

Załącznik nr 3

**do wniosku o przeprowadzenie
postępowania habilitacyjnego**

Autoreferat

Spis treści

| | |
|---|----|
| 1. Dane osobowe..... | 3 |
| 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe | 3 |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.... | 4 |
| 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)..... | 4 |
| 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego..... | 4 |
| 4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego | 4 |
| 4.3. Omówienie kolejnych etapów prac zmierzających do osiągnięcia założonego celu naukowego..... | 6 |
| 4.4. Zestawienie prac dokumentujących osiągnięcie naukowe..... | 7 |
| 4.5. Wprowadzenie i uzasadnienie podjęcia tematu osiągnięcia naukowego | 12 |
| 4.6. Omówienie najważniejszych wyników | 18 |
| 4.6.1. Gęstość i prędkość detonacji ładunków MWE luzem w warunkach podziemnych..... | 18 |
| 4.6.2. Gęstość ładunków MWE luzem w warunkach laboratoryjnych | 22 |
| 4.6.3. Średnica ładunku a prędkość detonacji MWE luzem..... | 25 |
| 4.6.4. Średnica otworu strzałowego a prędkość detonacji MWE luzem | 27 |
| 4.6.5. Rodzaj środka inicjującego a prędkość detonacji MWE luzem | 30 |
| 4.6.6. Czas od wykonania ładunków do detonacji a prędkość detonacji MWE luzem | 33 |
| 4.6.7. Temperatura ładunków a prędkość detonacji MWE luzem..... | 37 |
| 4.6.8. Nowa odmiana MWE luzem dla kopalń podziemnych | 39 |
| 4.6.9. Badania efektywności nowego MWE luzem w warunkach podziemnych..... | 42 |
| 4.7. Podsumowanie | 46 |
| 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej..... | 49 |
| 5.1. Współpraca międzynarodowa | 50 |
| 5.2. Współpraca krajowa..... | 53 |
| 5.3. Udział w projektach międzynarodowych i krajowych..... | 56 |
| 5.4. Pozyskiwanie projektów międzynarodowych..... | 56 |
| 5.5. Konferencje krajowe i zagraniczne | 57 |
| 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę..... | 58 |
| 6.1. Osiągnięcia dydaktyczne..... | 58 |
| 6.1.1. Zajęcia dydaktyczne | 58 |
| 6.1.2. Promotorstwo prac i opieka nad doktorantami..... | 59 |
| 6.1.3. Staże naukowe i praktyki studenckie | 59 |
| 6.2. Osiągnięcia organizacyjne | 60 |
| 6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę..... | 61 |
| 7. Inne ważne informacje dotyczące kariery zawodowej wnioskodawcy, poza wymienionymi w pkt 1–6. | 63 |
| 7.1. Omówienie pozostałych osiągnięć nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego | 63 |
| 7.2. Dane naukometryczne | 68 |

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Piotr Mertuszka
Data urodzenia: ██████████
Numer ORCID: 0000-0002-2539-104X

Miejsce zatrudnienia: KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe
Zakład Mechaniki Górnotworu

Adres: ██████████
████████████████████
████████████████████
████████████████████
██

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Nazwa: **stopień doktora nauk technicznych**
Dyscyplina: **górnictwo i geologia inżynierska**
Miejsce uzyskania: **Politechnika Wroclawska**
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Data uzyskania: **27 stycznia 2016 r.**
Tytuł rozprawy doktorskiej: **Optymalizacja parametrów strzelań przodków dla uzyskania efektu wzmocnienia fali sprężyste**
Promotor: **prof. dr hab. inż. Witold Pytel – Politechnika Wroclawska**
Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Jan Butra – Politechnika Wroclawska**
dr hab. inż. Adam Lurka – Główny Instytut Górnictwa

Nazwa: **dyplom magistra inżyniera górnictwa i geologii**
Specjalność: **eksploatacja podziemna i odkrywkowa złóż**
Miejsce uzyskania: **Politechnika Wroclawska**
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Data uzyskania: **10 lipca 2008 r.**
Tytuł pracy magisterskiej: **Ocena systemu eksploatacji w kierunku zrobów i stref upodatnionych na przykładzie ZG Rudna**
Promotor: **prof. dr hab. inż. Jan Butra**

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

Od **stycznia 2009 r.** do chwili obecnej zatrudniony jestem w KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, kolejno na stanowiskach:

- specjalisty inżynierjno-technicznego – od 1.01.2009 r. do 31.05.2012 r.
- specjalisty badawczo-technicznego – od 1.06.2012 r. do 30.09.2013 r.
- asystenta – od 1.10.2013 r. do 23.11.2017 r.
- adiunkta – od 24.11.2017 r. do chwili obecnej.

Ponadto, w okresie od 1 stycznia 2017 r. do 30 września 2022 r. pełniłem funkcję zastępcy kierownika Zakładu Mechaniki Górotworu, następnie w okresie od 1 października 2022 r. do 31 grudnia 2022 r. pełniłem obowiązki kierownika Zakładu Mechaniki Górotworu, a z dniem 1 stycznia 2023 r., objąłem stanowisko kierownika Zakładu Mechaniki Górotworu.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu ww. ustawy będące podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego i stanowiące znaczny wkład w rozwój nauk inżynierjno-technicznych, przedkładam cykl powiązanych tematycznie publikacji pt. **Bezpieczne i efektywne wydobywanie złoża techniką strzałową w komorowo-filarowym systemie eksploatacji**. Główne osiągnięcie naukowe uzupełnia uzyskany dorobek naukowy w postaci 94 publikacji (65 po uzyskaniu stopnia doktora), w tym 1 monografii naukowej, artykułów w czasopismach naukowych, materiałach konferencyjnych oraz rozdziałów w monografiach, z czego 16 znajduje się na tzw. Liście Filadelfijskiej.

4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Na cykl powiązanych tematycznie publikacji składa się **9 artykułów punktowanych w czasopismach z listy MEiN (MNiSW)**, w tym 8 posiadających wskaźnik Impact Factor:

[A1] **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Wincenciak J., Wawryszewicz A. The influence of time on the density and detonation velocity of bulk emulsion explosives – a case study from Polish copper mines. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 16 (2), 2019, s. 245–258; DOI: [10.22211/cejem/109839](https://doi.org/10.22211/cejem/109839).

Punktacja MNiSW: **70 pkt**, Impact Factor: **1,098**.

[A2] Kramarczyk B., **Mertuszka P.** Study of the influence of sensitizer content on the density of a bulk emulsion explosive used in underground operations. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 18 (4), 2021, s. 429–447, DOI: [10.22211/cejem/144498](https://doi.org/10.22211/cejem/144498).

Punktacja MEiN: **70 pkt**, Impact Factor: **0,948**.

- [A3] **Mertuszka P.**, Cenian B., Kramarczyk B., Pytel W. Influence of explosive charge diameter on the detonation velocity based on Emulinit 7L and 8L bulk emulsion explosives. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 15 (2), 2018, s. 351–363, DOI: [10.22211/cejem/78090](https://doi.org/10.22211/cejem/78090).

Punktacja MNiSW: **25 pkt**, Impact Factor: **1,040**.

- [A4] **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Maślej J., Saiang D. The effect of the blasthole diameter on the detonation velocity of bulk emulsion explosive in the conditions of selected mining panel of the Rudna mine. *Archives of Mining Sciences*, vol. 64 (4), 2019, s. 725–737, DOI: [10.24425/ams.2019.131062](https://doi.org/10.24425/ams.2019.131062).

Punktacja MNiSW: **40 pkt**, Impact Factor: **0,589**.

- [A5] **Mertuszka P.**, Fuławka K., Cenian B., Kramarczyk B. Wpływ sposobu pobudzenia materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na prędkość detonacji na przykładzie Emulinitu 8L. *Przegląd Górniczy*, nr 5/2017, s. 8–16.

Punktacja MNiSW: **7 pkt**, Impact Factor: 0.

- [A6] **Mertuszka P.**, Kramarczyk B. The impact of time on the detonation capacity of bulk emulsion explosives based on Emulinit 8L. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 43 (8), 2018, s. 799–804, DOI: [10.1002/prop.201800062](https://doi.org/10.1002/prop.201800062).

Punktacja MNiSW: **25 pkt**, Impact Factor: **1,749**.

- [A7] **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Szastok M. The influence of temperature on the detonation velocity of selected emulsion explosives. *Journal of Energetic Materials*, vol. 38 (3), 2020, s. 336–347, DOI: [10.1080/07370652.2019.1702739](https://doi.org/10.1080/07370652.2019.1702739).

Punktacja MNiSW: **70 pkt**, Impact Factor: **1,325**.

- [A8] Kramarczyk B., Pytlik M., **Mertuszka P.**, Jaszcz K., Jarosz T. Novel sensitizing agent formulation for bulk emulsion explosives with improved energetic parameters. *Materials*, vol. 15 (3), 2022, s. 900, DOI: [10.3390/ma15030900](https://doi.org/10.3390/ma15030900).

Punktacja MEiN: **140 pkt**, Impact Factor: **3,623**.

- [A9] **Mertuszka P.**, Kramarczyk B., Pytlik M., Szumny M., Jaszcz K., Jarosz T. Implementation and verification of effectiveness of bulk emulsion explosive with improved energetic parameters in an underground mine environment. *Energies*, vol. 15 (17), 2022, s. 6424; DOI: [10.3390/en15176424](https://doi.org/10.3390/en15176424).

Punktacja MEiN: **140 pkt**, Impact Factor: **3,252**.

Podsumowanie:

| | |
|----------------------------|---------------|
| Liczba publikacji: | 9 |
| Suma punktów MEiN (MNiSW): | 587 |
| Sumaryczny Impact Factor: | 13,624 |

4.3. Omówienie kolejnych etapów prac zmierzających do osiągnięcia założonego celu naukowego

Wymienione w pkt 4.2 prace są ze sobą ściśle powiązane ciągiem przyczynowo-skutkowym, który charakteryzuje kolejne etapy prowadzonych badań oraz uzyskanych wyników. Przebieg realizacji przedkładanego osiągnięcia naukowego można opisać następująco:

- 1) W pierwszym etapie **określono relację gęstości** materiału wybuchowego emulsyjnego luzem **od czasu** w warunkach podziemnych, a także **gęstości i prędkości detonacji** w zależności od **ilości uczulacza** wynikającej ze zmian prędkości obrotowej pompy uczulacza w module mieszalniczo-załadoczym [publikacja **A1**].
- 2) Następnie **zweryfikowano wyniki zmian gęstości** materiału wybuchowego w czasie uzyskanych w pracy [A1] **w warunkach laboratoryjnych** (przy zachowaniu wysokiej dokładności mieszania) w celu określenia **czy proces mieszania składników może przebiegać w sposób kontrolowany** przez użytkowników. Ten etap prac poprzedzono szczegółową analizą wyników badań gęstości materiału wybuchowego emulsyjnego luzem prowadzonych pod ziemią przez górników strzałowych dla losowo wybranych wozów strzałowych [publikacja **A2**].
- 3) Niezależnie prowadzono prace mające na celu **określenie wpływu średnicy ładunku** materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na prędkość detonacji oraz **zweryfikowanie** czy ewentualne **zmniejszenie średnicy** ładunku może doprowadzić do przerwania detonacji [publikacja **A3**].
- 4) Wyniki uzyskane w pracy [A3] były podstawą do szczegółowej analizy powyższego zagadnienia w warunkach podziemnych, tj. **określenia wpływu średnicy otworu strzałowego** na prędkość detonacji materiału wybuchowego emulsyjnego luzem dla koronek wiertniczych stosowanych powszechnie w ruchu zakładu górniczego, a także **określenie optymalnej średnicy otworów** z punktu widzenia prędkości detonacji, co oznacza odpowiednie wykorzystanie energii materiału wybuchowego [publikacja **A4**].
- 5) W artykule [A5] przeanalizowane zostało zagadnienie **wplywu zastosowanego środka inicjującego** na prędkość detonacji materiału wybuchowego emulsyjnego luzem, a także **wyznaczono długości odcinków** od miejsca inicjacji, po przekroczeniu których materiał wybuchowy **detonował już ze stałą prędkością** detonacji.
- 6) Równolegle prowadzono prace mające na celu **określenie wpływu czasu** na prędkość detonacji materiału wybuchowego emulsyjnego luzem, co w rezultacie miało pozwolić na **wyznaczenie minimalnego czasu** wymaganego do **utruty właściwości wybuchowych** analizowanego materiału wybuchowego [publikacja **A6**]. Jest to niezwykle kluczowe zagadnienie z punktu widzenia bezpieczeństwa prowadzonych robót górniczych.
- 7) Wyniki badań dotyczących **wplywu czasu przebywania** próbek materiału wybuchowego emulsyjnego w **ustalonej temperaturze** oraz **wplywu temperatury** na prędkość detonacji materiału wybuchowego przedstawiono w pracy [A7]. Problem ten dotyczy zarówno **obniżenia parametrów detonacyjnych** materiału wybuchowego emulsyjnego, jak i **pogorszenia właściwości użytkowych** w przypadku materiałów wybuchowych emulsyjnych nabojujących.

- 8) Wyznaczenie zależności prędkości detonacji od szeregu czynników technologicznych pozwoliło na **zdefiniowanie parametrów**, jakimi **powinien charakteryzować się** nowy materiał wybuchowy dla kopalń podziemnych. Dlatego też podjęto **próbę modyfikacji** stosowanego obecnie składu materiału wybuchowego emulsyjnego luzem. Założono, że nowy materiał wybuchowy musi charakteryzować się co najmniej takimi samymi parametrami detonacyjnymi, jak stosowany obecnie. Wykazano, że **nowy materiał wybuchowy** charakteryzuje się **wyższymi parametrami detonacyjnymi** oraz **znacznie szybszym, bardziej przewidywalnym i stabilniejszym przebiegiem reakcji uczulania** w porównaniu do stosowanego obecnie materiału wybuchowego [publikacja A8].
- 9) W ostatnim etapie osiągnięcia **zweryfikowano efektywność nowej odmiany** materiału wybuchowego emulsyjnego luzem **w warunkach podziemnych**. W trakcie prób ruchowych przeprowadzono badania gęstości i kruszości materiału wybuchowego dla próbek pobranych bezpośrednio z modułu mieszalniczo-załadowczego, a także przeprowadzono pomiary prędkości detonacji w otworach strzałowych oraz analizę rozdrobnienia urobku po strzelaniu. Ten szczególnie ważny element badań potwierdził, że **możliwa jest poprawa efektywności i bezpieczeństwa wydobywania**, ponieważ nowy materiał wybuchowy charakteryzuje się **znacznie szybszym i bardziej stabilnym przebiegiem reakcji uczulania** w odniesieniu do stosowanego obecnie materiału wybuchowego [publikacja A9].

Głównym celem naukowym przedłożonych etapów badawczych było:

określenie zasad prowadzenia bezpiecznego i efektywnego wydobywania złoża techniką strzałową w komorowo-filarowym systemie eksploatacji.

Powyższy cel został osiągnięty dzięki:

zweryfikowaniu w skali przemysłowej wpływu wybranych czynników technologicznych na prędkość detonacji materiału wybuchowego emulsyjnego luzem, a także opracowaniu i przetestowaniu w warunkach podziemnych nowej odmiany materiału wybuchowego.

4.4. Zestawienie prac dokumentujących osiągnięcie naukowe

[A1] Tytuł pracy: The influence of time on the density and detonation velocity of bulk emulsion explosives – a case study from Polish copper mines.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Wincenciak J., Wawryszewicz A.

Czasopismo: *Central European Journal of Energetic Materials*.

Numer, rok wydania, numery stron: 16 (2), 2019, 245–258.

DOI: [10.22211/cejem/109839](https://doi.org/10.22211/cejem/109839).

IF = **1,098**

Liczba punktów MNiSW: **70**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- sformułowaniu celów i założeń badawczych,
- dokonaniu przeglądu literaturowego (razem z zespołem),
- opracowaniu koncepcji pracy oraz zaplanowaniu poszczególnych etapów badań,
- wykonaniu wszystkich etapów badań dołowych,
- analizie wyników oraz sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej.

[A2] Tytuł pracy: Study of the influence of sensitizer content on the density of a bulk emulsion explosive used in underground operations.

Autorzy: Kramarczyk B., **Mertuszka P.**

Czasopismo: *Central European Journal of Energetic Materials*.

Numer, rok wydania, numery stron: 18 (4), 2021, 429–447.

DOI: [10.22211/cejem/144498](https://doi.org/10.22211/cejem/144498).

IF = **0,948**

Liczba punktów MEiN: **70**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- określeniu celów i założeń badawczych,
- przeprowadzeniu przeglądu literaturowego,
- opracowaniu koncepcji pracy,
- opracowaniu harmonogramu badań,
- udziale w badaniach dołowych i laboratoryjnych,
- analizie wyników badań oraz sformułowaniu wniosków (wraz ze współautorem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej i graficznej,
- przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

[A3] Tytuł pracy: Influence of explosive charge diameter on the detonation velocity based on Emulinit 7L and 8L bulk emulsion explosives.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Cenian B., Kramarczyk B., Pytel W.

Czasopismo: *Central European Journal of Energetic Materials*.

Numer, rok wydania, numery stron: 15 (2), 2018, 351–363.

DOI: [10.22211/cejem/78090](https://doi.org/10.22211/cejem/78090).

IF = **1,040**

Liczba punktów MNiSW: **25**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- sformułowaniu celów i założeń badawczych,
- dokonaniu przeglądu literaturowego,
- opracowaniu koncepcji pracy oraz zaplanowaniu poszczególnych etapów badań,
- przeprowadzeniu badań dołowych,
- analizie wyników oraz sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej oraz graficznej.

[A4] Tytuł pracy: The effect of the blasthole diameter on the detonation velocity of bulk emulsion explosive in the conditions of selected mining panel of the Rudna mine.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Maślej J., Saiang D.

Czasopismo: *Archives of Mining Sciences*.

Numer, rok wydania, numery stron: 64 (4), 2019, 725–737.

DOI: [10.24425/ams.2019.131062](https://doi.org/10.24425/ams.2019.131062).

IF = **0,589**

Liczba punktów MNiSW: **40**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- sformułowaniu celów i założeń badawczych,
- dokonaniu przeglądu literaturowego (razem z zespołem),
- opracowaniu koncepcji badań oraz harmonogramu badań,
- wykonaniu badań dołowych,
- analizie wyników oraz sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej,
- korekcie i przygotowaniu odpowiedzi na recenzje (z zespołem).

[A5] Tytuł pracy: Wpływ sposobu pobudzenia materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na prędkość detonacji na przykładzie Emulinitu 8L.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Fuławka K., Cenian B., Kramarczyk B.

Czasopismo: *Przegląd Górniczy*.

Numer, rok wydania, numery stron: 5, 2017, 8–16.

DOI: N/D

IF = N/D

Liczba punktów MNiSW: **7**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- określeniu celów i założeń badawczych,
- przeprowadzeniu przeglądu literaturowego (razem z zespołem),
- opracowaniu koncepcji pracy oraz harmonogramu badań,
- wykonaniu badań terenowych,
- analizie wyników oraz sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej,
- korekcie pracy przed złożeniem do druku.

[A6] Tytuł pracy: The impact of time on the detonation capacity of bulk emulsion explosives based on Emulinit 8L.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Kramarczyk B.

Czasopismo: *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*.

Numer, rok wydania, numery stron: 43 (8), 2018, 799–804.

DOI: [10.1002/prop.201800062](https://doi.org/10.1002/prop.201800062).

IF = **1,749**

Liczba punktów MNiSW: **25**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- określeniu celów i założeń badawczych,
- przeprowadzeniu przeglądu literaturowego,
- opracowaniu koncepcji pracy,
- opracowaniu harmonogramu i udziale w badaniach polowych,
- analizie wyników badań oraz sformułowaniu wniosków (wraz ze współautorem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej i graficznej.

[A7] Tytuł pracy: The influence of temperature on the detonation velocity of selected emulsion explosives.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Szastok M.

Czasopismo: *Journal of Energetic Materials*.

Numer, rok wydania, numery stron: 38 (3), 2020, 336–347.

DOI: [10.1080/07370652.2019.1702739](https://doi.org/10.1080/07370652.2019.1702739).

IF = **1,325**

Liczba punktów MNiSW: **70**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- sformułowaniu celów i założeń badawczych,
- przeprowadzeniu przeglądu literaturowego (razem z zespołem),
- opracowaniu koncepcji pracy oraz harmonogramu badań,
- wykonaniu badań terenowych,
- analizie wyników oraz sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej,
- przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

[A8] Tytuł pracy: Novel sensitizing agent formulation for bulk emulsion explosives with improved energetic parameters.

Autorzy: Kramarczyk B., Pytlik M., **Mertuszka P.**, Jaszcz K., Jarosz T.

Czasopismo: *Materials*.

Numer, rok wydania, numery stron: 15 (3), 2022, 900.

DOI: [10.3390/ma15030900](https://doi.org/10.3390/ma15030900).

IF = **3,623**

Liczba punktów MEiN: **140**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- dokonaniu przeglądu literaturowego (razem z zespołem),
- współudziale w opracowaniu koncepcji pracy,
- udziale w badaniach polowych,
- analizie wyników i sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- graficznym przedstawieniu wyników,
- przygotowaniu wstępnej wersji manuskryptu,
- edycji i korekcie końcowej wersji manuskryptu.

[A9] Tytuł pracy: Implementation and verification of effectiveness of bulk emulsion explosive with improved energetic parameters in an underground mine environment.

Autorzy: **Mertuszka P.**, Kramarczyk B., Pytlik M., Szumny M., Jaszcz K., Jarosz T.

Czasopismo: *Energies*.

Numer, rok wydania, numery stron: 15 (17), 2022, 6424.

DOI: [10.3390/en15176424](https://doi.org/10.3390/en15176424).

IF = **3,252**

Liczba punktów MEiN: **140**.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- sformułowaniu celów i założeń badawczych,
- dokonaniu przeglądu literaturowego,
- opracowaniu koncepcji pracy oraz zaplanowaniu poszczególnych etapów badań,
- udziale w badaniach,
- analizie wyników i sformułowaniu wniosków (razem z zespołem),
- graficznej prezentacji wyników,
- przygotowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej,
- edycji i korekcie końcowej wersji manuskryptu,
- przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

4.5. Wprowadzenie i uzasadnienie podjęcia tematu osiągnięcia naukowego

Działalność związana z realizacją osiągnięcia naukowego była wynikiem wieloletnich prac prowadzonych przeze mnie w KGHM CUPRUM w ramach prac badawczych, projektów, opinii technicznych oraz ekspertyz. Rozprawa doktorska, którą w styczniu 2016 r. obroniłem przed Radą Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, łączyła ze sobą kilka obszarów, w tym m.in. geomechanikę, technikę strzałową i modelowanie numeryczne. Na podstawie przeprowadzonych symulacji wykazałem, że istnieje wyraźny związek pomiędzy czasami opóźnień zastosowanymi w odpalanych przodkach, a stanem naprężeń i odkształceń w górotworze. Zmiana rozkładu wartości zapasów bezpieczeństwa charakterystycznych dla stanu obciążenia statycznego i stanu obciążenia wywołanego detonacją ładunków materiałów wybuchowych (MW) w przodkach eksploatacyjnych, wskazała na możliwość celowego wywoływania niestateczności w górotworze, a przez to wymuszania wstrząsów sejsmicznych w momencie nieobecności załogi w rejonach aktywnych pól eksploatacyjnych, zatem tych, które z reguły są najbardziej zagrożone dynamicznymi przejawami ciśnienia górotworu.

Prowadzone badania pozwoliły mi zapoznać się szczegółowo z wybranymi elementami techniki strzałowej w kopalniach należących do KGHM Polska Miedź S.A. Wstępne obserwacje potwierdziły to, że podejmowane w ostatnich latach próby wdrożenia mechanicznego systemu urabiania złóż (np. z wykorzystaniem kombajnów chodnikowych i ścianowych) doprowadziły do istotnych zaniedbań w prowadzeniu eksploatacji metodą tradycyjną z użyciem materiałów wybuchowych. Problem ten wiązał się przede wszystkim z ograniczeniem liczby prac badawczo-rozwojowych, których realizacja pozwoliłaby na poprawę efektywności prowadzonych robót górniczych. Z drugiej strony praktycznie nie wdrażano innowacyjnych rozwiązań w obszarze techniki strzałowej, które mogłyby wpłynąć na poprawę efektywności prac strzałowych. Należy także zaznaczyć, że mechanizacja procesu urabiania jest technicznie możliwa do zastosowania, ale z uwagi na pojawiające się problemy z utrzymaniem stropu¹ oraz wysokie koszty technologii, w chwili obecnej nie ma wystarczających podstaw do zmiany przyjętego systemu eksploatacji.

¹ Pytel W., Pałac-Walko B., Mertuszka P. 2021. Geomechanical safety aspects in hard rocks mining based on room-and-pillar and longwall mining systems. [W:] Hassani i in. (red.), Minefill 2020–2021. Taylor & Francis Group, London, UK, s. 288–304.

W związku z powyższym, w latach 2016–2022 pracę naukowo-badawczą koncentrowałem na dwóch zasadniczych obszarach. Pierwszy obejmował problematykę **urabiania złóż** techniką strzałową przy użyciu materiałów wybuchowych ze szczególnym naciskiem na szeroko rozumianą jakość środków strzałowych. Drugi obszar obejmował prace z zakresu **geomechaniki** i związanej z nią profilaktyki tąpniowej oraz z zakresu obudów wyrobisk podziemnych. W ogólnym rozumieniu wspomniane obszary zainteresowania dotyczyły tematyki mającej zasadniczy wpływ na zwiększenie bezpieczeństwa pracy i poprawę efektywności urabiania złoża w podziemnych zakładach górniczych.

Bezpieczeństwo i efektywność wydobywania złóż techniką strzałową są zagadnieniami tak złożonymi i wielowątkowymi, że nie sposób przeanalizować jednocześnie wpływu wszystkich parametrów i czynników, które je kształtują. W tej sytuacji można jedynie podejmować próby oceny wybranych elementów procesu eksploatacji z wykorzystaniem materiałów wybuchowych, a także wskazać kardynalne zasady prowadzenia bezpiecznego i efektywnego wydobywania. Bezpieczeństwo wydobywania złóż techniką strzałową jest powszechnie kojarzone przede wszystkim z bezpieczeństwem pracy z samymi środkami strzałowymi, choć z praktyki wynika, że zdecydowanie większym zagrożeniem jest prowadzenie robót górniczych w obecności w otworach strzałowych pozostawionych niewybuchów lub resztek niezdetonowanego materiału wybuchowego. Z drugiej strony efektywne urabianie złoża zależy od szeregu czynników, spośród których wyróżnić należy czynniki technologiczne, na które wpływają przede wszystkim decyzje służb strzałowych kopalń m.in. w zakresie wyboru średnic otworów strzałowych, rodzaju środka inicjującego, a także czasu przebywania ładunków MW w otworach strzałowych. Efektywne wydobywanie wiąże się również z poszukiwaniem nowych rozwiązań technicznych, w tym opracowywaniem nowych składów materiałów wybuchowych, których celem powinno być otrzymanie wyższych właściwości detonacyjnych i większej stabilności chemicznej. Tego typu materiały wybuchowe powinny również charakteryzować się mniejszą zawartością toksycznych produktów w gazach postrzałowych, co z kolei może wpłynąć na ogólne zwiększenie bezpieczeństwa robót.

Materiały wybuchowe emulsyjne (MWE), choć opracowane i opatentowane już w roku 1969², uważane są zasadniczo za najnowocześniejsze przemysłowe materiały wybuchowe, które stosuje się zarówno w górnictwie odkrywkowym, jak i podziemnym, a także w budownictwie i tunelowaniu. Ponieważ są one pozbawione składników wybuchowych, tzn. nie zawierają nitrowiązków czy nitroestrów (jak np. dynamity, amonity i saletroty), charakteryzują się wysokim stopniem bezpieczeństwa zarówno na etapie produkcji, jak i podczas transportu i użytkowania. Składają się one głównie z utleniaczy, wody, paliw, emulgatorów oraz środków uczulających i modyfikujących³. Sama matryca, której głównymi składnikami są utleniacze, paliwa i woda, nie ma właściwości wybuchowych, zatem nie jest zdolna do detonacji. Aby utworzyć zdolny do detonacji materiał wybuchowy, matrycę należy uczulić, tzn. wprowadzić do materiału wybuchowego pęcherzyki gazów, które podczas detonacji ulegają sprężeniu. Można tego dokonać poprzez wprowadzenie do matrycy zaotoczkowanego gazu,

² Bluhm H.F. 1969. Ammonium nitrate emulsion blasting agent and method of preparing same, Patent USA nr 3,447,978.

³ Mahadevan E.G. 2013. Ammonium nitrate explosives for civil applications: slurries, emulsions and ammonium nitrate fuel oils. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

tw. mikrobalonów tworzywowych lub mikrosfer szklanych (uczulanie fizyczne) albo odpowiednich związków chemicznych (uczulanie chemiczne), których reakcja z matrycą przebiega z wytworzeniem gazu. W wyniku zachodzących reakcji chemicznych, gęstość mieszaniny matrycy i uczulacza spada, co powoduje jego uczulanie. Podczas detonacji rozchodząca się w materiale wybuchowym fala uderzeniowa spręża gaz znajdujący się w pęcherzykach. Tym samym dochodzi do wzrostu temperatury pęcherzyków i w rezultacie do gwałtownego rozkładu azotanu(V) amonu z wydzieleniem tlenu. Proces detonacji jest podtrzymywany w wyniku gwałtownego spalania paliw zawartych w matrycy, czemu towarzyszy wydzielanie znacznych ilości ciepła.

W zależności od formy użytkowej, materiały wybuchowe emulsyjne można podzielić na nabożowane, tj. o określonej średnicy i masie w otoczkach foliowych lub tworzywowych, które produkowane są stacjonarnie oraz MWE luzem – wytwarzane przez urządzenia mieszalniczo-załadowcze w miejscu prowadzenia prac strzałowych i włączane bezpośrednio do otworów strzałowych.

Od pierwszych prób zastosowania materiałów wybuchowych emulsyjnych w kopalniach KGHM minęło już blisko 30 lat. Obecnie największą grupę materiałów wybuchowych pod względem zużycia stanowią materiały wybuchowe emulsyjne luzem, których stosowanie na skalę przemysłową wdrożono w kopalniach KGHM już w roku 2004. Ich średnie roczne zużycie waha się w granicach 12–14 tys. Mg, co odpowiada ok. 75% wszystkich stosowanych w Spółce materiałów wybuchowych. Wysoki stopień bezpieczeństwa tego typu MW jest związany także z brakiem właściwości wybuchowych ich głównego składnika, tj. matrycy, stanowiącej ok. 95% zawartości, co potwierdza zaliczenie jej do klasy 5.1 – utleniacze – według przepisów transportowych ADR i RID. Wytwarzanie i załadunek MWE do otworów strzałowych przeprowadza się za pomocą modułów mieszalniczo-załadowczych, które zabudowane są na samojezdnych wozach strzałowych. Taki materiał wybuchowy jest zdolny do detonacji najczęściej dopiero po ok. 20–30 min od załadowania do otworu strzałowego, co pozwala na swobodne oddalenie się służb strzałowych ze strefy zagrożonej wybuchem. Należy zaznaczyć, że załadunek składników materiału wybuchowego emulsyjnego luzem do otworu strzałowego jest tożsame z jego wytworzeniem, ponieważ modułowe urządzenie pompujące realizuje te dwie czynności jako jeden proces.

Niestety, utrzymanie wysokiej precyzji pracy modułów mieszalniczo-załadowczych, z uwagi na warunki panujące na dużych głębokościach, jest bardzo trudne. Warunki te to m.in. wysoka temperatura skał osiagającą lokalnie 55°C, wysoka temperatura powietrza przekraczająca 30°C i bardzo duża wilgotność powyżej 95%, co w połączeniu z wysokim zasoleniem wód kopalnianych jest środowiskiem sprzyjającym szybkiemu rozwojowi korozji i szybkiemu pogarszaniu parametrów znajdujących się tam urządzeń. Może więc dochodzić do sytuacji, w której do otworów strzałowych pompowane są składniki MWE w niewłaściwych proporcjach, co wpływa istotnie na przebieg reakcji uczulania oraz wartości parametrów detonacyjnych produktu końcowego⁴. W związku z tym pojawia się konieczność prowadzenia badań materiałów wybuchowych bezpośrednio na miejscu wykonywania robót strzałowych.

⁴ Tao T.J., Zhang J.H., Chi E.A., Zhao M.S., & Kang Q. 2014. Study of influence of sensitization process on quality of mixed emulsion explosive. *Advanced Materials Research*, vol. 1033–1034, s. 1305–1308.

W przypadku stwierdzenia wyżej wspomnianych nieprawidłowości, moduł należy poddać tzw. kalibracji, która ma na celu sprawdzenie czy przy danych obrotach pomp, dozowana jest pożądana objętość matrycy i uczulacza pozwalająca na uzyskanie mieszaniny wybuchowej o zakładanych właściwościach.

Innym istotnym problemem, na który należy także zwrócić uwagę, jest aktualna temperatura dostarczanych składników MWE luzem. Wiadomo bowiem z zależności dotyczących prędkości reakcji chemicznych, że większa temperatura matrycy przyspiesza reakcję uczulania i zwiększa prędkość tworzenia się pęcherzyków gazowych wewnątrz mieszaniny matrycy i uczulacza. Pęcherzyki te, zwane „hot-spotami”, prowadzą do zmiany właściwości detonacyjnych emulsji⁵. Niestety, jak pokazują wcześniejsze doświadczenia, zbyt wysoka temperatura matrycy dostarczanej do zakładu górniczego utrudniała z jednej strony ładowanie otworów strzałowych z uwagi na bardzo wysoką temperaturę węża załadowczego, który górnik strzałowy musi ręcznie umieścić w każdym ładowanym otworze, z drugiej zaś strony powodowała na tyle gwałtowną reakcję uczulania, że następowała ona już w wężu (za mieszalnikiem), co z kolei prowadziło do tak dużego wzrostu ciśnienia, że uruchamiało one zabezpieczenia i uniemożliwiało dalsze ładowanie. Problem ten rozwiązano tylko częściowo poprzez chłodzenie matrycy już na etapie produkcji. Niestety stwierdzono, że tego rodzaju profilaktyczne obniżanie temperatury matrycy prowadzi sporadycznie do niepożądanego zjawiska jej przechłodzenia, co ma niekorzystny wpływ na przebieg reakcji uczulania. Potwierdza to złożoność procesu uczulania w warunkach podziemnych, gdyż jak widać przebiega on w sposób nie do końca kontrolowany przez użytkowników.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa i efektywności wydobycia złoża techniką strzałową, bardzo istotnym elementem jest czas utraty właściwości wybuchowych materiału wybuchowego emulsyjnego luzem. Zasadniczo, zgodnie z certyfikatami badań typu WE, materiał wybuchowy może przebywać w otworze strzałowym maksymalnie przez 48 godzin. Problem pojawia się w momencie, kiedy nie dojdzie do odpalenia MW w tym czasie lub też po zakończeniu robót strzałowych w otworach pozostaną niewypały. Procedura likwidacji niewypałów opisana została w odpowiednich aktach prawnych⁶. Z uwagi na trudności w likwidowaniu niewypałów MWE luzem, służby strzałowe, opierając się na opracowaniach Zygmunta⁷ i in. oraz Marandy⁸, zgodnie z którymi materiał wybuchowy emulsyjny luzem traci właściwości wybuchowe po ok. 48 godzinach, przyjęły za bezpieczny i gwarantujący utratę właściwości wybuchowych czas wynoszący 14 dni. Niestety, założenia te nie są spójne z wynikami badań przedstawionymi przez Pradhana⁹, zgodnie z którymi próbki przechowywane przez 15 dni od załadowania charakteryzowały się jedynie niewielkim spadkiem energii wyrażonej przez prędkość detonacji.

⁵ Da Silva G., Długogorski B., Kennedy E. 2006. Water-in-oil emulsion foaming by thiourea nitrosation: reaction and mass transfer. *AIChE Journal*, vol. 52, issue 4, s. 1558–1565.

⁶ 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).

⁷ Zygmunt B., Maranda A., Buczkowski D. 2007. *Materiały wybuchowe trzeciej generacji*. Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa.

⁸ Maranda A. 2010. *Przemysłowe materiały wybuchowe*. Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa.

⁹ Pradhan M. 2010. Sleep time: its consequences on performance of bulk emulsion explosive. *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 69 (2), s. 125–128.

Oznacza to, że rozpatrywany rodzaj materiału wybuchowego niekoniecznie traci właściwości detonacyjne po czasie, który przyjmowano za wystarczający dla jego dezaktywacji, co jest szczególnie ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa robót wiertniczo-strzałowych. Sytuacja ta była impulsem do rozpoczęcia przeze mnie szczegółowych badań w zakresie bezpieczeństwa i efektywności wydobycia złoża techniką strzałową w kopalniach podziemnych.

Jednym z podstawowych parametrów, który opisuje właściwości materiałów wybuchowych w klasycznej teorii detonacji Chapmana-Jougueta, jest prędkość detonacji. Parametr ten wskazuje z jaką prędkością wewnątrz ładunku materiału wybuchowego przemieszcza się czoło fali detonacyjnej¹⁰. Dotychczasowe doświadczenia w zakresie kontroli *in situ* jakości środków strzałowych wskazują, że materiały wybuchowe detonujące z małą prędkością detonacji charakteryzują się zwykle mniejszą efektywnością urabiania skał niż MW detonujące z większymi prędkościami¹¹. W związku z tym, prędkość detonacji jest powszechnie stosowana do określania ciśnienia detonacji, zatem pośrednio również do określania energii wybuchu. Można więc stwierdzić, że zmniejszenie prędkości detonacji prowadzi do spadku ciśnienia detonacji, zatem w rezultacie redukuje impuls energii kruszącej skałę, co przekłada się na spadek efektywności wydobycia¹².

Prędkość detonacji jest przedmiotem moich badań i ekspertyz nieprzerwanie od roku 2015, kiedy to opracowałem oryginalną metodę kontroli właściwości środków strzałowych w warunkach ruchowych zakładu górniczego. Metoda ta w postaci obowiązkowej procedury została wdrożona i przyjęta jako podstawowy sposób badań środków strzałowych w podziemnych kopalniach rud miedzi w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). Tego typu badania są szczególnie istotne w przypadku stosowania materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem, których parametry termodynamiczne zależą od szeregu czynników związanych z przyjętą technologią wydobycia kopaliny.

W związku z powyższym, parametr prędkości detonacji MW został wykorzystany rutynowo do oceny wpływu wybranych parametrów przyjętej technologii (systemów) eksploatacji polskich złóż rud miedzi na zachowanie się materiałów wybuchowych, głównie powszechnie stosowanych MWE luzem, w odniesieniu do możliwości zwiększenia efektywności wydobycia. W szczegółowej tego rodzaju analizie uwzględniłem wszystkie te czynniki, na które bezpośredni wpływ mają decyzje podejmowane przez pracowników Działów Techniki Strzałowej kopalń. Moim głównym zamierzeniem było **zwiększenie świadomości** służb strzałowych, w tym szczególnie górników strzałowych, w zakresie zachowania się materiałów wybuchowych, z którymi na co dzień pracują, a także **poszerzenie wiedzy** w kontekście wpływu niektórych czynników na prędkość detonacji, zatem bezpośrednio również na efektywność urabiania. W analizach uwzględniłem te parametry, które mogą być uwzględniane i modyfikowane już na etapie projektowania robót strzałowych.

¹⁰ Włodarczyk E. 2012. Podstawy fizyki wybuchu, Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa.

¹¹ Chiappetta R.F. 1998. Blast monitoring instruments and analysis techniques with an emphasis on field application, *Fragblast – International Journal of Blasting and Fragmentation*, vol. 2, issue 1, s. 79–101.

¹² Cooper P.W. 1996. *Explosives engineering*, Wiley-VCH, New York.

Uzyskane przeze mnie wyniki pozwoliły na **sformułowanie wniosków oraz zaleceń** dotyczących bezpiecznego i efektywnego wydobywania złoża techniką strzałową w warunkach podziemnych kopalń rud miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego, co w mojej ocenie, przełoży się na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa, a jednocześnie zwiększenie efektywności robót górniczych. Opracowanie **nowego materiału wybuchowego**, który charakteryzuje się większymi parametrami detonacyjnymi, zwiększoną stabilnością chemiczną i mniejszą zawartością toksycznych produktów wybuchu w gazach postrzałowych, przyczyni się niewątpliwie do zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności wydobywania złóż.

Prowadzona przeze mnie przez okres kilku lat szczegółowa analiza literatury światowej w zakresie badań materiałów wybuchowych wskazała na istotne luki w zakresie zrealizowanych badań *in situ*, co skłoniło mnie do pogłębiania wiedzy w tym obszarze. Ogólnie rzecz biorąc, doświadczenia światowe opisują w większości wyniki prac prowadzonych w kopalniach odkrywkowych lub też badań nad materiałami wybuchowymi w skali laboratoryjnej na względnie małych próbkach. Takie warunki badań odzwierciedlają jedynie w niewielkim stopniu rzeczywiste warunki kopalń podziemnych, w których materiały wybuchowe powszechnie wykorzystuje się do urabiania złóż.

Podjęty przeze mnie **problem naukowy** dotyczy zatem istoty stosowania materiałów wybuchowych emulsyjnych w polskich kopalniach rud miedzi na tle istniejących uwarunkowań technologicznych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu wybranych parametrów technologii eksploatacji na efekt robót strzałowych. Wszechstronna wiedza w zakresie zależności pomiędzy tymi parametrami a efektywnością urabiania przyczyni się niewątpliwie do optymalnego stosowania konkretnych materiałów wybuchowych w danych warunkach górniczo-geologicznych.

Głównym celem prowadzonych przeze mnie badań, które przedstawione są w załączonym cyklu publikacji, było zweryfikowanie w skali przemysłowej następujących zależności:

- gęstości i prędkości detonacji MWE luzem w funkcji czasu w warunkach podziemnych [A1],
- gęstości ładunków MWE luzem w funkcji czasu w warunkach laboratoryjnych [A2],
- prędkości detonacji w funkcji średnicy ładunku [A3],
- prędkości detonacji w funkcji średnicy otworu strzałowego [A4],
- prędkości detonacji w funkcji zastosowanego środka inicjującego [A5],
- prędkości detonacji w funkcji czasu pomiędzy wykonaniem ładunków, a ich odpaleniem [A6],
- prędkości detonacji w funkcji czasu przebywania ładunków MWE luzem i nabojuowanych w ustalonej temperaturze [A7].

Przedmiotem badań we wszystkich przypadkach był materiał wybuchowy emulsyjny luzem. Dodatkowo, z uwagi na zwiększającą się głębokość, na której prowadzone są prace strzałowe i związany z tym wzrost temperatury górotworu w kopalniach LGOM, przeprowadziłem także badania wpływu czasu termostatowania ładunków MWE nabojuowanego (w otoczce foliowej) w ustalonej temperaturze na prędkość detonacji. Wyznaczenie zależności prędkości detonacji od tak dużej liczby zmiennych pozwoli na uzyskanie dokładniejszej charakterystyki MW, a jednocześnie zminimalizuje możliwość popełnienia błędów przez górników strzałowych. Ponadto, przedstawione zostały wyniki badań laboratoryjnych/stanowiskowych [A8] oraz prób

ruchowych pod ziemią [A9] dotyczących nowego materiału wybuchowego o większych parametrach detonacyjnych i większej stabilności chemicznej. Przeanalizowany przeze mnie problem związany jest z aktualnymi wyzwaniem eksploatacji złóż w kopalniach podziemnych, przed którymi stoi branża polskiego górnictwa miedziowego, co związane jest z coraz trudniejszymi warunkami górnictwo-geologicznymi panującymi w kopalniach LGOM.

4.6. Omówienie najważniejszych wyników

Kolejne etapy prac badawczych zmierzających do osiągnięcia założonego celu naukowego, które przedstawiono w pkt 4.2, zostały szczegółowo omówione w pkt 4.6.1–4.6.9, czemu odpowiadają poszczególne powiązane tematycznie publikacje od [A1] do [A9]. Najważniejsze osiągnięcia przedstawione w zaprezentowanym cyklu publikacji, które stanowią znaczny wkład w rozwój nauk inżynierijno-technicznych w zakresie bezpiecznego i efektywnego wydobycia złóż techniką strzałową zostały przedstawione w pkt 4.7.

Z uwagi na sygnalizowane przez producentów materiałów wybuchowych wątpliwości dotyczące potencjalnego obniżania prędkości detonacji poprzez umieszczanie sond pomiarowych wewnątrz ładunków MW, przeprowadziłem serię pomiarów mających na celu weryfikację tego problemu. Analiza obejmowała sondy w postaci rurek koncentrycznych, które wykorzystane były w zdecydowanej większości zaprezentowanych badań. Polegała ona na porównaniu prędkości detonacji ładunków MW z sondą umieszczoną wewnątrz ładunku i przymocowaną do jego zewnętrznej części. Przeprowadzone badania potwierdziły, że umieszczanie sond wewnątrz ładunku MW nie wpływa na prędkość detonacji¹³, dlatego też przedstawione tutaj wyniki można traktować jako bardzo wiarygodne.

4.6.1. Gęstość i prędkość detonacji ładunków MWE luzem w warunkach podziemnych

Gęstość MWE luzem jest ściśle powiązana z jego prędkością detonacji. W początkowym etapie reakcji uczulania, co zostało opisane w pkt 4.5, dochodzi do wzrostu gęstości, a tym samym do wzrostu prędkości detonacji. Następnie, po osiągnięciu wartości granicznej, gęstość MWE luzem obniża się powoli w czasie, czemu towarzyszy spadek prędkości detonacji i materiał wybuchowy staje się coraz słabszy. Jednym z podstawowych badań weryfikujących czy reakcja uczulania materiału wybuchowego emulsyjnego luzem przebiega w sposób prawidłowy jest sprawdzenie tzw. wstępnej reakcji uczulania oraz określenie gęstości mieszaniny po ok. 30 min od wytworzenia MW. Takie badanie, zgodnie z przyjętą w kopalniach KGHM procedurą, powinno poprzedzać każde ładowanie otworów strzałowych. Do jego wykonania zobowiązany jest operator wozu strzałowego. Wyniki zapisuje się dla każdego wozu (modułu) w protokołach z ładowania przodków i przechowuje w dokumentacjach służb strzałowych. Wyniki uznaje się za prawidłowe, jeśli zmierzona gęstość mieści się w określonym dla danego MW przedziale.

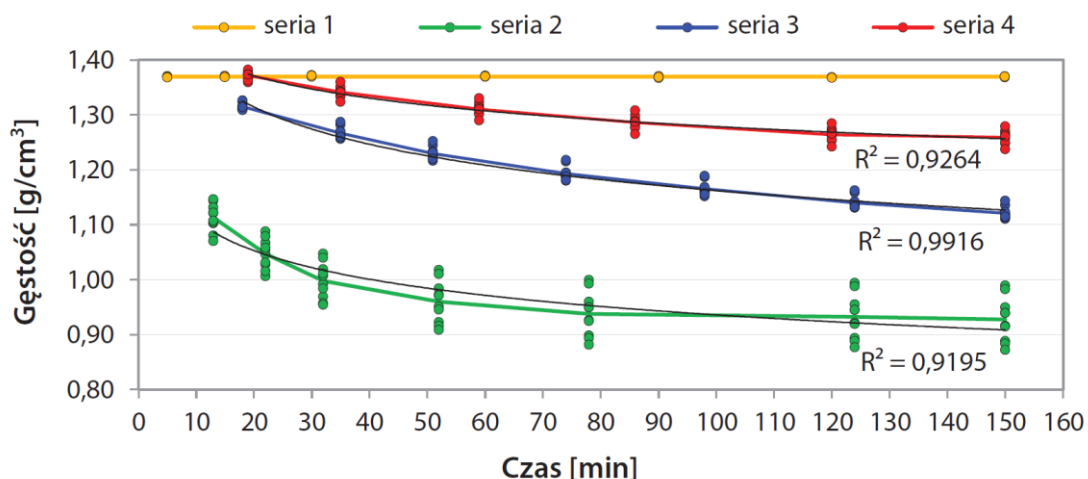
Ponieważ zauważa się znaczące różnice w gęstościach oznaczanych dla tego samego materiału wybuchowego, ale wytworzonego przez różne urządzenia mieszalniczo-załadowcze, pojawiły się wątpliwości, że nie wszystkie otwory strzałowe odpalane są przy gęstościach MW uznawanych za prawidłowe. Jeśli gęstość MW jest zbliżona do dolnej granicy zakresu gęstości,

¹³ Mertuszka P., Fuławka K., Baran W., Waczur J. 2018. Wpływ sposobu umieszczenia sondy pomiarowej względem ładunku materiału wybuchowego na prędkość detonacji. CUPRUM Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, nr 1 (86), s. 5–16.

materiał wybuchowy będzie charakteryzował się dużą wrażliwością na impuls inicjujący, ale jednocześnie gorszymi parametrami detonacyjnymi niż MW charakteryzujący się wysoką gęstością. Materiałom wybuchowym o dużej gęstości towarzyszy z kolei mniejsza wrażliwość, ale za to większa prędkość detonacji oraz koncentracja energii.

Badania gęstości ładunków MWE luzem podzielone zostały na dwa zasadnicze etapy. Pierwszy obejmował pobranie z czterech losowo wybranych wozów strzałowych po 10 próbek MWE luzem, a następnie wykonanie pomiarów gęstości ładunków w określonych odstępach czasu od wytworzenia. W drugim natomiast przeprowadzono pomiary gęstości oraz prędkości detonacji ładunków MWE luzem w zależności od ilości uczulacza, co pozwoliło na wyznaczenie zależności pomiędzy tymi parametrami. Wyniki badań zostały opublikowane w artykule [A1].

Analiza próbek MWE luzem pobranych z 4 losowo wybranych wozów strzałowych wykazała, że początkowe gęstości MW wytworzonego przez kontrolowane urządzenia znacznie różniły się między sobą (rys. 1). Maksymalne różnice wynosiły ok. $0,25 \text{ g/cm}^3$, co oznacza blisko 30% odchylenie. Również przebieg zmian gęstości w czasie materiałów wybuchowych wytworzonych przez różne moduły przebiegał w odmienny sposób. Do stabilizacji gęstości dochodziło po upływie innego czasu. Dla przykładu, gęstości próbek pobranych z wozu oznaczonego jako seria 2 ustabilizowały się już po 80 min. Maksymalny rozrzut wyników w serii wynosił blisko $0,1 \text{ g/cm}^3$. Należy zaznaczyć, że w dwóch z czterech serii pomiarowych zastosowano składniki z tej samej dostawy, a we wszystkich przypadkach próbki pobierano w trakcie ładowania przodków. Bardzo ważnym wnioskiem, choć niekorzystnym z punktu widzenia efektywności robót strzałowych, było stwierdzenie braku zmian gęstości mieszaniny matrycy i uczulacza w czasie dla próbek pobranych z modułu oznaczonego jako seria 1. Gęstość ta utrzymywała się na poziomie $1,36\text{--}1,37 \text{ g/cm}^3$ dla poszczególnych próbek. To jednoznacznie potwierdza, że reakcja uczulania przebiegała w sposób nieprawidłowy lub też w ogóle nie została ona zainicjowana. Niestety szczegółowa analiza problemu wykazała, że w węźu załadowniczym nie było mieszalnika, zatem zmieszanie składników nie było fizycznie możliwe.

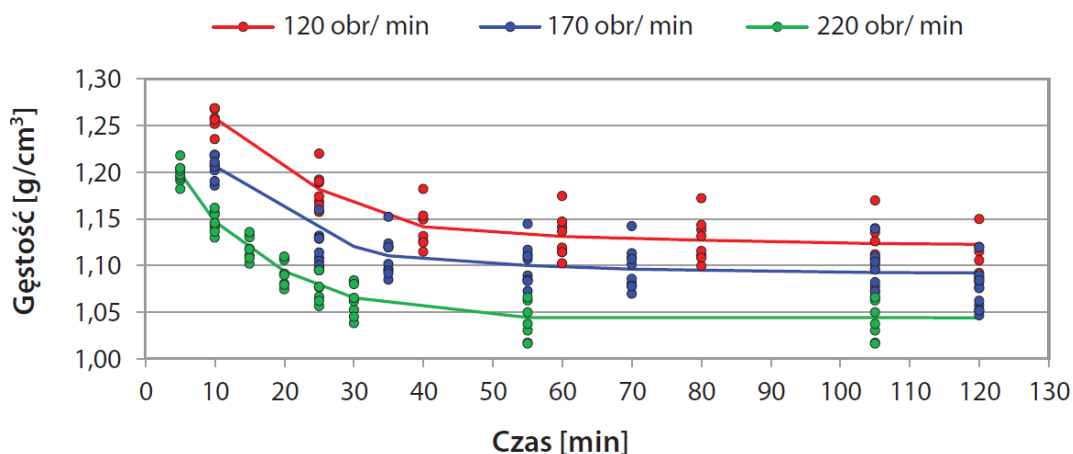


Rys. 1. Przebieg zmian gęstości w czasie MWE luzem wytworzonych przez różne moduły

Analiza potwierdziła znaczne różnice pomiędzy gęstościami MW wyprodukowanych przez wybrane wozy strzałowe, zarówno w zakresie zmian gęstości MW w czasie, ale również – co ważniejsze – w zakresie wartości końcowej, po ustabilizowaniu się gęstości i zakończeniu

reakcji uczulania. Wynosiły one odpowiednio $0,92 \text{ g/cm}^3$ dla próbek w serii drugiej, $1,14 \text{ g/cm}^3$ dla serii trzeciej i $1,26 \text{ g/cm}^3$ dla serii czwartej. Otrzymane rozbieżności świadczą o tym, że w niektórych przypadkach reakcja sensybilizacji przebiegała nieprawidłowo, zatem dochodziło do niewłaściwego dozowania składników MWE luzem. Biorąc pod uwagę, że każdego dnia w kopalniach KGHM, materiał wybuchowy emulsyjny luzem ładuje się do blisko 20 tysięcy otworów strzałowych, skala tego problemu może być bardzo duża.

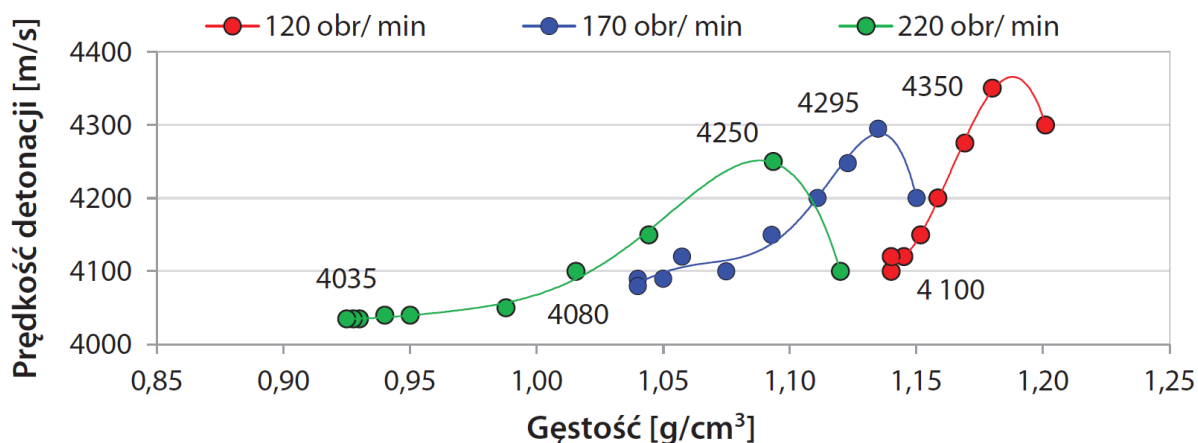
W oparciu o powyższe, przeprowadzony został drugi etap badań, którego celem była ocena wpływu zawartości uczulacza na przebieg zmian gęstości MWE luzem w czasie. Zawartość uczulacza zmieniano poprzez zmianę prędkości obrotowej pompy dozującej uczulacz bezpośrednio na module mieszalniczo-załadowniczym – im większe obroty pompy, tym większa zawartość uczulacza. Analiza obejmowała trzy prędkości obrotowe, tj. 170 obr/min (właściwa), 120 obr/min i 220 obr/min. Odstępy czasu pomiędzy pomiarami każdej z 10 próbek w ramach danej serii uzależniona była od szybkości zmian objętości MW – najmniejsze odstępy czasu między pomiarami dla najmniejszej ilości uczulacza. Wyniki przedstawiono na rys. 2. Największe gęstości wyznaczono dla najmniejszej prędkości pompy uczulacza, dla największej – najniższe. Potwierdza to fakt, że im więcej uczulacza, tym szybciej przebiega reakcja uczulania. Zbliżony charakter przebiegów potwierdza, że reakcja uczulania była poprawna w każdym przypadku.



Rys. 2. Przebieg zmian gęstości w czasie MWE luzem w zależności od prędkości obrotowej pompy dozującej uczulacz

Równoległe do pobierania próbek do pomiarów gęstości, przygotowano 30 ładunków MWE luzem w rurach tworzywowych do pomiarów prędkości detonacji, po 10 dla każdej prędkości obrotowej pompy. Odpalano je w odstępach co 15 min od załadowania, co poprzedzano każdorazowo pomiarem gęstości. Gęstość ładunków MWE luzem przy 120 obr/min była stosunkowo wysoka i dla pierwszych dwóch ładunków zmierzona po 15 min i 30 min od wytworzenia wynosiła odpowiednio $1,24 \text{ g/cm}^3$ i $1,22 \text{ g/cm}^3$, co spowodowało wystąpienie dwóch niewybuchów. Prędkości detonacji i gęstości próbek MW w tej serii ustabilizowały się po ok. 120 min od załadowania i wynosiły odpowiednio 4100 m/s i $1,14 \text{ g/cm}^3$. Zwiększanie obrotów do 170 na minutę doprowadziło do spadku gęstości, która po 15 min wynosiła $1,15 \text{ g/cm}^3$, przy prędkości detonacji równej 4200 m/s. Maksymalną prędkość detonacji zmierzono po 30 min od zmieszania składników przy gęstości równej $1,13 \text{ g/cm}^3$. Kolejne pomiary w czasie wykazywały spadek zarówno prędkości, jak i gęstości.

Wartości te ustabilizowały się po ok. 90 min od załadowania (gęstość $1,07 \text{ g/cm}^3$, prędkość detonacji 4100 m/s). Przy maksymalnej analizowanej prędkości pompy uczulacza doszło do przyspieszenia reakcji uczulania. Gęstość pierwszego ładunku po 15 min od wytworzenia wynosiła $1,12 \text{ g/cm}^3$ przy prędkości detonacji równej 4100 m/s . Prędkości i gęstości ładunków ustabilizowały się już po ok. 70 min i wynosiły odpowiednio 4030 m/s i $0,92 \text{ g/cm}^3$. Zbiorcze zestawienie zależności prędkości detonacji od gęstości MWE przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zależność prędkości detonacji od gęstości MWE luzem dla różnych prędkości obrotowych pompy dozującej uczulacz

Charakter uzyskanych zależności prędkości detonacji od gęstości MWE luzem jest bardzo zbliżony do zależności, którą przedstawił Lee i Persson¹⁴, co potwierdza tezę, że dla każdego MWE istnieje pewna gęstość, przy której będzie on charakteryzował się największą prędkością detonacji. W związku z tym należy dążyć do opracowania takiego składu MWE luzem, aby przebieg reakcji uczulania był powtarzalny, a materiał wybuchowy charakteryzował się możliwie jak najszybszą stabilizacją gęstości w czasie.

W oparciu o powyższe należy stwierdzić, że część ładunków MWE luzem w kopalniach LGOM prawdopodobnie nie jest odpalana przy optymalnych gęstościach. Zasadniczym problemem jest brak powtarzalności parametrów MWE luzem wytwarzanego ze składników pochodzących nawet z tej samej dostawy, ale wytwarzanych i ładowanych przy użyciu różnych modułów. W efekcie, taki sam MW załadowany do otworu strzałowego przy użyciu innych maszyn może charakteryzować się znacznie różniącymi się właściwościami, w tym odmiennymi parametrami detonacyjnymi. Tym samym, może to mieć znaczący wpływ na końcowy efekt robót strzałowych. Problem ten niestety wydaje się być powszechny, co potwierdzają późniejsze wyniki badań¹⁵. W związku z powyższym, uzasadnione było podjęcie dalszych badań mających na celu opracowanie takiej odmiany MWE luzem, która pozwoli na poprawę powtarzalności i stabilności reakcji uczulania w czasie.

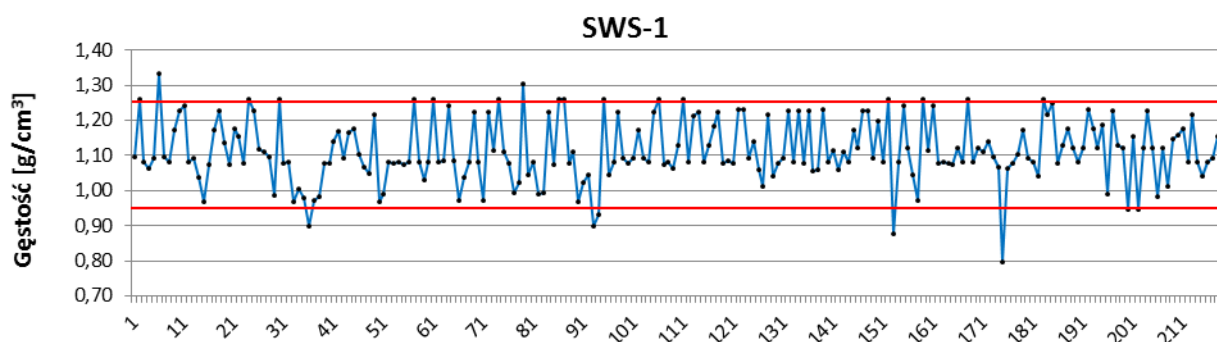
¹⁴ Lee J., Persson P.A. 1990. Detonation behavior of emulsion explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 15, issue 5, s. 208–216.

¹⁵ Kramarczyk, B.; Mertuszka, P. 2021. Study of influence of sensitizer content on density of bulk emulsion explosive used in underground operations. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 18, issue 4, s. 429–447.

4.6.2. Gęstość ładunków MWE luzem w warunkach laboratoryjnych

Podstawową metodą nadawania właściwości wybuchowych matrycy w przypadku materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem, o czym wspomniano już wcześniej, jest redukcja gęstości na drodze reakcji chemicznej, która zachodzi poprzez dodawanie do niej różnego rodzaju środków uczulających. Do zmieszania składników dochodzi bezpośrednio w węźu załadowniczym, w którym znajdują się mieszalniki. Z uwagi na wieloskładnikowość mieszaniny, precyzyjne dozowanie poszczególnych składników ma kluczowy wpływ na parametry detonacyjne i użytkowe produktu końcowego. Niestety zachowanie wysokiej precyzji pracy modułów mieszalniczo-załadowniczych w kopalniach podziemnych, z uwagi na panujące warunki, jest bardzo trudne i – jak wykazano wcześniej – taki sam materiał wybuchowy załadowany do otworu strzałowego przy użyciu dwóch różnych maszyn, może wykazywać znacznie różniące się parametry detonacyjne. Dlatego też podjęto próbę oceny wpływu ilości środka uczulającego na zmiany gęstości materiału wybuchowego emulsyjnego luzem w warunkach laboratoryjnych przy zachowaniu wysokiej dokładności dozowania. Wyniki badań zostały przedstawione w artykule [A2].

Pierwszym elementem badań była weryfikacja wyników pomiarów gęstości MWE luzem prowadzonych pod ziemią przez górników strzałowych. Analizie poddano cztery losowo wybrane wozy strzałowe. Obejmowała ona okres ok. 4–5 miesięcy. Liczba pomiarów dla każdego wozu była inna, co uzależnione było częstotliwością ich prowadzenia. I tak dla wozu 1 było to 219 pomiarów, 184 pomiary dla wozu 2, 212 pomiarów dla wozu 3 i 232 pomiary dla wozu 4. Wyniki dla jednego z analizowanych modułów przedstawiono na rys. 4. Na osi poziomej zaznaczone są kolejne pomiary. Czerwone linie oznaczają minimalną i maksymalną gęstość dla analizowanego materiału wybuchowego, zgodnie z deklaracją producenta, która powinna mieścić się w przedziale od $0,95 \text{ g/cm}^3$ do $1,25 \text{ g/cm}^3$.



Rys. 4. Wyniki pomiarów gęstości MWE luzem dla wybranego urządzenia ładującego

Analiza potwierdziła duży rozrzut gęstości MWE luzem zarówno pomiędzy poszczególnymi modułami mieszalniczo-załadowniczymi, jak i gęstości uzyskanych dla tych samych jednostek w analizowanym okresie. Sumarycznie, blisko 4% wyników nie mieściło się w wymaganym przedziale gęstości. Szczególnie niekorzystne wyniki zaobserwowano dla modułu 1, dla którego aż 22 pomiary wykraczały poza prawidłowy zakres gęstości, co oznacza odchylenie na poziomie 10%. Wskazuje to, że reakcja uczulania w warunkach podziemnych przebiega w sposób nie do końca kontrolowany przez użytkowników, zatem taki sam MW załadowany do otworu strzałowego przy użyciu różnych maszyn będzie charakteryzował się innymi

gęstościami, co w rezultacie przełoży się na znaczne różnice w parametrach detonacyjnych i wpłynie istotnie na końcowy efekt robót strzałowych. Wynikać to może choćby z niewłaściwego zmieszania składników w węźu załadowczym lub też może być spowodowane nieodpowiednim dozowaniem składników, co może doprowadzić do niepoprawnego przebiegu reakcji uczulania.

W oparciu o uzyskane wyniki przystąpiono do realizacji drugiego etapu badań w warunkach laboratoryjnych, co miało na celu określenie wpływu zawartości uczulacza na zmiany gęstości materiału wybuchowego emulsyjnego luzem, eliminując inne czynniki występujące w miejscu prowadzenia robót strzałowych. Założono, że takie badania pozwolą zweryfikować czy reakcja uczulania MWE luzem (zmian gęstości w czasie) przebiega w sposób prawidłowy.

Próbki MWE wykonano z matryc różniących się czasem ich przechowywania od momentu pobrania z linii produkcyjnej, w tym matryca M-1 pobrana 21 dni przed badaniami, matryca M-2 pobrana 7 dni przed badaniami i matryca M-3 pobrana w dniu poprzedzającym badania. Pozwoliło to na ocenę wpływu czasu przechowywania matrycy na przebieg reakcji uczulania. Gęstości matryc były takie same i wynosiły $1,40 \text{ g/cm}^3$. Analiza obejmowała standardową ilość uczulacza dla rozpatrywanego MW, ilości zmniejszone o 30% i 50% oraz ilości zwiększone o 30% i 50%. Dla każdej z trzech matryc oraz każdej ilości uczulacza wykonano po 6 próbek, co dało łącznie 90 próbek.

Próbki mieszano ręcznie bagnetem w pojemnikach tworzywowych, po czym mieszaninę przekładano do pojemników o znanej masie i objętości. Czas reakcji uczulania był kontrolowany niezależnie dla każdej próbki. Ponieważ matryca wymieszana z uczulaczem zwiększała swoją objętość w wyniku zachodzenia reakcji chemicznych, pomiary masy próbek prowadzono w 5-minutowych interwałach czasowych przez 60 min. Dodatkowo, próbki zważono po 24 godzinach. Każdy pomiar poprzedzony był usunięciem nadmiaru materiału wybuchowego poprzez wyrównanie do poziomu krawędzi pojemnika. Gęstość materiału wybuchowego wyznaczano ze stosunku masy próbki do objętości pojemnika. Właściwy stosunek matrycy do uczulacza dla materiału wybuchowego typu Emulinit wynosi 95,5% do 4,5%. Gęstość mieszaniny po zadozowaniu uczulacza wynosiła $1,37 \text{ g/cm}^3$. Zmodyfikowane na potrzeby badań zawartości uczulacza wynosiły: 3,15% (-30% w stosunku do właściwej zawartości), 2,25% (-50%), 5,85% (+30%) i 6,75% (+50%).

Z uwagi na dużą liczbę pomiarów oraz powtarzalne wyniki dla poszczególnych próbek w ramach danej serii pomiarowej, analizie poddano gęstości uśrednione z 6 próbek. Analiza średnich wartości potwierdziła wyraźny wpływ zawartości uczulacza na gęstość MWE luzem oraz na przebieg zmian gęstości w czasie. Obniżenie zawartości uczulacza o 30% powodowało zwiększenie gęstości produktu końcowego po 60 min średnio o 6–8% ($0,07 \text{ g/cm}^3$). Dalsze obniżanie zawartości uczulacza do 2,25% (-50%) doprowadziło do zwiększenia gęstości z $1,02 \text{ g/cm}^3$ do $1,10 \text{ g/cm}^3$. Z kolei zwiększenie zawartości z 4,5% na 5,85% (+30%) doprowadziło do spadku gęstości o $0,04 \text{ g/cm}^3$. Najbardziej wyraźną tendencję spadkową zauważa się dla największej zawartości uczulacza (+50%), co doprowadziło do spadku gęstości do poziomu $0,93\text{--}0,94 \text{ g/cm}^3$. W tej sytuacji przereagowała większa część materiału matrycy, co spowodowało powstanie większej ilości pęcherzyków gazu, co z kolei doprowadziło do tzw. przeczulenienia MWE luzem. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Uśrednione wyniki pomiarów laboratoryjnych gęstości MWE luzem

| zawartość uczulacza [%] → | 2,25 (-50%) | 3,15 (-30%) | 4,50 (nominalna) | 5,85 (+30%) | 6,75 (+50%) |
|---------------------------|------------------------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|
| czas [min] ↓ | gęstość [g/cm ³] | | | | |
| MATRYCA M-1 | | | | | |
| 5 | 1,31 | 1,33 | 1,31 | 1,29 | 1,28 |
| 10 | 1,26 | 1,27 | 1,24 | 1,22 | 1,21 |
| 15 | 1,23 | 1,23 | 1,19 | 1,17 | 1,16 |
| 20 | 1,22 | 1,20 | 1,17 | 1,14 | 1,11 |
| 25 | 1,20 | 1,19 | 1,14 | 1,11 | 1,09 |
| 30 | 1,18 | 1,18 | 1,12 | 1,09 | 1,06 |
| 35 | 1,17 | 1,17 | 1,10 | 1,07 | 1,04 |
| 60 | 1,11 | 1,09 | 1,02 | 0,98 | 0,94 |
| 1440 | 1,02 | 0,92 | 0,79 | 0,71 | 0,67 |
| MATRYCA M-2 | | | | | |
| 5 | 1,31 | 1,34 | 1,31 | 1,29 | 1,28 |
| 10 | 1,27 | 1,28 | 1,25 | 1,22 | 1,22 |
| 15 | 1,23 | 1,22 | 1,19 | 1,17 | 1,16 |
| 20 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,13 | 1,12 |
| 25 | 1,19 | 1,18 | 1,15 | 1,11 | 1,09 |
| 30 | 1,18 | 1,17 | 1,12 | 1,10 | 1,07 |
| 35 | 1,17 | 1,16 | 1,11 | 1,07 | 1,03 |
| 60 | 1,10 | 1,09 | 1,01 | 0,97 | 0,93 |
| 1440 | 1,01 | 0,91 | 0,80 | 0,70 | 0,65 |
| MATRYCA M-3 | | | | | |
| 5 | 1,31 | 1,33 | 1,30 | 1,29 | 1,29 |
| 10 | 1,27 | 1,27 | 1,24 | 1,22 | 1,22 |
| 15 | 1,23 | 1,23 | 1,19 | 1,17 | 1,16 |
| 20 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,13 | 1,12 |
| 25 | 1,20 | 1,19 | 1,14 | 1,12 | 1,10 |
| 30 | 1,18 | 1,17 | 1,12 | 1,09 | 1,07 |
| 35 | 1,17 | 1,16 | 1,10 | 1,06 | 1,04 |
| 60 | 1,10 | 1,08 | 1,02 | 0,98 | 0,94 |
| 1440 | 1,02 | 0,93 | 0,78 | 0,71 | 0,65 |

Wyniki pomiarów przeprowadzonych po 24 godzinach wskazują, że gęstość analizowanego materiału wybuchowego ulega znacznym zmianom wraz z upływem czasu. Ilość uczulacza zmniejszona o 50% (do 2,25%), doprowadziła do średniego spadku gęstości o 0,29 g/cm³ (w stosunku do zmierzonej po 5 min), tj. z 1,31 g/cm³ do 1,02 g/cm³. Przy takiej gęstości MWE charakteryzuje się zgodnymi z dopuszczalnymi (założonymi) parametrami detonacyjnymi. Z kolei zwiększenie zawartości uczulacza doprowadziło do spadku gęstości do wartości poniżej dopuszczalnej. Wynosiły one 0,71 g/cm³ dla zawartości uczulacza na poziomie 5,85% (+30%) i 0,65 g/cm³ dla 6,75% (+50%).

Badania potwierdziły znaczący wpływ zawartości uczulacza zarówno na końcową gęstość po upływie doby od wykonania ładunków (praktycznie całkowite przereagowanie składników), jak i zmianę gęstości w czasie od momentu zmieszania składników. Zwiększenie zawartości

uczulacza o 30% i 50% doprowadziło do spadku gęstości MWE luzem po 60 min od zadozowania (w stosunku do gęstości dla zawartości nominalnej) odpowiednio o 4% i 8%. Z kolei zmniejszenie zawartości uczulacza o te same wartości doprowadziło do zwiększenia gęstości po 60 min o 7% i 9%. Pomiary przeprowadzone po 24 godzinach od zadozowania wykazały, że zwiększenie zawartości uczulacza o 30% i 50% doprowadziło do spadku gęstości MWE luzem odpowiednio o 11% i 17% (również w stosunku do gęstości dla zawartości nominalnej), natomiast zmniejszenie zawartości uczulacza o 30% i 50% do wzrostu gęstości odpowiednio o 16% i 29%. Dodanie zbyt małej ilości uczulacza (poniżej wartości zalecanej) powoduje podwyższoną gęstość MWE luzem. Wiąże się to również z mniejszą ilością smarującego filmu wodnego w wężu załadowniczym, utrudnia właściwe mieszanie składników i pompowanie materiału do otworu strzałowego oraz wpływa niekorzystnie na parametry użytkowe. Zbyt duża ilość środka uczulającego powoduje nadmierny spadek gęstości poniżej zalecanej wartości. Taki MW może mieć inne niż deklarowane parametry strzałowe, co z kolei wpływa na efektywność robót strzałowych.

Ponieważ analiza zmian gęstości MWE luzem w czasie w warunkach laboratoryjnych potwierdziła, że uczulanie może przebiegać w sposób kontrolowany, uzasadnione byłoby podjęcie działań mających na celu opracowanie nowego sposobu dozowania i mieszania składników przez urządzenia mieszalniczo-ładujące pod ziemią.

4.6.3. Średnica ładunku a prędkość detonacji MWE luzem

Otwory strzałowe w kopalniach LGOM wiercone są koronkami o średnicach w zakresie od 45 mm do 64 mm. Na wybór średnicy otworu wpływa kilka parametrów, spośród których najważniejsze to ciśnienie eksploatacyjne, twardość skał, a także postać lub wymiary materiału wybuchowego (w przypadku MW nabojoyanych). Bardzo istotny jest pierwszy z tych parametrów, ponieważ prowadzi on do zaciskania otworów strzałowych pomiędzy ich odwierceniem a załadowaniem. Praktyka pokazuje, że proces zaciskania otworów jest na tyle szybki, że utrudnia on zarówno załadunek MW nabojoyanych, jak i umieszczanie w otworze węża załadowniczego w przypadku MWE luzem. Dlatego też dąży się do tego, aby wszystkie otwory łądować w możliwie najkrótszym czasie od odwiercenia. W wielu przypadkach stosuje się też większe niż wymagane średnice otworów, co pozwala na utrzymanie ciągłości ładunku, nawet w sytuacji występowania przemieszczeń poprzecznych otworów.

Średnice otworów powinno dobierać się także w zależności od rodzaju stosowanego materiału wybuchowego, ponieważ dla każdego z nich istnieje pewna średnica, zwana krytyczną, powyżej której detonuje on zawsze, natomiast poniżej – nie detonuje lub nie detonuje za każdym razem. Zwiększanie średnicy prowadzi do wzrostu prędkości detonacji aż do osiągnięcia średnicy granicznej, powyżej której prędkość utrzymuje się już na tym samym poziomie. Zależność ta została zweryfikowana dla trzech wybranych średnic ładunków i dwóch typów MWE luzem stosowanych w kopalniach KGHM. Wyniki badań opublikowano w pracy [A3].

Analizę zagadnienia przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym przeanalizowano prędkości detonacji dwóch typów MWE luzem umieszczonych w rurach tworzywowych o średnicy 32 mm, 40 mm i 50 mm oraz długości 100 cm. W drugim zweryfikowano prędkości

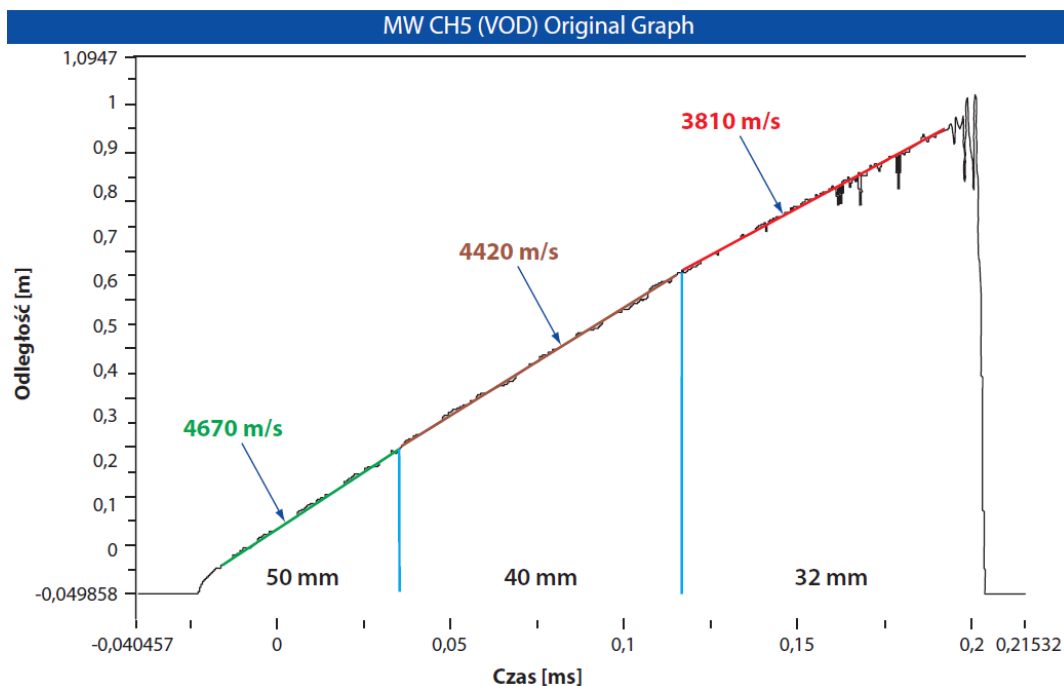
detonacji ładunków teleskopowych o długości 100 cm i zmiennej średnicy wynoszącej 50 mm w miejscu pobudzenia, 40 mm w części środkowej i 32 mm w części końcowej. Najmniejsze średnice były mniejsze niż minimalne średnice, przy których producent deklaruje, że dojdzie do detonacji MW. Dla każdej średnicy i każdego MW w etapie pierwszym przygotowano po 3 próbki, co dało łącznie 18 próbek. W drugim etapie odpalono 3 ładunki teleskopowe. W każdym badaniu do inicjacji ładunków wykorzystywano zapalniki skalne o masie ładunku wtórnego równej 0,65 g pentrytu (PETN). Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w zależności od średnicy ładunku

| Material wybuchowy | Średnica ładunku [mm] | Prędkość detonacji [m/s] | | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|----------------|---------|
| | | seria 1 | seria 2 | seria 3 | średnia |
| Emulinit 7L | 32 | brak detonacji | brak detonacji | brak detonacji | – |
| | 40 | 3660 | 3700 | 3740 | 3700 |
| | 50 | 3940 | 3910 | 3880 | 3910 |
| Emulinit 8L | 32 | 3310 | 3480 | 3140 | 3310 |
| | 40 | 3610 | 3670 | 3610 | 3630 |
| | 50 | 4050 | 3940 | 3980 | 3990 |

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano wzrost prędkości detonacji wraz ze zwiększaniem średnicy ładunków. Ładunki o średnicy 50 mm, tj. najbardziej zbliżonej do średnicy otworów w kopalniach KGHM, charakteryzowały się największą prędkością detonacji. Uwzględniając niepewność pomiaru w zastosowanej metodzie, zmierzone prędkości detonacji dla tej średnicy były zbliżone do wartości deklarowanych przez producenta, tj. 3900 m/s dla Emulinitu 7L i 3800 m/s dla Emulinitu 8L. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że żaden z ładunków MWE Emulinit 7L o średnicy 32 mm nie zdetonował, co związane jest z tym, że średnica ładunków była mniejsza niż średnica krytyczna analizowanego MW. Wskazuje na to poprawnie zdetonowany zapalnik. Zatem średnica badanego ładunku znajdowała się poniżej średnicy, która zapewnia prawidłową propagację fali detonacyjnej.

Bardzo podobne wnioski uzyskano w drugim etapie badań, w którym analizowano prędkości detonacji teleskopowych ładunków MWE Emulinit 8L. Uzyskane wartości wskazują na spadek prędkości wraz ze zmniejszaniem się średnicy ładunku. Należy zaznaczyć, że prędkości na odcinkach o stałej średnicy są względnie stabilne (rys. 5). Ładunki inicjowano od strony o największej średnicy, dlatego też w tych częściach próbek zarejestrowano największe prędkości detonacji. Zmniejszenie średnicy ładunku z 50 mm na 40 mm (–20%) doprowadziło do ok. 5-procentowego spadku prędkości dla każdego ładunku, tj. z 4670 m/s na 4420 m/s dla pierwszej próbki, następnie z 4630 m/s na 4380 m/s dla drugiej próbki i dla trzeciej z 4620 m/s na 4400 m/s. Na ostatnim odcinku próbki 1 prędkość detonacji spadła z 4670 m/s (dla odcinka o największej średnicy) na 3810 m/s, czemu towarzyszyło zmniejszenie średnicy z 50 mm do 32 mm – spadek prędkości detonacji na poziomie 20% od wartości zarejestrowanej dla ładunku o największej średnicy. Podobny spadek prędkości detonacji zaobserwowano dla kolejnych ładunków, które na odcinku o średnicy 32 mm wynosiły odpowiednio 3810 m/s dla próbki 2 (spadek z 4630 m/s) i 3780 m/s dla próbki 3 (spadek z 4620 m/s).



Rys. 5. Zależność prędkości detonacji od średnicy ładunku teleskopowego (próbka 1)

Materiał wybuchowy w ładunkach teleskopowych zdetonował na całej długości próbek, nawet na odcinkach o średnicy 32 mm, która jest mniejsza niż średnica deklarowana przez producenta jako krytyczna dla MWE Emulinit 8L. Wskazuje to jednoznacznie, że w warunkach, w jakich prowadzone były pomiary (skład MWE, temperatura itp.), średnica krytyczna badanego MW była poniżej 32 mm. Potwierdza to, jak bardzo zmienne są parametry MWE luzem produkowanych *in situ* i jak wiele czynników wpływa na jego właściwości detonacyjne, a zatem i efektywność urabiania złoża. Badanie to jest również bardzo istotne w odniesieniu do przytoczonego wcześniej problemu zaciskania otworów strzałowych na skutek ciśnienia eksploatacyjnego. Wyniki potwierdzają, że jeśli MWE luzem zostanie zainicjowany w części ładunku o odpowiednio dużej średnicy, to zmniejszanie średnicy otworu strzałowego oraz ładunku MW, np. na skutek zaciskania otworów, nie powinno spowodować zaniku detonacji, o ile średnica ładunku nie będzie mniejsza niż średnica krytyczna danego MW.

Ponieważ uzyskane wyniki badań wskazują, że prędkość detonacji MW jest zależna od średnicy ładunku można przypuszczać, podobnie jak w przypadku badań gęstości MWE luzem, że nie wszystkie otwory strzałowe odpala się przy średnicach, które są zbliżone do optymalnych dla danego materiału wybuchowego. Dlatego też kolejnym krokiem było zweryfikowanie tego zagadnienia bezpośrednio w otworach strzałowych, ale o średnicach, które są powszechnie stosowane w kopalniach rud miedzi LGOM.

4.6.4. Średnica otworu strzałowego a prędkość detonacji MWE luzem

Kolejnym krokiem w ocenie średnicy ładunków MWE luzem było zweryfikowanie wpływu średnicy otworu strzałowego na prędkość detonacji. Wyniki badań opublikowano w pracy [A4]. Smoleński¹⁶ już w roku 1981 wskazywał, że otoczka ładunku ma również wpływ na prędkość

¹⁶ Smoleński D. 1981. Detonacja materiałów wybuchowych, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa.

detonacji, a jest on szczególnie widoczny dla MW o małych średnicach. Można więc przypuszczać, że ocena wpływu średnicy ładunków MWE luzem na prędkość detonacji poza otworem strzałowym jest niewystarczająca i powinna być uzupełniona o próby *in situ* w skałach, w których regularnie odpala się ładunki MW.

Ocenę tego zagadnienia podzielono na dwa zadania. W pierwszym odpalano ładunki MWE luzem w otworach strzałowych o wybranych średnicach, w których prowadzono pomiary prędkości detonacji. W drugim przeprowadzono ocenę fragmentacji urobku po odpaleniu przodków, w których zastosowano otwory o średnicach, dla których prędkości detonacji były do siebie zbliżone. Pomiary prędkości detonacji przeprowadzono w otworach strzałowych o średnicach powszechnie stosowanych w kopalniach LGOM, tj. 45 mm, 51 mm, 56 mm i 64 mm, uzupełniając je o pomiary w otworach o średnicy 38 mm i 76 mm, aby zagadnienie zweryfikować w nieco większym zakresie. Wszystkie otwory wykonano w piaskowcach o zbliżonych parametrach wytrzymałościowych. Dla każdej średnicy przeprowadzono pomiar w trzech otworach. Przedmiotem badań był materiał wybuchowy emulsyjny luzem o handlowej nazwie Emulgit RP-T2. Do otworów załadowano różne ilości materiału wybuchowego, aby długość ładunku, a co za tym idzie – odcinek pomiarowy, wynosił co najmniej 100 cm. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.

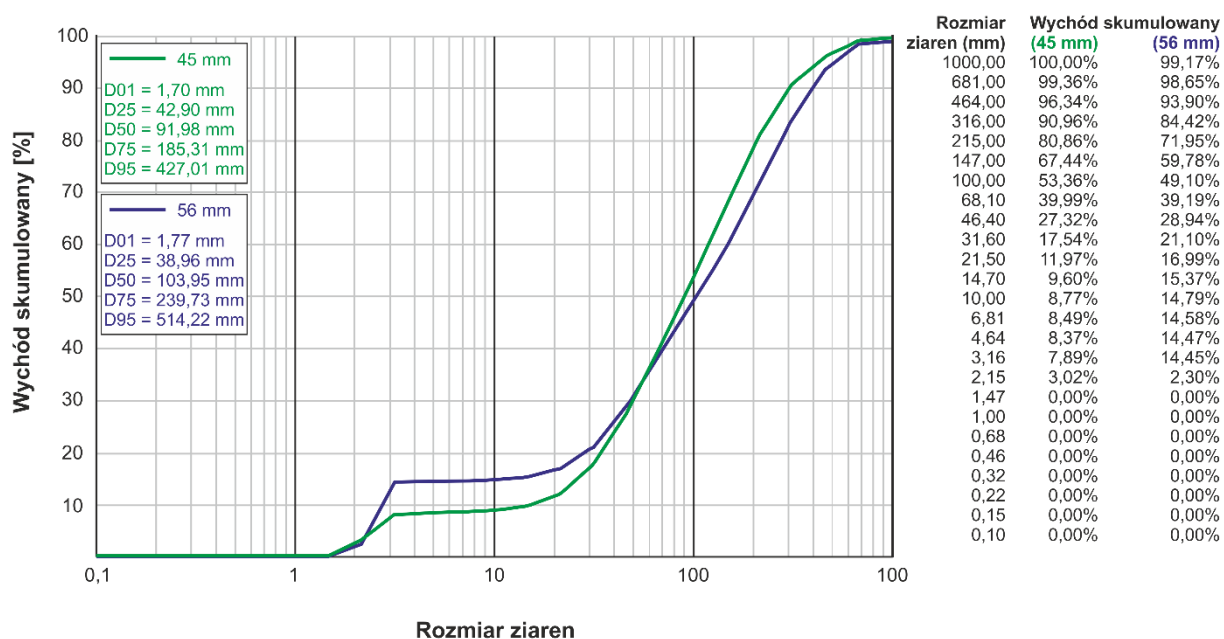
Tabela 3. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w zależności od średnicy otworu

| Średnica otworu [mm] | Prędkość detonacji [m/s] | | | |
|-------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|
| | seria 1 | seria 2 | seria 3 | średnia |
| 38 | 3700 | 3550 | 3610 | 3620 |
| 45 | 3890 | 3910 | 3920 | 3910 |
| 51 | 4030 | 4070 | 4040 | 4050 |
| 56 | 4000 | 3860 | 3960 | 3940 |
| 64 | 3810 | 3850 | 3810 | 3820 |
| 76 | 3870 | 3890 | 3880 | 3880 |

Największy rozrzut wyników wokół wartości średniej widoczny jest dla otworów o średnicy 38 mm i 56 mm. Najmniejsze różnice natomiast dla średnic 45 mm i 76 mm. Mimo tego, rozrzut wyników mieścił się w granicach niepewności pomiarowej zastosowanego urządzenia. Różnice pomiędzy prędkościami zmierzonymi dla analizowanych średnic sięgają nawet 520 m/s, co wskazuje na wyraźny wpływ średnicy otworu strzałowego na prędkość detonacji MWE luzem. Analiza potwierdziła, że materiał wybuchowy załadowany do otworów strzałowych o średnicy 38 mm detonował z najmniejszą prędkością, co oczywiście było oczekiwanym rezultatem, ponieważ minimalna średnica otworów strzałowych dla badanego materiału wybuchowego, zgodnie z deklaracją producenta, wynosi 35 mm. Wraz ze zwiększaniem średnicy otworów obserwowano wzrost prędkości detonacji, aż do średnicy równej 51 mm, dla której zarejestrowano wartość maksymalną. Dalsze zwiększanie średnicy otworów prowadziło do spadku prędkości detonacji, przy czym mógł on wynikać ze zmian gęstości MW w otworach o większych średnicach. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że średnica 51 mm była, z punktu widzenia prędkości detonacji, optymalną średnicą otworów strzałowych dla warunków, w których prowadzono badania.

Drugim zadaniem w analizie zagadnienia średnicy otworów strzałowych była weryfikacja stopnia rozdrobnienia urobku uzyskanego w wyniku odpalenia dwóch przodków, w których wykonano otwory o średnicach 45 mm i 56 mm, co wynikało z tego, że dla tych średnic zmierzone prędkości detonacji były do siebie najbardziej zbliżone. Wynosiły one odpowiednio 3910 m/s dla otworów o średnicy 45 mm i 3940 m/s dla otworów o średnicy 56 mm. Tak bliskie prędkości detonacji pozwoliły zweryfikować wpływ średnicy otworów strzałowych na stopień rozdrobnienia urobku. Analizę fragmentacji w oparciu o serię zdjęć urobku wykonanych w trakcie wybierania przodka wykonano przy użyciu dedykowanego oprogramowania.

Analiza krzywych i histogramów wskazuje na znaczące różnice w stopniu rozdrobnienia urobku w zależności od zastosowanej średnicy (rys. 6). Urobek z przodka, w którym zastosowano otwory o średnicy 56 mm charakteryzuje się znacząco wyższą zawartością frakcji drobnej w stosunku do zawartości tej samej frakcji w przodku, w którym wykonano otwory o średnicy 45 mm. Zawartość frakcji poniżej 10 mm wyniosła blisko 15% i była o ok. 40% większa od odpowiadającej jej frakcji w przodku, w którym zastosowano otwory strzałowe o średnicy 45 mm. Ponadto, przy średnicy 56 mm stwierdzono większy udział brył nadwymiarowych, tj. powyżej 400 mm, co wynika zasadniczo z krótszej długości kolumny MW w otworze. Wyniki analizy potwierdzają, że dobór odpowiednich parametrów robót strzałowych w odniesieniu do średnicy otworów, zweryfikowany badaniami *in situ*, przekłada się na efektywność robót strzałowych.



Rys. 6. Skumulowane rozkłady fragmentacji dla średnicy 45 mm i 56 mm

Wyniki potwierdziły znaczący wpływ średnicy otworów strzałowych na prędkość detonacji materiału wybuchowego emulsyjnego luzem. Można więc zakładać, że kolejny parametr robót strzałowych nie został jak dotąd zoptymalizowany i część ładunków w kopalniach rud miedzi LGOM odpalanych jest w otworach o nieodpowiednich dla danego MW średnicach. Parametr ten powinien być uwzględniany każdorazowo na etapie projektowania robót strzałowych w zależności od lokalnych warunków górniczo-geologicznych.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na określenie optymalnej średnicy otworów strzałowych z punktu widzenia prędkości detonacji, co oznacza odpowiednie wykorzystanie energii zastosowanego materiału wybuchowego. Znajomość optymalnej, dla danych warunków, średnicy otworów może mieć praktyczne znaczenie w procesie optymalizacji robót strzałowych poprzez wykonywanie otworów strzałowych, których średnice umożliwiają osiągnięcie zbliżonych do optymalnych parametrów detonacyjnych MW, co przełoży się na efektywność robót strzałowych, ale również na bezpieczeństwo poprzez ograniczanie niewybuchów w przypadku występowania zjawiska zaciskania otworów strzałowych.

Zagadnienie doboru średnic otworów strzałowych jest również związane z kwestią położenia przestrzennego środka inicjującego (zapalnika) w kolumnie MW. Przy średnicy otworu strzałowego równej 45 mm, zapalnik zajmuje pozycję w przybliżeniu równoległą do osi otworu. Z kolei przy średnicach większych, np. 64 mm, może dochodzić do obracania zapalnika. Taka sytuacja wynika bezpośrednio ze sposobu łączenia rurek detonujących, które w trakcie prac strzałowych mogą być naciągane, w wyniku czego może dojść do częściowego wysunięcia zapalnika z MW lub obrócenia zapalnika. Przeprowadzone w tym zakresie badania wykazały, że niewłaściwe położenie zapalnika w ładunku MWE luzem może znacząco wydłużyć etap „rozbiegu” detonacji, a w skrajnych przypadkach nawet spowodować, że w ładunku nie dojdzie do propagacji detonacji¹⁷. Dzieje się tak dlatego, że ładunek wtórny w zapalniku umieszczony jest na dnie łuski, zatem jego niewłaściwe ułożenie w ładunku MWE luzem (w sytuacji, kiedy nie stosuje się tzw. ładunków udarowych) wpłynie na sposób rozproszenia energii impulsu inicjującego. To z kolei może wydłużyć czas osiągnięcia przez materiał wybuchowy poziomu stabilnej prędkości detonacji, a jednocześnie wpłynąć na efektywność robót strzałowych oraz ich bezpieczeństwo poprzez powstawanie „fajek” czy niewypałów.

4.6.5. Rodzaj środka inicjującego a prędkość detonacji MWE luzem

Zgodnie z certyfikatami badań typu WE, materiały wybuchowe emulsyjne luzem stosowane w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. detonują od zapalnika skalnego o masie ładunku wtórnego równej 0,65 g PETN. Co ciekawe, już dwa lata po wprowadzeniu MWE luzem do stosowania w polskich kopalniach rud miedzi LGOM, materiały wybuchowe pobudzano dodatkowymi ładunkami udarowymi i taki stan rzeczy utrzymuje się do dnia dzisiejszego. Celem stosowania ładunków udarowych jest zwiększenie impulsu początkowego i ułatwienie przeniesienia detonacji z zapalnika na materiał wybuchowy¹⁸. Wyniki dotychczasowych badań nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, w jakim stopniu sposób inicjacji wpływa na prędkość detonacji MW, choć wynika z nich, że rodzaj i energia pobudzenia wpływają na czas, po którym materiał wybuchowy osiągnie stałą prędkość detonacji¹⁹.

Do analizy tego problemu wykorzystane zostały środki inicjujące stosowane w kopalniach LGOM w ostatniej dekadzie. Obejmowała ona ocenę przebiegów prędkości detonacji

¹⁷ Mertuszka P., Fuławka K., Szumny M., Zdrojewski A. 2018. Wpływ przestrzennego położenia zapalnika w ładunku materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na skuteczność detonacji. Przegląd Górniczy, nr 4, s. 17–24.

¹⁸ Morawa R. 2004. Kierunki rozwoju środków strzałowych dla poprawy bezpieczeństwa w wykonywanych pracach strzałowych, Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPO pt. Materiały Wybuchowe: Badania – zastosowanie – bezpieczeństwo, Ustroń.

¹⁹ Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski N., Trzeciński W.A. 1995. Shock initiation studies of ammonium nitrate explosives, Combustion and Flame, vol. 102, s. 64–72.

MWE luzem inicjowanych przy użyciu ładunku dynamitu skalnego o handlowej nazwie Ergodyn 30E, pobudzaczy Rioprime 25, Nitrobooster 10M i NKG-20, a także zapalnika skalnego elektrycznego (ZE) i zapalnika elektrycznego wzmocnionego (WZI). Wyniki badań opublikowano w pracy [A5]. Próbkki MW umieszczone były w rurach tworzywowych o średnicy 50 mm i długości 100 cm, a pomiary prędkości detonacji wykonywano po względnym ustabilizowaniu się gęstości. Dla każdego środka inicjującego odpalono po 3 próbki (18 próbek łącznie). Ocena przebiegów prędkości detonacji skupiała się przede wszystkim na etapie tzw. rozbiegu MW. Wyniki pomiarów prędkości detonacji stabilnej dla poszczególnych środków inicjujących przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w zależności od środka inicjującego

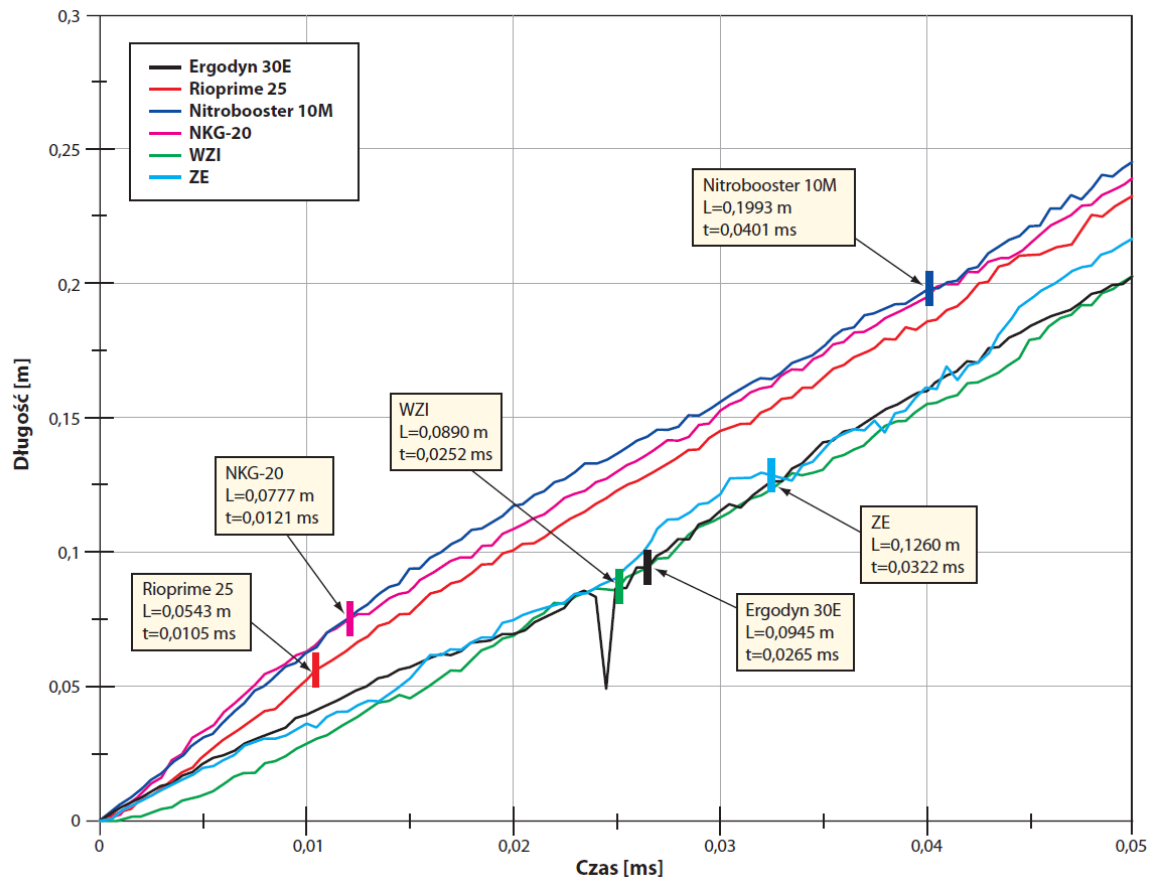
| Środek inicjujący | Prędkość detonacji [m/s] | | |
|-------------------|--------------------------|---------|---------|
| | seria 1 | seria 2 | seria 3 |
| Ergodyn 30E | 4610 | 4440 | 4430 |
| Rioprime 25 | 4660 | 4520 | 4400 |
| Nitrobooster 10M | 4590 | 4470 | 4380 |
| NKG-20 | 4650 | 4450 | 4330 |
| WZI | 4600 | 4460 | 4360 |
| ZE | 4610 | 4560 | 4360 |

Z przeprowadzonej analizy wynika, że prędkości detonacji oznaczone w kolejnych seriach maleją, niezależnie od zastosowanego środka inicjującego, co jest związane ze zmianą w czasie parametrów MWE uczulanych chemicznie, co z kolei było spowodowane przerwą technologiczną pomiędzy odpalaniem kolejnych ładunków. Natomiast prędkości detonacji w poszczególnych seriach pomiarowych, niezależnie od zastosowanego środka inicjującego są do siebie zbliżone. Potwierdza to, że sposób pobudzenia MWE luzem nie wpływa znacząco na prędkość detonacji stabilnej.

Powyższy wniosek nie oznacza jednak, że stosowanie ładunków udarowych jest bezpodstawne, choć analizowany materiał wybuchowy emulsyjny luzem może zostać „rozpędzony” do maksymalnej prędkości detonacji nawet najslabszym z użytych środków inicjujących, tj. zapalnikiem skalnym. Dlatego też materiał wybuchowy należy pobudzić w taki sposób, aby osiągnął on maksymalną prędkość detonacji na możliwie najkrótszym odcinku od miejsca położenia środka inicjującego, co może ograniczyć powstawanie tzw. fajek na dnie otworu strzałowego. W związku z tym, wyznaczano długości odcinków, po przekroczeniu których MW detonował już ze stałą prędkością detonacji. Przykładowe charakterystyki rozwoju detonacji analizowanego MW przedstawiono na rys. 7.

Analiza wyników 1 serii pomiarowej potwierdziła celowość stosowania pobudzaczy. Względnie wysoka początkowa prędkość detonacji MWE luzem w pobliżu pobudzacza zapewnia odpowiednio duży impuls energetyczny w przypadku każdego z analizowanych pobudzaczy, co jest szczególnie ważne przy inicjacji od dna otworu, gdzie potrzeba największej energii do urobienia skał. Najlepszy w tej serii okazał się pobudzacz NKG-20, który poza największą początkową prędkością detonacji MW w pobliżu pobudzacza, utrzymał na blisko 21-centymetrowym odcinku podwyższoną prędkość detonacji. Charakterystyka rozwoju

detonacji przy inicjacji dynamitem skalnym jest niekorzystna, na co wskazują zakłócenia na wykresie. W związku z tym stabilna prędkość detonacji osiągnięta została dopiero po ok. 15 cm. Etap rozwoju detonacji w przypadku obu rodzajów zapalników przyjmuje podobną charakterystykę początkową, aczkolwiek zapalnik wzmożony spowodował, że stabilna prędkość detonacji została osiągnięta na odcinku o ok. 17% krótszym.



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki rozwoju detonacji MWE luzem dla serii 2

Podobne wyniki uzyskano w 2 serii pomiarowej. Charakterystyki rozbiegu dla pobudzaczy NKG-20, Rioprime 25 i Nitrobooster 10M są do siebie bardzo zbliżone i w każdym przypadku zapewniają początkową prędkość detonacji większą od prędkości detonacji badanego MW. W tej serii najlepszy okazał się Nitrobooster 10M, przy użyciu którego początkowa prędkość detonacji była większa od ustalonej na odcinku równym prawie 20% próbki. Z kolei przy pobudzeniu dynamitem skalnym, początkowa prędkość detonacji MW była stosunkowo wysoka, ale charakterystyka rozwoju detonacji ponownie nie była korzystna, na co po raz kolejny wskazują pewne zakłócenia na wykresie. W związku z tym, krzywa prędkości detonacji MWE luzem przy zastosowaniu tego środka inicjującego jest zbliżona do krzywych opisujących inicjację zapalnikami. Przebiegi uzyskane przy badaniach z zapalnikami są do siebie zbliżone także w tej serii, przy czym zapalnik wzmożony doprowadził do znacznie szybszego osiągnięcia stabilnej prędkości detonacji.

Wyniki otrzymane w ostatniej serii pomiarowej również potwierdzają celowość stosowania pobudzaczy do inicjacji MWE luzem. Największa efektywność inicjacji została potwierdzona dla pobudzaczy NKG-20, Rioprime 25 i Nitrobooster 10M. Charakteryzowały się one większą

prędkością detonacji w pobliżu pobudzacza w porównaniu z ustaloną prędkością detonacji badanego ładunku MWE luzem. W każdym z tych przypadków, stabilizacja prędkości detonacji nastąpiła po ok. 15 cm. Przy pobudzeniu dynamitem skalnym zaobserwowano znacznie większą początkową prędkość detonacji od stabilnej prędkości detonacji MWE luzem, a odcinek spowolnienia detonacji związany z jej przeniesieniem z pobudzacza na MW jest praktycznie niezauważalny. Charakterystyki rozwoju detonacji MWE luzem do stabilnej detonacji dla drugiej i trzeciej serii pomiarowej przedstawiono w pracy [A5].

W oparciu o uzyskane wyniki badań należy stwierdzić, że rodzaj i wielkość środka inicjującego nie wpływają na ustaloną prędkość detonacji analizowanego materiału wybuchowego emulsyjnego luzem, który nawet przy zastosowaniu samych zapalników, osiąga deklarowaną przez producenta prędkość detonacji i jest ona podobna do stabilnej prędkości detonacji, jaką miały ładunki MWE inicjowane pobudzaczami. Różnice widoczne są wyłącznie na początkowych odcinkach ładunków. W praktyce oznacza to, że prędkość detonacji pobudzacza powinna być większa od prędkości detonacji stabilnej materiału wybuchowego. W przeciwnym razie stosowanie pobudzaczy nie zwiększy efektywności MW.

Podsumowując, stosowanie pobudzaczy do inicjowania MWE luzem jest jak najbardziej zasadne, ponieważ zapewniają one odpowiednio duży impuls energetyczny, co niewątpliwie przekłada się na poprawę efektywności urabiania skał. Ponadto, stosowanie pobudzaczy znacznie zmniejsza odległość, po przebyciu której prędkość detonacji MW osiąga stałą wartość. Zatem należy stosować taki środek inicjujący, aby MWE luzem detonował na całej długości ładunku z prędkością detonacji nie mniejszą niż stabilna, a korzystne jest, aby na jak najdłuższym odcinku detonował z prędkością detonacji większą niż stabilna.

W oparciu o przeprowadzoną serię badań można wnioskować, że stosowanie pobudzaczy o odpowiedniej masie zmniejsza zarówno prawdopodobieństwo powstawania tzw. fajek, ale też pozostawiania resztek niezdetonowanego MW na dnie otworu strzałowego. Wyniki uzyskane podczas inicjacji MWE luzem samymi zapalnikami również potwierdziły korzystne charakterystyki rozwoju detonacji. Można więc przypuszczać, że przy urabianiu skał o niższych parametrach wytrzymałościowych, długość odcinka, po przekroczeniu którego prędkość detonacji MWE luzem jest mniejsza od ustalonej, prawdopodobnie nie pogorszy efektywności prowadzonych robót strzałowych.

4.6.6. Czas od wykonania ładunków do detonacji a prędkość detonacji MWE luzem

Kolejnym istotnym parametrem jest czas, jaki upłynął pomiędzy załadowaniem MWE luzem do otworu strzałowego a jego odpaleniem. Parametr ten należy rozpatrywać dwutorowo, tj. z punktu widzenia efektywności urabiania, zatem w sposób przedstawiony w pkt 4.6.1 (spadek prędkości detonacji w czasie), ale także z punktu widzenia bezpieczeństwa, czyli możliwości utraty jego właściwości wybuchowych po upływie pewnego czasu, co związane jest procesem chemicznym uczulania MW. Problem ten został już zasygnalizowany we wprowadzeniu. Chodzi mianowicie o to, że zdarzają się sytuacje, które powodują, że otwory załadowane MWE luzem nie zostaną odpalone w przewidzianym czasie. Takimi sytuacjami mogą być np. zawał stropu, wstrząs sejsmiczny czy problem z inicjacją ładunków – niepoprawne działanie środków strzałowych lub odcięcie rurek detonujących przez opadające bryły skalne.

Przez szereg lat służby kopalniane opierały się na opracowaniach polskich naukowców, zgodnie z którymi, materiał wybuchowy emulsyjny luzem traci właściwości wybuchowe po ok. 48 godzinach od wytworzenia, co w warunkach użytkowych tożsamy jest z załadowaniem MW do otworów strzałowych. Ze względów bezpieczeństwa jednak, służby strzałowe przyjęły, że bezpieczny i gwarantujący „dezaktywację” MWE luzem czas wynosi 14 dni. Niestety żadne z powyższych stwierdzeń nie zostało zweryfikowane odpowiednimi badaniami.

Wyniki pierwszych badań w tym zakresie zostały przeprowadzone z wykorzystaniem metody jakościowej²⁰. W trakcie badań odpalano próbki MWE luzem załadowane do rur tworzywowych w odstępach co 1–2 dni przez okres 3 tygodni od wytworzenia. W wyniku badań stwierdzono, że MWE luzem nie traci właściwości wybuchowych po upływie ww. 48 godzin. Co więcej, jest zdolny do detonacji przez co najmniej 3 tygodnie od wytworzenia.

W związku z tym, powyższy problem został zweryfikowany poprzez wykonanie pomiarów prędkości detonacji ładunków MWE luzem. Badania zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap obejmował przeprowadzenie serii pomiarów prędkości detonacji w wybranych odstępach czasowych, przy czym ostatni pomiar wykonano po upływie 24 godzin od wytworzenia MW²¹. W drugim etapie zaplanowano pomiary prędkości detonacji ładunków MWE luzem przez okres 6 miesięcy od wytworzenia, przy czym wraz z upływem czasu zwiększano odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi badaniami. Wyniki badań zostały opublikowane w artykule [A6].

Próbki MW umieszczane były w rurach tworzywowych, które były zaślepione z obu stron aż do momentu odpalania. Ładunki MW we wszystkich badaniach dotyczących wpływu czasu pomiędzy wykonaniem ładunków a odpaleniem na prędkość detonacji inicjowano zapalnikami skalnymi o masie ładunku wtórnego równej 0,65 g PETN. Wyniki uzyskane w pierwszym etapie badań przedstawiono w tabeli 5. Oznaczają one wartość prędkości detonacji wyrażoną w procentach w stosunku do wartości początkowej (dla pierwszej próbki odpalonej po 30 min), której wartość przyjęto jako 100%.

Tabela 5. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w czasie od wytworzenia

| Seria | Czas | Próbka 1 | Próbka 2 | Próbka 3 | Średnia |
|-------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 1 | 30 min | 100 | 98 | 95 | 98 |
| 2 | 60 min | 93 | 94 | 93 | 93 |
| 3 | 90 min | 83 | 85 | 83 | 84 |
| 4 | 180 min | 86 | 84 | 87 | 86 |
| 5 | 240 min | 83 | 80 | 80 | 81 |
| 6 | 300 min | 79 | 79 | 79 | 79 |
| 7 | 24 godz. | 77 | 74 | 73 | 75 |

²⁰ Cenian B., Wojewódka A., Pytel W., Mertuszka P. 2015. Wpływ czasu na zdolność do detonacji materiałów wybuchowych emulsyjnych ładowanych mechanicznie, *Wiadomości Górnicze*, r. 66, nr 3, s. 155–161.

²¹ Mertuszka P., Kramarczyk B., Cenian B. 2017. Zmiany prędkości detonacji MW emulsyjnego luzem w funkcji czasu na przykładzie Emulinitu 8L. *Przegląd Górniczy*, nr 3, s. 10–14.

Wyniki badań potwierdziły, że prędkość detonacji MWE luzem spada w czasie do 24 godzin od wykonania ładunków, co oznacza, że staje się on słabszy, ale nie traci właściwości wybuchowych. Największą prędkość detonacji osiągnęła pierwsza próbka odpalona po 30 min. Dla kolejnych próbek w pierwszej serii odnotowano już niewielki spadek prędkości detonacji na poziomie 2–5% w stosunku do pierwszej. Spadek ten jest związany z upływem czasu, który był spowodowany przerwą technologiczną pomiędzy odpalaniem próbek, niezbędną do przygotowania stanowiska strzałowego do kolejnego pomiaru. Oznacza to, że dla zapewnienia maksymalnej efektywności robót strzałowych, przodki powinno się odpalać w możliwie najkrótszym czasie od ich załadowania, przy zachowaniu minimalnego zalecanego przez producenta czasu wynoszącego 20–30 min, na co wskazuje choćby ok. 20-procentowy spadek prędkości detonacji dla próbek odpalonych po 5 godzinach w stosunku do próbek odpalonych 30 min po wytworzeniu MW. W związku z tym, drugi etap badań obejmował okres 6 miesięcy. W tym celu przygotowano 42 próbki MWE luzem, które odpalano w ustalonych odstępach czasu, tj. po 30 min, 60 min, 90 min, 180 min, 240 min i 300 min, następnie po 24 godzinach i 48 godzinach oraz 7, 14, 31, 72, 128 i 190 dniach od ich wykonania. Każda seria składała się z trzech próbek. Część ładunków po załadowaniu została umieszczona w magazynie o stałej temperaturze otoczenia wynoszącej ok. 15°C, które pobierano bezpośrednio przed każdą serią pomiarów. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 6 i na rys. 8.

Tabela 6. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w czasie od wytworzenia

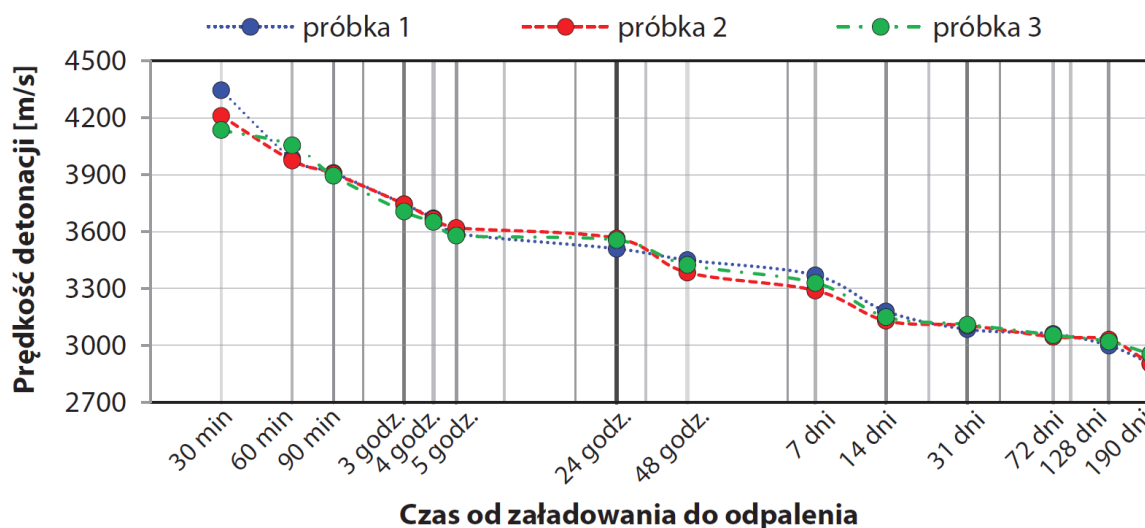
| Seria | Czas | Prędkość detonacji [m/s] | | | |
|-------|----------|--------------------------|----------|----------|---------|
| | | próbka 1 | próbka 2 | próbka 3 | średnia |
| 1 | 30 min | 4350 | 4210 | 4140 | 4230 |
| 2 | 60 min | 3990 | 3980 | 4060 | 4010 |
| 3 | 90 min | 3910 | 3910 | 3900 | 3910 |
| 4 | 180 min | 3750 | 3750 | 3710 | 3740 |
| 5 | 240 min | 3670 | 3670 | 3650 | 3660 |
| 6 | 300 min | 3590 | 3620 | 3580 | 3600 |
| 7 | 24 godz. | 3510 | 3570 | 3560 | 3550 |
| 8 | 48 godz. | 3450 | 3390 | 3430 | 3420 |
| 9 | 7 dni | 3370 | 3290 | 3330 | 3330 |
| 10 | 14 dni | 3180 | 3130 | 3150 | 3150 |
| 11 | 31 dni | 3090 | 3110 | 3110 | 3100 |
| 12 | 72 dni | 3060 | 3050 | 3060 | 3060 |
| 13 | 128 dni | 3000 | 3030 | 3020 | 3020 |
| 14 | 190 dni | 2910 | 2910* | 2960 | 2930 |

* detonacja nastąpiła dopiero po zastosowaniu pobudzacza

Wyniki potwierdzają spadkowy trend prędkości detonacji MWE luzem w czasie. Największe prędkości detonacji uzyskano w pierwszej, natomiast najmniejsze – w ostatniej serii pomiarowej, przy czym odpalenie jednej z próbek w ostatniej serii nie powiodło się i konieczne było ponowne zainicjowanie próbki zapalnikiem z pobudzaczem. Na początku spadek prędkości detonacji był największy, natomiast wraz z upływem czasu spadki były coraz mniejsze. Oznacza to, że należy dążyć do jak najszybszego inicjowania ładunków MW, gdyż przebywanie

MWE luzem w otworach strzałowych wraz z upływem czasu będzie przekładało się na spadek efektywności urabiania, ponieważ mniejsza prędkość detonacji jest bezpośrednio związana ze spadkiem ciśnienia detonacji, co w rezultacie prowadzi do zmniejszenia energii kruszącej skałę (materiał wybuchowy staje się słabszy). W związku z tym zaleca się, aby czas przebywania MWE luzem w otworach strzałowych był jak najkrótszy. W przypadku, kiedy MWE luzem miałyby przebywać w otworze strzałowym przez dłuższy czas, należałoby ładować otwory MW nabojuowanymi, które nie są tak wrażliwe na czas przebywania w otworze.

Wyniki uzyskane w drugim etapie badań są zbliżone do tych uzyskanych w etapie pierwszym i wskazują, że prędkość detonacji próbek odpalonych po 5 godzin od wykonania ładunków spadła o ok. 15–20% w stosunku do pierwszej próbki. Spadek prędkości detonacji MWE luzem w czasie od 5 godzin od wytworzenia do 24 godzin nie jest tak znaczny, jak w okresie od 24 godzin do 48 godzin. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku prowadzenia grupowych strzelań odpężających, przy których ładowanie przodków prowadzone jest w trakcie kilku następujących po sobie zmian, a odpalanie odbywa się dopiero dzień lub dwa po załadowaniu wszystkich otworów strzałowych. Spadek prędkości detonacji MWE luzem stabilizuje się względnie po 14 dniach od wytworzenia i utrzymuje dalej w czasie na zbliżonym poziomie z niewielkim trendem spadkowym.



Rys. 8. Wyniki pomiarów prędkości detonacji w czasie od wytworzenia

Zaprezentowane wyniki badań są szczególnie ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa robót górniczych. Potwierdziły one, że MWE luzem, wbrew powszechnej opinii służb kopalnianych, nie traci swoich właściwości wybuchowych po określonym przez producenta czasie, tj. 48 godzin od jego wykonania. Co więcej, zachowuje zdolność do detonacji (właściwości wybuchowe) przez co najmniej 6 miesięcy od czasu jego wytworzenia. Zatem wiercenie w otworach strzałowych, w których pozostały resztki niezdetonowanego MW jest kategorycznie niedopuszczalne, a przodki załadowane MWE luzem i nieodpalone w najdłuższym dopuszczalnym czasie, należy traktować z najwyższą ostrożnością, a podczas ich usuwania ściśle przestrzegać przepisów zawartych w Rozporządzeniu 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).

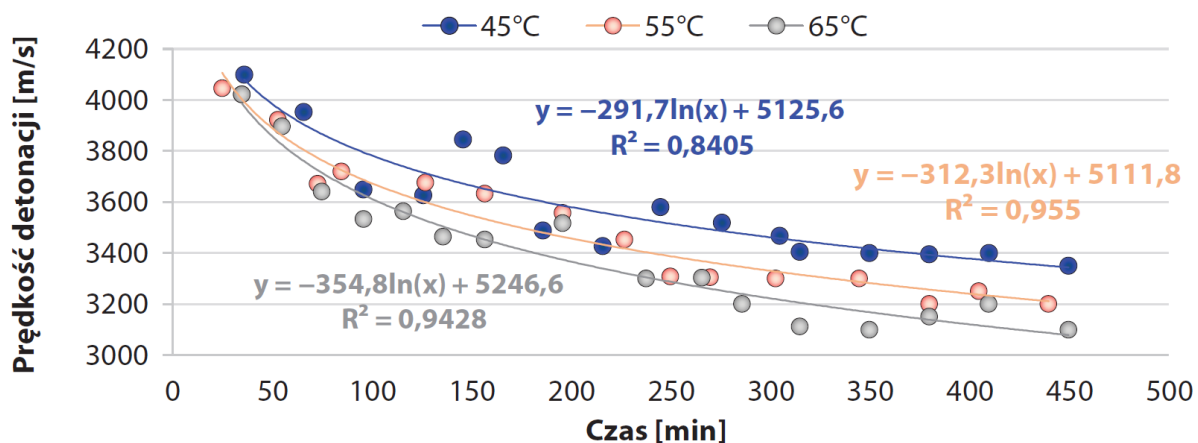
4.6.7. Temperatura ładunków a prędkość detonacji MWE luzem

Temperatura otoczenia i jej wpływ na prędkość detonacji MW emulsyjnych, zarówno luzem, jak i nabojujących, to kolejne analizowane zagadnienie. Problem ten jest obecnie szczególnie ważny z uwagi na zwiększającą się głębokość eksploatacji złoża, a co za tym idzie – także temperaturę górotworu w kopalniach LGOM, która lokalnie osiąga już 55°C, przy średniej równej 39°C. Niestety, zakres użytkowania stosowanych obecnie MWE nie przekracza 50°C, a stosowanie ich w temperaturach w zakresie 50–60°C jest dozwolone wyłącznie, jeśli odpalenie MW w otworach strzałowych nastąpi nie później niż w przeciągu 5 godzin od załadowania. Można zatem zakładać, że część ładunków MWE w kopalniach KGHM jest odpalana poza dopuszczonym zakresem ich stosowania. Jest to związane z tym, że otwory strzałowe odpala się dwa razy na dobę, zatem czas pomiędzy załadowaniem a odpaleniem może wynosić nawet 10 godzin, a w przypadku grupowych strzelań odprężających – aż do 48 godzin. Problem ten jest również ważny z uwagi na zmianę konsystencji MWE nabojujących w związku z wysoką temperaturą powietrza pod ziemią, co bardzo utrudnia jego ręczne ładowanie do otworów, a nawet powoduje blokowanie naboju MWE w otworach strzałowych. Wyniki badań dotyczących określenia wpływu temperatury na prędkość detonacji zostały przedstawione w artykule [A7].

Przedmiotem badań były MWE stosowane obecnie w kopalniach KGHM, w tym jeden luzem i dwa nabojujące o średnicy 32 mm i 40 mm. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Próbkę odpalano w ustalonych odstępach czasowych w zakresie od 30 min do 450 min od momentu ich umieszczenia w komorze klimatycznej. Czas pomiędzy wytwarzaniem ładunków MW, a umieszczeniem ich w komorze nie przekraczał 2 min. Ładunki zostały przebadane w temperaturach charakterystycznych dla skał złożowych w kopalniach LGOM, tj. 45°C, 55°C i 65°C, przy czym ostatnia zbliżona jest do maksymalnej temperatury skał zanotowanej na głębokości 1500 m²². Dla każdego typu MWE przygotowano po 16 próbek (łącznie 48). Ładunki umieszczano w rurach tworzywowych, które uprzednio termostatowano w komorze klimatycznej w danej temperaturze przez 30 min. Dodatkowo, dla wszystkich MW, określony został czas, po którym ładunki osiągały temperaturę równą temperaturze otoczenia. Ponieważ zmiany temperatury ładunków w czasie dla poszczególnych serii były zbliżone, zostały one uśrednione. Wyniki uzyskane dla MWE luzem przedstawiono na rys. 9.

Wyniki badań wskazują na wyraźną tendencję spadkową prędkości detonacji MWE luzem, zarówno z upływem czasu, jak i ze wzrostem temperatury ładunków. Wzrost temperatury istotnie wpływa na spadek efektywności MWE luzem wyrażonej prędkością detonacji, co związane jest głównie z przyspieszeniem procesu uczulania i jednocześnie szybszym spadkiem gęstości ładunków. Prędkości detonacji MWE luzem wyznaczone po 250 min termostatowania, zatem w momencie, kiedy wszystkie ładunki MW powinny osiągnąć temperaturę otoczenia, były w temperaturze 45°C większe średnio o ok. 150 m/s niż przy temperaturze 55°C i nawet o 300 m/s większe niż przy temperaturze 65°C. Analizując jedynie wyznaczone linie trendu można zaobserwować, że prędkość detonacji ładunków MWE luzem termostatowanych w temperaturze 45°C jest średnio o 5% większa niż ładunków przechowywanych w 55°C i aż o 9% większa w porównaniu z próbkami przechowywanymi w 65°C. Potwierdza to bardzo duży wpływ temperatury na prędkość detonacji analizowanego MWE luzem.

²² Downorowicz S. 2007. Geotermika. [W:] A. Banaszak, M. Banaś (red.). Monografia KGHM Polska Miedź S.A., część II – Geologia, Lubin, s. 145–148.



Rys. 9. Zależność prędkości detonacji MWE luzem od czasu dla różnych temperatur

Z kolei wyniki uzyskane dla MWE nabożowanych charakteryzują się dużo większą stabilnością. Wynika to m.in. z innego sposobu ich uczulania (gęstość jest stała). Oznacza to, że czas ich przebywania w otworach strzałowych nie powinien mieć aż tak dużego wpływu na efektywność, jak przy MWE luzem. W przypadku MWE nabożowanego o średnicy 32 mm, wzrost temperatury przekładał się nieznacznie na zwiększenie objętości ładunku, a zatem też na niewielkie zmniejszenie jego gęstości. Dlatego też ładunki przechowywane w temperaturach wyższych charakteryzowały się mniejszą prędkością detonacji. Opierając się na wyznaczonych liniach trendu, prędkość detonacji MW termostatowanego w temperaturze 65°C zmierzona 30 min po jego umieszczeniu w komorze klimatycznej była o nieco ponad 100 m/s mniejsza niż MW termostatowanego w temperaturze 55°C oraz o ok. 220 m/s mniejsza niż przy 45°C. Wraz z upływem czasu, kiedy dochodziło do wyrównywania temperatury ładunków MWE i otoczenia, różnice w prędkościach znacząco wzrastały. Prędkości detonacji ładunków po 250 min termostatowania w temperaturze 45°C były średnio o ponad 5% większe niż ładunki przechowywane w temperaturze 55°C. Zdecydowanie większe różnice obserwowano dla temperatury 65°C, przy której prędkość detonacji była o blisko 10% mniejsza. Dodatkowo, przeanalizowana została średnia różnica w wyznaczonych trendach prędkości detonacji. Wyniki wskazują, że prędkości detonacji ładunków przechowywanych w temperaturze 45°C po upływie 250 min od umieszczenia w komorze klimatycznej były średnio o 400 m/s większe niż w temperaturze 65°C i o 210 m/s większe niż w temperaturze 55°C.

Największym rozrzutem prędkości detonacji charakteryzowały się z kolei ładunki MWE nabożowanego o średnicy 40 mm, choć widoczne były różnice dla poszczególnych temperatur. Największe prędkości detonacji zarejestrowano dla ładunków termostatowanych w 45°C, a najmniejsze – dla 65°C. Na podstawie wyznaczonych linii trendu stwierdzono, że po upływie 250 min termostatowania, zatem w momencie, w którym wszystkie ładunki powinny osiągnąć temperaturę równą temperaturze otoczenia, prędkości detonacji przy 45°C były średnio o ok. 100 m/s większe od prędkości detonacji ładunków termostatowanych w temperaturze 55°C i o blisko 180 m/s większe w porównaniu z ładunkami termostatowanymi w temperaturze 65°C. Zależności prędkości detonacji obu MWE nabożowanych od czasu dla różnych temperatur przedstawiono w pracy [A7].

Wyniki badań potwierdziły znaczący wpływ temperatury na prędkość detonacji materiałów wybuchowych emulsyjnych. Wskazują one na obniżenie parametrów użytkowych MWE, zarówno luzem, jak i nabojujących, wraz ze wzrostem temperatury ładunku. Zgodnie z przyjętym systemem eksploatacji złóż w kopalniach LGOM, ładunki MW odpalane są w przedziale czasowym od 30 min do 48 godzin od załadowania, co oznacza, że nie wszystkie są odpalane w optymalnych dla danego MW temperaturach. Zatem odpalanie powinno następować każdorazowo w możliwie najkrótszym czasie od załadowania do otworów strzałowych (przy zachowaniu minimalnego zalecanego przez producenta czasu wynoszącego 20–30 min), aby ograniczyć możliwość podwyższenia ich temperatury do zbliżonej do temperatury górotworu. Należy mieć na uwadze, że w najbliższych latach eksploatacja złóż będzie prowadzona na głębokościach, na których temperatura skał wzrośnie nawet do 65°C. W takich temperaturach stosowane obecnie MWE będą prawdopodobnie charakteryzowały się niskimi parametrami detonacyjnymi i związaną z nimi niską efektywnością prac strzałowych.

Istotnym problemem wysokiej temperatury jest również pogorszenie właściwości użytkowych MWE nabojujących, co sprawia, że ręczne ładowanie naboju do otworów strzałowych jest utrudnione z uwagi na ich elastyczność. To z kolei powoduje ich blokowanie w otworach w trakcie ładowania, a w wielu przypadkach ogranicza możliwość ich dosunięcia do dna otworu strzałowego.

4.6.8. Nowa odmiana MWE luzem dla kopalń podziemnych

Wyniki badań przedstawione w pkt 4.6.1–4.6.7 wskazują, że istotnym problemem związanym z bezpiecznym i efektywnym wydobywaniem złoża w polskich kopalniach rud miedzi jest charakterystyka stosowanych materiałów wybuchowych, szczególnie MWE luzem. Z uwagi na zachodzący proces uczulania niewybuchowych składników, tego typu MW wyróżnia zmienność parametrów strzałowych w czasie, tj. pomiędzy wytworzeniem (załadowaniem do otworów strzałowych), a zainicjowaniem. Problem ten dotyczy zasadniczo przemysłu wydobywczego na całym świecie, ale jak dotąd nie udało się opracować i wdrożyć na skalę przemysłową MWE luzem o zwiększonych parametrach detonacyjnych i przewidywalnej (stabilnej) reakcji uczulania. Szczególnie ważna jest tu przewidywalność reakcji uczulania. Należy przez to rozumieć opracowanie takiego składu MWE luzem, który umożliwi przebieg reakcji uczulania w możliwie najkrótszym czasie po zmieszaniu składników, następnie szybkie osiągnięcie właściwej gęstości MW (związane z reakcją uczulania) i ostatecznie pozwoli na utrzymanie tej wartości na zbliżonym poziomie w czasie pomiędzy osiągnięciem właściwej gęstości i odpaleniem ładunków. Jednym z rozwiązań, które były rozpatrywane jako alternatywa do obecnie stosowanych MW był dodatek aluminium²³. Badania wykazały jednak, że dodatek aluminium na ekonomicznie uzasadnionym poziomie nie wnosi znaczącej poprawy parametrów użytkowych MWE luzem.

W związku z powyższym podjęto próbę modyfikacji obecnie stosowanego składu materiału wybuchowego emulsyjnego luzem stosowanego w polskich kopalniach rud miedzi LGOM. Założono że, rozwiązanie to nie będzie ingerować w główny składnik MW, tj. matrycę,

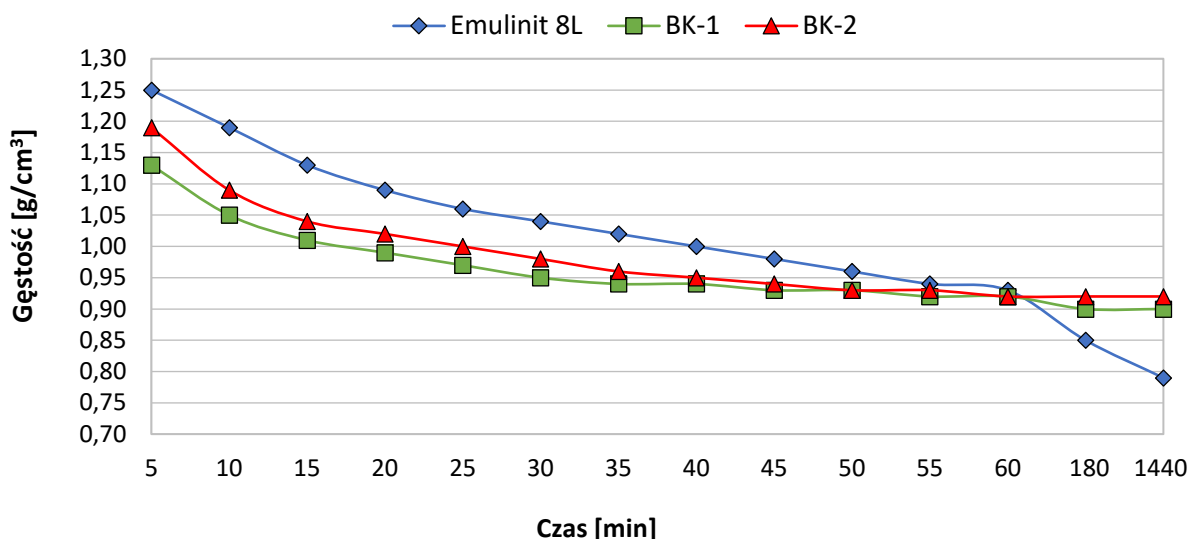
²³ Kramarczyk B., Pytlik M., Mertuszka P. 2020. Effect of aluminum additives on selected detonation parameters of bulk emulsion explosive. *High Energy Materials*, tom XII, nr 1, s. 99–113.

ale opierać się będzie wyłącznie na modyfikacji środka uczulającego. Ponadto, opracowany produkt miał charakteryzować się co najmniej takimi samymi parametrami detonacyjnymi, jak standardowo stosowany materiał wybuchowy. Modyfikacja składu uczulacza polegała głównie na zmniejszeniu zawartości wody i azotanu(III) sodu, obniżeniu jego pH i wprowadzeniu dodatku chloranu(VII) sodu. Wyniki badań w tym zakresie zostały opublikowane w pracy [A8].

Na podstawie wielomiesięcznych analiz laboratoryjnych oraz szeregu prób poligonowych, podczas których prowadzono pomiary prędkości detonacji analizowanych materiałów wybuchowych, wyłoniono dwa najlepsze, które charakteryzowały się największymi prędkościami detonacji, a gęstość MW stabilizowała się po stosunkowo krótkim czasie od mieszania składników. Materiały te różniły się zawartością wody, azotanu(III) sodu i chloranu(VII) sodu w uczulaczu. Wytypowane do dalszych prac składy MW nazwano roboczo BK-1 i BK-2. Dla tych materiałów przeprowadzono serię badań, podczas których prowadzono pomiary zmian gęstości MW w czasie, pomiary parametrów fali podmuchu, prędkości detonacji i kruszności, określano względną zdolność MW do wykonania pracy przy użyciu wahadła balistycznego, a także oznaczano skład chemiczny gazów postrzałowych.

Uczulanie dwóch nowych materiałów wybuchowych wybranych do szczegółowych badań przebiega dwutorowo: po pierwsze zachodzi typowa reakcja nagazowywania MW, ale dodatkowo na drodze reakcji podwójnej wymiany pomiędzy chloranem(VII) sodu (nadchloranem sodu), a azotanem(V) amonu (saletrą amonową), dochodzi także do powstania, a następnie wytrącania się chloranu(VII) amonu i azotanu(V) sodu, przy czym reakcja ta następuje dopiero po zmieszaniu składników. W uczulaczu jest na tyle duża zawartość wody, że nie dochodzi do wytrącania chloranu(VII) amonu. Dochodzi do tego dopiero w momencie, kiedy nastąpi kontakt uczulacza z roztworem przesyconym azotanu(V) amonu znajdującym się w roztworze utleniaczy z matrycą, podobnie jak w przypadku fazy utleniaczy w matrycy. Na skutek reakcji chemicznej następuje wytrącanie kryształków chloranu(VII) amonu, przy czym dochodzi do tego już w samym otworze strzałowym. Co ważne, sam nadchloran amonu jest wybuchowy i w przeszłości był stosowany jako samodzielny materiał wybuchowy kruszący. Powoduje to zatem dodatkowe uwrażliwianie materiału wybuchowego i pozwala podczas detonacji lepiej wykorzystać energię chemiczną zawartą w materiale wybuchowym.

Próbki do wymienionych wcześniej badań przygotowywano ręcznie. Należy więc założyć, że były one niemalże jednorodne, ponieważ dokładność mieszania była bardzo duża. Pomiar prędkości detonacji prowadzono równoległe z pomiarem ciśnienia fali podmuchu, natomiast pomiary zmian gęstości MW w czasie, badania na wahadle balistycznym, oznaczanie kruszności oraz pomiary składu chemicznego gazów postrzałowych prowadzono niezależnie. Wyniki pomiarów gęstości przedstawiono na rys. 10, pomiarów parametrów fali podmuchu w tabeli 7, prędkości detonacji w tabeli 8, kruszności w tabeli 9, względnej zdolności do wykonania pracy w tabeli 10 i składu chemicznego gazów postrzałowych w tabeli 11. Dla każdego parametru analizowano po trzy próbki, jednak dla zwiększenia przejrzystości wyników, przestawiono je jako wartości średnie.



Rys. 10. Przebieg zmian gęstości MWE luzem w czasie

Tabela 7. Wyniki pomiarów parametrów powietrznej fali uderzeniowej

| Parametr | Materiał wybuchowy | | |
|---------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| | Emulinit 8L | BK-1 | BK-2 |
| Maksymalne ciśnienie P_{2m} [kPa] | 123,73±7,91 | 127,13±5,67 | 131,20±6,49 |
| Maksymalne ciśnienie $P_{2,5m}$ [kPa] | 73,33±7,02 | 74,30±1,01 | 75,93±1,71 |
| Czas trwania impulsu t_{2m} [ms] | 1,27±0,01 | 1,26±0,01 | 1,27±0,01 |
| Czas trwania impulsu $t_{2,5m}$ [ms] | 1,46±0,02 | 1,49±0,04 | 1,46±0,03 |
| Impuls fali I_{2m} [Pa·s] | 57,20±0,89 | 57,53±0,86 | 58,60±1,04 |
| Impuls fali $I_{2,5m}$ [Pa·s] | 43,83±0,60 | 44,37±0,67 | 44,80±0,26 |

Tabela 8. Wyniki pomiarów prędkości detonacji

| | Materiał wybuchowy | | |
|--------------------------|--------------------|--------|--------|
| | Emulinit 8L | BK-1 | BK-2 |
| Prędkość detonacji [m/s] | 4233±32 | 4647±6 | 5033±6 |

Tabela 9. Wyniki pomiarów kruszności

| | Materiał wybuchowy | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------|------------|------------|
| | Heksogen | Emulinit 8L | BK-1 | BK-2 |
| Kruszność [mm] | 17,17±0,44 | 14,85±0,15 | 17,04±0,32 | 18,16±0,15 |
| Współczynnik kruszności [-] | 0,401 | 0,329 | 0,396 | 0,434 |

Tabela 10. Wyniki pomiarów względnej zdolności do wykonania pracy

| | Materiał wybuchowy | | | |
|---------|--------------------|-------------|------|------|
| | Heksogen | Emulinit 8L | BK-1 | BK-2 |
| RWS [%] | 100 | 62,6 | 68,8 | 69,6 |

Tabela 11. Wyniki pomiarów składu chemicznego gazów postrzałowych

| Materiał wybuchowy | Ilość wydzielonych tlenków [dm ³ /kg] | | | |
|--------------------|--|-----------|-----------------|-----------------|
| | CO ₂ | CO | NO ₂ | NO _x |
| Emulinit 8L | 114,8±1.1 | 4,11±0,28 | 0,04±0,01 | 0,51±0,19 |
| BK-1 | 117,1±0,9 | 2,51±0,12 | 0,04±0,01 | 0,29±0,07 |
| BK-2 | 115,3±0,4 | 3,45±0,46 | 0,03±0,01 | 0,28±0,13 |

Pomiary gęstości MW wykazały, że standardowo stosowany MW typu Emulinit 8L uczuła się powoli, natomiast proces uczulania materiałów wybuchowych wytworzonych przy użyciu obu zaproponowanych uczulaczy jest znacznie szybszy. Ponadto, gęstość odmian BK-1 i BK-2 stabilizuje się już po ok. 30 min i następnie pozostaje na tym samym poziomie, co jest niewątpliwym przełomem w stosunku do stosowanego obecnie składu MW. W przypadku pomiarów powietrznej fali uderzeniowej nie stwierdzono istotnych różnic w stosunku do standardowego MW. Pomiary prędkości detonacji wskazują z kolei na dużo wyższe prędkości dla nowych odmian, szczególnie dla odmiany BK-2, w odniesieniu do standardowego MW. Badanie kruszności metodą Hessa wykazało większą o ok. 20% kruszność dla odmian BK-1 i BK-2 w stosunku do standardowo stosowanego MWE luzem. W badaniu względnej zdolności do wykonania pracy na wahadle balistycznym stwierdzono ok. 10% wzrost tego parametru dla odmian BK-1 i BK-2 w stosunku do standardowego MW. Badania składu gazów postrzałowych wykazały z kolei, że ilość toksycznych tlenków CO i NO_x uległa zmniejszeniu zarówno dla odmiany BK-1, jak i BK-2.

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że nowe składy MWE luzem charakteryzują się praktycznie w każdym aspekcie lepszymi parametrami użytkowymi niż stosowany obecnie materiał wybuchowy. Związane jest to z większym stopniem przereagowania składników, szybszą stabilizacją gęstości, mniejszą zawartością toksycznych produktów w gazach postrzałowych, a także większymi parametrami detonacyjnymi. Można więc powiedzieć, że detonacja jest bardziej zbliżona do idealnej i materiał wybuchowy staje się bardziej zbliżony do idealnego, w porównaniu z powszechnie stosowanym MWE Emulinit 8L, na co wskazują głównie wyniki badań kruszności i prędkości detonacji. Dla użytkownika istotny jest szybki przebieg reakcji uczulania i niewielka zmienność parametrów detonacyjnych w czasie, jaki następuje po reakcji uczulania. Przyspieszenie tej reakcji pozwala na zmniejszenie wpływu czasu na zmiany parametrów detonacyjnych MWE luzem.

4.6.9. *Badania efektywności nowego MWE luzem w warunkach podziemnych*

Ostatnim elementem prac było zweryfikowanie w warunkach ruchowych zakładu górniczego wyników badań nad nową odmianą MWE luzem dla kopalń podziemnych. Badania takie są szczególnie istotne z uwagi na wnioski przedstawione w pkt 4.6.2, które wskazują, że wyniki badań laboratoryjnych nie zawsze mają bezpośrednie przełożenie na testy w warunkach ruchowych, w których MW wytwarzany jest przez modułowe urządzenia mieszalniczo-załadownicze. Do badań wytypowano materiał wybuchowy opisany w pkt 4.6.8 jako odmiana BK-2, ponieważ charakteryzował się on lepszymi parametrami niż odmiana BK-1. Dotyczyło to w szczególności prędkości detonacji, kruszności i względnej zdolności do wykonania pracy.

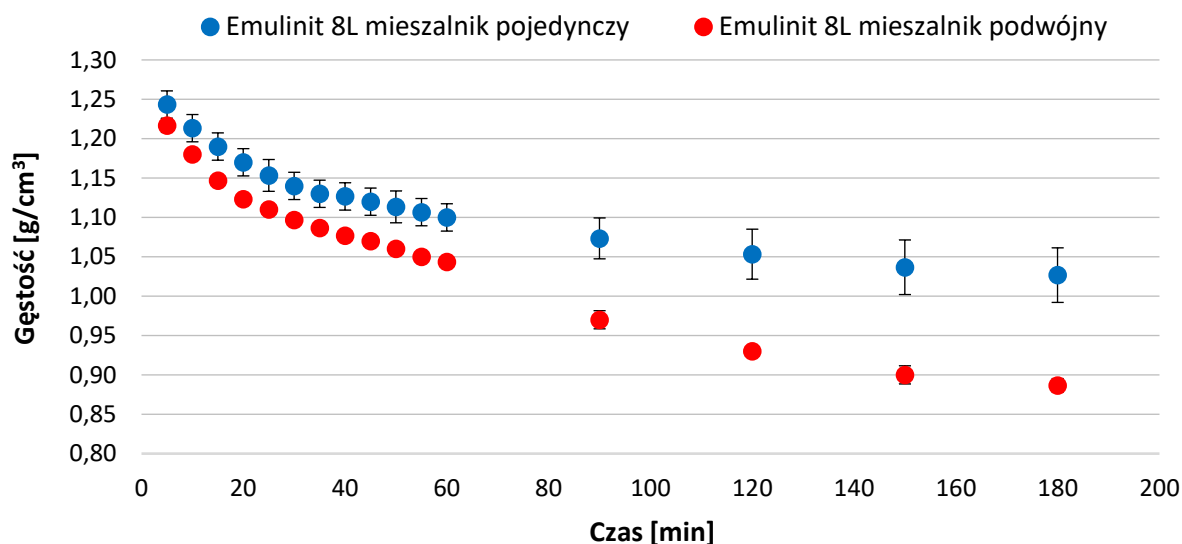
Badania wykonano w wybranych wyrobiskach kopalni „Lubin”, a ich rezultaty opublikowano w pracy [A9]. Wyniki porównano ze standardowym MW typu Emulinit 8L. Próby podziemne podzielono na dwa etapy, podczas których odpalano po 4 przodki, w tym dwa załadowane MW typu Emulinit 8L i dwa odmianą BK-2. Badania polegały na załadowaniu przodków materiałem wybuchowym wytworzonym przez modułowe urządzenie pompujące, a następnie przeprowadzeniu pomiarów prędkości detonacji bezpośrednio w otworach strzałowych oraz wykonaniu analizy rozdrobnienia urobku po strzelaniu. Ponadto z urządzenia mieszalniczo-załadowczego pobrano próbki MWE luzem do badań gęstości oraz kruszności. Zawartość uczulacza w całkowitej masie mieszaniny wynosiła 4,5% dla standardowego MW, natomiast dla odmiany BK-2 została zmniejszona do 3,5%, co wynikało z wielomiesięcznych analiz laboratoryjnych oraz szeregu prób poligonowych nad nowym składem uczulacza, których wyniki zaprezentowano w poprzednim rozdziale.

Testy podziemne poprzedzono dodatkowymi badaniami laboratoryjnymi, w których określono wrażliwość nowego składu MW na tarcie i uderzenie. Badania wykazały, że wrażliwość na uderzenie odmiany BK-2 przekracza 50 J, a wrażliwość na tarcie wynosi powyżej 360 N – podobnie, jak w przypadku standardowego MW.

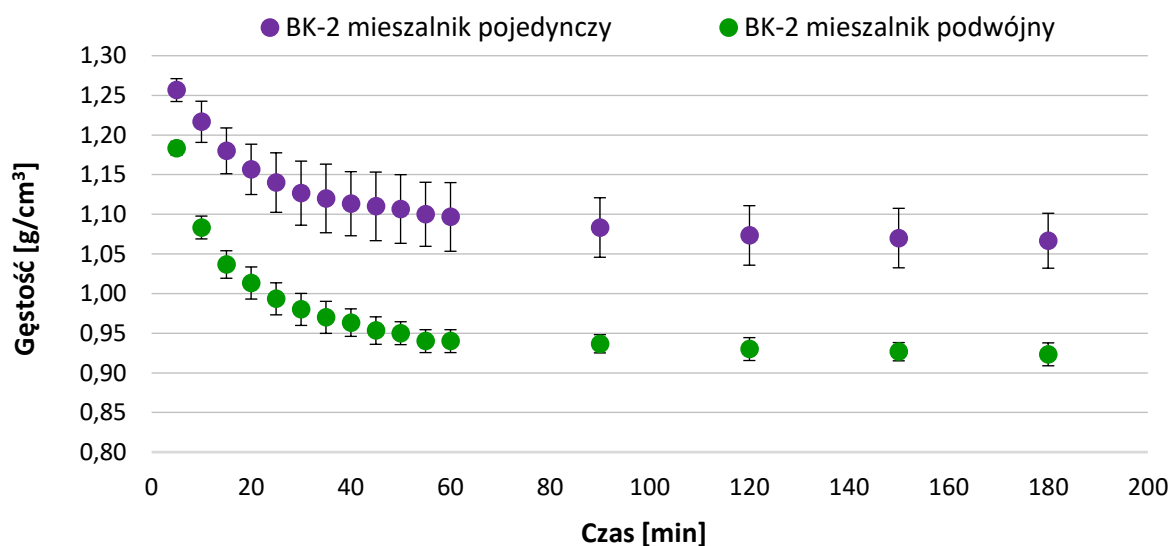
Przodki zlokalizowane były w sąsiednich komorach, zatem panujące warunki górnictwo-geologiczne były zbliżone. Otwory w przodkach zostały wykonane przy zastosowaniu tej samej metryki strzałowej (takie samo rozmieszczenie, długości i średnice otworów, takie same ilości MW i takie same czasy opóźnień zapalników). Wszystkie testy przeprowadzono dla tej samej matrycy MW. Różnica pomiędzy pierwszym a drugim etapem polegała na użyciu różnych mieszalników: w pierwszym etapie zastosowano mieszalnik pojedynczy, natomiast w drugim – podwójny. Materiał wybuchowy typu Emulinit 8L powinien być standardowo wytwarzany przy użyciu podwójnego mieszalnika, jednak z uwagi na dużą lepkość głównego składnika i wiążące się z tym wysokie ciśnienia układów hydraulicznych w modułowym urządzeniu pompującym, stosunkowo często dochodzi do sytuacji, w których stosuje się mieszalnik pojedynczy.

Pomiary gęstości prowadzono analogicznie, jak we wcześniejszych badaniach, przy czym materiał wybuchowy pobierany z urządzenia mieszalniczo-załadowczego był umieszczany w workach foliowych, a następnie wyciskany do pojemników pomiarowych. Pierwszy pomiar gęstości przeprowadzono po 5 min od wytworzenia MW, a kolejne wykonywano co 5 min przez pierwsze 60 min, a następnie co 30 min przez kolejne 120 min.

Pomiar prędkości detonacji prowadzono w otworach strzałowych przy użyciu metody ciągłej. Czas pomiędzy załadowaniem MW do otworów strzałowych a detonacją ładunków w otworach wyniósł ok. 150 min. Badanie kruszności wykonano, jak poprzednio, metodą Hessa, a próbki odpalono po ok. 30 min od wytworzenia MW. Analiza fragmentacji została przeprowadzona w dedykowanym programie komputerowym na podstawie serii zdjęć usypu po odpaleniu przodków. Wyniki badań gęstości przedstawiono na rys. 11–12, prędkości detonacji w tabeli 12, kruszności w tabeli 13, natomiast wyniki analizy fragmentacji urobku po odstrzale na rys. 13.



Rys. 11. Przebieg zmian gęstości w czasie MWE luzem typu Emulinit 8L



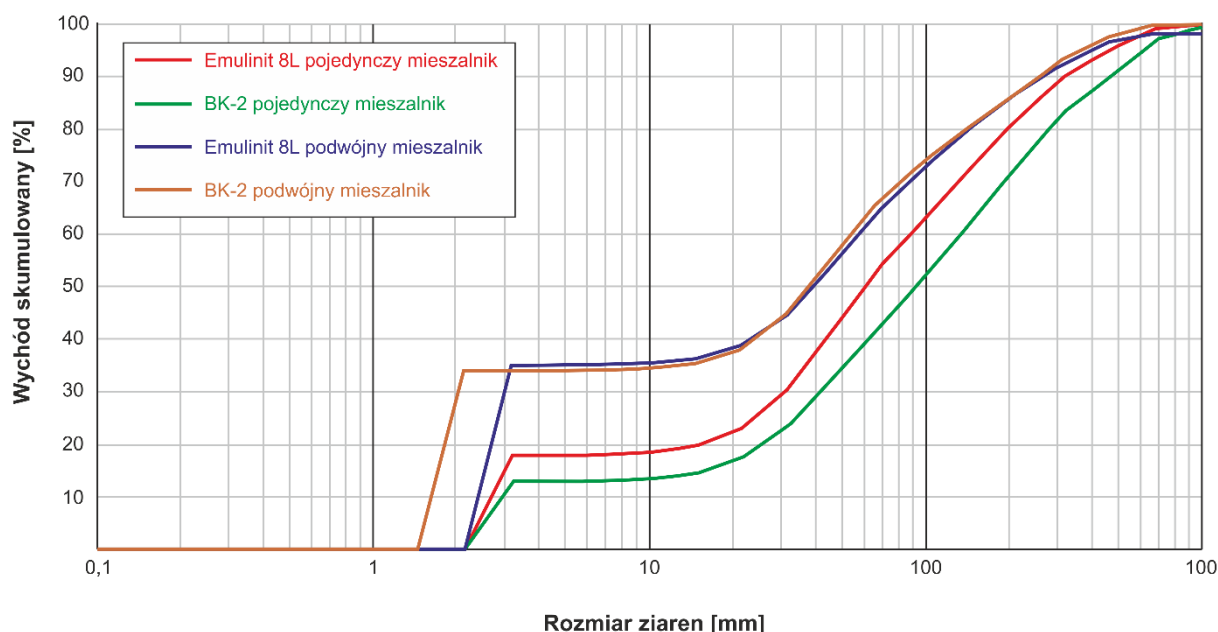
Rys. 12. Przebieg zmian gęstości w czasie MWE luzem typu BK-2

Tabela 12. Wyniki pomiarów prędkości detonacji

| Mieszalnik | Próbka | Prędkość detonacji [m/s] | |
|------------|--------|--------------------------|------|
| | | Emulinit 8L | BK-2 |
| pojedynczy | 1 | 3710 | 3760 |
| | 2 | 3850 | 3735 |
| | 3 | 3880 | 3890 |
| | 4 | 3720 | 3895 |
| podwójny | 1 | 4030 | 4000 |
| | 2 | 4060 | 3990 |
| | 3 | 4000 | 4060 |
| | 4 | 4090 | 4070 |

Tabela 13. Wyniki pomiarów kruszności

| | Mieszalnik | Materiał wybuchowy | |
|---|------------|--------------------|------------|
| | | Emulinit 8L | BK-2 |
| Kruszność [mm] | pojedynczy | 15,25±0,11 | 15,43±0,53 |
| | podwójny | 14,94±0,12 | 16,23±0,25 |
| Współczynnik kruszności ²⁴ [-] | pojedynczy | 0,341 | 0,346 |
| | podwójny | 0,331 | 0,371 |



Rys. 13. Skumulowane rozkłady fragmentacji w zależności od rodzaju mieszalnika dla analizowanych materiałów wybuchowych

W trakcie pierwszego etapu badań, w którym zastosowano pojedynczy mieszalnik, zauważono problemy z jednorodnością mieszaniny matrycy i uczulacza podawanej przez modułowe urządzenie pompujące. W materiale widoczne były smugi uczulacza, który nie był poprawnie wymieszany z matrycą, a przebieg reakcji uczulania przebiegał w sposób nierównomierny, co potwierdziły wyniki badań gęstości (rozzrzut wartości dla próbek). W drugim etapie badań (mieszalnik podwójny) wszystkie próbki uczulały się równomiernie, na co wskazuje niewielki rozrzut wyników badań gęstości. Co ważne, gęstości dla odmiany BK-2 już po niecałych 40 min osiągnęły wartość ustaloną. Z kolei gęstość MW typu Emulinit 8L spadała w dalszym ciągu nawet po 180 min. Zmiany gęstości świadczą o przebiegu reakcji uczulania.

Wyniki badań podziemnych wykazały, że prędkości detonacji obu MWE luzem w otworach strzałowych, zarówno w przypadku użycia pojedynczego, jak i podwójnego mieszalnika, są do siebie zbliżone i utrzymują się w granicach niepewności pomiarowej zastosowanego urządzenia pomiarowego. Nie potwierdzono zatem wyników uzyskanych w warunkach

²⁴ Yang M., Ma H., Shen Z. 2019. Effect of RDX powders on detonation characteristics of emulsion explosives. Journal of Energetic Materials, vol. 37(4), s 459–474.

laboratoryjnych, w których prędkości detonacji nowego materiału wybuchowego były większe niż prędkości stosowanego obecnie Emulinitu 8L. Jednakże oba materiały wybuchowe, do wytworzenia których zastosowano podwójny mieszalnik, detonowały z większymi prędkościami niż wytworzone przy użyciu pojedynczego mieszalnika. Wyniki pomiarów kruszności dla odmiany BK-2 są większe niż dla standardowego materiału wybuchowego Emulinit 8L, co w szczególności zostało stwierdzone w drugim etapie badań. Współczynnik kruszności dla składu BK-2 był w tym przypadku o ponad 12% większy niż dla Emulinitu 8L.

Wyniki analizy fragmentacji nie wykazały istotnych różnic pomiędzy MW typu Emulinit 8L i nową odmianą BK-2. Zauważono natomiast znaczną poprawę w rozdrobnieniu urobku dla przodków odpalanych w drugim etapie badań. Potwierdza to, że dokładność mieszania ma istotny wpływ na efekt robót strzałowych. Mając jednak na uwadze, że nowa odmiana MW charakteryzuje się większą lepkością niż aktualnie stosowany Emulinit 8L, nawet podwójny mieszalnik nie zapewnia odpowiedniego wymieszania składników, co powoduje, że nie jest możliwe osiągnięcie w warunkach ruchowych takich parametrów detonacyjnych MW, jakie uzyskano w skali laboratoryjnej.

Można więc przypuszczać, że do poprawy parametrów detonacyjnych nowego materiału wybuchowego wytwarzanego przez urządzenia mieszalniczo-załadowcze pod ziemią konieczne będzie opracowanie i przetestowanie w warunkach ruchowych zakładu górniczego innego sposobu mieszania składników MW, a zatem nowej konstrukcji mieszalnika statycznego. Niemniej przeprowadzone testy ruchowe wskazują niewątpliwie na możliwość poprawy efektywności i bezpieczeństwa wydobywania, ponieważ nowa odmiana MW charakteryzuje się znacznie szybszym, bardziej przewidywalnym i stabilniejszym przebiegiem reakcji uczulania w porównaniu do aktualnie stosowanego MW typu Emulinit 8L. Odmiana BK-2 osiągała znacznie szybciej gęstość ustaloną, która utrzymywała się na tym samym poziomie w czasie. Zastosowanie do prac strzałowych nowego materiału wybuchowego typu BK-2 pozwoli na skrócenie czasu wykonywania robót strzałowych, a także utrzymanie tej samej efektywności niezależnie od czasu, jaki upłynął pomiędzy załadowaniem MW do otworów strzałowych, tj. jego wytworzeniem a odpaleniem.

4.7. Podsumowanie

Za najważniejsze osiągnięcia opisane w przedstawionym cyklu publikacji, które stanowią znaczny wkład w rozwój nauk inżyniersko-technicznych w zakresie bezpiecznego i efektywnego wydobywania złóż techniką strzałową uważam wykazanie, że:

- **reakcja uczulania** materiału wybuchowego emulsyjnego luzem wytwarzanego przez urządzenia mieszalniczo-załadowcze przebiega w sposób nie do końca kontrolowany przez użytkownika, zatem taki sam MW wytworzony i załadowany do otworu strzałowego przy użyciu różnych maszyn może charakteryzować się inną gęstością, co w rezultacie może oznaczać odmienne parametry detonacyjne i wpływać znacząco na końcowy efekt robót strzałowych;
- **ilość dozowanego uczulacza** uzyskana poprzez zmianę prędkości obrotowej pompy uczulacza wpływa na prędkość reakcji sensybilizacji, a jednocześnie na prędkość

detonacji MWE luzem, przy czym najmniejsze gęstości uzyskano przy największej ilości uczulacza, tj. największej prędkości obrotowej pompy; największe prędkości detonacji uzyskano dla próbek pobranych przy najmniejszej prędkości obrotowej pompy, zatem przy najmniejszej ilości uczulacza;

- zwiększanie **średnicy ładunku** MWE luzem w zakresie analizowanych średnic wpływa na wzrost prędkości detonacji, a w przypadku zbyt małej średnicy ładunku, standardowy zapalnik górniczy nie zapewnia przeniesienia detonacji na ładunek zasadniczy MW,
- **średnica otworu strzałowego** ma znaczący wpływ na prędkość detonacji MWE luzem, ale także na stopień rozdrobnienia urobku skalnego, przy czym stosowanie średnic powyżej 51 mm nie powoduje już wzrostu prędkości detonacji;
- **rodzaj środka inicjującego**, o ile jest wystarczający do zainicjowania MWE luzem, nie wpływa na wartości prędkości detonacji stabilnej, ale ma znaczenie na etapie tzw. rozbiegu detonacji, co zapewnia odpowiednią energię początkową wybuchu, ale przede wszystkim ogranicza powstawanie zarówno niewybuchów, jak i tzw. fajek na dnie otworu strzałowego;
- materiał wybuchowy emulsyjny luzem, wbrew powszechnej opinii użytkowników, **nie traci właściwości wybuchowych po 48 godzinach**, ale zachowuje parametry detonacyjne przez co najmniej 6 miesięcy od wykonania ładunków, co utwierdza w przekonaniu, że niedopuszczalne jest wiercenie w otworach strzałowych, w których pozostały resztki niezdetonowanego MW; zaobserwowane spadki prędkości detonacji MWE luzem w okresie pierwszych kilkunastu godzin od wykonania ładunków wskazują, że przodki należy odpalać w możliwie najkrótszym czasie od momentu załadowania otworów, przy zachowaniu minimalnego zalecanego przez producenta czasu wynoszącego 20–30 min;
- **temperatura otoczenia** ma znaczący wpływ na prędkość detonacji MWE luzem, co jest bardzo ważną informacją ze względu na zwiększającą się głębokość eksploatacji złóż rud miedzi w rejonie LGOM, gdzie temperatura pierwotna skał przekracza już lokalnie poziom 50°C; tak wysoka temperatura otoczenia wpływa szczególnie negatywnie na właściwości użytkowe ładunków MWE nabojoyanych z uwagi na istotne zwiększenie ich elastyczności skutkujące blokowaniem ładunków w otworach strzałowych;
- **zapropozowany nowy materiał wybuchowy emulsyjny luzem** charakteryzuje się wyższymi parametrami detonacyjnymi w porównaniu do stosowanego obecnie materiału wybuchowego, znacznie szybszym, powtarzalnym i bardziej przewidywalnym przebiegiem reakcji uczulania w czasie oraz mniejszą zawartością toksycznych produktów wybuchu w gazach postrzałowych;
- **stosowanie pojedynczego mieszalnika** do wytwarzania materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem nie zapewnia odpowiedniego wymieszania składników MW, co wpływa na niejednorodność produktu końcowego oraz uzyskiwane parametry detonacyjne;
- zwiększenie **szybkości uczulania** i związane z tym szybsze **osiągnięcie stałej gęstości** MWE luzem jest możliwe poprzez wdrożenie nowego materiału wybuchowego, który po dopracowaniu sposobu mieszania, może zastąpić stosowany dotychczas MW.

Wyniki uzyskane podczas realizacji badań potwierdziły, że wiele parametrów robót strzałowych w kopalniach rud miedzi LGOM nie zostało jak dotąd zoptymalizowanych i część ładunków odpalanych jest w warunkach, które nie gwarantują odpowiednio dużej efektywności robót strzałowych, zatem ogólnie rzecz ujmując – wydobywania złoża. Dotyczy to zarówno przebiegu reakcji uczulania MWE luzem, ale też wpływu wybranych czynników technologicznych na prędkość detonacji MW, spośród których wyróżnić należy średnice otworów strzałowych, rodzaj środków inicjujących, temperaturę ładunków MW czy też czas, jaki upłynął pomiędzy załadowaniem materiału wybuchowego emulsyjnego luzem do otworów strzałowych, zatem jego wytworzeniem, a odpaleniem.

Wyniki badań pozwoliły na sformułowanie wniosków oraz zaleceń dotyczących bezpiecznego i efektywnego wydobywania złoża techniką strzałową w warunkach podziemnych kopalń rud miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego, co w mojej ocenie, przełoży się na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa, a jednocześnie zwiększenie efektywności robót górniczych. Kluczowe zasady prowadzenia bezpiecznego i efektywnego wydobywania złoża techniką strzałową w komorowo-filarowym systemie eksploatacji sformułowałem następująco:

- każdorazowe rozpoczęcie ładowania przodków MWE luzem należy **bezwzględnie poprzedzać** sprawdzeniem wstępnej reakcji uczulania oraz określeniem gęstości mieszaniny matrycy i uczulacza po ok. 30 min od wytworzenia;
- w przypadku kiedy reakcja uczulania przebiega w sposób nieprawidłowy, tzn. gdy nie zauważa się zmian gęstości mieszaniny matrycy i uczulacza w czasie lub gęstości MWE luzem wykraczają poza zakres optymalny, moduł mieszalniczo-załadowczy należy **poddać obowiązkowej kalibracji**;
- czas pomiędzy ładowaniem MWE luzem do otworów strzałowych a odpaleniem powinien być **możliwie jak najkrótszy**, przy zachowaniu minimalnego zalecanego przez producenta czasu wynoszącego 20–30 min, aby uzyskać wysoką efektywność urabiania;
- w przypadku prowadzenia strzelań odprężających, w których materiał wybuchowy w przodkach odpala się kilka lub kilkanaście godzin po załadowaniu, należy stosować **materiały wybuchowe nabożowane**, których właściwości detonacyjne są stabilniejsze niż materiałów wybuchowych luzem;
- średnice otworów strzałowych, w miarę możliwości, **nie powinny przekraczać 51 mm**, aby zapewnić dłuższą kolumnę MW w otworze oraz lepszą fragmentację urobku;
- do inicjacji ładunków MWE luzem należy **stosować pobudzacze**, które zapewniają odpowiednio duży impuls energetyczny i ograniczają prawdopodobieństwo powstawania tzw. fajek; pobudzacze stosować w szczególności w otworach o dużych średnicach, co pozwoli na względnie osiowe położenie środka inicjującego w otworze oraz właściwe ukierunkowanie energii wybuchu,
- każdy materiał wybuchowy emulsyjny luzem załadowany do otworu strzałowego, a także niewypał, należy **traktować z największą ostrożnością**, ponieważ zachowuje on zdolności detonacyjne przez okres co najmniej 6 miesięcy;

- bezwzględnie zabrania się **wiercenia w otworach** strzałowych lub fajkach, w których znajdują się resztki niezdetonowanego materiału wybuchowego lub niewypały, niezależnie od czasu, jaki upłynął od załadowania materiału wybuchowego;
- nie jest dozwolone **przekraczanie maksymalnego czasu** przebywania MWE nabożowanego w otworze strzałowym, w którym temperatura skał przekracza 50°C;
- nie dopuszcza się stosowania materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem w górotworze, którego **temperatura przekracza 50°C**;
- w przypadku prowadzenia robót strzałowych z wykorzystaniem MWE luzem, do ładowania otworów należy bezwzględnie stosować **dwa mieszalniki** statyczne (lub jeden podwójny), aby zapewnić odpowiednie wymieszanie składników oraz uzyskać zakładane parametry detonacyjne;
- należy możliwe jak najszybciej doprowadzić do **wdrożenia nowego materiału wybuchowego** emulsyjnego luzem, który będzie się charakteryzował wyższymi parametrami detonacyjnymi niż obecnie stosowany MWE typu Emulinit 8L oraz stabilniejszym przebiegiem reakcji uczulania.

Przedstawione w ramach cyklu publikacji **wyniki badań są na bieżąco wykorzystywane** przez służby strzałowe kopalń KGHM Polska Miedź S.A. jako element wspomagający w doborze metryk strzałowych [Z1].

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Od momentu rozpoczęcia pracy naukowej w roku 2009, współpracowałem łącznie z kilkudziesięcioma instytucjami naukowymi lub uczelniami, w zdecydowanej większości zagranicznymi, w ramach wspólnych przedsięwzięć naukowo-badawczych oraz projektów międzynarodowych. Do najważniejszych należą: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Niemcy), Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Francja), Colorado School of Mines (Stany Zjednoczone), Luleå Tekniska Universitet (Szwecja), D'Appolonia Engineering (Stany Zjednoczone), Główny Instytut Górnictwa (Katowice) oraz Wojskowa Akademia Techniczna (Warszawa). Ponadto, w ramach różnych projektów realizowanych z 7. Programu Ramowego, programu Horyzont 2020, a także programu Interreg Baltic Sea, współpracowałem z kilkudziesięcioma firmami, zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi, świadczącymi usługi w zakresie wdrażania innowacyjnych technologii dla przemysłu.

Kluczowe osiągnięcia powyższej współpracy:

- 26 publikacji w czasopismach naukowych,
- 14 referatów wygłoszonych na konferencjach naukowych,
- udział w 1 krajowym i 9 międzynarodowych konsorcjach badawczych.

5.1. Współpraca międzynarodowa

Współpraca z najważniejszymi jednostkami zagranicznymi obejmowała:

1) **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**, Niemcy [V1]

Okres współpracy: od listopada 2011 r. do chwili obecnej

Współpraca dotyczyła i dotyczy opracowywania technologii górniczych, w tym systemów górniczych, maszyn i urządzeń niezbędnych do bezpiecznej i efektywnej eksploatacji złóż w kopalniach głębokich. Większość z nich została z powodzeniem przetestowana w warunkach podziemnych.

Podstawą współpracy były (lub są nadal) poniższe projekty:

- **I²MINE** – Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future (2011–2016) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego; lider projektu: Luossavaara-Kiirunavaara AB (Szwecja);
- **SIMS** – Sustainable Intelligent Mining Systems (2017–2020) finansowany ze środków programu Horyzont 2020; lider projektu: Atlas Copco Rock Drills AB (Szwecja);
- **NEXGEN SIMS** – Next Generation Carbon Neutral Pilots for Smart Intelligent Mining Systems (2021–2024) finansowany ze środków programu Horyzont 2020; lider projektu: Epiroc Rock Drills AB (Szwecja).

2) **Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques**, Francja [V2]

Okres współpracy: od listopada 2011 r. do marca 2016 r.

Współpraca dotyczyła przede wszystkim realizacji wspomnianego wcześniej projektu **I²MINE**, a w szczególności prac w ramach pakietu roboczego WP3 w zakresie geomechaniki i technologii zabezpieczania wyrobisk w kopalniach podziemnych, które koordynowałem. Ponadto, w roku 2013, wraz z instytutem INERIS realizowałem prace związane z systemem monitoringu geotechnicznego i geofizycznego dla kopalń głębokich.

3) **Colorado School of Mines**, Stany Zjednoczone [V3]

Okres współpracy: od czerwca 2010 r. do grudnia 2011 r.

Współpraca dotyczyła przede wszystkim realizacji prac związanych z oceną zagrożenia, które towarzyszy eksploatacji składowisk odpadów przemysłowych, a w szczególności zbiorników poflotacyjnych (stawów osadowych) w przemyśle wydobywczym.

Podstawą współpracy był projekt **IRIS** – Integrated European Industrial Risk Reduction System (2008–2012) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego; lider projektu: VCE Holding GmbH (Austria).

4) **Luleå Tekniska Universitet, Szwecja [V4]**

Okres współpracy: od listopada 2011 r. do chwili obecnej

Współpraca dotyczyła i dotyczy przede wszystkim realizacji wspomnianych już wcześniej projektów, tj. **I²MINE**, **SIMS** oraz **NEXGEN SIMS**. W ramach projektu I²MINE koordynowałem prace związane z realizacją pakietu roboczego WP3, którego zakres obejmował ścisłą współpracę pomiędzy KGHM CUPRUM i LTU. Z kolei w projekcie SIMS, kierowałem pracami związanymi z realizacją zadania 7.1, którego wyniki pośrednie i wyniki prowadzonych prób podziemnych były poddawane ciągłej kontroli prowadzonej przez LTU. W ramach obecnie realizowanego projektu NEXGEN SIMS współpracuję z Uniwersytetem LTU realizując zadania związane z pakietem roboczym WP7.

W ramach współpracy z LTU opracowano wspólnie poniższe publikacje:

- **Mertuszka P.**, Szumny M., Wawryszewicz A., Fuławka K., Saiang D., 2019, Blasting delay pattern development in the light of rockburst prevention – case study from Polish copper mine, Proceedings of the IVth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 14–16 października 2019 r., E3S Web of Conferences, vol. 105. DOI: [10.1051/e3sconf/201910501012](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501012).
- Szumny M., **Mertuszka P.**, Fuławka K., Koziarz E., Saiang D., 2019, Blasting operations using different initiation methods in deep underground mines, Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM Albena, 28 czerwca – 7 lipca 2019 r., vol. 19 (1.3), s. 111–118. DOI: [10.5593/sgem2019/1.3/S03.014](https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.014).
- **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Maślej J., Saiang D., 2019, The effect of the blasthole diameter on the detonation velocity of bulk emulsion explosive in the conditions of selected mining panel of the Rudna mine, Archives of Mining Sciences, vol. 64 (4), s. 725–737. DOI: [10.24425/ams.2019.131062](https://doi.org/10.24425/ams.2019.131062).

5) **D'Appolonia Engineering, Stany Zjednoczone [V5]**

Okres współpracy: od stycznia 2011 r. do października 2012 r.

Współpraca dotyczyła opracowania nowoczesnych zasad i metod oceny ryzyka związanego z eksploatacją Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych „Żelazny Most” dla istniejącego poziomu zapór oraz możliwej dalszej rozbudowy, a także opracowania strategii w zakresie doboru odpowiednich środków łagodzących pozwalających na bezpieczną eksploatację Obiektu w przyszłości. W ramach współpracy koordynowałem prace merytoryczno-administracyjne zespołu projektowego składającego się ze specjalistów z oddziałów spółki D'Appolonia z Belgii, Włoch i Stanów Zjednoczonych oraz pracowników KGHM Polska Miedź S.A.

Z publikacyjnego punktu widzenia, w ramach blisko 14-letniej współpracy z podmiotami zagranicznymi powstało łącznie 12 publikacji, w tym:

- Fuławka K., Pytel W., Szumny M., **Mertuszka P.**, Pałac-Walko B., Hartlieb P., Jakić M., Nöger M., 2022, Prototype of instrumented rock bolt for continuous monitoring of roof fall hazard in deep underground mines, *Sensors*, vol. 23 (1), s. 154.
DOI: [10.3390/s23010154](https://doi.org/10.3390/s23010154).
- Fuławka K., **Mertuszka P.**, Pytel W., Szumny M., Jones T., 2022, Seismic evaluation of the distress blasting efficiency, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14 (5), s. 1501–1513. DOI: [10.1016/j.jrmge.2021.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.010).
- **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Nikolov S., 2020, Field evaluation of mine blasting efficiency, *SWS Journal of Earth Planetary Sciences*, vol. 2 (2), s. 1–15.
DOI: [10.35603/eps2020/issue2.01](https://doi.org/10.35603/eps2020/issue2.01).
- Pytel W., Fuławka K., Pałac-Walko B., **Mertuszka P.**, Kisiel J., Jalas P., Joutsenvaara J., Shekov V., 2019, Universal approach for risk identification and evaluation in underground facilities, *Mining Science*, vol. 27, s. 165–181.
DOI: [10.37190/MSC202712](https://doi.org/10.37190/MSC202712).
- **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Maślej J., Saiang D., 2019, The effect of the blasthole diameter on the detonation velocity of bulk emulsion explosive in the conditions of selected mining panel of the Rudna mine, *Archives of Mining Sciences*, vol. 64 (4), s. 725–737. DOI: [10.24425/ams.2019.131062](https://doi.org/10.24425/ams.2019.131062).
- Baranowski P., Damaziak K., Mazurkiewicz Ł., **Mertuszka P.**, Pytel W., Małachowski J., Pałac-Walko B., Jones T., 2019, Distress blasting of rock mass: multiscale modelling and simulation, *Shock and Vibration*, vol. 2019 (2878969).
DOI: [10.1155/2019/2878969](https://doi.org/10.1155/2019/2878969).
- **Mertuszka P.**, Szumny M., Fuławka K., Nikolov S., 2019, Selected methods of blasting works efficiency assessment, *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, 28 czerwca – 7 lipca 2019 r.*, vol. 19 (1.3), s. 677–684. DOI: [10.5593/sgem2019/1.3/S03.074](https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.074).
- Szumny M., **Mertuszka P.**, Fuławka K., Koziarz E., Saiang D., 2019, Blasting operations using different initiation methods in deep underground mines, *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, 28 czerwca – 7 lipca 2019 r.*, vol. 19 (1.3), s. 111–118.
DOI: [10.5593/sgem2019/1.3/S03.014](https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.014).
- **Mertuszka P.**, Szumny M., Wawryszewicz A., Fuławka K., Saiang D., 2019, Blasting delay pattern development in the light of rockburst prevention – case study from Polish copper mine, *Proceedings of the IVth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 14–16 października 2019 r.*, *E3S Web of Conferences*, vol. 105 (01012).
DOI: [10.1051/e3sconf/201910501012](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501012).

- Pytel W., **Mertuszka P.**, Jones T., Paprocki H., 2018, Numerical simulations of geomechanical state of rock mass prior to seismic events occurrence – case study from a Polish copper mine aided by FEM 3D approach, Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection MPES, Praca zbiorowa pod red. E. Widzyk-Capehart, A. Hekmata i R. Singhala, Santiago, 19–22 listopada 2018 r., s. 417–427. DOI: [10.1007/978-3-319-99220-4_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_34).
- Kisiel J., Budzanowski M., Chorowski M., Cygan S., Dorda J., Hanzel S., Harańczyk M., Horoszczak L., Januszewska K., Jaroń L., Konefał A., Kozak K., Lankof L., Mania S., Markiewicz A., Markowski P., Mazur J., **Mertuszka P.**, Mietelski J., Poliński J., Puchalska M., Pytel W., Raczyński M., Sadecki Z., Sadowski A., Ślizowski J., Sulej R., Szarska M., Szegłowski T., Tomankiewicz E., Urbańczyk K., Zalewska A., 2010, SUNLAB - the project of a Polish underground laboratory, Proceedings of the Carpathian Summer School of Physics, Sinaia, 20 czerwca – 3 lipca 2010 r., vol. 1304, s. 326–330. DOI: [10.1063/1.3527216](https://doi.org/10.1063/1.3527216).
- Zalewska A., Pytel W., Chorowski M., Cygan S., Hanzel S., Januszewska K., Jaroń L., Kisiel J., Lankof L., Markiewicz A., Markowski P., **Mertuszka P.**, Raczyński M., Sadecki Z., Sobczyk J., Sulej R., Szarska M., Ślizowski J., Szegłowski T., Urbańczyk K., 2010, LAGUNA in Polkowice-Sieroszowice mine in Poland, Acta Physica Polonica B, vol. 41 (7), s. 1803–1812.

5.2. Współpraca krajowa

Współpraca z najważniejszymi jednostkami krajowymi obejmowała:

1) **Główny Instytut Górnictwa** w Katowicach [V6]

Okres współpracy: od listopada 2011 r. do chwili obecnej

Współpraca dotyczyła m.in. realizacji prac w ramach przytoczonego wcześniej projektu **I²MINE** finansowanego ze środków 7. Programu Ramowego w latach 2011–2016. Jej zakres obejmował koordynację zadań związanych z technologią zabezpieczania wyrobisk w kopalniach podziemnych. W latach 2012–2015 współpraca ukierunkowana była na zagadnieniu odprężających robót strzałowych w warunkach kopalń rud miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego, którą z ramienia KGHM CUPRUM koordynowałem. Następnie w latach 2017–2021 współpraca skupiała się na projekcie **PROMETEST** finansowanym ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz KGHM Polska Miedź S.A., w ramach którego pełniłem funkcję kierownika zadań oraz koordynowałem prace konsorcjum w zakresie merytoryczno-administracyjnym. Ponadto, od roku 2017 do chwili obecnej, współpracuję ściśle z pracownikami Laboratorium Badań Materiałów Wybuchowych i Zapalników Elektrycznych Kopalni Doświadczalnej „Barbara” (obecnie Jednostki Oceny Zgodności Głównego Instytutu Górnictwa), a od roku 2020 z Zakładem Badań Mechanicznych i Inżynierii Materiałowej.

W ramach współpracy z Głównym Instytutem Górnictwa opracowano łącznie 12 publikacji (10 artykułów w czasopismach naukowych i 2 referaty konferencyjne opublikowane w materiałach konferencyjnych), w tym:

- Pytel W., **Mertuszka P.**, Lurka A., Fuławka K., Szumny M., 2018, Seismic peak particle velocity and acceleration response to mining faces firing in a light of numerical modeling and underground measurements, Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, 30 czerwca – 9 lipca 2018 r., vol. 18, issue 1.3, s. 677–684. DOI: [10.5593/sgem2018/1.3/S03.086](https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.3/S03.086).
- **Mertuszka P.**, Pytlik M., 2019, Wybrane metody oznaczania dokładności opóźnień zapalników. Proceedings of the International Conference „Blasting techniques”, Stará Lesná, 22–24 maja 2019 r., s. 127–136.
- **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Wincenciak J., Wawryszewicz A., 2019, The influence of time on the density and detonation velocity of bulk emulsion explosives – a case study from Polish copper mines. Central European Journal of Energetic Materials, vol. 16 (2), s. 245–258. DOI: [10.22211/cejem/109839](https://doi.org/10.22211/cejem/109839).
- **Mertuszka P.**, Pytlik M., 2019, Analysis and comparison of the continuous detonation velocity measurement method with the standard method. High Energy Materials, tom XI, str. 63–72. DOI: [10.22211/matwys/0182](https://doi.org/10.22211/matwys/0182).
- **Mertuszka P.**, Pytlik M., 2020, Oznaczanie prędkości detonacji wybranych idealnych materiałów wybuchowych przy użyciu metody ciągłej i odcinkowej. Przegląd Górniczy, nr 6/2020, s. 8–14.
- **Mertuszka P.**, Fuławka K., Pytlik M., Szastok M., 2019, The influence of temperature on the detonation velocity of selected emulsion explosives. Journal of Energetic Materials, vol. 38 (3), s. 336–347. DOI: [10.1080/07370652.2019.1702739](https://doi.org/10.1080/07370652.2019.1702739).
- Kramarczyk B., Pytlik M., **Mertuszka P.**, 2020, Effect of aluminum additives on selected detonation parameters of bulk emulsion explosive. High Energy Materials, tom XII, nr 1, s. 99–113. DOI: [10.22211/matwys/0197](https://doi.org/10.22211/matwys/0197).
- Pytel W., **Mertuszka P.**, Fuławka K., Lurka A., Pałac-Walko B., 2021, Resultant axial stresses in instrumented rockbolts induced by dynamic effects occurred due to multi-face blasting in the working areas. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 116, s. 104088. DOI: [10.1016/j.tust.2021.104088](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104088).
- Pytlik M., **Mertuszka P.**, 2021, Determining the timing accuracy of electronic detonators using different methods. High Energy Materials, tom XIII, s. 144–157. DOI: [10.22211/matwys/0211](https://doi.org/10.22211/matwys/0211).
- Kramarczyk B., Pytlik M., **Mertuszka P.**, Jaszcz K., Jarosz T., 2022, Novel sensitizing agent formulation for bulk emulsion explosives with improved energetic parameters. Materials, vol. 15 (3), s. 900. DOI: [10.3390/ma15030900](https://doi.org/10.3390/ma15030900).

- **Mertuszka P.**, Kramarczyk B., Pytlik M., Szumny M., Jaszcz K., Jarosz T., 2022, Implementation and verification of effectiveness of bulk emulsion explosive with improved energetic parameters in an underground mine environment. *Energies*, vol. 15 (17), s. 6424. DOI: [10.3390/en15176424](https://doi.org/10.3390/en15176424).
- Kramarczyk B., **Mertuszka P.**, Pytlik M., Szudeja R., 2022, Determining the brisance of selected emulsion explosives used in mining via the Hess method. *High Energy Materials*, tom XIV, s. 117–134, DOI: [10.22211/matwys/0226](https://doi.org/10.22211/matwys/0226).

2) **Wojskowa Akademia Techniczna** w Warszawie [V7]

Okres współpracy: od kwietnia 2014 r. do chwili obecnej

Współpraca dotyczyła przede wszystkim projektu **PROMETEST** realizowanego w ramach programu CuBR finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz KGHM Polska Miedź S.A. (wraz z przygotowaniem wniosku). W ramach przedmiotowego projektu pełniłem funkcję kierownika zadań oraz koordynowałem prace konsorcjum w zakresie merytoryczno-administracyjnym. Obecnie trwają prace nad wdrożeniem wyników przedmiotowego projektu w formie dostosowania prototypu aplikacji do projektowania metryk strzałowych dla warunków kopalń rud miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego.

W ramach współpracy z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej opracowano wspólnie trzy poniższe publikacje:

- Małachowski J., Pytel W., Damaziak K., Mazurkiewicz Ł., **Mertuszka P.**, Cenian B., 2015, O modelowaniu numerycznym detonacji ładunków materiałów wybuchowych w otworach włomowych. *CUPRUM Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud*, nr 1 (74), s. 95–10.
- Mazurkiewicz Ł., Małachowski J., Baranowski P., Damaziak K., Pytel W., **Mertuszka P.**, 2015, Numerical modelling of detonation in mining face cut-holes. W: Kleiber M. i in. *Advances in Mechanics: Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues*, Wyd. CRC Press, s. 393–396.
- Baranowski P., Damaziak K., Mazurkiewicz Ł., **Mertuszka P.**, Pytel W., Małachowski J., Pałac-Walko B., Jones T., 2019, Destress blasting of rock mass: multiscale modelling and simulation. *Shock and Vibration*, vol. 2019, Article ID 2878969. DOI: [10.1155/2019/2878969](https://doi.org/10.1155/2019/2878969).

5.3. Udział w projektach międzynarodowych i krajowych

Poza wymienionymi wyżej kluczowymi projektami realizowanymi we współpracy z uczelniami lub zagranicznymi instytucjami naukowymi, brałem lub biorę w dalszym ciągu udział w realizacji poniższych projektów w charakterze członka zespołu projektowego:

- **LAGUNA** – Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification and Neutrino Astrophysics (2008–2011) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego; lider projektu: Eidgenoessische Technische Hochschule Zürich (Szwajcaria);
- **LAGUNA-LBNO** – Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations (2011–2014) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego; lider projektu: Eidgenoessische Technische Hochschule Zürich (Szwajcaria);
- **BSUIN** – Baltic Sea Underground Innovation Network (2017–2021) finansowany ze środków programu Interreg Baltic Sea; lider projektu: University of Oulu (Finlandia);
- **illuMINEation** – Bright Concepts for a Safe and Sustainable Digital Mining Future (2020–2023) finansowany ze środków programu Horyzont 2020; lider projektu: Montanuniversitaet Leoben (Austria);
- **AGEMERA** – Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials (2022–2025) finansowany ze środków programu Horyzont 2020; lider projektu: University of Oulu (Finlandia).

Ponadto, w latach 2017–2021 realizowałem prace w ramach krajowego konsorcjum składającego się z pracowników KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie, Głównego Instytutu Górniczego oraz NITROERG S.A. Prace konsorcjum dotyczyły realizacji projektu **PROMETEST** finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz KGHM Polska Miedź S.A. w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia o nazwie CuBR. W projekcie tym pełniłem funkcję kierownika zadań, a także koordynowałem prace konsorcjum w zakresie merytoryczno-administracyjnym.

5.4. Pozyskiwanie projektów międzynarodowych

Od roku 2010 do chwili obecnej podejmuję działania zespołowe mające na celu pozyskiwanie projektów międzynarodowych finansowanych z różnych programów Unii Europejskiej, w tym m.in. z 7. Programu Ramowego, programu Interreg Baltic Sea czy programu Horyzont 2020. Przygotowywanie tego typu wniosków wymaga ścisłej współpracy pomiędzy wieloma uczelniami, instytucjami naukowymi czy przedsiębiorstwami z różnych krajów.

Rezultatem powyższej współpracy było pozyskanie 7 projektów międzynarodowych, w tym:

- **LAGUNA-LBNO** – Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations (2011–2014) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego;
- **I²MINE** – Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future (2011–2016) finansowany ze środków 7. Programu Ramowego;

- **SIMS** – Sustainable Intelligent Mining Systems (2017–2020) finansowany ze środków programu Horyzont 2020;
- **BSUIN** – Baltic Sea Underground Innovation Network (2017–2021) finansowany ze środków programu Interreg Baltic Sea;
- **illuMINEation** – Bright Concepts for a Safe and Sustainable Digital Mining Future (2020–2023) finansowany ze środków programu Horyzont 2020;
- **NEXGEN SIMS** – Next Generation Carbon Neutral Pilots for Smart Intelligent Mining Systems (2021–2024) finansowany ze środków programu Horyzont 2020;
- **AGEMERA** – Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials (2022–2025) finansowany ze środków programu Horyzont 2020.

5.5. Konferencje krajowe i zagraniczne

Od czasu rozpoczęcia pracy naukowej w roku 2009, uczestniczyłem jako prezentujący w **42 konferencjach**, w tym **19 konferencjach zagranicznych** oraz **23 konferencjach krajowych**. Nadmienię, że 16 referatów zaprezentowałem przed uzyskaniem stopnia doktora (w tym 9 na konferencjach zagranicznych i 7 na krajowych), natomiast po uzyskaniu stopnia doktora było to 26 referatów, odpowiednio 10 i 16 na konferencjach zagranicznych i krajowych. Ponadto, byłem współtwórcą prac, na podstawie których pozostali współautorzy wygłosili **27 referatów konferencyjnych**, w tym **15 na konferencjach zagranicznych** i **12 na krajowych**. Wygłosiłem również **12 wykładów na zaproszenie** podczas krajowych i zagranicznych konferencji, warsztatów i seminariów, w tym:

- Szumny M., **Mertuszka P.** Zastosowanie wybranych programów komputerowych do wspomagania robót strzałowych. *XXIV Szkoła Eksploatacji Podziemnej*, Kraków, 23–27 lutego 2015 r.
- **Mertuszka P.** Nowe metody projektowania robót strzałowych wraz z oceną ich efektywności. *Konferencja „Po Pierwsze Bezpieczeństwo”*, Kocierz, 27–29 kwietnia 2016 r.
- **Mertuszka P.** Wpływ wybranych parametrów na zachowanie się MWE luzem na przykładzie Emulinitu 8L. *Konferencja „Materiały Wybuchowe w Górnictwie Podziemnym – Wymagania, Zastosowanie, Bezpieczeństwo”*, Targanice, 5–6 października 2017 r.
- Pytel W., **Mertuszka P.**, Szeptun K. Podatna kotwa spiralna dla wyrobisk górniczych w warunkach głębokiej kopalni. *4. Polski Kongres Górniczy*, Kraków, 20–22 listopada 2017 r.
- **Mertuszka P.** Doświadczenia KGHM CUPRUM z udziału w programach badawczych dedykowanych dla surowców mineralnych. *Dzień informacyjny o surowcach mineralnych*, Wrocław, 16 maja 2018 r.
- **Mertuszka P.**, Fuławka K., Szumny M., Zdrojewski A., Mierzwiak R. Zastosowanie urządzenia MicroTrap do oznaczania czasów opóźnień zapalników. *XII Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Robót Strzałowych”*, Ustroń, 3–5 października 2018 r.

- Szumny M., **Mertuszka P.** Zastosowanie zapalników elektronicznych w nowoczesnym górnictwie. *Konferencja „Materiały Wybuchowe – Aktualne Regulacje Prawne i Zasady Bezpieczeństwa”*, Targanice, 18–19 października 2018 r.
- Pytel W., **Mertuszka P.** Wpływ robót strzałowych na obciążenie obudowy kotwowej w pobliżu czynnych frontów eksploatacyjnych. *International Mining Forum*, Ormontowice, 11–12 kwietnia 2019 r.
- **Mertuszka P.** A novel approach to the rockburst hazard prevention methods based on blasting. *Clustering Workshop Sustainable Low Impact Mining (SLIM) – Best practices in Raw Materials in Europe*, Helsinki, 14 września 2019 r.
- **Mertuszka P.**, Kramarczyk B., Mierzwiak R. Wpływ zawartości uczulacza na gęstość MWE luzem na przykładzie Emulinitu 8L. *Konferencja „Od Profesjonalistów dla Profesjonalistów – Optymalizacja Robót Strzałowych w Górnictwie Podziemnym i Odkrywkowym”*, Ustroń, 17–18 października 2019 r.
- **Mertuszka P.**, Kondol P. Nowe podejście do strzelań odprężających z wykorzystaniem zapalników elektronicznych w warunkach kopalń LGOM. *XXXI Szkoła Eksploatacji Podziemnej*, Kraków, 11–13 kwietnia 2022 r.
- **Mertuszka P.**, Kramarczyk B., Pytlik M. Opracowanie nowatorskiej i ekologicznej formuły materiału wybuchowego emulsyjnego luzem o zwiększonych parametrach detonacyjnych i stabilności chemicznej. *Konferencja „Bezpieczeństwo i optymalizacja prac strzałowych w górnictwie podziemnym”*, Ustroń, 6–7 października 2022 r.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

6.1.1. Zajęcia dydaktyczne

Działalność dydaktyczną realizuję od roku 2016 na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Słuchaczami autorskich **wykładów**, które prowadzę w języku angielskim, są studenci międzynarodowych programów edukacyjnych Socrates-Erasmus oraz polscy studenci anglojęzycznej specjalności studiów magisterskich. Dydaktyka obejmuje okres po uzyskaniu stopnia doktora i dotyczy dwóch kursów [**W1**]:

- *Tunnel and Underground Excavation Design* w roku akademickim 2016/2017, 2017/2018 i 2019/2020,
- *Theory and Practice in Geomechanics* w roku akademickim 2016/2017, 2017/2018 oraz 2021/2022.

Ponadto, w roku akademickim 2013/2014 i 2015/2016 prowadziłem szereg zajęć z przedmiotu *Rock Mechanics* pod nadzorem prof. dr hab. inż. Witolda Pytla [**W2**].

6.1.2. Promotorstwo prac i opieka nad doktorantami

W latach 2018–2019 byłem opiekunem 6 **prac dyplomowych** realizowanych na Wydziale Geoinżynierii Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, w tym 4 magisterskich i 2 inżynierskich. Nadmienię, że jedna z prac magisterskich otrzymała wyróżnienie Dziekana Wydziału. Ponadto w latach 2018–2022 byłem **promotorem pomocniczym** w przewodzie doktorskim. Zestawienie prac przedstawiono poniżej:

Prace magisterskie

- Beata Mitura, *Wpływ wybranych parametrów na zachowanie się materiału wybuchowego emulsyjnego luzem* (2018),
- Kamil Kulesza, *Metodologia prowadzenia badań kontrolnych materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem od momentu wytworzenia do załadowania do otworów strzałowych* (2018),
- Karolina Malińska, *Ocena wpływu średnicy otworu strzałowego na rozdrobnienie urobku na przykładzie oddziału G-3 kopalni „Rudna”* (2019),
- Rafał Michalczyk, *Ocena efektywności zastosowanej metryki strzałowej w warunkach wybranej kopalni odkrywkowej surowców skalnych* (2019),

Prace inżynierskie

- Tomasz Hajtko, *Organizacja robót wiertniczo-strzałowych na przykładzie kopalni „Lubin”* (2018),
- Mateusz Chustecki, *Dobór metryk strzałowych dla typowej furty eksploatacyjnej wybranego oddziału kopalni „Lubin”* (2018).

Rozprawy doktorskie

- mgr inż. Krzysztof Fuławka, *Częstotliwość dominująca oraz składowe rotacyjne drgań sejsmicznych w analizie stateczności skarp* (2022).

6.1.3. Staże naukowe i praktyki studenckie

Poza zajęciami dydaktycznymi oraz promotorstwem na pracami, byłem również opiekunem 4 **staży naukowych** (praktyk studenckich), które odbywały się w Zakładzie Mechaniki Górnotworu KGHM CUPRUM, w tym:

- Jakob Herrmann – Technische Universität Bergakademie Freiberg – praktyka studencka w okresie lipiec–sierpień 2013 r.,
- Anna Dąbek – Uniwersytet Śląski – staż wakacyjny w okresie lipiec–wrzesień 2014 r. w ramach projektu „GEOFUTURE – Geofizyka w gospodarce przyszłości”,
- Maciej Bodlak – Politechnika Wrocławska – zawodowa praktyka studencka w okresie listopad–grudzień 2014 r.,
- Beata Mitura – Politechnika Wrocławska – praktyka studencka w okresie lipiec–wrzesień 2017 r.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

Od marca 2018 r. jestem członkiem **Rady Naukowej KGHM CUPRUM**. W marcu 2022 r. zostałem powołany na członka Rady na kolejną kadencję (2022–2026), w której pełnię funkcję zastępcy Przewodniczącego. W ramach realizacji zadań Rady opiniuję wnioski na wewnętrzne prace badawczo-rozwojowe wraz z podziałem środków na te cele oraz biorę udział w procesie odbioru tych prac, opiniuję wnioski kandydatów na stanowiska naukowe oraz oceniam dorobek naukowy i techniczny pracowników Spółki, biorę udział w wyznaczaniu i opiniowaniu kierunków działalności naukowej, badawczo-rozwojowej i wdrożeniowej Spółki, a także biorę udział w nadzorowaniu współpracy naukowej z podmiotami zewnętrznymi.

Od października 2012 r. do chwili obecnej jestem członkiem **Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa SITG**. W maju 2019 r. objąłem stanowisko wiceprezesa Koła Zakładowego przy KGHM CUPRUM, a w okresie styczeń 2020 r. – grudzień 2021 r. pełniłem obowiązki Prezesa Koła. Nadrzędnym celem realizowanych przeze mnie przedsięwzięć jest krzewienie oświaty i kultury technicznej, a także upowszechnianie doświadczeń w dziedzinie nauki i techniki. Ponadto biorę udział w organizacji spotkań naukowych, sesji plenerowych, seminariów i konferencji będących inicjatywą Zarządu Głównego SITG.

W maju 2021 r. zostałem członkiem **Stowarzyszenia Polskich Inżynierów Strzałowych SPIS**, a w czerwcu 2021 r. podczas Walnego Zjazdu Wyborczego zostałem wybrany na członka władz Stowarzyszenia obejmując stanowisko członka Sądu Koleżeńskiego. Moje działania w Stowarzyszeniu skupiają się głównie na integrowaniu środowiska inżynierów i techników zajmujących się wytwarzaniem, obrotem i badaniami środków strzałowych. W ramach działań Sądu odpowiadam za rozstrzyganie ewentualnych sporów powstałych między członkami Stowarzyszenia w związku z ich działalnością.

W czerwcu 2022 r. zostałem powołany na członka Sekcji Górnictwa Podziemnego Rud Miedzi **Komitetu Górnictwa Polskiej Akademii Nauk** na kadencję 2020–2023, który podejmuje wszelkie działania służące rozwojowi nauk górnictwych oraz wykorzystaniu ich osiągnięć dla dobra kraju [Z2].

Od roku 2017 jestem nieprzerwanie **rzecznikiem Wyższego Urzędu Górniczego** do spraw ruchu zakładu górnictwa w grupie XII – roboty strzałowe, grupie XIII – obudowy kotwowe oraz grupie XXI – badania rozwiązań technicznych poprzedzających wprowadzenie nowych systemów eksploatacji rud miedzi, cynku i ołowiu lub odmian tych systemów.

Jestem również członkiem **Komitetu Redakcyjnego Czasopisma Naukowo-Technicznego Górnictwa Rud CUPRUM** (5 pkt zgodnie z rozporządzeniem MNiSW z dnia 22.02.2019 r. w sprawie ewaluacji jakości działalności naukowej) oraz czasopisma *Central European Journal of Energetic Materials* (70 pkt MNiSW, IF 1,104), a także członkiem **Rady Naukowej** czasopisma *Materiały Wysokoenergetyczne – High Energy Materials* (20 pkt MNiSW).

Ponadto, byłem członkiem **Komitetu Naukowego XVII Międzynarodowej Konferencji Naukowej IPOEX nt. Materiały Wybuchowe: Badania – Zastosowanie – Bezpieczeństwo**, która odbywała się w dniach 13–15 czerwca 2022 r. w Ustroniu. W listopadzie 2022 r. zostałem powołany na członka **Komitetu Organizacyjnego XLIV Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii**, która odbędzie się w dniach 20–23 marca 2023 r. w Karpaczu.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę

W ramach działalności popularyzujących naukę lub sztukę w latach 2012–2016 byłem opiekunem oraz prowadziłem **zajęcia terenowe** dla studentów Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej oraz dla grup studentów zagranicznych programów edukacyjnych, które odbywały się m.in. w kopalni migmatytu i amfibolitu w Piławie Górnej, podziemnym magazynie gazu w Wierzchowicach oraz kopalniach rud miedzi należących do KGHM Polska Miedź S.A. – Rudna i Polkowice-Sieroszowice.

Ponadto opiekowałem się gośćmi z zagranicznych jednostek naukowych i przemysłu w trakcie szeregu **wyjazdów technologicznych** do Oddziałów Górniczych KGHM Polska Miedź S.A., podczas których omawiałem problemy związane z eksploatacją złóż rud miedzi w Polsce. Najważniejszymi były: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Montanuniversität Leoben, Luleå Tekniska Universitet, McGill University, Kazakhmys Services Limited, SRK Consulting czy Bochumer Eisenhütte.

W latach 2009–2022 brałem aktywny udział w **konferencjach, sympozjach i warsztatach**, zarówno krajowych, jak i zagranicznych. Wygłosiłem podczas nich łącznie 42 prezentacje (wykłady, referaty), z czego 16 przed doktoratem i 26 po uzyskaniu stopnia doktora. Niewielką przewagę w całkowitej liczbie konferencji stanowią konferencje zagraniczne. Nadmienię, że wygłosiłem również 12 wykładów na zaproszenie podczas krajowych i zagranicznych konferencji, warsztatów i seminariów [X1–X12]. W okresie tym uzyskałem również ogólny dorobek naukowy w postaci 93 publikacji, w tym artykułów w czasopismach naukowych, materiałach konferencyjnych oraz rozdziałów w monografiach, z czego 16 znajduje się na tzw. Liście Filadelfijskiej. Uzupełnieniem dorobku naukowego jest monografia mojego autorstwa nt. „Materiały wybuchowe emulsyjne w polskim górnictwie rud miedzi” wydana w roku 2019 przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Wrocławskiej.

Od roku 2017 współpracuję z wydawnictwami czasopism naukowych w roli **recenzenta**. Uczestniczę aktywnie w dyskusjach nad problemami badawczymi innych autorów. W ostatnich pięciu latach wykonałem 37 recenzji artykułów naukowych, zarówno dla czasopism krajowych, jak i zagranicznych. Spośród nich 18 dla czasopism indeksowanych na liście *Journal Citation Reports* i posiadających Impact Factor, w tym 4 dla czasopisma *Central European Journal of Energetic Materials* (IF 1,104), 4 dla czasopisma *Mining, Metallurgy & Exploration* (IF 1,695), 3 dla czasopisma *Shock and Vibration* (IF 1,616), 2 dla czasopisma *Minerals* (IF 2,818), 2 dla czasopisma *Journal of Energetic Materials* (IF 2,421) oraz po jednej dla czasopism *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* (IF 2,485), *Applied Sciences* (IF 2,838) i *Sustainability* (IF 3,889). Recenzje artykułów w czasopismach krajowych obejmowały *Przegląd Górniczy*, *Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud CUPRUM*, *Materiały Wysokoenergetyczne*, *Studia Geotechnica et Mechanica* i *Journal of Sustainable Mining*.

Wyniki prowadzonych przeze mnie prac naukowych zostały kilkakrotnie **wyróżnione podczas konferencji** międzynarodowych. W roku 2017 podczas 17. międzynarodowej interdyscyplinarnej konferencji naukowej z zakresu nauk o ziemi i nauk planetarnych SGEM, która odbywała się w Albenie (Bułgaria), wygłoszony przeze mnie referat nt. „*Blasting Parameters Alternate Selection as a Tool for Elastic Wave Effect Amplification at Potentially Instable Locations*”

Within Main Roof Strata” został nagrodzony **kryształową statuetką** w konkursie na najlepszą prezentację w sesji „Exploration and Mining” [Y1]. Na tej samej konferencji organizowanej w roku 2019 za referat nt. „*Selected Methods of Blasting Works Efficiency Assessment*” otrzymałem ponownie **kryształową statuetkę** [Y2]. W latach 2015–2016 podczas międzynarodowego forum młodych naukowców, które odbywały się w Sankt Petersburgu (Rosja), otrzymałem dwukrotnie wyróżnienia za wygłoszone referaty, tj. **III miejsce** w roku 2015 za referat nt. „*Safety of the Blasting Works in LGOM Mines Conditions*” zaprezentowany w sesji „Integrated development of deposits and advanced processing of solid (including coal and shale) minerals” [Y3] oraz **I miejsce** w roku 2016 za referat nt. „*The Influence of Timing on Crack Developments Within Blastholes*” wygłoszony w sesji „Development of solid minerals deposits and safety of mining operations” [Y4].

W roku 2016 otrzymałem **nagrodę honorową** Słowackiego Stowarzyszenia Robót Strzałowych i Wiertniczych za referaty wygłoszone w latach 2013–2015 podczas międzynarodowych konferencji „Blasting Techniques”, które odbywają się cyklicznie w miejscowości Stará Lesná na Słowacji [Y5].

Za artykuł nt. „*Doświadczenia Zakładów Górniczych Polkowice-Sieroszowice z wykonywania szybków techniką strzałową*” otrzymałem **I nagrodę** zespołową w konkursie im. prof. Bolesława Krupińskiego za najlepszy artykuł opublikowany w roku 2015 na łamach *Przeglądu Górniczego* upowszechniający doświadczenia kopalń podziemnych w zakresie działań skutkujących poprawą bezpieczeństwa górniczego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż. Współautorami artykułu był Bogusław Cenian z kopalni Polkowice-Sieroszowice oraz prof. Witold Pytel z KGHM CUPRUM [Y6].

Za liczbę publikacji i liczbę punktów uzyskanych z tych publikacji w roku 2015 otrzymałem wspólnie z prof. Witoldem Pytlem **II nagrodę** zespołową Prezesa Zarządu KGHM CUPRUM [Y7]. W roku 2014 otrzymałem **nagrodę Zarządu KGHM CUPRUM** za realizację I etapu projektu nt. „*Optymalizacja geometrii otworów włomowych dla maksymalizacji zasięgu strefy spękań w warunkach polskich kopalń miedzi*” w ramach funduszy przeznaczonych na działalność statutową. W roku 2015 ponownie otrzymałem nagrodę Zarządu za realizację II etapu tego projektu [Y8–Y9].

W roku 2015 za projekt nt. „*Podatna kotwa spiralna dla wyrobisk górniczych w warunkach głębokiej kopalni*” otrzymałem zespołowe **wyróżnienie** w Ogólnopolskim Konkursie im. Stanisława Staszica za najlepsze produkty innowacyjne „Laur Innowacyjności 2015” organizowanym przez Naczelną Organizację Techniczną pod patronatem Ministerstwa Gospodarki, Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Ministerstwa Spraw Zagranicznych [Y10].

Uchwałą Zarządu Głównego Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Naczelnej Organizacji Technicznej, w grudniu 2020 r. otrzymałem tytuł **Eksperta NOT**, który stanowi potwierdzenie wysokich kwalifikacji, tj. wiedzy, umiejętności i kompetencji społecznych w dziedzinie nauk technicznych [Y11].

W grudniu 2021 r. otrzymałem **Honorowy Kordzik Górniczy** jako nagrodę za nienaganną postawę, szczególne osiągnięcia oraz zaangażowanie pracownicze [Z3]. Ponadto, w październiku 2022 r. decyzją Ministra Aktywów Państwowych otrzymałem **stopień górniczy** Dyrektora Górniczego II stopnia, będący honorowym wyróżnieniem górniczym [Z4]. W grudniu 2018 r. otrzymałem **medal** „Zasłużony Pracownik KGHM CUPRUM”, a postanowieniem Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 25 października 2019 r. zostałem odznaczony **medalem** brązowym za długoletnią służbę. Z kolei we wrześniu 2022 r. zostałem wyróżniony **odznaką** Zasłużonego Działacza Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa.

W ramach **spotkań edukacyjnych** dotyczących trudu pracy górniczej byłem trzykrotnie zaproszony do jednostek oświatowych, aby poszerzyć wiadomości dzieci na temat ciężkiej i niebezpiecznej pracy górnika. Spotkania odbyły się: (1) w roku 2009 w Przedszkolu nr 36 im. Wandy Chmielowskiej we Wrocławiu, (2) w roku 2010 w Niepublicznym Przedszkolu „Mały Twórca” we Wrocławiu i (3) w roku 2018 w Szkole Podstawowej nr 71 we Wrocławiu.

W latach 2017–2019 byłem członkiem **Komisji Opiniującej** wnioski o finansowanie badań ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach dotacji statutowej (Fundusz Działalności Statutowej) oraz w ramach Funduszy Wewnętrznych KGHM CUPRUM. Prace w przedmiotowej Komisji obejmowały kwalifikacje wniosków do finansowania wraz z podziałem środków finansowych, a także ocenę merytoryczną zrealizowanych prac badawczych.

7. Inne ważne informacje dotyczące kariery zawodowej wnioskodawcy, poza wymienionymi w pkt 1–6.

7.1. Omówienie pozostałych osiągnięć nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Główne osiągnięcie naukowe uzupełnia uzyskany dorobek publikacyjny w postaci artykułów w krajowych i międzynarodowych czasopismach naukowych, materiałach konferencyjnych oraz rozdziałów w monografiach. Powyższy dorobek można przyporządkować do dwóch zasadniczych obszarów, tj. szeroko rozumianej **geomechaniki** (stateczność wyrobisk podziemnych, profilaktyka tąpniowa, zagrożenia geomechaniczne) oraz **techniki strzałowej** (materiały wybuchowe, dobór parametrów strzelań, ocena jakości środków strzałowych).

Zagadnienia związane z urabianiem złóż w kopalniach rud miedzi LGOM analizowane były m.in. z punktu widzenia przyjętego systemu eksploatacji. Wyniki tego rodzaju analizy przedstawione zostały w pracy [E3]. Ocena obejmowała eksploatację złoża w kierunku zrobów i stref upodatnionych z uwzględnieniem warunków górniczo-geologicznych w wybranych polach eksploatacyjnych. Wyniki potwierdziły, że w analizowanych oddziałach nie nastąpił istotny wzrost zagrożenia wstrząsami i zawałami, a przyjęty sposób eksploatacji wpłynął korzystnie na poprawę warunków stateczności stropu. Ponadto stwierdzono, że przy zachowaniu odpowiedniej profilaktyki, możliwe jest prowadzenie zarówno bezpiecznego wybierania złoża, jak i ograniczenie skutków zjawisk sejsmicznych o charakterze dynamicznym.

Analizy numeryczne były jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych przez mnie od roku 2009 do oceny zagrożeń geomechanicznych towarzyszących eksploatacji złoża w kopalniach LGOM czy oceny zachowania się górotworu w trakcie prowadzonych robót. Wyniki tego rodzaju analiz zostały przedstawione m.in. w pracy [F4], w której metody numeryczne wykorzystano do oceny możliwości wystąpienia wstrząsu górotworu. Celem analizy było określenie stanu naprężeń i odkształceń w górotworze oraz sprawdzenie czy przy danej geometrii wyrobisk istniały przesłanki o możliwości pojawienia się niestateczności ponad stropem wyrobisk. Wyniki analizy wskazują, że przedstawione podejście może być podstawą do określania obszarów, w których istnieje zagrożenie utraty stateczności, na co wskazują obliczone numerycznie wartości zapasów bezpieczeństwa. W pracy [I24] z kolei zostało przedstawione podejście analogiczne, przy czym podstawą podjętych analiz było wystąpienie serii wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych, których epicentra zlokalizowane były w pobliżu filara zamykającego. Dlatego też zidentyfikowano warunki geomechaniczne w czasie poprzedzającym wystąpienie wybranych wstrząsów, co miało na celu zweryfikowanie, w jakim stopniu postęp eksploatacji, a zatem także geometria wyrobisk, mogły wpływać na wystąpienie zjawisk sejsmicznych. Wyniki analiz potwierdziły, że niskie wartości współczynników bezpieczeństwa we wszystkich rozpatrywanych przypadkach wskazywały na zwiększone ryzyko pojawienia się niestateczności. Co ważne, wskazane obszary zwiększonego zagrożenia utratą stateczności pokrywają się z rzeczywistym zasięgiem zniszczeń w obrębie wyrobisk.

Podejście symulacyjne zaprezentowane w pracy [I40] pozwoliło na ocenę geomechanicznych problemów towarzyszących eksploatacji złoża płaskiego lub o niewielkim nachyleniu przy użyciu jednoetapowego systemu komorowo-filarowego oraz systemu ścianowego z ugięciem stropu. Chodziło zatem o określenie zapasów bezpieczeństwa w warstwach zlokalizowanych ponad stropem wyrobisk i ocenę możliwości wystąpienia niestateczności w tych warstwach. Analizowano także stan zagrożenia w przypadku podparcia stropów wyrobisk kasztami drewnianymi, podporami typu TekPak oraz przy zastosowaniu podsadzki zestalanej. Wyniki potwierdziły, że dla założonych warunków górniczo-geologicznych (tj. w rejonie działania wzmożonych ciśnień górotworu), wyliczone rozkłady wartości zapasów bezpieczeństwa wskazują na realne zagrożenie tapaniami w przypadku wybierania złoża systemem ścianowym bez wypełniania przestrzeni wybranej podsadzką charakteryzującą się wysoką efektywnością. Ponadto, upodatkowanie calizny na froncie eksploatacji, typowe dla technologii komorowo-filarowej, prowadzi do radykalnego zmniejszenia zagrożenia tapaniowego i zawałowego.

Kolejnym elementem działań w obszarze geomechaniki była szeroko rozumiana stateczność wyrobisk podziemnych. Prace w tym zakresie obejmowały przede wszystkim pomiary i obserwacje zachowania się stropu przy użyciu różnych urządzeń pomiarowych, ale także prace nad nowymi systemami obudowy. W publikacji [F2] przedstawiono charakterystykę autorskiego systemu obserwacji stropu bezpośredniego opierającego się na wklejanej kotwie oprzyrządowanej. Obejmowała ona podstawowe założenia systemu wraz ze sposobem wykonania i montażu tensometrów, a także wyniki pilotażowych pomiarów przeprowadzonych w rejonie aktywnego sejsmicznego oddziaływania górniczego kopalni „Lubin”. Dane pozyskiwane z długoterminowych pomiarów podziemnych przy użyciu tych kotew były następnie poddawane szczegółowej analizie, m.in. z punktu widzenia zagrożenia zawałowego, wpływu

wstrząsów sejsmicznych na zachowanie się kotew czy też z punktu widzenia wpływu robót strzałowych na zachowanie się obudowy kotwowej. I tak w pracy [I21] przeprowadzono ocenę wpływu oddziaływania drgań generowanych odpalaniem ładunków MW w przodkach na stan obudowy kotwowej i zagrożenie zawałowe. Chodziło zatem o zweryfikowanie czy strzelania grupowe przodków mogą wpływać negatywnie na stan obudowy kotwowej. Analiza opierała się głównie na symulacjach numerycznych, ale wyniki skonfrontowano z wartościami naprężeń zmierzonymi za pomocą kotew oprzyrządowanych. Pomimo niewielkiej populacji danych wejściowych, wyniki wskazują na brak istotnego wpływu strzelań grupowych na zagrożenie zawałowe w warstwach stropu bezpośredniego. Wykazano również, że metody numeryczne mogą być wykorzystywane do określania rozkładu naprężeń w stropie bezpośrednim w wyniku prowadzonych robót strzałowych.

W pracy [I34] wykorzystano ponownie dane z pomiarów naprężeń w żerdziach kotew uzyskanych przy użyciu kotew oprzyrządowanych. W tym przypadku chodziło o weryfikację wpływu wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w bliskim polu falowym na zmiany wartości naprężeń w żerdziach kotew. Analiza potwierdziła, że zagrożenie zawałowe jest ściśle związane z lokalizacją wstrząsów, nawet jeśli są to wstrząsy o stosunkowo małej energii. Wstrząsy wysokoenergetyczne z kolei nie powodowały znaczących zmian naprężeń w kotwach. Najbardziej obszerna analiza danych uzyskanych z rejestracji naprężeń na kotwach oprzyrządowanych została jednak przedstawiona w pracy [F25]. Celem przeprowadzonych analiz było sprawdzenie, czy – i ewentualnie w jakim stopniu – grupowe strzelania odprężające wpływają na stan obudowy kotwowej. W związku z tym dokonano korelacji statystycznej pomiędzy zmierzonymi naprężeniami osiowymi na żerdziach kotew i szacowanymi wartościami PPV od robót strzałowych. Wyniki przeprowadzonej analizy potwierdziły, że w warunkach górniczo-geologicznych analizowanego pola eksploatacyjnego, jednoczesne odpalenie grup przodków nie prowadzi do znaczących stałych zmian wartości mierzonych naprężeń osiowych we wklejanych kotwach oprzyrządowanych. Dlatego też nie ma żadnych przeciwwskazań, aby kontynuować prace w zakresie metod prowadzących do wzmocnienia fali sejsmicznej generowanej robotami strzałowymi w celu zwiększenia efektywności aktywnych metod profilaktyki tapaniowej.

Problem związany z aktywnością sejsmiczną i sposobami poprawy efektywności metod profilaktycznych w kopalniach rud miedzi LGOM był przedmiotem wieloletnich badań, których wyniki zaprezentowane zostały w szeregu publikacji. Obejmowały one zarówno podejścia analityczne, symulacje komputerowe, jak i wyniki prób ruchowych nowych metod profilaktycznych. W pracy [F7] przedstawione zostały analizy dotyczące wpływu wybranych metod profilaktycznych na aktywność sejsmiczną w wybranym polu eksploatacyjnym kopalni „Rudna”. Oceniono zależność aktywności sejsmicznej od tempa eksploatacji, wielkości otwarcia przestrzeni roboczej oraz prowadzonych strzelań odprężających. Stwierdzono, że każdy z tych parametrów wpływa na poziom aktywności sejsmicznej. Szczególny problem zauważa się jednak w przypadku aktywnych metod profilaktycznych, których efektywność, pomimo podejmowania wieloletnich prób poprawy ich skuteczności, utrzymuje się nadal na stosunkowo niskim poziomie.

W związku z powyższym podejmowano szereg prób mających na celu poprawę efektywności grupowych strzelań odprężających. Jednym z rozpatrywanych rozwiązań było precyzyjne odpalanie ładunków MW przy użyciu zapalników elektronicznych. Wprowadzenie do tego zagadnienia zostało przedstawione w pracy [E6]. Z uwagi na początkowy brak narzędzi do testowania rozpatrywanych rozwiązań, prowadzono jedynie rozważania teoretyczne przy użyciu narzędzi numerycznych. Chodziło o próby zasymulowania rozkładów fali sejsmicznej wzbudzanej robotami strzałowymi. Ponieważ zjawisko to, z uwagi na szybkozmienny charakter, jest bardzo trudne do zasymulowania, wprowadzano pewne uproszczenia, co zaprezentowano m.in. w pracy [H20]. Potwierdzono jednak numerycznie, że istnieje wyraźny związek pomiędzy zastosowanym opóźnieniem, a charakterystyką wyzwolonej fali sejsmicznej.

Bardziej szczegółową analizę problemu przedstawiono w pracy [I6], w ramach której przeprowadzono symulację odpalania grup przodków różniące się liczbą przodków oraz przyjętymi opóźnieniami pomiędzy przodkami. Analizowanym parametrem była zmiana zapasów bezpieczeństwa w czasie w obszarze, w którym może dojść do utraty stateczności. Wyniki potwierdziły, że takie podejście może mieć zastosowanie w strzelaniach odprężających, które ukierunkowane są na zwiększenie amplitudy drgań fali sejsmicznej w miejscach zagrożonych utratą stateczności. Ponadto, zmiana liczby przodków, ich rozmieszczenie oraz zastosowane opóźnienia pomiędzy przodkami wpływają na rozkład zapasów bezpieczeństwa, co potwierdzały również wyniki kolejnych prac analitycznych w tym zakresie [I11].

W międzyczasie kontynuowano prace mające na celu zwiększenie wiarygodności wyników uzyskiwanych przy użyciu symulacji numerycznych. W tym celu przeanalizowano wpływ przyjętej do modelu numerycznego wartości częstotliwości, zakładanej jako dominująca, wokół której poszukiwano rozwiązań numerycznych. Wyniki analiz przedstawiono w pracy [I20]. Potwierdziły one, że wartość przyjętej częstotliwości wpływa na wartości szczytowe prędkości i przyspieszeń drgań. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że wartości PPV wzrastają wraz ze wzrostem przyjętej wartości częstotliwości. Z kolei w pracy [I19] podjęto próbę zasymulowania wartości szczytowych PPV generowanych robotami strzałowymi oraz ich porównania z wartościami zarejestrowanymi *in situ* przy użyciu trójskładowych geofonów. Uzyskane wyniki wskazują, że właściwe odzwierciedlenie źródła drgań pozwala na symulowanie wartości parametrów PPV z zadowalającą dokładnością.

Po wieloletnich próbach symulacji zjawiska odpalania ładunków MW w przodkach nawiązano współpracę z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie, której wynikiem była m.in. praca [F12]. Pozwoliła ona na wypracowanie bardziej wiarygodnego niż dotychczas sposobu symulacji strzelań odprężających. Zaproponowane podejście łączyło ze sobą dwa rozwiązania, tj. analizę w skali otworu strzałowego lub grupy otworów, a także analizę w skali makro, tzn. skali pola lub oddziały eksploatacyjnego. Wyniki analiz potwierdziły, że przyjęte podejście do symulowania zachowania się górotworu poddanego obciążeniu dynamicznemu w formie strzelań grupowych, może być z powodzeniem stosowane jako element profilaktyki tąpaniowej w kopalniach podziemnych. Wyznaczone numerycznie prędkości drgań fali sejsmicznej praktycznie pokrywają się z przebiegami zmierzonymi przy użyciu czujników zainstalowanych pod ziemią, co potwierdza wiarygodność przyjętej metody.

W celu potwierdzenia wcześniejszych założeń, że zapalniki elektroniczne mogą przyczynić się do zwiększenia amplitudy drgań generowanych robotami strzałowymi, przeprowadzono analizę zapisów sejsmicznych ze strzelań testowych pod ziemią z wykorzystaniem zapalników elektronicznych i klasycznych zapalników nieelektrycznych. Wyniki przedstawiono w pracy [I30]. Analiza wskazuje na bardzo istotne różnice w strukturach sejsmogramów, zarówno w zakresie wartości szczytowych, jak i charakterystyk częstotliwościowych. Wartości parametru PPV przy strzelaniu z zapalnikami elektronicznymi są zdecydowanie większe, a jednocześnie widocznie skumulowane wokół dwóch częstotliwości. Potwierdza to zasadność stosowania zapalników elektronicznych do „zwiększenia” źródła drgań. Ostatnim elementem wymagającym zweryfikowania przed przystąpieniem do prób ruchowych nowej metody odprężania górotworu było sprawdzenie, jak skrócenie całkowitego czasu odpalania przodka wpłynie na poprawność jego urobienia. Metodę prób podziemnych oraz uzyskane wyniki przedstawiono w pracy [I35]. Ocena opierała się na określeniu kształtu usypu urobku, a także stopniu jego rozdrobnienia dla przodków odpalonych standardowymi metrykami, tj. przy użyciu zapalników półsekundowych oraz metrykami zmodyfikowanymi, w których do inicjacji MW we wszystkich otworach zastosowano zapalniki milisekundowe. Wyniki potwierdziły, że skrócenie czasu odpalania przodka nie wpływa istotnie na jego prawidłowe urobienie w zakresie uzyskanego zabioru i stopnia rozdrobnienia, choć urobek uzyskany przy użyciu zapalników milisekundowych był drobniejszy niż w przypadku zapalników półsekundowych i ułożony na znacznie większej odległości od przodka niż przy zapalnikach półsekundowych.

Próby ruchowe nowej metody odprężania górotworu w warunkach kopalń KGHM Polska Miedź S.A. przeprowadzono w rejonie 3 pól eksploatacyjnych, po jednym w każdym z Oddziałów Górniczych, przy czym próby w kopalni „Polkowice-Sierszowice” traktowane były jako testowe. Wyniki przedstawione w pracy [F29] potwierdzają, że stosowanie zapalników elektronicznych do inicjacji ładunków MW w otworach włomowych pozwala na maksymalizację ładunku MW na opóźnienie z bardzo wysoką dokładnością. Robotami strzałowymi spowodowano łącznie sześć wstrząsów i choć ich energia była stosunkowo niska, wystąpiły one w momencie odpalania grup przodków lub też w czasie wyczekiwania po robotach strzałowych, zatem formalnie zakwalifikowano je jako wstrząsy spowodowane.

Powyższe podejście ma jednak pewne ograniczenia, ponieważ brak wstrząsu może wskazywać, że strzelania odprężające były nieefektywne. Dlatego też poszukiwano rozwiązań, które pozwolą na bardziej szczegółową ocenę ilościową, zatem umożliwiającą nie tylko potwierdzić, że doszło do zjawiska sejsmicznego, ale jakie były wskaźniki sejsmiczne poszczególnych robót strzałowych. W tym celu prowadzono szczegółowe analizy efektu sejsmicznego strzelań grupowych w warunkach kopalń LGOM w oparciu o analizę sygnałów sejsmicznych zawierających zapisy drgań indukowanych robotami strzałowymi. W oparciu o szczegółową analizę przedstawioną w pracy [F11] stwierdzono, że istnieje możliwość takiej konfiguracji opóźnień odpalania poszczególnych przodków, aby w sposób istotny wzmocnić efekt sejsmiczny, a tym samym zwiększyć skuteczność aktywnych metod profilaktyki tąpaniowej. Zatem nie można zgodzić się z powszechnie panującą opinią, że im więcej przodków jest odpalonych w ramach grupowych strzelań przodków, tym możliwość spowodowania wstrząsu sejsmicznego jest większa.

Dlatego też w oparciu o wyniki wieloletnich prac w tym zakresie opracowano metodę oceny efektywności strzelań odprężających dla kopalń podziemnych, która opiera się na analizie zapisów sejsmicznych generowanych robotami strzałowymi w bezpośrednim otoczeniu pola eksploatacyjnego. Metoda uwzględnia szereg parametrów charakteryzujących roboty strzałowe, w tym m.in. ilość materiału wybuchowego, liczbę odpalanych przodków, rodzaj metryki strzałowej, a także rozkłady opóźnień zapalników w obrębie przodka i grupy przodków. Pozwala ona uwzględnić w analizie amplitudę, częstotliwość dominującą oraz czas trwania drgań sejsmicznych, dlatego też uzyskane wartości wskaźnika efektywności strzelań grupowych odzwierciedlają rzeczywiste warunki propagacji fali sejsmicznej pod ziemią. Metoda ta opisana została w pracy [F27]. Zaproponowane rozwiązanie charakteryzuje się dużą wiarygodnością wyników, ponieważ uwzględnia wiele parametrów opisujących zarówno roboty strzałowe, jak i lokalne warunki górniczo-geologiczne. Lokalny efekt sejsmiczny w tej metodzie można rozpatrywać zarówno w ujęciu amplitudowym, jak i amplitudowo-czasowo-częstotliwościowym.

Wszystkie przedstawione powyżej problemy geomechaniczne mają bardzo wysoki potencjał mogący przyczynić się do prowadzenia bezpiecznego i efektywnego wydobywania złoża przy komorowo-filarowym systemie eksploatacji. Obecnie kontynuowane są prace w zakresie zwiększenia efektywności robót strzałowych i możliwości sterowania drganiami, które wzbudzone są detonacją MW w otworach strzałowych. W tym celu w jednym z aktywnych pól eksploatacyjnych kopalni „Lubin” zabudowany został ciągły system monitoringu zagrożenia tąpniowego z wykorzystaniem kotew oprzyrządowanych i akcelerometrów. Z uwagi na złożoność systemu i wysokie ceny podzespołów na rynku półprzewodników, prowadzono badania mające na celu określenie możliwości zastosowania alternatywnych czujników pomiarowych do rejestracji drgań pochodzących od robót strzałowych. W tym celu zastosowano czujniki typu MEMS, które na czas pomiarów zabudowano w komorze sejsmicznej pod ziemią. W pracy [F28] przedstawiono wyniki testów porównawczych, które polegały na analizie zapisów sejsmicznych wzbudzanych robotami strzałowymi uzyskanymi przy użyciu czujników wchodzących w skład kopalnianej sieci sejsmicznej oraz akcelerometrów typu MEMS. Wyniki analiz potwierdziły, że nisko kosztowe czujniki typu MEMS pozwalają na uzyskanie wiarygodnych zapisów drgań parasejsmicznych i mogą być z powodzeniem stosowane do oceny efektu strzelań odprężających w warunkach kopalń podziemnych.

7.2. Dane naukometryczne

Do określenia zbiorczych wskaźników bibliometrycznych wykorzystano bazę *Web of Science* oraz *Scopus*. Rozkład cytowań w poszczególnych latach w oparciu o te bazy przedstawiono na rys. 14–15. Liczba cytowań na dzień 9 stycznia 2023 r. wynosi:

- 84 (**63** bez autocytowań) według bazy Web of Science,
- 147 (**98** bez autocytowań) według bazy Scopus.

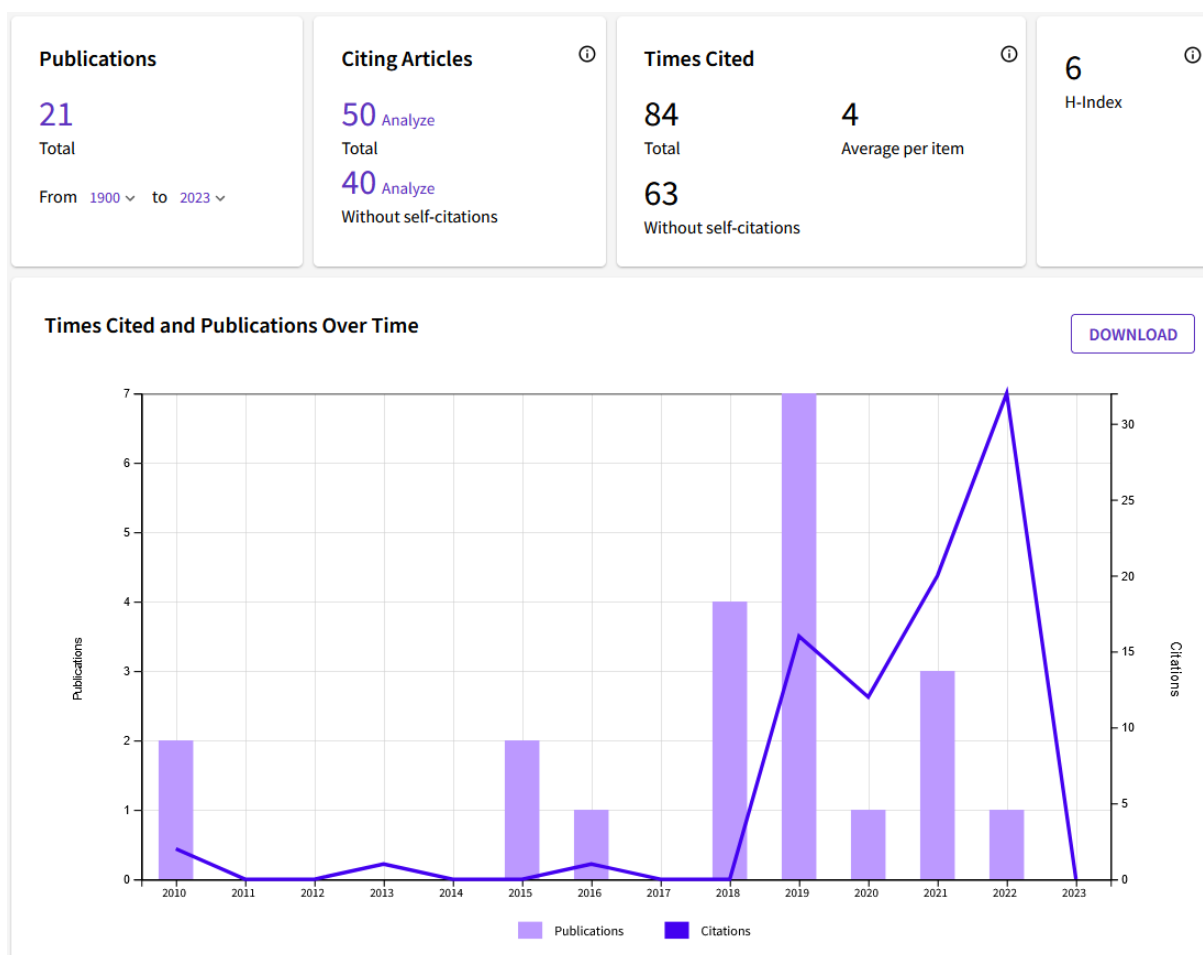
Sumaryczny wskaźnik Impact Factor został określony zgodnie z wartością tego wskaźnika obowiązującą w roku poprzedzającym rok opublikowania artykułu. Na dzień 9 stycznia 2023 r. wynosi on **39,092**, w tym **0,671** przed doktoratem i **38,421** po uzyskaniu stopnia doktora.

Indeks Hirscha został również określony w oparciu o powyższe bazy bibliograficzne. Według stanu z dnia 9 stycznia 2023 r. wynosi on:

- **6** według bazy Web of Science,
- **6** według bazy Scopus.

Liczba punktów została określona w oparciu o punktację czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki (dawniej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego) zgodnie z punktacją obowiązującą w roku opublikowania. Zgodnie ze stanem z dnia 9 stycznia 2023 r. wartość punktowa wynosi:

- **95** przed doktoratem (**76** za artykuły naukowe i **19** za rozdziały w monografiach),
- **1746** po uzyskaniu stopnia doktora (**1646** za artykuły naukowe, **20** za rozdziały w monografiach i **80** za monografię naukową).



Rys. 14. Rozkład cytowań według bazy Web of Science od roku 2010

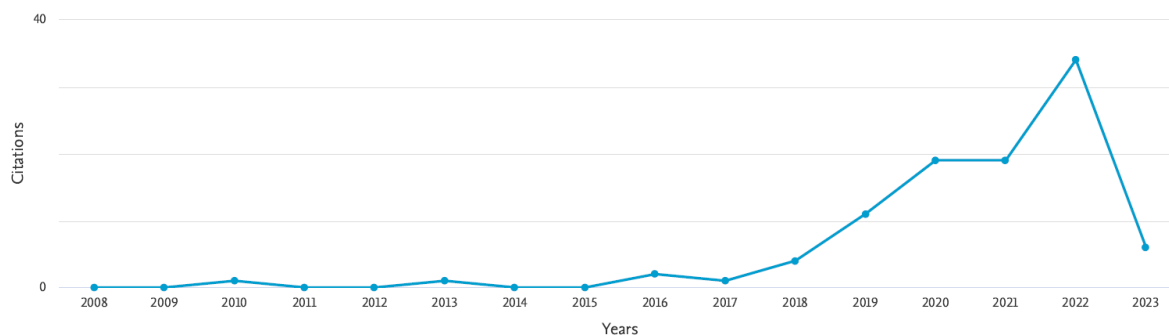
This is an overview of citations for this author.

Author *h*-index : 6 View *h*-graph

35 Cited Documents from "Mertuszka, Piotr" [+ Save to list](#)

Author ID:36994755300

Date range: 2008 to 2023 Exclude self citations of selected author Exclude self citations of all authors Exclude citations from books [Update](#)



Rys. 15. Rozkład cytowań według bazy Scopus od roku 2008