

# Oznaczanie prędkości detonacji materiałów wybuchowych oraz czasów opóźnień zapalników w długich otworach strzałowych

Determination of the detonation velocity of explosives and delay accuracy of detonators in long blastholes



*Dr inż. Piotr Mertuszka\**



*Dr inż. Marcin Szumny\**



*Mgr inż. Krzysztof Fulawka\**



*Mgr inż. Tomasz Żołądek\*\*)*



*Mgr inż. Patrycja Rink\*\*)*

**Treść:** W artykule przedstawione zostały wyniki pilotażowych pomiarów prędkości detonacji materiałów wybuchowych oraz dokładności opóźnień zapalników w warunkach in situ z wykorzystaniem wielokanałowego rejestratora DataTrap II. Pomiary prowadzono w długich otworach strzałowych w kopalni odkrywkowej surowców skalnych. Dzięki zastosowaniu metody ciągłej możliwe było określenie zmian prędkości detonacji na całej długości kolumny materiału wybuchowego z jednoczesnym określeniem dokładności opóźnień stosowanych zapalników nieelektrycznych i elektronicznych.

**Abstract:** The article presents the results of pilot measurements of detonation velocity and detonators' delays accuracy under the in-situ conditions using the multichannel DataTrap II recorder. Tests were carried out in long blastholes in an open-pit mine. The applied continuous method allowed to determine the changes in the detonation velocity along with the entire length of the explosive column and measure the delay accuracy of electronic and non-electric detonators.

## **Słowa kluczowe:**

*technika strzałowa, materiały wybuchowe, prędkość detonacji*

## **Keywords:**

*blasting, explosives, velocity of detonation*

\*) KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

\*\*\*) Austin Powder Polska Sp. z o.o., Łukaszów

## 1. Wprowadzenie

Eksploatacja złóż kopalin w Polsce z wykorzystaniem materiałów wybuchowych (MW) prowadzona jest głównie w kopalniach odkrywkowych surowców skalnych, kopalniach soli oraz w górnictwie podziemnym rud i metali nieżelaznych. Według danych statystycznych, zużycie MW w polskim przemyśle górnictwem wynosi ok. 40 000 Mg rocznie, na co składają się zarówno materiały wybuchowe nabojuwane, jak i materiały luzem, w tym emulsyjne. Te ostatnie, produkowane przez samojezdne systemy mieszalniczo-załadowcze w warunkach *in situ*, stanowią ok. 70–80% wszystkich obecnie stosowanych materiałów wybuchowych w Polsce (Rawicki i in. 2017). Niestety, oprócz szeregu zalet, spośród których wyróżnić należy zwiększenie bezpieczeństwa pracy czy ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko poprzez redukcję drgań parasejsmicznych, to właśnie materiały wybuchowe emulsyjne (MWE) luzem charakteryzują się największą zmiennością parametrów termodynamicznych (Maranda i in. 2008). Jak wskazują ostatnie badania prowadzone przez Autorów, efektywność MWE luzem jest ściśle związana z szeregiem parametrów obejmujących przyjętą technologię eksploatacji, w tym m.in. średnicę otworów strzałowych, sposób inicjacji, temperaturę otoczenia, gęstość MW w momencie detonacji czy czas, jaki upłynął od momentu załadowania do odpalenia (Mertuszka 2019).

Potwierdza to, że okresowa kontrola wybranych parametrów środków strzałowych jest elementem kluczowym dla utrzymania wysokiej efektywności prowadzonych robót. Parametrem, który jest najczęściej stosowany do weryfikacji jakości materiału wybuchowego jest prędkość detonacji (Żganec i in. 2016; Pachmań i in. 2017; Balakrishnan i in. 2019; Mertuszka i in. 2020). Jak pokazują dotychczasowe doświadczenia w zakresie kontroli jakości stosowanych środków strzałowych, materiały wybuchowe detonujące z małą prędkością charakteryzują się zwykle mniejszą efektywnością urabiania aniżeli detonujące z prędkością stosunkowo dużą (Chiappetta 1998; Heit 2011). Prędkość detonacji jest parametrem powszechnie stosowanym przy określaniu ciśnienia detonacji ( $P_d$ ), a co za tym idzie – do określania energii wybuchu (Kabwe 2018; Cooper 1996). Jak zaznacza Trzcziński i in. (2008), zmniejszenie prędkości detonacji prowadzi do spadku ciśnienia detonacji, zatem w rezultacie redukuje impuls energii kruszącej skałę.

Na podstawie kilkuletnich badań realizowanych przez Autorów można stwierdzić, że prędkości detonacji mierzone w warunkach *in situ* mogą wyraźnie odbiegać od wartości deklarowanych przez producentów. W takich przypadkach efektywność robót strzałowych może być znacząco niższa. Mówiąc o weryfikacji parametrów robót strzałowych należy również wspomnieć o dokładności stosowanych środków inicjujących. Wszelkie rozbieżności w rzeczywistych czasach opóźnień nie tylko negatywnie wpływają na produktywność prowadzonych robót, ale również zmniejszają możliwość konstruktywnej kontroli fali sejsmicznej generowanej robotami strzałowymi (Kabiesz, Lurka 2015). Regularna kontrola parametrów środków strzałowych w różnych warunkach górnictwo-geologicznych, daje nie tylko możliwość sprawdzenia zgodności tych parametrów z danymi deklarowanymi przez producentów, ale może być również podstawą do identyfikacji przyczyny ewentualnego pogorszenia efektów robót strzałowych. Ponadto, w przypadkach skrajnych, gdy wartości zmierzone wyraźnie odbiegają od wartości nominalnych, tego typu pomiary mogą być podstawą do reklamacji wadliwej partii produktu.

Pomiary prędkości detonacji materiałów wybuchowych prowadzono do tej pory zasadniczo przy użyciu rejestratorów

do pomiaru odcinkowego, takich jak Explomet-Fo-2000, SpeedTrap i in. (Szastok 2015) oraz z wykorzystaniem jednokanałowych urządzeń, które umożliwiają pomiar ciągły, jak np. MicroTrap, HandiTrap, VODMate (Tete i in. 2013). W praktyce, dokładniejsze wyniki uzyskuje się w przypadku pomiarów ciągłych ze względu na dużą częstotliwość próbkowania. Dzięki temu możliwe jest określenie przebiegu detonacji na całej długości próbki lub kolumny materiału wybuchowego i ewentualnych lokalnych zmian wartości, świadczących o problemach z załadunkiem otworu, bądź niejednorodnością materiału wybuchowego (Batko, Pyra 2010; Mertuszka, Pytlík 2019). Mimo wielu zalet, urządzenia jednokanałowe posiadają jedno istotne ograniczenie. Mianowicie, w trakcie jednego pomiaru rejestrowane są dane tylko z jednego otworu strzałowego. Problem ten w znacznej mierze rozwiązuje nowoczesny rejestrator wielokanałowy typu DataTrap II produkowany przez kanadyjską firmę MREL, który wyposażony jest w 8 niezależnych kanałów pomiarowych o bardzo dużej rozdzielczości. W praktyce, jednoczesne wykonanie pomiarów z wykorzystaniem wszystkich 8 kanałów daje nie tylko możliwość śledzenia zmian prędkości detonacji w poszczególnych otworach, ale pozwala także na określenie czasów opóźnień zapalników w każdym z otworów.

W ramach niniejszego opracowania przedstawiono wyniki pilotażowych badań środków strzałowych w długich otworach z wykorzystaniem rejestratora DataTrap II. Zakres prac obejmował dwie serie pomiarowe, podczas których określono prędkości detonacji materiałów wybuchowych oraz wyznaczono czasy opóźnień zapalników w otworach strzałowych. Należy zaznaczyć, że zgodnie z obowiązującym w Polsce Rozporządzeniem Ministra Energii w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w ruchu zakładu górnictwa (2017), długimi otworami strzałowymi nazywane są otwory o długości przekraczającej 6 m. Otwory tego typu objęte są dodatkowymi wymaganiami dotyczącymi konstrukcji ładunku w otworze oraz sposobu inicjacji.

## 2. Charakterystyka rejestratora DataTrap II

Rejestrator DataTrap II (rys. 1) jest 8-kanałowym przenośnym urządzeniem do ciągłych pomiarów prędkości detonacji opierającym się na metodzie elektrycznej. Częstotliwość próbkowania wynosi maksymalnie 10 MHz, co umożliwia pomiar prędkości detonacji nawet na bardzo krótkich ładunkach MW z bardzo dużą dokładnością. Zasada pomiaru opiera się na obserwacji zmian oporności dedykowanej sondy. Fala detonacyjna poruszając się wzdłuż sondy niszczy ją, powodując zmianę jej rezystancji, w wyniku czego urządzenie zapisuje zmiany napięcia w funkcji czasu, a następnie konwertuje dane na prędkość detonacji. Urządzenie działa więc na zasadzie klasycznego oscyloskopu cyfrowego. Niepewność pomiaru związana jest ze zmiennością oporności jednostkowej stosowanych sond i może wynieść maksymalnie 2%.

Ze względu na ciągły charakter rejestracji, nie ma możliwości interpretacji wyników z poziomu urządzenia. Wyniki, po przeniesieniu ich do pamięci komputera, mogą być analizowane przy użyciu dedykowanego programu *DAS – Data Acquisition Suite*. Program ten jest również wykorzystywany do transmisji danych z urządzenia na komputer oraz konwersji zarejestrowanych danych elektrycznych na konkretną wielkość fizyczną, odpowiadającą typowi zastosowanego czujnika pomiarowego. Dane można również zapisać w postaci rozszerzeń uniwersalnych, takich jak *.csv* czy *.txt*, co umożliwia interpretację wyników w większości specjalistycznych programów do analizy danych. Podstawowe dane



Rys. 1. Rejestrator DataTrap II  
Fig. 1. DataTrap II recorder

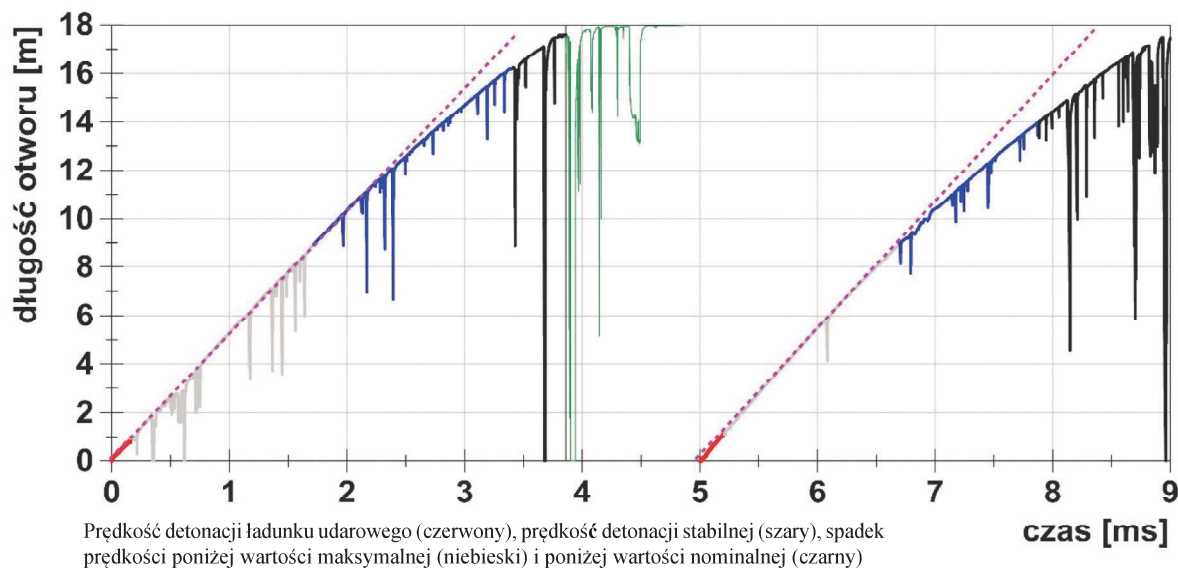
Tabela 1. Wybrane dane techniczne urządzenia DataTrap II  
Table 1. Selected technical data of DataTrap II recorder

Liczba kanałów pomiarowych	8
Maksymalna częstotliwość próbkowania	10 MHz
Maksymalna rozdzielczość	0,1 $\mu$ s
Pamięć	64 mln punktów pomiarowych
Maksymalna liczba pomiarów	32
Maksymalny czas rejestracji (przy maksymalnej rozdzielczości)	6 s / kanał

techniczne rejestratora DataTrap II przedstawiono w tabeli 1.

Budowa urządzenia zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa, co jest bardzo istotne z punktu widzenia jego stosowania w warunkach *in situ*. Podczas pomiarów napięcie wyjściowe nie przekracza 8 V, natomiast poziom generowanego prądu jest niższy niż 50 mA. W związku z tym, nie ma możliwości, aby urządzenie wygenerowało sygnał mogący zainicjować materiał wybuchowy czy zapalnik. Wykonanie pomiaru z sondą

umieszczoną na całej długości próbki lub kolumny MW jest zarówno podstawą do wyznaczenia prędkości detonacji, ale może również służyć do określania charakterystyki przebiegu detonacji w różnych warunkach górniczo-geologicznych. Przykładowy zapis prędkości detonacji w dwóch sąsiadujących otworach strzałowych o długości 18 m przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wykresy prędkości detonacji z oznaczeniem etapów detonacji w otworze strzałowym  
Fig. 2. Detonation velocity plots with phases of detonation inside the blasthole

Zarejestrowane przebiegi prędkości detonacji wskazują, że duża częstotliwość próbkowania umożliwia precyzyjne określenie skuteczności inicjacji oraz momentów osiągnięcia poszczególnych etapów detonacji, tj. detonacji stabilnej oraz etapów, na których dochodzi do zmian prędkości. Posiadając dane dotyczące jakości odwiercenia otworów czy stopnia ich zawodnienia, można stwierdzić czy charakter przebiegu detonacji w danych warunkach jest bliski optymalnemu czy też nie. Pomiary prowadzone urządzeniem DataTrap II umożliwiają także precyzyjne określenie interwału czasowego pomiędzy otworami strzałowymi. Należy podkreślić, że moment rozpoczęcia pomiaru jest niezależny dla każdego kanału rejestratora, zatem poszczególne otwory badawcze mogą być odpalane zarówno tym samym opóźnieniem, jak i różnymi opóźnieniami, bez konieczności zachowywania kolejności odpalania, co wymagane było przy 1-kanałowym rejestratorze MicroTrap (Mertuszka i in. 2017). Jest to więc istotna zaleta w porównaniu do innych systemów do ciągłego pomiaru prędkości detonacji. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów czasów opóźnień zapalników pomiędzy czterema sąsiadującymi otworami strzałowymi, w których zastosowano konektory powierzchniowe o tym samym czasie inicjacji wynoszącym 67 ms.

Analiza tego typu jest szczególnie istotna w przypadku robót strzałowych w odkrywkowych zakładach górniczych, w których wymagana jest kontrola poziomu emitowanych drgań parasejsmicznych. Ponadto, bieżąca weryfikacja dokładności opóźnień środków inicjujących jest jednym z elementów niezbędnych do prowadzenia robót strzałowych zgodnie z przyjętym projektem.

Warto również zaznaczyć, że przy zastosowaniu odpowiednich czujników, rejestrator DataTrap II może zostać wykorzystany do jednoczesnych pomiarów czasów opóźnień zapalników, poziomu drgań wyzwalanych robotami strzałowymi czy ciśnienia powietrznej fali uderzeniowej.

### 3. Metodyka i przedmiot badań

Badania obejmowały dwie serie robót strzałowych w odkrywkowej kopalni surowców skalnych na Dolnym Śląsku,

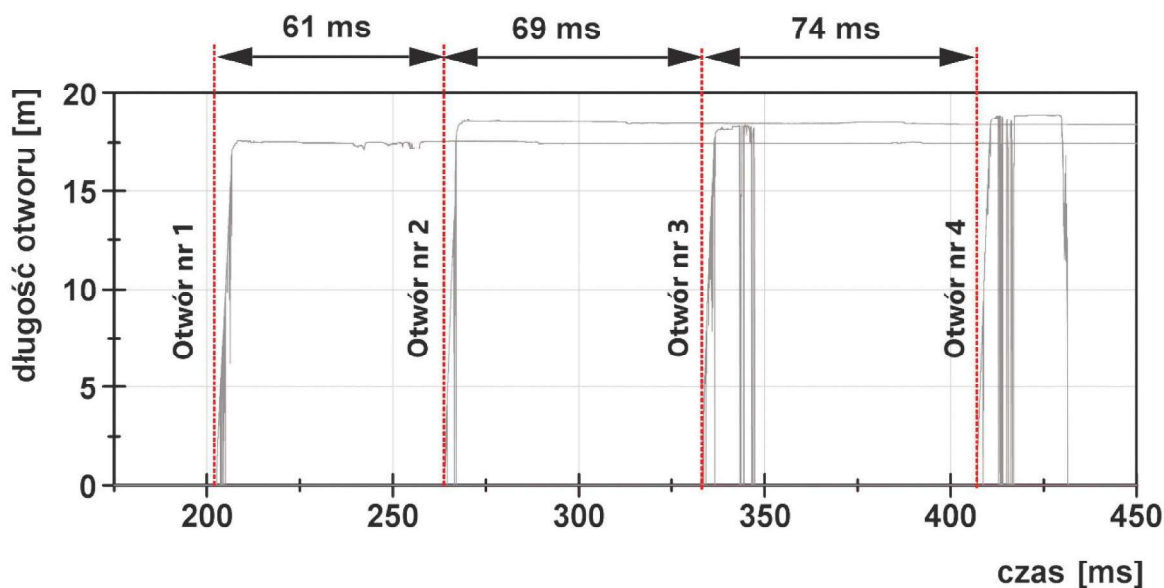
które przeprowadzono w sierpniu oraz w listopadzie 2020 r. Celem pomiarów było określenie rzeczywistej prędkości detonacji materiałów wybuchowych w warunkach *in situ*. Do badań zastosowano elastyczne sondy pomiarowe typu ProbeCable o nominalnej oporności jednostkowej wynoszącej 10,80  $\Omega/m$ . Przed rozpoczęciem ładowania otworów, sondy mocowano taśmą do ładunku udarowego i umieszczano na dnie otworów. Następnie końcówki sond łączono z kablami komunikacyjnymi, które podłączano z kolei bezpośrednio do rejestratora znajdującego się w bezpiecznej odległości od miejsca prowadzenia robót strzałowych. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4, natomiast lokalizację otworów strzałowych, w których prowadzono pomiary na rysunku 5.

W oparciu o zarejestrowane dane, wyznaczono wartości prędkości detonacji oraz czasy opóźnień zapalników znajdujących się w sąsiadujących ze sobą otworach strzałowych. Przebiegi prędkości detonacji zarejestrowane na całej długości kolumny MW umożliwiły również określenie momentu osiągnięcia detonacji stabilnej.

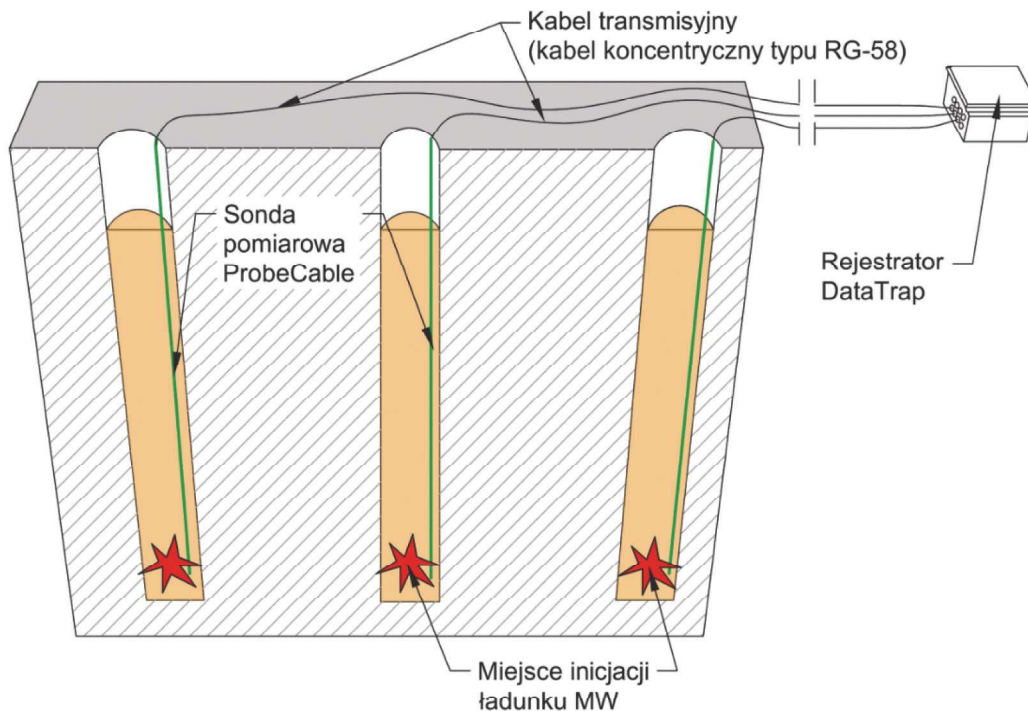
#### 3.1. Seria 1

W trakcie pierwszej serii pomiarowej badaniu zostały poddane dwa typy emulsyjnego materiału wybuchowego luzem produkowanego przez firmę Austin Powder Polska Sp. z o.o. Cztery otwory pomiarowe załadowano MW typu Hydromite 100, a pozostałe cztery materiałem wybuchowym typu Hydromite 70. Materiał wybuchowy typu Hydromite 100 jest materiałem emulsyjnym produkowanym na bazie matrycy z dodatkiem czynnika gazującego, natomiast Hydromite 70 jest produkowany na bazie matrycy z uczulaczem (69%) oraz dodatkiem porowatej saletry amonowej (30%) i oleju (1%). Gęstość materiałów wybuchowych zmierzona 30 min po zmieszaniu komponentów wynosiła 1,05  $g/cm^3$  dla MW Hydromite 100 oraz 1,13  $g/cm^3$  dla MW Hydromite 70. Podstawowe parametry analizowanych materiałów wybuchowych przedstawiono w tabeli 2.

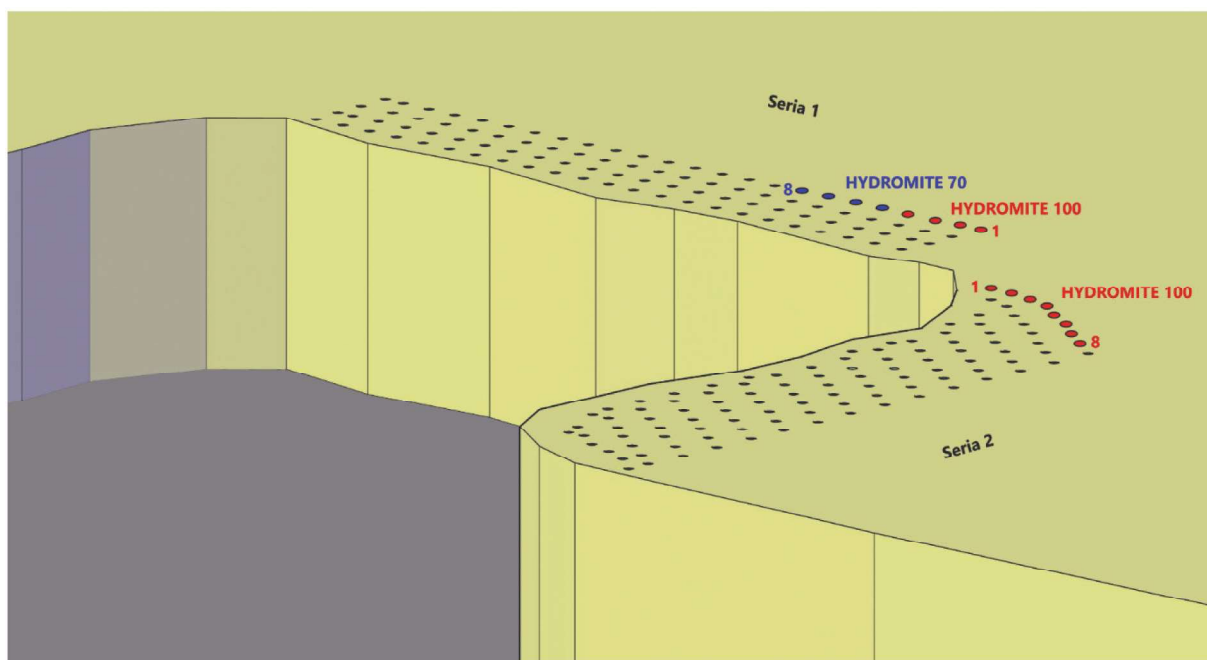
Materiał wybuchowy załadowano do 8 otworów strzałowych o średnicy 89 mm i długości ok. 19 m, które znajdowały się w skrajnym rzędzie otworów (po 4 otwory dla każdego



Rys. 3. Wykres prędkości detonacji z wyznaczonymi czasami opóźnień zapalników  
Fig. 3. Detonation velocity plot with determined delays of detonators



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego z rejestratorem DataTrap II  
 Fig. 4. Scheme of measurement system with the DataTrap II recorder



Rys. 5. Lokalizacja otworów badawczych w obu seriach pomiarowych  
 Fig. 5. Location of tested blastholes in both measurement series

Tabela 2. Wybrane parametry badanych materiałów wybuchowych (wg danych producenta)  
 Table 2. Selected parameters of the tested explosives (based on the technical data sheets)

Parametr	Hydromite 100	Hydromite 70
Gęstość	1,05–1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,15–1,25 g/cm <sup>3</sup>
Bilans tlenowy	–0,8%	–1,8%
Objętość produktów wybuchu	958 dm <sup>3</sup> /kg	965 dm <sup>3</sup> /kg
Ciepło wybuchu	2 937 kJ/kg	3 251 kJ/kg
RWS [ANFO=100]	76	83
RBS [ANFO=0,85 g/cm <sup>3</sup> ]	98	122
Prędkość detonacji (w rurze stalowej)	4000 ms	4500 ms

MW). Masa materiału wybuchowego wynosiła ok. 120 kg/otwór. Podczas załadunku stwierdzono, że wszystkie otwory były zawodnione. Do inicjacji zastosowano zapalniki nieelektryczne typu ShockStar MS wraz z ładunkiem udarowym w postaci MW nitroestrowego typu Ergodyn 35E o średnicy 50 mm i masie 500 g. W celach bezpieczeństwa w każdym otworze strzałowym zastosowano po dwa ładunki udarowe (górny i dolny) uzbrojone zapalnikami nieelektrycznymi. Górny ładunek udarowy został uzbrojony zapalnikiem o opóźnieniu 500 ms, natomiast dolny o nominalnym czasie 475 ms. Połączenie powierzchniowe sieci strzałowej, które określa sekwencję odpalania poszczególnych otworów, zostało wykonane przy użyciu konektorów powierzchniowych typu ShockStar Surface o odpowiednim czasie opóźnienia. Schemat ładunku w otworze strzałowym wraz z lokalizacją sondy pomiarowej przedstawiono na rysunku 6.

W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniem, rejestrator umieszczono w schronie strzałowym zlokalizowanym w bezpiecznej odległości od miejsca wykonywania prac. Częstotliwość próbkowania została ustalona na poziomie 2,5 MHz na każdy kanał. Wzbudzenie na każdym z kanałów następowało niezależnie w momencie rozpoczęcia detonacji w danym otworze (moment przerwania obwodu).

### 3.2. Seria 2

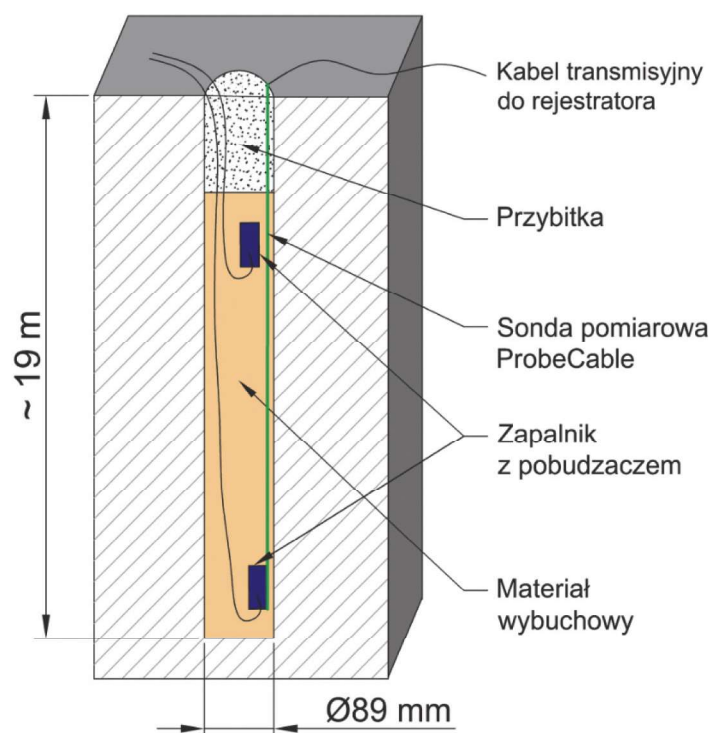
W trakcie drugiej serii pomiarowej, wszystkie otwory strzałowe załadowano materiałem wybuchowym emulsyjnym luzem typu Hydromite 100. Gęstość MW zmierzona 30 min od momentu elaboracji wahała się w granicach od 0,94 g/cm<sup>3</sup> do 1,00 g/cm<sup>3</sup>. Pomiary wykonano ponownie w 8 otworach strzałowych o długości ok. 19 m, do których załadowano po ok. 120–130 kg MW. Podczas załadunku stwierdzono, że wszystkie otwory były zawodnione. Do inicjacji zostały zastosowane zapalniki elektroniczne E\*Star o programowalnym czasie opóźnienia wraz z ładunkiem udarowym, który stanowił ponownie 500-gramowy nabój MW typu Ergodyn

35E. W celu zapewnienia pewnej i bezpiecznej inicjacji, w każdym otworze strzałowym zastosowano po dwa ładunki udarowe (górny i dolny) uzbrojone zapalnikami elektronicznymi. Górny ładunek został opóźniony w stosunku do dolnego o 25 ms. Połączenie powierzchniowe sieci strzałowej zostało wykonane przy zastosowaniu przewodu obwodowego typu Bus Line. Rejestrator umieszczono ponownie w schronie strzałowym zlokalizowanym w bezpiecznej odległości od miejsca wykonywania prac strzałowych. Częstotliwość próbkowania pozostała niezmienna w stosunku do serii 1 i wynosiła 2,5 MHz na każdy kanał.

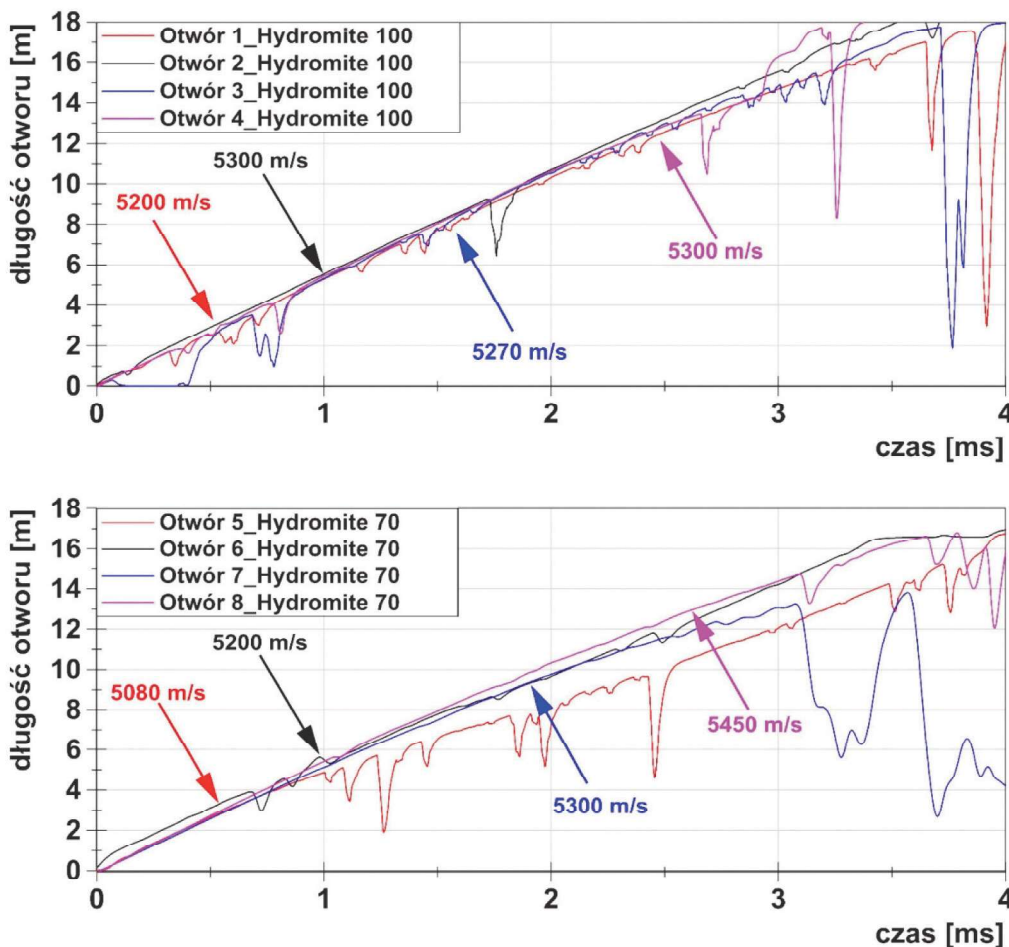
## 4. Analiza wyników badań

W trakcie przeprowadzonych pomiarów, zarówno w serii 1 jak i 2, zarejestrowano prędkości detonacji we wszystkich otworach strzałowych. Wykresy zmian prędkości detonacji w czasie w otworach odpalonych w pierwszej serii pomiarowej przedstawiono na rysunku 7.

Jak wynika z zarejestrowanych przebiegów, maksymalne prędkości detonacji we wszystkich przypadkach przekraczały deklarowaną przez producenta prędkość minimalną i wahały się w granicach od 5080 m/s do 5450 m/s. Analizując charakterystykę przebiegu detonacji można stwierdzić, że MWE typu Hydromite 100 jest materiałem o wysokim poziomie stabilności. Zarejestrowane dane wskazują, że w trzech z czterech otworów inicjacja doprowadziła do niemal natychmiastowego osiągnięcia prędkości detonacji stabilnej. Następnie, kolumna MW detonowała ze stałą prędkością na odcinku ok. 12 m, po czym nieznacznie spadała w końcowej części otworu. Spadek prędkości detonacji w górnych częściach otworów może być związany z mniejszą gęstością MWE na tych odcinkach, co bezpośrednio wynika z oddziaływania obciążenia grawitacyjnego wewnątrz kolumny MW. Pewne zaburzenia procesu inicjacji zaobserwowano jedynie w otworze strzałowym nr 3, jednak zakłada się, że taki stan



Rys. 6. Schemat ładunku MW w otworze  
Fig. 6. Scheme of explosive charge in blasthole



Rys. 7. Przebiegi prędkości detonacji zarejestrowane w serii 1  
 Fig. 7. Detonation velocity plots recorded in series 1

rzeczy był powiązany z bardzo dużym zawadzeniem otworu i problemem z załadunkiem.

Większe rozbieżności wyników zaobserwowano w przypadku materiału wybuchowego typu Hydromite 70. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, wszystkie 4 otwory zostały prawidłowo zainicjowane, dzięki czemu detonacja przebiegała stabilnie już po kilku centymetrach od położenia ładunku udarowego. Następnie, w trzech z czterech analizowanych otworach, w odległości ok. 8 m od ładunku udarowego, zaczęły pojawiać się rozbieżności w zarejestrowanych prędkościach. W jednym z przypadków (otwór nr 5), znaczący spadek prędkości zaobserwowano już po przekroczeniu 4 m. Przypuszczalnie, zmiany te mogą być związane z nierównomiernym rozmieszczeniem granulek saletry w całej objętości MW. Niemniej, we wszystkich 4 analizowanych przypadkach, zmierzone prędkości detonacji znacząco przewyższały wartości deklarowane przez producenta.

W uzupełnieniu do pomiarów prędkości detonacji wyznaczono czasy opóźnień zapalników. Z punktu widzenia kontroli drgań parasejsmicznych, dokładne czasy opóźnień pojedynczych zapalników nie są tak istotne, jak czasy całkowite, tj. czasy obejmujące opóźnienie zapalnika powierzchniowego zsumowane z czasem opóźnienia zapalnika otworowego. W takim przypadku, ewentualne błędy w opóźnieniach inicjacji kumulują się bądź się wzajemnie niwelują, co jest ściśle zależne od tego, czy błąd ma wartość dodatnią, czy ujemną. Według opracowanej siatki strzałowej, opóźnienia pomiędzy kolejnymi otworami strzałowymi powinny wyno-

sić 67 ms. Wyniki pomiarów czasów opóźnień zapalników nieelektrycznych ShockStar MS przedstawiono w tabeli 3. Przeprowadzone pomiary wykazały, że wartości rzeczywiste obarczone są błędem w zakresie od kilku do nawet 11% (średnio ok. 3%). Z punktu widzenia efektywności urabiania, taki rozrzut wyników należy traktować jako nieistotny, jednak w przypadku strzelań w kopalniach odkrywkowych, w których istotne jest minimalizowanie poziomu drgań, zaleca się stosowanie zapalników o większej dokładności.

Tabela 3. Zmierzone czasy opóźnień zapalników nieelektrycznych w odniesieniu do pierwszego otworu

Table 3. Recorded delays of non-electric detonators in relation to the first blasthole

Numer otworu	Seria 1			
	Wartość nominalna	Wartość zmierzona	Błąd	
	ms	ms	ms	%
1	469	477	8	1,71
2	402	406	4	1,00
3	335	332	-3	0,90
4	268	263	-5	1,87
5	201	201	0	0,00
6	134	119	-15	11,19
7	67	70	3	4,48
8	0	0		0,00

Warto jednocześnie zaznaczyć, że w większości przypadków, odchylenie od wartości nominalnej nie przekraczało 2% i tylko w jednym przypadku (otwór nr 6), zmierzona wartość opóźnienia wyraźnie odstawała od wartości nominalnej. Przy małej populacji danych, może to istotnie zaburzyć interpretację wyników. W takiej sytuacji warto powtórzyć pomiary wykorzystując zapalniki z tej samej partii produkcyjnej, aby określić skalę ewentualnego problemu.

Wykresy prędkości detonacji MWE luzem typu Hydromite 100 zarejestrowane w trakcie drugiej serii pomiarowej przedstawiono na rysunku 8. Zakres prędkości maksymalnych zawierał się w przedziale od 4550 m/s do 5310 m/s, co jest wartością znacznie większą od deklarowanej przez producenta. Warto zauważyć, że w 7 przypadkach, przebieg detonacji jest bardzo stabilny niemal na całej długości otworu strzałowego. Ponadto, we wszystkich 8 przypadkach zaobserwowano prawidłowe pobudzenie MW, gdyż brak jest widocznych odcinków świadczących o tzw. „rozpędzaniu się” materiału wybuchowego.

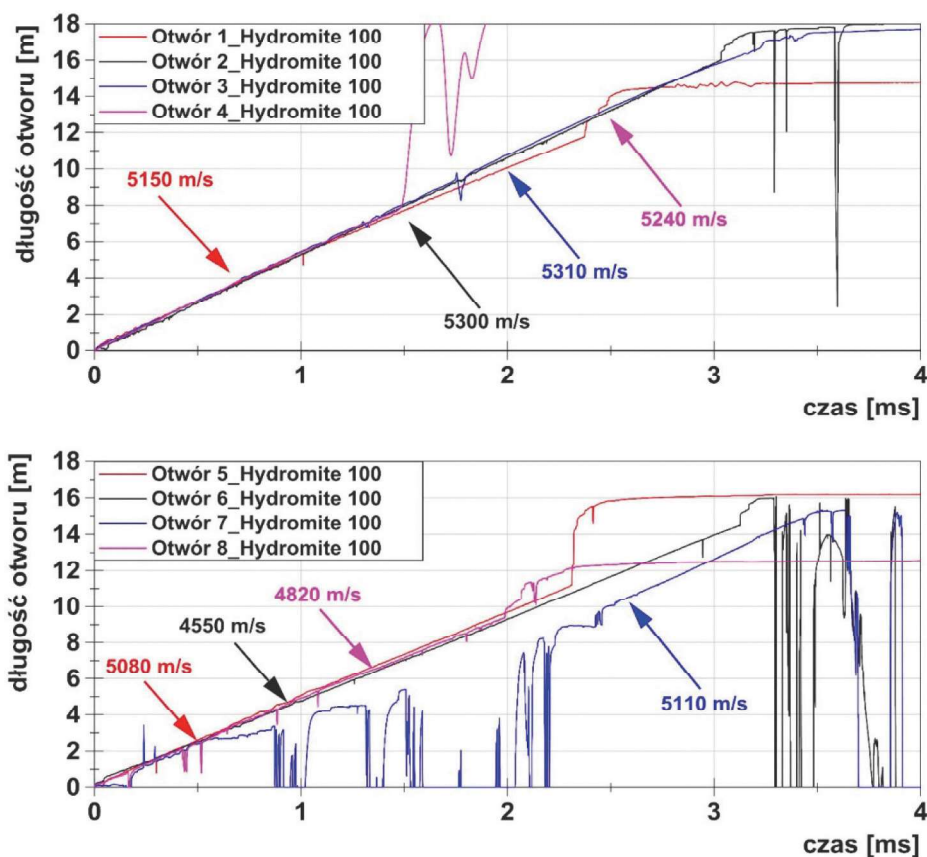
Większe zakłócenia widoczne są jedynie w otworze nr 7, w którym nie można jednoznacznie określić przebiegu prędkości detonacji pomiędzy 3 m a 10 m. Taka sytuacja może wynikać z problemów z załadunkiem, wskutek czego sonda pomiarowa była kilkakrotnie wyciągana i ponownie umieszczana w otworze, przez co mogła ulec częściowemu uszkodzeniu. W efekcie, na wykresie widoczne są spadki wskazujące, że obwód elektryczny nie był zamknięty. W tym przypadku, stabilny przebieg detonacji zaobserwowano jedynie na ostatnich 4 m otworu strzałowego.

Biorąc pod uwagę wszystkie wyniki pomiarów prędkości detonacji MWE typu Hydromite 100 (łącznie z obu serii),

maksymalna wartość prędkości wynosiła od 4550 m/s do 5310 m/s, a wartość średnia wynosiła 5136 m/s, zatem o ponad 1000 m/s powyżej wartości deklarowanej. Maksymalne odchylenie od wartości średniej wynosiło ok. 11% (580 m/s), przy czym średnio było to zaledwie ok. 3%. Z kolei analizując MW typu Hydromite 70 (4 pomiary), wartość średnia wynosiła 5257 m/s (ponad 750 m/s powyżej wartości deklarowanej), natomiast maksymalne odchylenie od wartości średniej wynosiło ok. 4% (średnio 2%).

W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów czasów opóźnień zapalników elektronicznych typu E\*Star. Zapalniki te, według deklaracji producenta, charakteryzują się dokładnością na poziomie 0,01% względem zaprogramowanego czasu opóźnienia. Zgodnie z dokumentacją strzałową, opóźnienia pomiędzy kolejnymi otworami powinny wynosić odpowiednio 34 ms, 70 ms, 100 ms, 121 ms, 172 ms, 196 ms oraz 219 ms. Przeprowadzone pomiary wykazały jednoznacznie, że zapalniki elektroniczne charakteryzują się bardzo dużą precyzją w zakresie zaprogramowanych czasów opóźnień. We wszystkich przeanalizowanych przypadkach, dokładność inicjacji poszczególnych zapalników była zgodna co do 1 ms z wartością zdefiniowaną podczas logowania zapalników przed odstrzałem.

Duża precyzja czasów inicjacji w zapalnikach elektronicznych sprawia, że wydają się one być najlepszym rozwiązaniem w przypadku konieczności wykonywania robót o charakterze specjalistycznym, w których bardzo istotne jest zagadnienie kontroli drgań parasejsmicznych. Nie bez znaczenia pozostaje również wpływ dokładności stosowanych systemów inicjacji na rozdrobnienie i kształt usypu urobku po odstrzale.



Rys. 8. Przebiegi prędkości detonacji zarejestrowane w serii 2  
Fig. 8. Detonation velocity plots recorded in series 2



**Tabela 4. Zmierzone czasy opóźnień zapalników elektronicznych typu E\*Star w odniesieniu do pierwszego otworu**

**Table 4. Recorded delays of E\*Star electronic detonators in relation to the first blasthole**

Numer otworu	Seria 2			
	Wartość zaprogramowana	Wartość zmierzona	Błąd	
	ms	ms	ms	%
1	0	0	0	0,00
2	34	34	0	0,00
3	70	70	0	0,00
4	100	100	0	0,00
5	121	121	0	0,00
6	172	172	0	0,00
7	196	196	0	0,00
8	219	219	0	0,00

## 5. Podsumowanie

Podstawowym elementem, który wpływa bezpośrednio na efektywność robót strzałowych jest jakość wykorzystywanych środków strzałowych, szczególnie materiału wybuchowego. W oparciu o dotychczasowe doświadczenia można stwierdzić, że górnicze materiały wybuchowe, a zwłaszcza materiały wybuchowe emulsyjne luzem, charakteryzują się na ogół dużą zmiennością parametrów termodynamicznych w zależności od warunków górniczo-geologicznych i technicznych występujących w miejscu wykonywania robót strzałowych. Dotyczy to również środków inicjujących, których dokładność, w wielu przypadkach, warunkuje możliwość kontroli negatywnego wpływu robót strzałowych na środowisko. W większości przypadków, kontrola jakości materiału wybuchowego sprowadza się w zasadzie do sprawdzenia wstępnej reakcji uczuleniowej, czyli do pomiaru gęstości wytworzonego materiału wybuchowego, a następnie, po zakończeniu strzelania, do jakościowej oceny efektu robót. W sytuacji pojawienia się problemów z urabianiem, informacje te ograniczają możliwość podjęcia konstruktywnych działań korygujących, a ewentualne zmiany wdrażane są metodą prób i błędów.

W celu utrzymania optymalnego efektu robót strzałowych wskazane jest prowadzenie okresowej weryfikacji parametrów środków strzałowych w warunkach *in situ*. Badania tego typu pozwalają określić, na ile wartości pomierzone pokrywają się z danymi deklarowanymi przez producentów, a jednocześnie na sprawdzenie czy zastosowany materiał wybuchowy jest w danych warunkach eksploatacyjnych stabilny, zatem, czy nie zmienia swoich parametrów użytkowych wraz ze zmianą warunków górniczo-geologicznych. Wykorzystanie do tego celu wielokanałowego urządzenia DataTrap II umożliwia zebranie informacji, których nie można otrzymać przy użyciu klasycznych urządzeń jednokanałowych czy urządzeń do pomiarów odcinkowych, którymi prowadzi się pomiary metodą znormalizowaną. Dzięki temu, w ramach jednego pomiaru, można określić prędkość detonacji materiału wybuchowego nawet w ośmiu otworach strzałowych. Informacja ta pozwala na weryfikację jednorodności materiału wybuchowego, szczególnie ważną w przypadku stosowania MW luzem, ale także określenie wpływu wody, zwiercin, kawałków skał itp., znajdujących się w kolumnie materiału wybuchowego na przebieg detonacji. Możliwe jest również sprawdzenie czy doszło do pełnej detonacji, do detonacji częściowej, czy nastąpił błąd i kolumna MW nie zdetonowała – włącznie ze wskazaniem, w której części kolumny doszło do przerwania detonacji.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że analizowane wielokanałowe urządzenie do ciągłego

pomiaru prędkości detonacji spełnia oczekiwania w zakresie dokładności realizowanych badań, jak również ich praktycznego wykonywania w warunkach ruchowych zakładu górniczego. Informacje uzyskane w trakcie pomiarów mogą być podstawą do podjęcia działań korygujących, pozwalających na poprawę efektywności robót strzałowych.

## Literatura

- BALAKRISHNAN V., PRADHAN M., DHEKNE P.Y. 2019 - Field investigation in the detonation behaviour of emulsion explosive column induced with air gaps. *Mining Science*, nr 26, s. 55–68.
- BATKOP., PYRAJ. 2010 - Pomiar prędkości detonacji MW w otworze strzałowym z zastosowaniem aparatury MicroTrap. „*Górnictwo i Geoinżynieria*”, nr 34(4), s. 57–66.
- CHIAPPETTA R.F. 1998 - Blast monitoring instruments and analysis techniques with an emphasis on field application. *Fragblast – International Journal of Blasting and Fragmentation*, nr 2(1), s. 79–101.
- COOPER P.W. 1996 - *Explosives engineering*. Wiley-VCH, New York.
- HEIT A. 2011 - An investigation into the parameters that affect the swell factor used in volume and design calculations at Callide open cut coal mine. Graduate work, University of Southern Queensland.
- KABIESZ J., LURKA A. 2015 - Konstruktywna interferencja drgań generowanych robotami strzałowymi - przesłanki praktyczne. „*Wiadomości Górnicze*” nr 66(5), s. 273–280.
- KABWE E. 2018 - Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, nr 10(3), s. 523–533.
- MARANDA A., GOŁĄBEK B., KASPERSKI J. 2008 - *Materiały wybuchowe emulsyjne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- MERTUSZKA P., FUŁAWKA K., CENIAN B. 2017 - Pomiar prędkości detonacji ładunków materiałów wybuchowych w warunkach połowych z wykorzystaniem urządzeń Explomet-Fo-2000 oraz MicroTrap™. „*Górnictwo Odkrywkowe*” nr 1, s. 28–34.
- MERTUSZKA P. 2019 - Materiały wybuchowe emulsyjne w polskim górnictwie rud miedzi. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- MERTUSZKA P., PYTLIK M. 2019 - Analysis and comparison of the continuous detonation velocity measurement method with the standard method. „*Materiały Wysokoenergetyczne*” nr 11(2), s. 63–72.
- MERTUSZKA P., SZUMNY M., FUŁAWKA K., NIKOŁOV S. 2020 - Field evaluation of mine blasting efficiency. *SWS Journal of Earth and Planetary Sciences*, nr 2(2), s. 1–16.
- PACHMÁN J., KÜNZEL M., KUBÁT K., ŠELEŠOVSKÝ J., MARŠÁLEK R., POSPÍŠIL M., KUBÍČEK M., PROKEŠ A. 2017 - OPTIMEX: Measurement of detonation velocity with a passive optical fibre system. *Central European Journal of Energetic Materials*, nr 14(1), s. 233–250.
- RAWICKI Z., KRZEŁOWSKI J., MIREK A. 2017 - Bezpieczeństwo robót strzałowych w podziemnych zakładach górniczych w kontekście nieprawidłowości przy ich wykonywaniu stwierdzanych przez organy nadzoru górniczego. „*Przeгляд Górniczy*” nr 73(3), s. 50–57.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 9 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w ruchu zakładu górniczego (Dz.U. 2017, poz. 321).
- SZASTOK M. 2015 - Nowa metoda pomiaru prędkości detonacji materiałów wybuchowych. „*Wiadomości Górnicze*” nr 66(4), s. 213–216.
- TETE A.D., DESHMUKH A., YERPUDE R. 2013 - Velocity of detonation (VOD) measurement techniques – practical approach. *International Journal of Engineering and Technology*, nr 2(3), s. 259–265.
- TRZCIŃSKI W.A., CHYLEK Z., CUDZIŁO S., SZYMANCZYK L. 2008 - Badanie parametrów detonacyjnych i wrażliwości flegmatyzowanych materiałów wybuchowych opartych na FOX-7. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, nr 57(3), s. 7–25.
- ŽGANEC S., BOHANEK V., DOBRILLOVIĆ M. 2016 - Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and heavy ANFO blends. *Central European Journal of Energetic Materials*, nr 13(3), s. 694–704.

Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń 2021  
Artykuł akceptowano do druku – 15.03.2021