie węglowym USA próby te przybierały charakter zaleceń wynikających bezpośrednio z doświadczenia kopalń. Zgodnie z pierwszym tego typu zaleceniem (Rice 1934), dotyczącym systemu filarowego, powinien być utrzymywany prosty front eksploatacji filarowej oraz stosowane stopy (kaszty) wypełnione skałą płoną – zamiast tzw. organów – w miejscach szczególnie narażonych [27]. Kolejne zalecenia (Holland i Thomas 1954) zostały ujęte w następujących punktach:

1. Czysto wybierać pole filarowe.
2. Unikać pozostawiania pojedynczych filarów poza linią podparcia.
3. Utrzymywać krótki wspornik (zawis) stropu w zrobach.
4. Nie prowadzić rozcinki w strefach ciśnienia eksploatacyjnego.
5. Nie rozcinać filarów w pobliżu frontu wybierania.
6. Przy eksploatacji warstwami nie przekraczać grubości warstwy 4,3 m.
7. Wzdłuż starych zrobów pozostawiać jeden lub dwa rzędy filarów.
8. Utrzymywać filary w jednakowej wielkości i kształcie.
9. Stosować wąskie chodniki przygotowawcze (ok. 4,3 m).
10. Zmiany parametrów systemu eksploatacji uzależniać od zaobserwowanych zafałdowań, zmian upadu oraz zmian miąższości i zwięzłości pokładu.

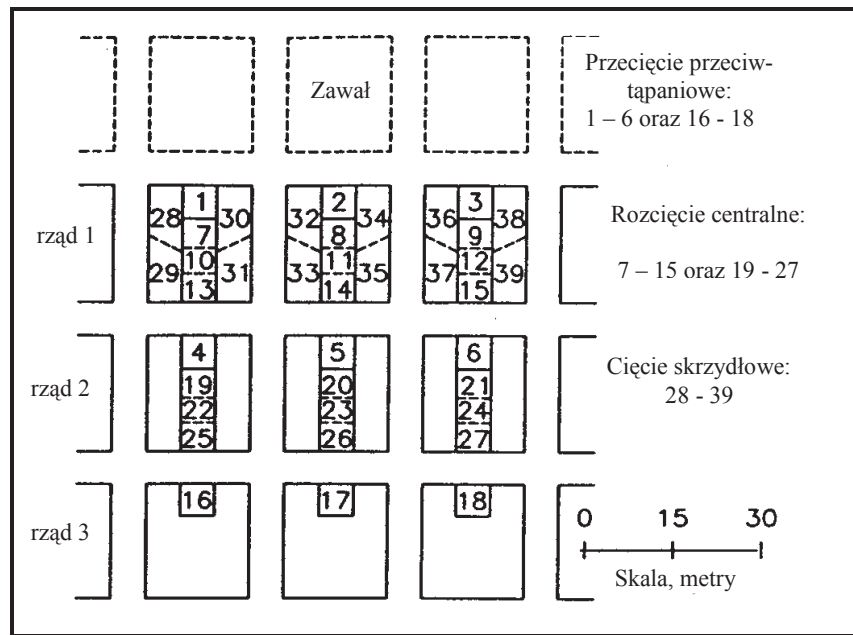


Zmiany jakie nastąpiły współcześnie w technice górniczej, a zwłaszcza jej zmechanizowanie (np. wprowadzenie chodnikowych kombajnów bębnowych typu *continuous miner*) uniemożliwiły przestrzeganie niektórych z podanych wyżej zasad (np. drażenia chodników o szerokości 4,3 m), niemniej jednak większość z nich zachowuje swoją ważność do dzisiaj. Bezpośrednio przed upowszechnieniem się w kopalniach węglowych USA systemu ścianowego (1960) Peperakis (1958) sformułował zalecenia dotyczące głównie warunków panujących w kopalniach rejonu Sunnyside w stanie Utah. Obejmowały one następujące zasady:

1. W celu odprężenia górotworu stosować roboty strzałowe z wykorzystaniem długich otworów.
2. Przed frontem eksploatacji rozcinać większe bloki na mniejsze jednorodne filary.
3. Nie rozcinać wielkich bloków w czasie robót przygotowawczych.
4. Duże nieregularne bloki złoża wycięte w czasie robót przygotowawczych formować przed frontem eksploatacji na regularnej wielkości bloki.
5. W celu ochrony przed skutkami tąpnięcia wprowadzić przed frontem silną obudowę dodatkową.
6. W celu minimalizacji opadu skał po tąpnięciu stosować obudowę z podatnych łuków stalowych.
7. Podsadzka hydrauliczna ogranicza transfer naprężeń podczas tąpnięcia.

Do zmiennych elementów systemu eksploatacji należy optymalna wielkość filarów, która często jest wynikiem lokalnych obserwacji praktyków górniczych. W stanie Zachodnia Wirginia zauważono na przykład, że filary węglowe o szerokości poniżej 14 m oraz powyżej 49 m nigdy nie były obiektem tąpnięcia, w związku z czym wprowadzono tzw. system wąskofilarowy, w którym podstawowe wymiary filarów były zawsze mniejsze od 14 m. Można stwierdzić, że w danych warunkach geomechanicznych był to wymiar zapewniający pokrytyczny stan filarów, podczas gdy wymiar 49 m zapewniał nieprzekraczanie krytycznego obciążenia filarów (utrzymywania filarów w stanie sprężystym).

Przy ścianowym systemie eksploatacji węgla w wariantach z kilkoma (2–5) chodnikami podścianowymi i nadścianowymi obiektem tapania są często tzw. filary łańcuchowe (*chain pillars*), znajdujące się pomiędzy poszczególnymi chodnikami przyścianowymi, podzielone przecinkami na całym wybiegu ściany. Tapania te zdarzają się zarówno w czasie prowadzenia ściany – kiedy najbardziej narażone są chodniki położone w jej bezpośrednim sąsiedztwie – jak i w czasie późniejszej fazy szybkiego wybierania samych filarów (15×30 m) kombajnami CM, kiedy tapania występują najczęściej przy krawędzi zrobów. W związku z tym w ostatnim 20-leciu opracowano nowy system wybierania filarów łańcuchowych polegający na sekwencyjnym urabianiu calizny równocześnie w 3 do 4 rzędach filarów w celu stopniowego przesuwania obciążenia nadkładem poza linię filarów, gdzie skupiona jest większość załogi i maszyn. Uproszczoną zasadę tego postępowania, w postaci karty kolejności urabiania segmentów filarów, pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Schemat kolejności wybierania filarów węglowych (Kentucky, USA) [53]

Fig. 10. Operational sequence for extraction of pillars (Kentucky, USA) [53]

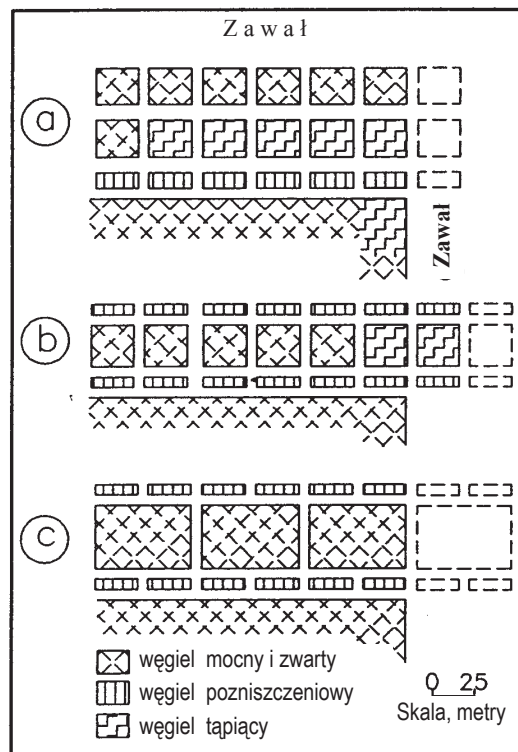
Przy wybieraniu pokładów węgla w warunkach zagrożenia tapaniami system ścianowy z wieloma chodnikami przyścianowymi **ma istotną przewagę** nad systemem z pojedynczymi chodnikami, stosowanym między innymi w Polsce. Pozwala on mianowicie w sposób planowy ukształtować układ obciążenia stropowego na poszczególne partie calizny węglowej, tak aby uniknąć tapani w wyrobiskach, w których aktualnie pracuje załoga i maszyny. Uwzględnia się przy tym trzy możliwe warianty zagrożenia, a mianowicie:

- tapania występują przed frontem ściany,
- tapania występują po przejściu ściany,
- nie było tapani w strefie frontu ścianowego.

Wymienionym trzem przypadkom odpowiadają trzy różne optymalne układy filarów łańcuchowych pokazane na rysunku 11. Trzeci z nich ma za zadanie stworzyć wstępne warunki do bezpiecznego wybierania filarów łańcuchowych po przejściu ściany i został stworzony dla warunków, gdzie dotychczas tapania występowały wyłącznie podczas wybieraniu tych filarów.

Z doświadczeń polskiego górnictwa węglowego (kopalnia „Mysłowice”) na podkreślenie zasługuje przypadek wybierania grubego (20 m) pokładu zagrożonego tapaniami (pokł. 510) na głębokości 500 m, w otoczonym zrobami filarze o wymiarach 1200×300 m, w warunkach koniecznej ochrony powierzchni [40]. Ten szczególnie trudny projekt zrealizowano, prowadząc w pierwszym etapie eksploatację podsadzkową dolnej warstwy o grubości 3 m, odprężającą cały pokład. Eksploatacji towarzyszyły pomiary aktywności sejsmicznej (4500 wstrząsów o magnitudzie od

0,18 do 2,17) oraz otworowe pomiary deformacji stropu do 80 m ponad pokładem – co pozwalało ocenić stopień zagrożenia w kolejnych fazach eksploatacji, zaś strefy szczególnego zagrożenia zlokalizowano metodami tomografii sejsmicznej oraz mikrograwimetrii. Modyfikacje systemu eksploatacji w miejscach podwyższonego poziomu zagrożenia polegały na zmianie wysokości ściany, jednostkowej objętości podsadzki, liczby i szerokości wyrobisk w warstwie wyższej oraz doborze parametrów strzałań profilaktycznych.

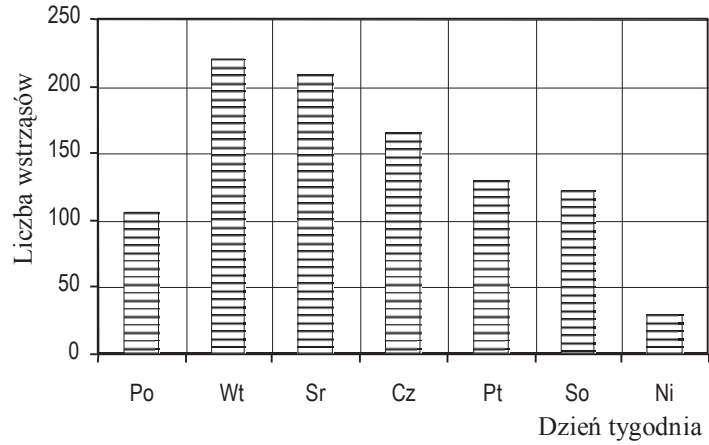


Rys. 11. Przykład trzech układów chodników przyścianowych (Kentucky, USA) [53]

Fig. 11. Example of three configurations of longwall entries (Kentucky, USA) [53]

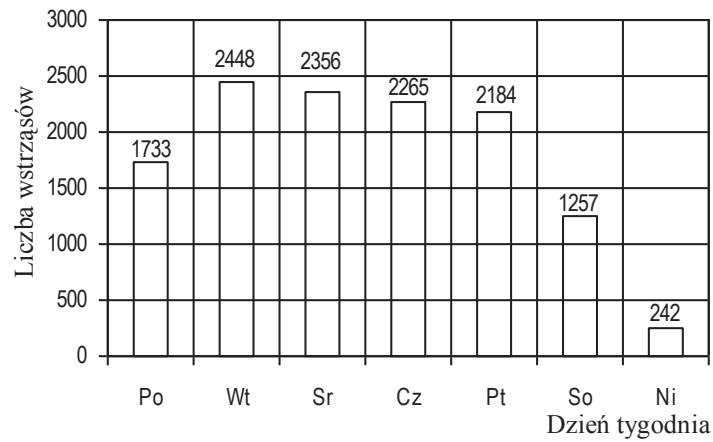
Istotnym, ostatnio zbadanym, elementem systemu eksploatacji pokładów węgla mającym poważny wpływ na liczbę i energię wyemitowanych wstrząsów sejsmicznych górotworu – a co za tym idzie i poziom zagrożenia tąpnięciami – jest regularność czasowa postępu frontu ścianowego. Jak wykazują badania teoretyczne, jak i wieloletnie obserwacje w kopalniach – prędkość przemieszczeń poziomych skał górotworu stropowego narasta skokowo w miarę przerywania eksploatacji i ponownego jej uruchamiania, na przykład w związku z cotygodniowymi sobotnio-niedzielnymi przerwami w pracy [15, 63]. Na rysunku 12 pokazano całkowitą liczbę wstrząsów w kopalni Niederberg w Zagłębiu Ruhry [17] w rozbiciu na dni tygodnia, za lata 1995–1999, zaś na rysunkach 13 i 14 podobny przykład z kopalni „Rydułtowy”

(odpowiednio: liczba wstrząsów i energia wstrząsów) [8], za okres 1988–1998. Przytoczone przykłady przemawiają na rzecz regularnego całotygodniowego postępu ścian węglowych – jako środka ograniczającego anomalie występowania wstrząsów oraz przyrosty zagrożenia tapaniami w środku tygodnia.



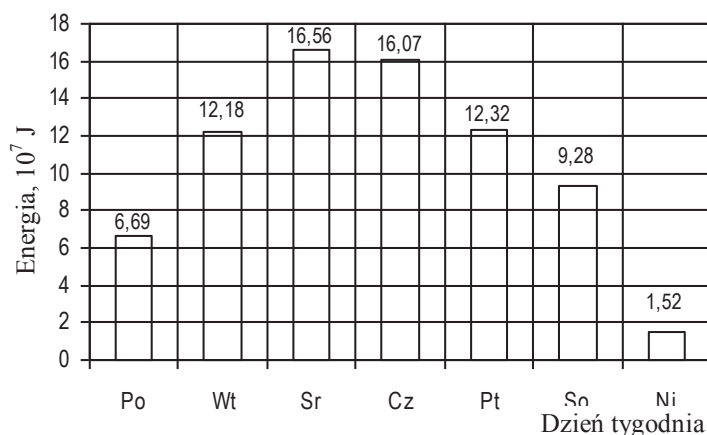
**Rys. 12.** Tygodniowy rozkład wstrząsów w kopalni Niederberg w zagłębiu Ruhry w latach 1995–1999 [17]

**Fig. 12.** Weekly distribution of tremors at Niederberg mine in the Ruhr basin, over the years 1995–1999 [17]



**Rys. 13.** Tygodniowy rozkład wstrząsów w kopalni „Rydułtowy” w latach 1988–1998 [8]

**Fig. 13.** Weekly distribution of tremors at Rydułtowy mine, over the years 1988–1998 [8]



**Rys. 14.** Tygodniowy rozkład sumarycznej energii wstrząsów w kopalni „Rydułtowy” w latach 1988–1998 [8]

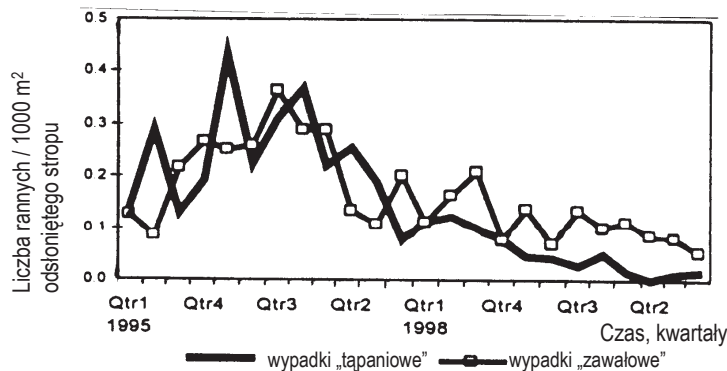
**Fig. 14.** Weekly distribution of total energy of tremors at Rydułtowy mine, over the years 1988–1998 [8]

W górnictwie rud metali są również modyfikowane systemy eksploatacji w celu ograniczenia zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami. Najprostszą ich formą jest dostosowanie intensywności eksploatacji do dopuszczalnego poziomu zagrożenia sejsmicznego. W kopalni El Teniente (Chile) opracowano „indeks aktywności górniczej” obejmujący różne warianty systemu eksploatacji i skorelowano go empirycznie z aktywnością sejsmiczną – co pozwala na utrzymywanie jej na ustalonym, nieprzekraczalnym poziomie [12]. W chińskich kopalniach rud masowo stosuje się roboty strzałowe w celu odprężania zagrożonych partii górotworu, wytwarzając w ich miejscu upodatnione strefy *quasi*-plastyczne [61]. System eksploatacji został więc uzupełniony o stały element, jakim są roboty profilaktyczno-odprężające.

W kopalni złota TauTona (RPA) eksploatującej systemem ścian podłużnych dwie pokładowe żyły rudy na głębokości od 1593 (żyła VCR) do 3456 m (żyła CLR), przy nachyleniu obu żył wynoszącym  $21^\circ$  – rozpoczęto w 1995 roku intensywne próby z podsadzką jako środkiem zmniejszającym zagrożenie tąpnięciami. Ze względu na częste tąpnięcia, ściany prowadzi się w układzie „do pola” w celu ochrony chodników przed zniszczeniem, zaś pomiędzy ścianami pozostawia się 40-metrowej szerokości filary stabilizujące, z takim ich umiejscowieniem, aby obejmowały – o ile to możliwe – strefy większych zaburzeń i nieciągłości geologicznych, w których dotychczas najczęściej występują silne tąpnięcia. Szerokość filarów stabilizujących została powiększona z 20 do 40 m w celu zapobieżenia roztępieniu wąskich filarów – co zdarzało się uprzednio (w latach 1980–1985).

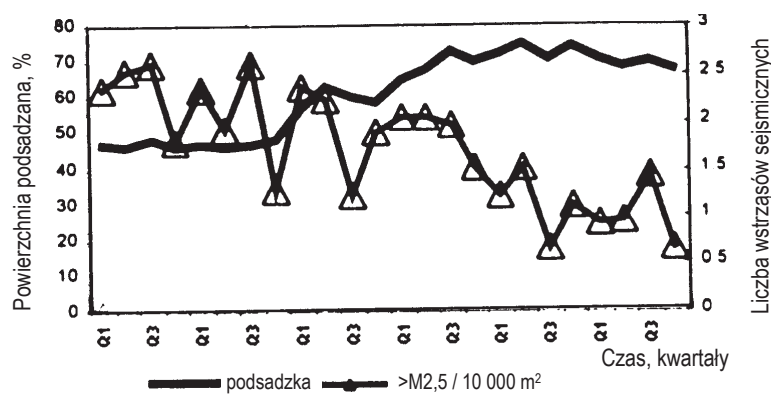
Wprowadzenie podsadzania ścian, najpierw na sucho (odpady skalne), a następnie hydraulicznie (odpady z przeróbki) przyczyniło się do zdecydowanego zmniejszenia aktywności sejsmicznej górotworu oraz liczby występujących tąpnięć. Na rysunku 15 pokazano spadek liczby uszkodzeń ciała w kopalni TauTona przypadających na

1000 m<sup>2</sup> odsłoniętego stropu w latach 1995–1998 (oddzielnie dla wypadków spowodowanych tąpnięciem oraz opadem skał). W omawianym okresie nastąpił wzrost procentowego udziału podsadzki w wybieranym złożu z 45 do 70%, a także skrócenie odsłoniętej przestrzeni po wybiegu (odległości podsadzki od frontu urabiania) poniżej 4,5 m. Na rysunku 16 przedstawiono spadek kwartalnej liczby silnych wstrząsów ( $m > 2,5$ ) w omawianym okresie oraz wzrost procentowego udziału podsadzki w wypełnieniu zrobów [48].



**Rys. 15.** Natężenie wypadków związanych z ruchem skał w kopalni TauTona w RPA w latach 1995–1998 [48]

**Fig. 15.** Intensity of accidents connected with rock movements at Tau Tona mine, RSA, over the years 1995–1998 [48]



**Rys. 16.** Spadek liczby wstrząsów przy wzroście powierzchni podsadzanej (kopalnia TauTona, RPA) [48]

**Fig. 16.** Decrease of the number of tremors at increasing the backfilled area (Tau Tona mine, RSA) [48]

## 5. MONITOROWANIE ZAGROŻENIA ORAZ ZAPOBIEGANIE TĄPANIOM

Monitorowanie zagrożenia tąpnięciami zaczyna się w momencie projektowania eksploatacji – przez badania skłonności węgla lub innej kopaliny do magazynowania energii sprężystości oraz gwałtownego jej wydzielania w momencie rozpadu. Istnieje wiele metod laboratoryjnych oraz wskaźników opisujących dynamiczne własności skał i umożliwiających – w pewnym stopniu – prognozę skłonności do tępnięć partii złoża przewidzianych do eksploatacji [3, 62]. W ostatnim okresie zyskują na popularności metody oceniania skłonności skał do tępnięć według czasu ich dynamicznego rozpadu oraz tzw. modułu spadku, czyli nachylenia do osi odciętych opadającej części krzywej pokrywczego rozpadu próbek ściskanych jednoosiowo. Bardziej zbliżoną do skałi naturalnej prognozę uzyskuje się, stosując wiercenia testowe (metoda pomiaru jednostkowej objętości zwiercin) w strefach koncentracji naprężeń eksploatowanego złoża (głównie węglowego), a także pomiary aktywności sejsmoakustycznej w strefach położonych przed frontem eksploatacji – o ile to możliwe – połączone z lokalizacją miejsc wystąpienia poszczególnych impulsów [53] (rys. 9). W przypadku zagrożenia wynikającego z nagłego, niekontrolowanego załamania się stropu, istotnym elementem systemu monitoringu jest pomiar prędkości osiadania stropu zasadniczego – prowadzony przez pionowe otwory małośrednicowe wykonane w stropie. Najdokładniejszymi jednak współcześnie metodami monitorowania położenia stref koncentracji naprężenia w górotworze jest tomografia sejsmiczna – wymagająca „obramowania” badanego pola wyrobiskami umożliwiającymi dostęp do punktów zamierzonego wzbudzenia oraz odbioru impulsów, a także sejsmologiczna tomografia pasywna – wykorzystująca banki danych o wstrząsach sejsmicznych do określenia pola prędkości w obrębie rozpatrywanego bloku górotworu [49]. Zapobieganie występowaniu tępnięć w kopalniach węgla polega na:

- profilaktyce na etapie projektowania eksploatacji,
- strzelaniu odprężającym w pokładzie,
- strzelniczym lub hydraulicznym szczelinowaniu mocnych warstw stropowych,
- wtlaczaniu wody do pokładu,
- wtlaczaniu wody do skał stropowych [62],
- dostosowaniu średniego postępu ściany do stopnia zagrożenia,
- regularnym całotygodniowym postępie ściany [8],
- wzmocnieniu obudowy wyrobisk w strefie ciśnienia eksploatacyjnego.

W kopalniach rud metali monitorowanie stanu zagrożenia odbywa się najczęściej przez obliczanie bieżącej wartości jednego ze wskaźników równowagi. Przykładem może być wskaźnik ERR opracowany w kopalniach złota Południowej Afryki, a stosowany również w zagłębiu Coeur d'Alene [60]. Wartość tego wskaźnika – wyrażającego zmianę energii na jednostkę postępu frontu eksploatacji – oblicza się jako połowę iloczynu sumy sił działających na dany blok górotworu oraz zmiany jego konwergencji – przypadającej na jednostkę powierzchni wybieranego bloku. Śledzenie zmian tej wielkości pozwala na ocenę poziomu zagrożenia tąpnięciami, jak również

ocenę wpływu zmian w systemie eksploatacji (np. parametry podsadzki) lub zmian w geologii złoża – na poziom zagrożenia.

Tapaniom pokładowym w kopalniach złota w RPA zapobiega się głównie przez stosowanie strzelań odprężających w przodku – przed rozpoczęciem cyklu urabiania. W ten sposób poszerzeniu do około 3,0 m ulega pas spękanych kwarcytów złożowych (przy grubości złoża  $1,0 \div 1,5$  m) – co znacznie ogranicza lub całkowicie wyklucza występowanie tąpnięć w przodkach ścianowych [59]. W innych wielkich zagłębiach rudnych natomiast (np. Coeur d'Alene w USA) podstawową formą profilaktyki tapaniowej jest stosowanie podsadzki.

## 6. ROLA OBUDOWY W ZAPOBIEGANIU SKUTKOM TĄPAŃ

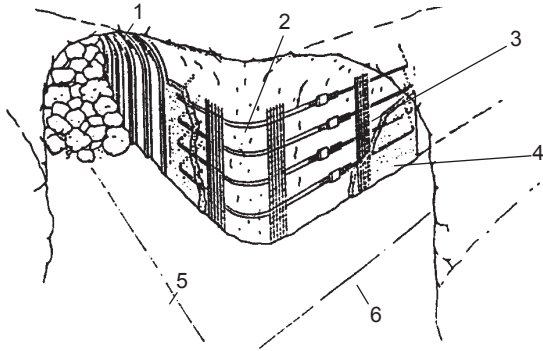
W górnictwie panuje powszechne przekonanie, że obudowa nie jest w stanie zapobiec wystąpieniu tąpnięcia, może jednak w znacznym stopniu ograniczyć jego skutki w wyrobiskach. Najlepszym przykładem skutecznego zabezpieczenia wyrobiska korytarzowego przed skutkami tąpnięć jest system zaporowego zabezpieczenia chodników odstawczych wypracowany w kopalni El Teniente (Chile) [34]. Składa się on z czterech współpracujących ze sobą elementów obudowy, mianowicie:

- kotwi stalowych wklejanych na całej długości,
- siatki stalowej z grubego drutu, o oczku 10 cm,
- ciągów napiętych lin stalowych podtrzymujących siatkę,
- dodatkowej powłoki z betonu natryskowego o grubości około 10 cm.

System ten zilustrowano na rysunku 17. W szeregu przypadków zaistniałych tąpnięć stwierdzono, że chodniki zachowują nadal swoją funkcję – przy zmniejszonej nieco średnicy przekroju poprzecznego wyrobiska (o ok. 1 m), co jest skutkiem wyhamowania pędu skał ociosowych i stropowych w czasie tąpnięcia, przez kotwie i system siatki z linami.

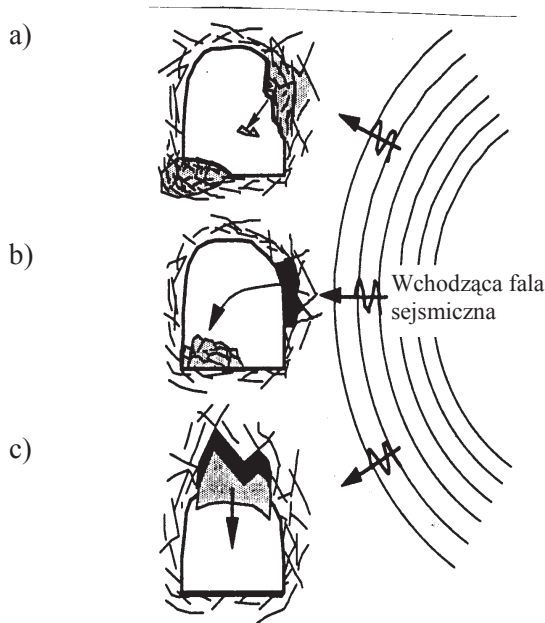
Podstawą doboru obudowy, mającej zabezpieczyć wyrobisko w istotnym stopniu przed skutkami tąpnięć, jest analiza dynamicznego oddziaływania na nią mas skalnych odspojonych od calizny w czasie tąpnięcia. Zakłada ona kolejno: wyzwajające tąpnięcie działanie wstrząsu sejsmicznego, zniszczenie fragmentu calizny otaczającej przekrój poprzeczny wyrobiska, masę, prędkość i drogę przemieszczanych dynamicznie mas skalnych, wreszcie – ich uderzenie w obudowę o znanej charakterystyce podatnościowej i maksymalnej nośności. Szkic ideowy rozpadu masywu skalnego otaczającego wyrobisko pokazano na rysunku 18 [29]. Przybliżona znajomość parametrów dynamicznych typowego tąpnięcia w danej kopalni umożliwia zaprojektowanie i wykonanie obudowy zaporowej, która będzie w stanie uchronić wyrobisko przed zniszczeniem albo znacznie ograniczyć wielkość i zasięg szkód spowodowanych przez tąpnięcie [30]. Dla doboru trafnego rozwiązania obudowy duże znaczenie mają obserwacje kopalniane oraz opisy zachowania się różnych rodzajów obudowy podczas zaistniałych tąpnięć [14, 21, 50].





**Rys. 17.** Czteroskładnikowa kotwiowa obudowa zaporowa w kopalni El Teniente (Chile): 1 – komora podbierkowa (5 odrzwi stalowych), 2 – liny stalowe  $\varnothing 0,6''$  (wytrzymałość na rozciąganie 0,1 MN), 3 – siatka stalowa zgrzewana (ACMA 3020), 4 – beton natryskowy (grubość 10 cm), 5 – przecinka, 6 – chodnik odstawczy [34]

**Fig. 17.** Four-component resistance roof bolting at El Teniente mine (Chile): 1 – underworking chamber (5 steel frames), 2 – 0.6" dia steel ropes (tensile strength 0,1 MN), – welded steel net (ACMA 3020), 4 – shotcrete (10 cm thick), 5 – cross heading, 6 – conveyor road [34]



**Rys. 18.** Schemat niszczenia wyrobiska przez wstrząs i tapnięcie: a – wzrost objętości skał wskutek spękania, b – wyrzucenie skał wskutek transferu energii sejsmicznej, c – zawal stropu wskutek wstrząsu sejsmicznego [29]

**Fig. 18.** Scheme of destruction of an apening by tremor and rockburst: a – increase of rock volume due to cracking, b – rock outburst in consequence of seismic energy transfer, c – roof fall as a result of seismic tremor [29]

W kopalniach węgla kamiennego, gdzie wyrobiska wykonane są w skałach o małej lub średniej wytrzymałości – pierwszorzędne znaczenie dla ochrony załóg przed skutkami tąpnięć ma powiązanie obudowy łukowej z górotworem za pomocą kotwi bądź w ogóle zastąpienie obudowy odrzwiowej kotwioną, która znacznie wydajniej hamuje rozdrabnianie i ruch mas skalnych do wyrobiska. W kopalniach stosujących system ścianowy z chodnikami o przekroju prostokątnym (w USA) dobre wyniki uzyskiwano przy stosowaniu stosów wypełnionych skałą płoną lub łącznym stosowaniu obudowy podporowej i kotwienia górotworu [27]. Badania i obserwacje zachowania się różnych rodzajów obudowy chodnikowej w czterech zagrożonych tąpnięciami kopalniach węgla w stanie Utah (USA) na głębokości 450–760 m pod górską powierzchnią – co znacznie nasila przejawy ciśnienia górotworu – wykazały ponadto, że duże znaczenie dla ochrony chodników przed skutkami tąpnięć mają [6]:

- podatność systemów obudowy (zarówno podporowej, jak i kotwionej),
- pokrytyczne (podatne, wąskie) filary węglowe tworzone wzdłuż chodników przyścianowych.

W tym świetle dużą wartość mają doświadczenia południowoafrykańskiego górnictwa złota, dotyczące kotwi podatnych (*cone-bolts*), a także europejskie doświadczenia ze stalowymi łukowymi obudowami podatnymi.

## 7. DYNAMICZNE ZJAWISKA O WIELKIEJ SKALI ORAZ SEJSMICZNOŚĆ POEKSPLOATACYJNA

Wieloletnia działalność górnicza, a zwłaszcza eksploatacja wielopoziomowa, prowadzić może do zjawisk dynamicznych w skali mega, takich jak zapadliska sięgające z głębi skorupy ziemskiej aż do powierzchni. W kopalniach eksploatujących żyły kwarcu złotonośnego w południowych Indiach (zagłębie Kolar Gold Fields) w drugiej połowie XX wieku zanotowano siedem takich zjawisk [38], którym towarzyszyły wstrząsy sejsmiczne o wielkości sięgającej od 4,5 do 5,0 w skali Richtera oraz liczne zniszczenia zarówno w strukturze kopalń, jak i na powierzchni. Wstrząsy te zostały zanotowane przez sejsmografy w odległości do 760 km od zagłębia górniczego.

Podobne zjawisko wystąpiło podczas eksploatacji złóż soli potasowych w rejonie Górnej Kamy w zachodnim Uralu. W dniu 9 stycznia 1995 roku w kopalni Solikamsk-2 wystąpił indukowany robotami górniczymi wstrząs sejsmiczny o magnitudzie 4,7. Towarzyszyło mu zapadnięcie się nadkładu złoża aż do powierzchni na obszarze 600×600 m oraz osiadanie powierzchni o wielkości 4,5 m na obszarze o wymiarach 700×850 m. Epicentrum wstrząsu pokrywało się z północno-wschodnią granicą kopalni. W związku z wysokim zasięgiem deformacji nieciągłych w obrębie zapadliska i zniszczeniem ciągłości nieprzepuszczalnych warstw w nadkładzie, wyłonił się problem zagrożenia zatopieniem wyrobisk całej kopalni.

Przez kilka lat po wystąpieniu tego zjawiska w kopalni stwierdzano uszkodzenia bądź zniszczenia filarów, konwergencję wyrobisk i wzmoczoną lokalną aktywność sejsmiczną, pojawiło się również zagrożenie dla sąsiedniej kopalni Solikamsk-1.

Wstrząs i jego geomechaniczne następstwa wywołały nie tylko migrację wód podziemnych, lecz również wypływy gazów (mieszaniny metanu z wodorem, dwutlenku węgla, tlenu węgla i innych), co zagroziło nie tylko egzystencji miejscowych kopalń, lecz także bezpieczeństwu mieszkańców osiedli położonych w najbliższym obszarze [44]. Można przeto w tym wypadku mówić o zagrożeniach skojarzonych o znacznie szerszym zasięgu niż łącznie występujące zagrożenia górnicze [28].

Omówione powyżej w skrócie zdarzenia wywołują nieuniknioną refleksję o konieczności przewidywania zasięgu wpływów działalności górniczej, związanej zwłaszcza ze zjawiskami dynamicznymi w górotworze.

Autorzy podręczników z zakresu górnictwa i geomechaniki, wydanych w pierwszej połowie XX wieku, przypuszczali, że pływy skorupy ziemskiej oddziałują na tąpnięcia w głębokich kopalniach. Jak wiadomo chodzi tu o cyklicznie występujące siły wywołane grawitacyjnym przyciąganiem Słońca i Księżyca, które mogłyby wyzwalać wstrząsy sejsmiczne powstające wskutek zwiększenia naprężeń występujących w skorupie ziemskiej w wyniku działalności górniczej. Gdyby istniała taka ewentualność, występowanie wstrząsów mogłoby być skutecznie prognozowane, bowiem pływy są dokładnie przewidywalne. Szczegółowe badania i analizy [22] wykazały jednak, że nie wykluczając pewnych związków małych przyrostów naprężenia w litosferze spowodowanych pływami z występowaniem niektórych wstrząsów sejsmicznych na obszarach górniczych – analiza statystyczna znanych przypadków nie wykazuje jednak istotności tych związków.

Długotrwała działalność górnicza skupiona na określonym obszarze może wywoływać wstrząsy sejsmiczne nawet po zamknięciu kopalń. Jest to spowodowane niecałkowitym zrównoważeniem się skorupy ziemskiej w rejonach dawnych robót górniczych. Przykładem są wstrząsy jakie wystąpiły w zagłębiu Kolar Gold Fields w Indiach, gdzie działalność górniczą zakończono w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Na obszarze tym po zakończeniu robót górniczych stwierdzono zanikającą powoli aktywność sejsmiczną.

W latach 1997–1999 na przykład w lokalnej sieci sejsmometrycznej zanotowano ogółem 609 wstrząsów o różnej energii sejsmicznej i lokalizacji ognisk. Stwierdzono, że są one w głównej mierze spowodowane bądź zainicjowane migracją wód opadowych wgłęb górotworu, co powoduje osłabienie skał znajdujących się w stanie wysokiego wyężenia wokół dawnych wyrobisk górniczych. Trudno jest określić jak długo może trwać proces całkowitego uspokojenia się górotworu, co spowodowałoby ustanie aktywności sejsmicznej. Stąd konieczne jest utrzymywanie sieci sejsmicznych w dawnych obszarach górniczych – do śledzenia częstości i intensywności sejsmicznej aktywności poeksploatacyjnej.

## 8. WNIOSKI

1. Aktywność sejsmiczna górotworu i tąpnięcia są zjawiskami powszechnymi w górnictwie światowym i występują wszędzie tam, gdzie wysokie naprężenia w skorupie ziemskiej i znaczna wytrzymałość skał, prowadzą do ich dynamiczne-

- go niszczenia. Występowanie tąpnięć w kopalniach ma miejsce na wszystkich pięciu kontynentach (Europa, Azja, Ameryka, Afryka i Australia) i dotyczy najczęściej głębszych partii kopalń węgla kamiennego oraz głębokich kopalń rud metali.
2. Aktywność sejsmiczna górotworu oraz zagrożenie tąpnięciami są ogólnie przewidywalne na podstawie badania własności mechanicznych skał i pomiarów naprężeń w górotworze, mogą być także skutecznie monitorowane przy zastosowaniu regionalnej sieci sejsmometrów, lokalnego układu odbiorników sejsmoakustycznych (geofonów), wierceń testowych w złożu przed frontem eksploatacji, pomiarów prędkości osiadania stropu zasadniczego i innych metod. Szczególnie przydatne są metody lokalizacji położenia stref występowania wysokich naprężeń w górotworze, a mianowicie tomografia sejsmiczna oraz sejsmologiczna tomografia pasywna.
  3. W wielu zagłębiach górniczych występowanie tąpnięć miało swój początek po przekroczeniu pewnej, charakterystycznej dla skał tego zagłębia, głębokości eksploatacji. Dla skał osadowych formacji węglonośnych, pomimo występowania węgla nawet na dużych głębokościach, nigdzie nie udało się prowadzić wydobywania poniżej poziomu około 1500 m, co ma bezpośredni związek ze skrajnie wysokim nasileniem tąpnięć na tej głębokości.
  4. Współcześnie działające w skorupie ziemskiej siły tektoniczne nie mają istotnego wpływu na występowanie tąpnięć, nawet w obszarach, gdzie naprężenie poziome kilkakrotnie przewyższa składową grawitacyjną (wschodnia Australia, Anglia). Jedynym znanym autorowi wyjątkiem są kopalnie fosforytów na półwyspie Kola w Rosji.
  5. Sposób eksploatacji złożeń i kierowania stropem ma znaczny wpływ na częstość występowania oraz energię tąpnięć. Powszechnie stwierdza się korzystny wpływ łagodnego i ograniczonego opuszczania stropu (podsadzka, upodatkowane filary resztkowe) na ograniczenie zagrożenia tąpnięciami. Ostatnie badania wykazały ponad wszelką wątpliwość korzystny wpływ regularnego, całotygodniowego postępu frontu eksploatacji na ograniczenie liczby i energii wstrząsów sejsmicznych górotworu.
  6. Najbardziej powszechnym sposobem monitorowania zagrożenia tąpnięciami są rejestracje lokalizacji i energii źródeł wstrząsów sejsmicznych w regionalnych bądź lokalnych sieciach sejsmologicznych. Analiza struktury naruszonego górotworu na tej podstawie uwarunkowana jest jednak należyłą dokładnością wyznaczania lokalizacji pionowej źródeł – co często nie jest możliwe w sieciach płaskich, związanych ze złożami osadowymi. Sieci sejsmiczne należy utrzymywać przez wiele lat po zakończeniu eksploatacji złożeń w danym rejonie – ze względu na sejsmiczną aktywność poeksploatacyjną i konieczność zachowania materiału dowodowego w przypadku procesów sądowych o odszkodowanie z tytułu szkód wyrządzonych wstrząsami.
  7. Wśród metod aktywnej profilaktyki tąpniowej częstością stosowania wyróżniają się najtańsze metody odprężania robotami strzałowymi, o często niekontrolowanych skutkach w górotworze. Na szerokie upowszechnienie zasługują natomiast

nowoczesne **technologie inżynierii stropów**, szczególnie ich ukierunkowane hydrauliczne szczelinowanie.

8. W przeciwieństwie do kopalń rud metali, w górnictwie węglowym często niedoceniana jest rola obudowy wyrobisk korytarzowych – jako środka zapobiegającego niszczącym skutkom tąpnięć. Do najbardziej zalecanych sposobów unikania wypadków, związanych z tapaniami w tych wyrobiskach, należy zaliczyć przykotwianie odrzwi obudowy łukowej do górotworu oraz zamianę obudowy odrzwiowej na kotwioną – co sprawdziło się wielokrotnie, szczególnie w kopalniach węglowych w USA oraz Francji.

#### Literatura

1. Adams D.J., van der Heever P.: *An overview of seismic research co-ordinated by SIMRAC since its inception*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
2. Arabasz W.J., Nava S.J., Phelps W.T.: *Mining seismicity in the Wasatch Plateau and Book Cliffs coal mining districts*. Utah, USA. Proc. RaSiM4. Balkema 1997.
3. Bicz J.A.: *Metody prognoza udaropasności plastow*. Ugol 1994 nr 7.
4. Bräuner G.: *Rockbursts in coal mines and their prevention*. Balkema 1994.
5. Brink A.Z., O'Connor D.M.: *Research on the prediction of rockbursts at Western Deep Levels*. J. South Afr. Inst. Min. Met. 1983 (Jan.).
6. DeMarco M.J., Barron L.R., Kneisley R.O.: *comparative analysis of longwall gateroad design in four deep, Bump-Prone Western U.S. Coal Mines*. 12<sup>th</sup> Conf. Ground Control in Mining. WVU, Morgantown 1993.
7. Domański B., Gibowicz S.J., Wiejacz P.: *Source time functions of seismic events induced at a copper mine in Poland: Empirical Green's function approach in the frequency and time domains*. Proc. RaSiM5. SAIMM 2001.
8. Drzęźła B.: *Geomechaniczne i ekonomiczne aspekty przerw w eksploatacji górniczej*. Prace Naukowe GIG, Seria: Konferencje 2002 nr 41, s. 85-93.
9. Dubiński J.: *Geomechanical and geophysical aspects of the seismicity and rockbursts in N-303 longwall of Bielszowice coal mine*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
10. Dubiński J., Konopko W.: *Tapania: ocena, prognoza, zwalczanie*. Katowice, GIG 2000.
11. Dunlop R., Gaete S.: *Controlling induced seismicity at El Teniente Mine: The Sub6 sector case history*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
12. Dunlop R., Gaete B.S.: *An estimation of the induced seismicity related to a caving method*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
13. Durrheim R.J.: *Management of mining-induced seismicity in ultra-deep South African Gold Mines*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
14. Durrheim R.J., Handley M.F., Haile A., Roberts M.K.C.: *Rockburst damage to tunnels in a deep South African gold mine caused by M<sub>s</sub> = 3.6 seismic event*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
15. Dżegniuk B., Sroka A.: *Prędkość i przyspieszenie procesu osiadania w aspekcie przerw w prowadzeniu eksploatacji górniczej*. Prace Naukowe GIG, Seria: Konferencje 2002, nr 41, s. 105-110.
16. Ebrahim-Trollope R.: *Gutenberg-Richter relationship and mine-induced seismicity as observed at the African Rainbow Minerals Mines – Klerksdorp*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
17. Fritschen R.: *Prognose bergbauinduzierter Erderschütterungen im deutschen Steinkohlenbergbau*. Freiberg, TU Bergakademie (rozprawa doktorska).
18. Ghose A.K.: *Bumps and rockbursts in Indian Coal Mines – an overview*. W: Rockbursts - Global Experiences. Edit. A.K. Ghose, H.S. Seshagiri Rao. Oxford & IBH Publ. Co., N. Delhi-Bombay.
19. Glazer S.N.: *Applied mine seismology: A Vaal Reefs perspective*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
20. Hagan T.O., v.Z. Brink A.: *Ideas for seismic risk assessment in South African Gold and Platinum Mines*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
21. Haile A.T.: *Observations of the dynamic performance of South African tunnel support systems*. Proc. Conf. Rock Support and Reinforcement in Practice, Balkema 1999.

22. Handley M.F.: *The significance of Earth Tides as a trigger of seismicity in deep level mines*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
23. Haramy K.Y., Kneisley R.O., Brady B.T.: *Analysis of major failure through integration of static and dynamic rock mechanics investigation*. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Ground Control in Mining. WVU, Morgantown.
24. Haramy K.Y., Magers J.A., McDonnell J.P.: *Mining under strong roof*. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Ground Control in Mining. Morgantown, WVU 1988.
25. Haramy K.Y., McDonnell J.P.: *Causes and Control of Coal Mine Bumps*. BoM RI 9225, 1988.
26. Hudyma M.R., Mikula P.A.: *Quantifying seismic hazard using neural networks*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
27. Iannacchione A.T., Marco M.J.: *Optimum mine designs to minimize coal bumps: A review of past and present U.S. practices*. Conf. Deposit Expl. in Natural Hazard Conditions. Kraków, Wydaw. AGH 1991.
28. Kabiesz J.: *Charakterystyka skojarzonych zagrożeń górniczych w aspekcie ich oceny oraz doboru metod prewencji*. Prace Naukowe GIG 2002 nr 849.
29. Kaiser P.K., Maloney S.M.: *Ground motion parameters for design of support in burst-prone ground*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
30. Kidybiński A.: *Design criteria for roadway supports to resist dynamic loads*. J. Mining & Geological Engng 1986 Vol. 4, s. 91–109.
31. Kidybiński A.: *Geomechaniczna klasyfikacja tępań w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym – środki zabezpieczenia wyrobisk korytarzowych*. Przegląd Górniczy 1994 nr 2, s. 11–13.
32. Kidybiński A.: *Kryteria uszkodzenia lub zniszczenia wyrobisk korytarzowych i komorowych wskutek wstrząsów*. Bezp. Pracy i Ochr. Środ. w Górn. 1999 nr 5 (57).
33. Kidybiński A., Amartin J.P., Takla G.: *Tapnięcie spagowe w kopalni Merlebach – przyczyny i środki zapobiegawcze na przyszłość*. Prace Naukowe GIG, Seria: Konferencje 2001 nr 39, s. 69–74.
34. Kidybiński A., Smółka J., Nierobisz A., Rojas E.: *Rozwiązania systemów obudowy kotwicznej stosowane w kopalni El Teniente dla ochrony wyrobisk przed skutkami tępań*. Prace Naukowe GIG, Seria: Konferencje 1995 nr 1, s. 101–125.
35. Kneisley R.O.: *Microseismic data analysis of failure occurrence in a deep*. Western U.S. Coal Mine: A Case Study. BoM RI 9228, 1988.
36. Konečný P.: *Mining-induced seismicity and rockbursts in the Czech part of the Upper Silesian Coal Basin*. UN ECE Seminar on Rock Bursts and Sudden Outbursts. St. Petersburg. Genewa Wydaw. ONZ ECE 1993.
37. Konečný P.: *Changes of nature of rockbursts with increasing mining depth in Czech part of Upper Silesian Coal Basin*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
38. Krishna Murthy R., Nagarajan K.S.: *Rockbursts in Kolar Gold Fields*. Conf. Mining Practice, Rockburst Hazard, Rock Mechanics, Febr., Edit. Bharat Gold Mines Ltd. 1988.
39. Kurlenya M.V., Yeryomenko A.A.: *Features of ore mining in Siberia under conditions of seismic-active folded region*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
40. Lasek S., Matwiejszyn A., Ptak M.: *Completing exploitation with hydraulic backfilling in conditions of coexisting natural hazards: A case study*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
41. Li S.L., Guo R.: *Development of rockburst research for metal mines in China*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
42. Luo X., Hatherly P., Ross J.: *Microseismic mapping of floor fracturing for longwall planning at South Blackwater Colliery (Australia)*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
43. Mahtab M.A.: *Rockbursts in Kolar Gold Fields in India*. Rep. to the USBM 1990 Jan.
44. Malovichko A.A., Shulakov D.Y., Dyaguilev R.A., Sabirov R.H., Ahmetov B.S.: *Comprehensive monitoring of the large mine-collapse at the Upper Kama potash deposit in Western Ural*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
45. Mayer J., Mavec M., Kočevar M., Uran B.: *Seismicity pattern in the Velenje coal mine, Slovenia*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
46. McMahan T.: *Rock burst research and the Coeur d'Alene District*. BoM. IC 9186, 1988.
47. Misich I., Lang A.: *Examples of rockburst damage in Western Australia*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.

48. Murphy S.K.: *An evaluation of the effect of extensive backfilling on seismicity in longwall mining*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
49. Mutke G., Lurka A., Mirek A., Bargiel K., Wróbel J.: *Temporal changes in seismicity and passive tomography images: a case study of Rudna copper ore mine – Poland*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
50. Ortlepp W.D., Stacey T.R.: *Rockburst mechanisms in tunnels and shafts*. Tunnelling and Underground Space Technology 1994 Vol. 9, nr 1.
51. Potvin Y., Hudyma M.R.: *Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
52. Riefenberg J.: *Statistical evaluation and time series analysis of microseismicity*. Mining and Rock Bursts in a Hard-Rock Mine. BoM RI 9379, 1991.
53. Rowell G.A., Lemons J.S.: *Microseismic analysis of a mountain bump*. 5<sup>th</sup> Conf. Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials. Penn. State Univ., June.
54. Rymon-Lipinski W.K., Bakker D.: *The development of government rockburst and rockfall hazard monitoring system for South African mines*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
55. Simser B., Joughin W.C., Ortlepp W.D.: *The performance of Brunswick Mine's rockburst support system during a severe seismic episode*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
56. Scott D.F., Williams T.J.: *Investigation of a rock-burst site*. Sunshine Mine, Kellog, Idaho. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
57. Srinivasan C., Willy Y.A., Benady S.: *Rockburst seismic intensity attenuation for the Kolar Gold Fields hard rock mining region*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
58. Talebi S., Mottahed P., Pritchard C.J.: *Monitoring seismicity in some mining camps of Ontario and Quebec*. Proc. RaSiM4, Balkema.
59. Toper A.Z., Grodner M., Lightfoot N.: *Preconditioning: A rockburst control technique*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
60. Whyatt J.K., Williams T.I., Board M.P.: *Rock mechanics investigations at the Lucky Friday Mine. 2<sup>nd</sup> part: Evaluation of underhand backfill practice for rock burst control*. BoM RI 9433, 1992.
61. Wu A.X., Sun Y.Z., Gour S.: *Mining technology to reduce rockburst energy*. Proc. RaSiM5, SAIMM 2001.
62. Wu Y., 1997 Zhang W.: *Prevention of rockbursts in coal mines in China*. Proc. RaSiM4, Balkema 1997.
63. Zych J.: *Wpływ dużego postępu frontu i przerw w eksploatacji na przemieszczenia i odkształcenia poziome na powierzchni*. Prace Naukowe GIG, Seria: Konferencje 2002 nr 41, s. 429-447.

**Recenzent:** Prof. dr hab. inż. Władysław Konopko