



**Politechnika
Śląska**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Wspólna Szkoła Doktorska

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Przemysław Sierodzki

**„Wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości rozchodzenia się
fal sejsmicznych w rejonie frontu eksploatowanej ściany pokładu węgla
z wykorzystaniem permanentnego, pneumatycznego źródła sejsmicznego”**

Promotor: dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Zbigniew Isakow

Dziedzina nauki:

nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina naukowa:

Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Gliwice 2025

Spis treści

1. Wstęp	5
2. Cel, zakres i tezy pracy	7
3. Charakterystyka sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla.....	9
3.1. Rodzaje fal sejsmicznych w pokładzie węgla oraz ich parametry dynamiczne i kinematyczne	9
3.1.1. Prędkość fali sejsmicznej	11
3.1.2. Tłumienie fali sejsmicznej.....	14
3.1.3. Dyspersyjność sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla	14
4. Metodyka wyznaczania prędkości sejsmicznej fali kanałowej w pokładzie węgla na podstawie modelowania numerycznego 3D	19
4.1. Wstęp teoretyczny do modelowania metodą różnic skończonych	19
4.2. Propagacja fali sejsmicznej przez trójwarstwowy model pokładu węgla.....	22
4.3. Modelowanie numeryczne propagacji fali sejsmicznej przez model pokładu węgla	27
4.4. Obliczanie dyspersji sygnału na podstawie modelowania 3D	29
5. Iskrobezpieczny wzbudnik WZB-2	32
5.1. Testy demonstratora technologii wzbudnika WZB-2	32
5.2. Założenia projektowe konstrukcji wzbudnika WZB-2	33
5.3. Budowa wzbudnika WZB-2	35
5.4. Proces certyfikacji wzbudnika WZB-2 do pracy w podziemnych zakładach górnictw z zagrożeniem metanowym	37

6. Przegląd i analiza rozdzielczości aparatów geofizycznych stosowanych w polskim górnictwie węglowym.....	43
6.1. Przegląd rozwoju systemów i urządzeń do oceny zagrożenia tąpnięciami stosowanych w górnictwie węglowym i w kopalniach rud miedzi	43
6.2. Analiza rozdzielczości sejsmoakustycznej aparatury pomiarowej wykorzystywanej w podziemnych zakładach górniczych	53
7. Testy wzbudnika WZB-2 jako źródło sejsmicznego w tomografii sejsmicznej na poligonie badawczym KGHM O/ZG „RUDNA”	59
7.1. Wprowadzenie	59
7.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań	59
7.3. Schemat pomiaru	60
7.4. Przetwarzanie i interpretacja danych	61
8. Wyznaczanie prędkości fal sejsmicznych z wykorzystaniem wzbudnika WZB-2 na poligonie badawczym KWK Mysłowice-Wesoła.....	63
8.1. Wprowadzenie	63
8.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań	63
8.3. Schemat pomiaru	65
8.4. Przetwarzanie i interpretacja danych	66
9. Wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości fal sejsmicznych z wykorzystaniem wzbudnika WZB-2 w KWK ROW Ruch Rydułtowy.....	70
9.1. Wprowadzenie	70
9.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań	70
9.3. Schemat pomiaru	73

9.4. Przetwarzanie i interpretacja danych	76
10. Podsumowanie i wnioski.....	80
Literatura.....	82
Streszczenie	96
Abstract.....	98
Spis rysunków	100
Spis tabel.....	104

1. Wstęp

W rejonach prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej dochodzi do zmian pola naprężeń, których wynikiem jest sejsmiczność wywołująca zagrożenie tąpnięciem [1], [2]. Oprócz statystycznej analizy rejestrowanej sejsmiczności w ocenie ryzyka sejsmicznego wykorzystuje się również pomiary in-situ prędkości rozchodzenia się różnych typów fal sejsmicznych. Zmiany wartości prędkości można wiązać ze zmianami wartości naprężeń [3], [4]. Powszechnie stosowane metody pomiaru prędkości wykorzystują wstrząsy indukowane eksploatacją (metoda pasywna) albo ładunek wybuchowy (metoda aktywna). Metoda pasywna obarczona jest dużym błędem wynikającym z estymacji lokalizacji źródła fali (wstrząsu). Dodatkowo, rejon objęty pomiarem prędkości jest determinowany położeniem hipocentrum wstrząsu. W przypadku metody aktywnej dużym ograniczeniem jest koszt wykonania pomiaru i analizy pojedynczego badania oraz problemy logistyczne przeprowadzenia samego pomiaru. W efekcie badania te wykonywane są w dużych odstępach czasu co utrudnia śledzenie dynamicznie zmieniającego się pola naprężeń wraz z postępem frontu wydobywania. Dodatkowo, ładunek wybuchowy w metodach aktywnych może być odpalony w danym punkcie tylko raz w czasie pomiaru, co może wpływać na jakość otrzymanych sejsmogramów. Ograniczona liczba uzyskanych danych jak i częstotliwość wykonywania pomiarów zarówno w metodzie pasywnej jak i aktywnej utrudnia wiarygodną detekcję i analizę małych, kilkuprocentowych anomalii prędkości.

Rozwiązaniem znacząco eliminującym wymienione problemy monitorowania zmian prędkości fal sejsmicznych może być zastosowanie systemu sejsmicznego wyposażonego w pneumatyczne, iskrobezpieczne, sterowane z powierzchni źródło fal sejsmicznych. Dzięki zdalnemu, wielokrotnemu wzbudzaniu fali sejsmicznej w krótkich odstępach czasu (do kilkudziesięciu minut) możliwy będzie quasi-ciągły, dokładny pomiar prędkości fal sejsmicznych. Taki rodzaj źródła umożliwi automatyzację procesu kontrolowanego wydobywania z minimalizacją ryzyka wystąpienia tąpnięcia, tak istotnego z punktu widzenia przemysłu 4.0. Otrzymane w ten sposób wysokorozdzielcze (wysoki stosunek sygnału użytecznego do szumu) sejsmogramy mogą dostarczać bardzo dokładnych informacji o wartościach prędkości i w konsekwencji umożliwić dokładniejsze monitorowanie odpowiedzi górotworu na prowadzone wydobywanie. Wykorzystanie permanentnego, pneumatycznego źródła sejsmicznego w znaczący

sposób poprawi profilaktykę oceny zagrożenia sejsmicznego w rejonie wydobywania. Polepszeniu ulegnie również dokładność wyznaczania lokalizacji zjawisk mikrosejsmicznych przed frontem ściany. Analiza dotychczasowego stanu techniki i czystości patentowej wykazała, że prace nad pomiarem online prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej w górotworze z wykorzystaniem wielu wzbudników prowadzono w systemie INGEN [5], w którym jako współwykonawca uczestniczył doktorant, a jako konsorcjant jego pracodawca Centrum Transferu Technologii EMAG Sp. z o.o. Wiele opracowanych elementów tego systemu skutecznie wdrożono już do produkcji, jednakże wzbudnik hydrauliczny, ze względu na jego złożoną konstrukcję i uciążliwość stosowania nie został jeszcze skomercjalizowany.

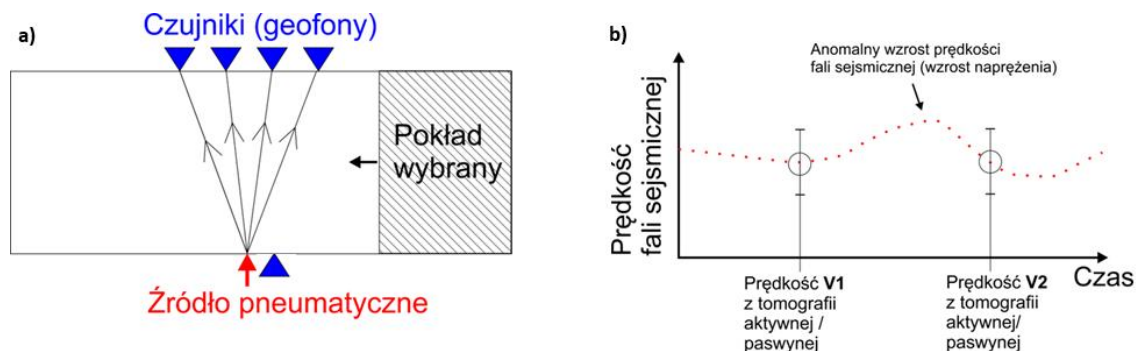
Koncepcja pomiaru prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej przed frontem ściany z wykorzystaniem wzbudników hydraulicznych opracowana podczas realizacji systemu była również przedmiotem patentów: krajowego PL 230218 i zagranicznych (Rosja RU 2604532, Ukraina UA 118088, ChRL ZL 201480002445.1) zgłoszonych w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG podczas realizacji projektu INGEN.

2. Cel, zakres i tezy pracy

Celem pracy jest zaproponowanie nowej metody uzyskania parametrów górotworu z wykorzystaniem istniejącej aparatury sejsmoakustycznej oraz nowo zaprojektowanego iskrobezpiecznego pneumatycznego wzbudnika sejsmicznego. Metoda ta umożliwi quasi-ciągły pomiar prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych przed frontem ściany wydobywczej węgla kamiennego. Wykorzystanie analizy dyspersji fal kanałowych do wyznaczania ich prędkości, w miejsce tradycyjnej metody polegającej na wyznaczeniu pierwszego wstąpienia czoła fali sejsmicznej, umożliwi wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości propagacji.

Dotychczas nie przedstawiono publikacji dotyczących zastosowania pneumatycznego wzbudnika w eksploatacji węgla, jednakże pozytywne wyniki badań [6] w kanadyjskich kopalniach złota motywują do podjęcia próby adaptacji tego rozwiązania.

Dodatkową motywacją był udział w badaniach nad tworzeniem się fali kanałowej w pokładach węgla [7], [8].



Rys. 2.1. Proponowany schemat pomiarowy a) oraz spodziewane wyniki w stosunku do rzadko wykonywanych tomografii pełnoskalowych b).

Doktorant w ramach pracy doktorskiej podjął zadanie wytworzenia systemu sejsmicznego wyposażonego w pneumatyczne źródło sejsmiczne, jego praktycznego zastosowania i zbadania oraz analizy otrzymanych rezultatów w odniesieniu do występującego zagrożenia sejsmicznego na poligonach badawczych.

W celu scharakteryzowania fal sejsmicznych i algorytmów przetwarzania danych, doktorant opracował wirtualny poligon badawczy, wykorzystując modelowanie numeryczne 3D metodą różnic skończonych [9].

Zaprojektowano i wykonano prototyp wzbudnika sejsmicznego, kompatybilnego z systemami Aramis M/E i Ares-5/E. Wzbudnik spełnia wymogi eksploatacji podziemnej, posiadając certyfikat ATEX oraz dopuszczenie Wyższego Urzędu Górniczego.

Następnie określono konfigurację systemu pomiarowego, uwzględniając warunki pracy w kopalni oraz przeprowadzono testy laboratoryjne. Prototyp systemu zaimplementowano na poligonach badawczych, integrując go z istniejącą aparaturą sejsmiczną.

W ramach pracy przeprowadzono przetwarzanie i analizę zarejestrowanych danych, w tym analizę dyspersji fali kanałowej w pokładzie węgla.

Oczekuje się, że wyniki badań umożliwią identyfikację zmian prędkości, świadczących o zmianach naprężeń, niedostępnych dla obecnych metod (Rys. 2.1). Poprawi to skuteczność profilaktyki tąpniowej, zwiększając bezpieczeństwo górników i redukując wstrząsy o dużej energii, szkodliwe dla środowiska i infrastruktury.

Temat pracy wpisuje się w priorytetowe kierunki badań, mające na celu rozwój nowych technologii, zwiększenie liczby patentów i innowacyjności gospodarki. Praca wykorzystuje zaawansowane technologie informatyczne, telekomunikacyjne i mechatroniczne, przyczyniając się do ochrony środowiska i rozwoju przedsiębiorstwa na rynkach krajowym i zagranicznym (w tym rozwoju eksportu do Chin).

3. Charakterystyka sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla

3.1. Rodzaje fal sejsmicznych w pokładzie węgla oraz ich parametry dynamiczne i kinematyczne

Fale sejsmiczne wywoływane działalnością górniczą są typowym przykładem zaburzenia w ośrodku sprężystym. Opisuje się je standardowymi pojęciami z ruchu falowego. Najważniejsze parametry kinematyczne wykorzystywane w geofizyce górniczej do opisanía fali sejsmicznej przedstawiono w Tab. 3.1.

Tab. 3.1. Parametry fali sejsmicznej w ośrodku sprężystym.

Nazwa parametru	Oznaczenie	Jednostka
Amplituda	A	m
Długość fali	λ	m
Częstotliwość	f	Hz
Okres	T	s
Liczba falowa	k	-
Częstotliwość kątowna	ω	1/s
Faza	ϕ	rad
Prędkość	V	m/s
Współczynnik tłumienia	α	-
Współczynnik dobroci	Q	-

Głównymi typami fal sejsmicznych analizowanymi w górnictwie podziemnym, są fale przestrzenne (objętościowe) [10] rozchodzące się w górotworze. Do fal przestrzennych zalicza się dwa rodzaje fal: podłużną i poprzeczną.

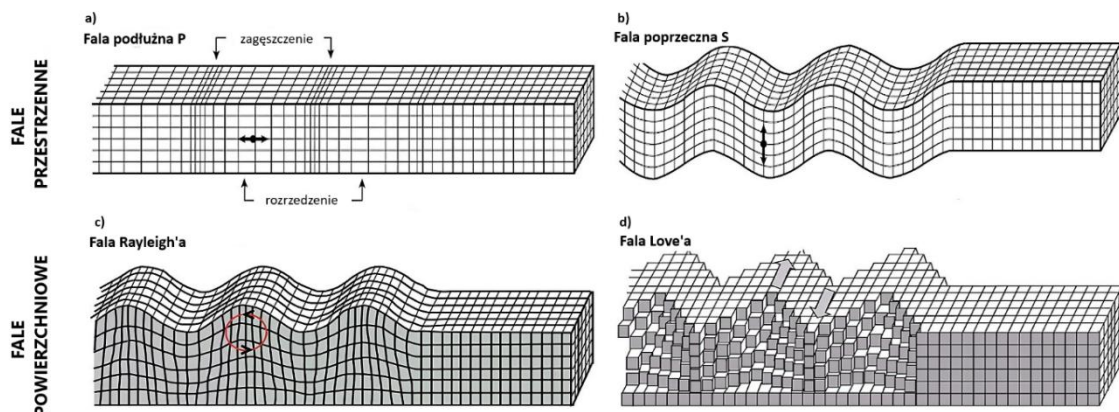
Fala podłużna P (primary) jest tak nazywana ze względu na największą prędkość rozchodzenia się, jej drgania posiadają charakter zagęszczeniowo - rozrzedzeniowy (Rys. 3.1 a).

Fala poprzeczna S (secondary) o drganiach o charakterze ścinania ma zazwyczaj większą amplitudę, lecz mniejszą prędkość rozchodzenia od fali podłużnej (Rys. 3.1 b).

Szczególnym przypadkiem fal sprężystych są fale dyspersyjne, których prędkość rozchodzenia się zależy od częstotliwości. Do najbardziej rozpowszechnionych fal dyspersyjnych zaliczamy fale powierzchniowe Rayleigh'a i Love'a.

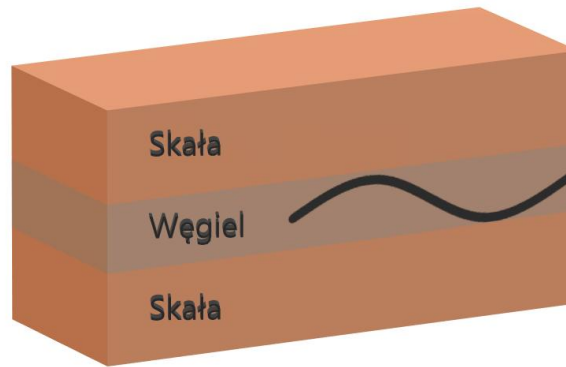
Fale Rayleigh'a powstają najczęściej na granicy ziemia-powietrze albo na granicy o dużym kontraście parametrów sprężystych [11]. Ruch cząstek odbywa się po elipsie w płaszczyźnie pionowej, zgodnej z kierunkiem rozchodzenia się fali (Rys. 3.1 c). W skład fal Rayleigh'a wchodzi zarówno fala podłużna, jak i fala poprzeczna spolaryzowana pionowo (P+SV).

Do powstania fali Love'a wymagany jest odpowiednio duży kontrast parametrów sprężystych oraz obecność warstwy o niższej prędkości nad podłożem o wyższej prędkości [12]. Ruch cząstek odbywa się poziomo, prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali (Rys. 3.1 d). W skład fal Love'a wchodzi tylko fala poprzeczna spolaryzowana poziomo (SH).



Rys. 3.1. Podstawowe rodzaje fal sejsmicznych, a) podłużna, b) poprzeczna, c) Rayleigh'a, d) Love'a.

Fale dyspersyjne nie rozchodzą się wyłącznie w przypowierzchniowych warstwach Ziemi, ale mogą również powstawać głęboko w pokładzie węgla – zarówno fale Rayleigh'a, jak i Love'a. Niskoprędkościowy pokład węgla, zalegający pomiędzy wysokoprędkościowymi warstwami utworów sedymentacyjnych (Rys. 3.2), stanowi idealny falowód (kanał) do generowania fal dyspersyjnych tego typu. Ten rodzaj fal został nazwany przez Krey'a [13] falami kanałowymi (ang. channel waves).



Rys. 3.2. Pokład węgla jako przykład ośrodka warstwowego, gdzie występuje fala kanałowa uwięziona w pokładzie węgla (zaznaczono symbolicznie).

Fale kanałowe, podobnie jak fale powierzchniowe, charakteryzują się mniejszym tłumieniem niż fale objętościowe. Amplituda maleje z kwadratem odległości w przypadku fal objętościowych, natomiast w przypadku fal kanałowych i powierzchniowych – z pierwiastkiem z odległości. Ta cecha sprzyja wykorzystaniu fal kanałowych do obrazowania mikrotektoniki pokładu węgla i monitorowania zmian prędkości. Fale te są łatwiejsze do identyfikacji, ponieważ posiadają większy stosunek sygnału użytecznego do szumu w zaszumionym otoczeniu eksploatacji węgla. Dodatkowym atutem fal kanałowych w rozpoznaniu pokładu węgla jest obecność tzw. fazy Airy’ego, czyli częstotliwości, dla której fala kanałowa, a dokładnie jej pierwsza moda, propaguje z najmniejszą prędkością grupową. Ze względu na mniejsze tłumienie związane z rozprzestrzenianiem sferycznym czoła fali, nawet wysokie częstotliwości są przenoszone na duże odległości. Dzięki temu fale kanałowe są bardzo wrażliwe na zmiany anizotropii ośrodka (np. wszelkiego rodzaju spękania) [13].

3.1.1. Prędkość fali sejsmicznej

Prędkość fali sejsmicznej zależy od wielu czynników, takich jak struktura i właściwości szkieletu ośrodka geologicznego, zawartość płynów i gazów w porach, temperatura, a także stan naprężenia i deformacji ośrodka. Z punktu widzenia mechaniki, prędkość fali jest uzależniona od parametrów sprężystości i bezwładności ośrodka, przez który fale się rozprzestrzeniają. Prędkości fal objętościowych P i S zależą od modułów sprężystości oraz gęstości objętościowej ośrodka, w którym te fale występują.

W ośrodku idealnie sprężystym, w ciele stałym wartość prędkości rozchodzenia się fali określają wzory [14]:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.1.)$$

gdzie,

E – moduł Younga,

ρ – gęstość objętościowa,

G – moduł sprężystości postaci (moduł sztywności)

Przyjmuje się związek między prędkościami fal P i S w ośrodku jednorodnym i izotropowym ma postać:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1-v}{0,5-v}}, \text{ dla } v = 0,25 \quad \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3} \quad (3.2.)$$

gdzie,

v – współczynnik Poissona

W górnictwie podziemnym podstawowym pomiarem prędkości fali P jest różnica czasów dotarcia czoła fali sejsmicznej do czujnika pomiarowego. W przypadku obliczania energii sejsmicznej zakłada się stałe współczynniki prędkości fali.

Prędkość fali sejsmicznej jest jednak zmienna w czasie, należy zatem zdefiniować parametry dynamiczne fali

Prędkość fazowa fali sejsmicznej to prędkość z jaką rozchodzi się w ośrodku określona faza harmoniczna (monochromatyczna) tej fali.

$$V = \lambda f \quad (3.3.)$$

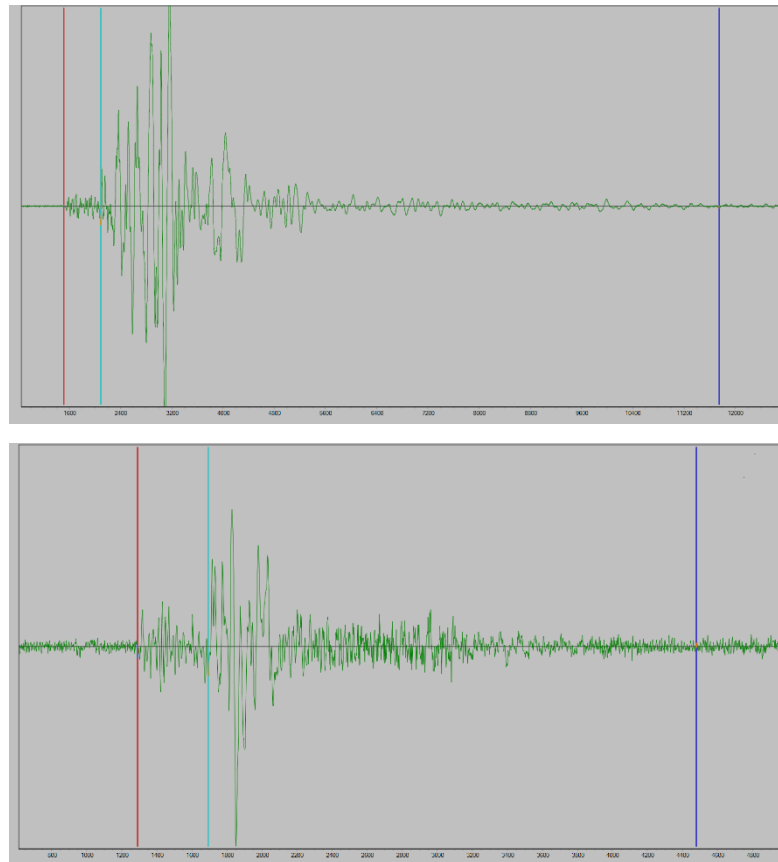
Wielkość ta zależy od właściwości ośrodka, w którym rozchodzi się fala, a także od częstotliwości (długości) fali. W ośrodkach jednorodnych i izotropowych prędkość fazowa jest stała dla wszystkich częstotliwości. W ośrodkach anizotropowych i niejednorodnych prędkość fazowa może zależeć od kierunku propagacji fali. W przypadku fal sejsmicznych, prędkość fazowa zależy od rodzaju fali (P, S, powierzchniowe), a także od budowy geologicznej ośrodka, przez który fala się rozchodzi.

Prędkość grupowa fali sejsmicznej to prędkość z jaką rozchodzi się w ośrodku grupa fal o zbliżonych częstotliwościach. W przeciwieństwie do prędkości fazowej, która opisuje prędkość pojedynczej harmoniczej (monochromatycznej) składowej fali, prędkość grupowa odnosi się do prędkości propagacji energii i informacji niesionej przez paczkę falową.

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (3.4.)$$

W ośrodkach dyspersyjnych, w których prędkość fazowa zależy od częstotliwości, prędkość grupowa może różnić się od prędkości fazowej.

W przypadku fal sejsmicznych, prędkość grupowa jest istotna dla opisu propagacji sygnałów sejsmicznych, które składają się z wielu składowych o różnych częstotliwościach. Prędkość grupowa zależy od rodzaju fali (P, S, powierzchniowe), a także od budowy geologicznej ośrodka, przez który fala się rozchodzi.



Rys. 3.3. Przykładowe zapisy fal sejsmicznych z oprogramowania systemu ARAMIS-M/E, gdzie algorytm wyznaczył początek fali P (czerwony znacznik), fali S (jasno-niebieski znacznik) oraz koniec zapisu (ciemno-niebieski znacznik), skala czasu nie została zachowana.

3.1.2. Tłumienie fali sejsmicznej

Fala sejsmiczna jest przykładem fali mechanicznej tłumionej, jej amplituda maleje wraz z upływem czasu, co spowodowane jest stratami energii. Dla rozchodzącej się w ośrodku niesprężystym fali sejsmicznej zanik amplitudy wraz z odległością od źródła opisuje zależność [15]

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (3.5.)$$

gdzie:

A – amplituda fali w odległości r od źródła,

A_0 – amplituda fali w źródle,

α – współczynnik tłumienia fali [1/m]

r – odległość od źródła.

Współczynnik tłumienia fali α podawany jest zazwyczaj jako parametr dobroci Q , zależny również od prędkości oraz częstotliwości fali sejsmoakustycznej [16].

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha v} - \frac{\alpha v}{4\pi f} \quad (3.6.)$$

dla $Q \gg 1$

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha v} \quad \alpha = \frac{\pi f}{Qv} \quad (3.7.)$$

gdzie:

Q – współczynnik dobroci,

α – współczynnik tłumienia [1/m],

f – częstotliwość fali sejsmicznej [Hz],

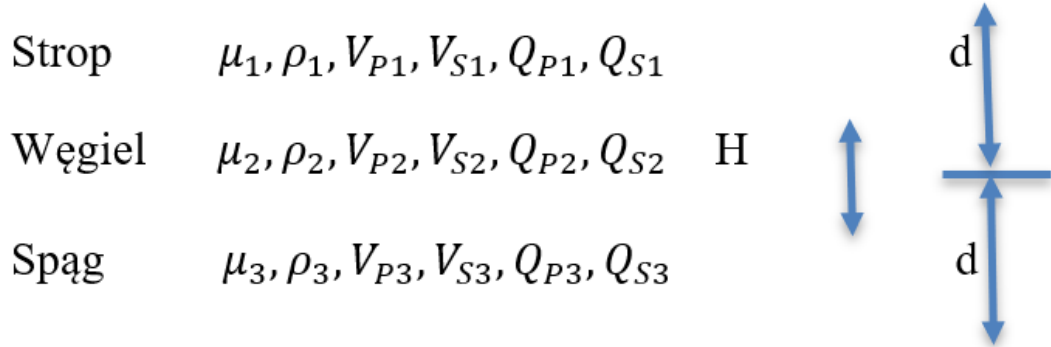
v – prędkość propagacji fali sejsmicznej [m/s].

3.1.3. Dyspersyjność sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla

W ośrodku jednorodnym warstwowym, jakim można uznać strukturę pokładu ściany węgla, gdy $V_1 \gg V_2 \ll V_3$ zachodzi zjawisko dyspersji fali sejsmicznej.

W takim ośrodku fale o różnej częstotliwości rozchodzą się z różną prędkością.

Można zatem wyznaczyć zależność prędkości grupowej fal oraz prędkości fazowej w zależności od częstotliwości [17].



Rys. 3.4. Schemat ściany węgla o miąższości H jako ośrodka warstwowego z różnymi parametrami, z dwoma półpłaszczyznami d .

Badanie fal dyspersyjnych wymaga wprowadzenia metod obliczania krzywych dyspersji dla fal kanałowych. Ze względu na podobne parametry sprężystości dla stropu i spągu pokładu nasze rozwiązanie analityczne uzyskuje się dla podobnych jednorodnych półprzestrzeni (Rys. 3.4).

W przypadku fali kanałowej typu Love'a stosujemy algorytm rekurencji fazowej [18].

Zakładając, że mamy dwie podobne jednorodne półprzestrzenie, częstotliwość kątowna ω zmienia się w odniesieniu do prędkości fazowej c , dla grubości węgla H w następujący sposób:

$$\omega(c) = \frac{2 \arctan \left(i \frac{\rho_1 V_{S1}^2 \gamma_1}{\rho_2 V_{S2}^2 \gamma_2} \right) - n\pi}{H \gamma_2} \quad (3.8.)$$

gdzie:

n – numer mody (0 dla mody fundamentalnej, 1 dla pierwszej wyższej mody),

i – jednostka urojona,

ρ_1, ρ_2 – odpowiednio gęstość skały i węgla, V_{S1}, V_{S2} – odpowiednio prędkość fali S skały i węgla

$\gamma_m = \sqrt{\frac{1}{V_{Sm}^2} - \frac{1}{c^2}}$ - współczynnik propagacji, gdzie $m = 1$ dla skały, $m = 2$ dla węgla.

Równanie posiada rozwiązanie, kiedy zachodzi $V_{S1} > c > V_{S2}$

Obliczenia dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a przedstawiono w [19], [20].

W porównaniu z falą kanałową typu Love'a (czysta fala S spolaryzowana poziomo), rozwiązanie dla fali kanałowej typu Rayleigh'a (fala P plus fala S spolaryzowana pionowo = fala SV) jest bardziej złożone i obejmuje również prędkość fali P (V_P).

Zgodnie z [20] równanie dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a można rozwiązać poprzez znalezienie wyznaczników macierzy M, tj. $\det(M) = 0$:

$$M = \begin{bmatrix} -iksh\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & \beta_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -ik & -\beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2 ch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & ikch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -\alpha_1 & -ik & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 ch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -A_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -\beta_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{v_{S1}}{v_{S2}}\right)^2 & -A_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{v_{S1}}{v_{S2}}\right)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -D_1 sh\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -C_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -\frac{\rho_1}{\rho_2} D_2 & -C_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{v_{S1}}{v_{S2}}\right)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2ikch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -2\beta_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -ik & \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\alpha_2 ch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & 2ikch\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & \alpha_1 & -ik \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\beta_2 sh\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -2A_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -B_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{v_{S1}}{v_{S2}}\right)^2 & A_1 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2D_1 ch\left(\alpha_2 \frac{H}{2}\right) & -2C_2 sh\left(\beta_2 \frac{H}{2}\right) & -\frac{\rho_1}{\rho_2} D_2 & -C_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{v_{S1}}{v_{S2}}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (3.9.)$$

Gdzie:

i – jednostka urojona,

V_{S1}, V_{S2} – odpowiednio prędkość fali S skały i węgla

$$\alpha_i = \left[k^2 - \left(\frac{\omega}{v_{Pi}} \right)^2 \right]^{1/2}, \beta_i = \left[k^2 - \left(\frac{\omega}{v_{Si}} \right)^2 \right]^{1/2}, \text{ gdzie } i = 1 \text{ dla skały, } i = 2 \text{ dla węgla.}$$

$$A_1 = k^2 + \beta_1^2, A_2 = k^2 + \beta_2^2,$$

$$B_1 = 2ik\alpha_1, B_2 = 2ik\alpha_2,$$

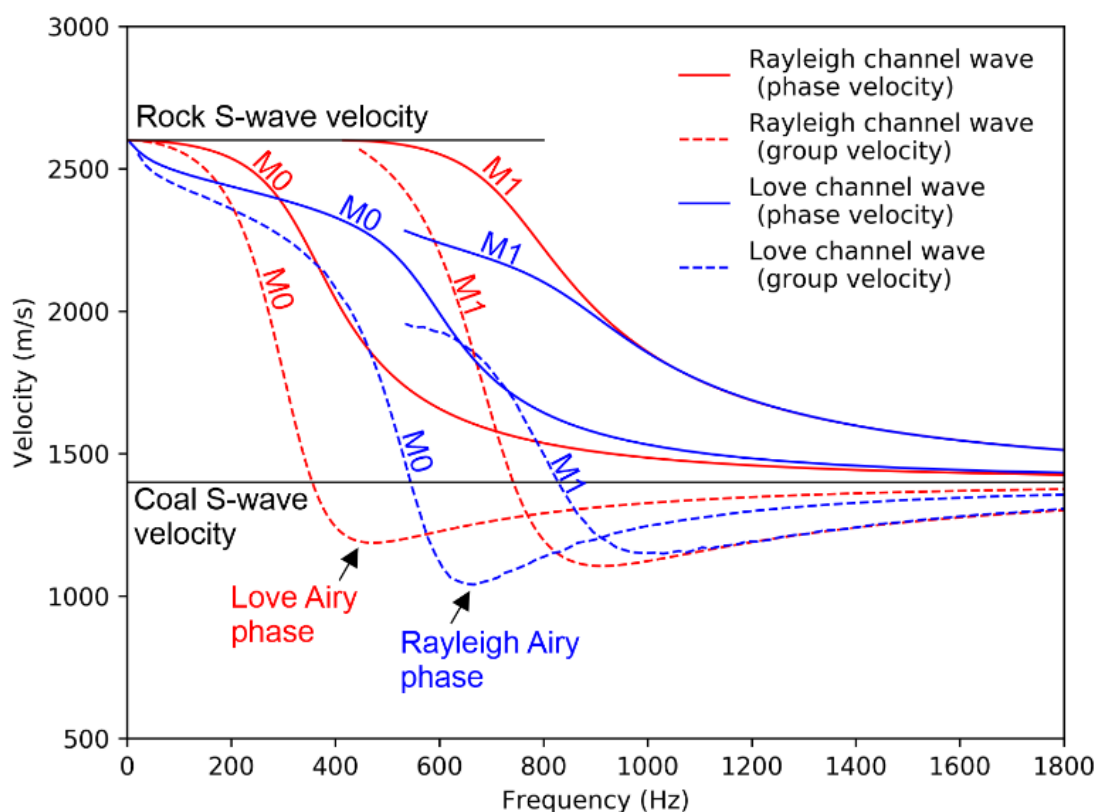
$$C_1 = 2ik\beta_1, C_2 = 2ik\beta_2,$$

$$D_1 = 2k^2 - \left(\frac{\omega}{v_{S2}} \right)^2, D_2 = 2(kv_{SN})^2 - \left(\frac{\omega}{v_{S2}} \right)^2,$$

gdzie numer mody wynosi:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (3.10.)$$

Krzywe dyspersji prędkości grupowej można uzyskać przez różniczkowanie prędkości fazowej [21].



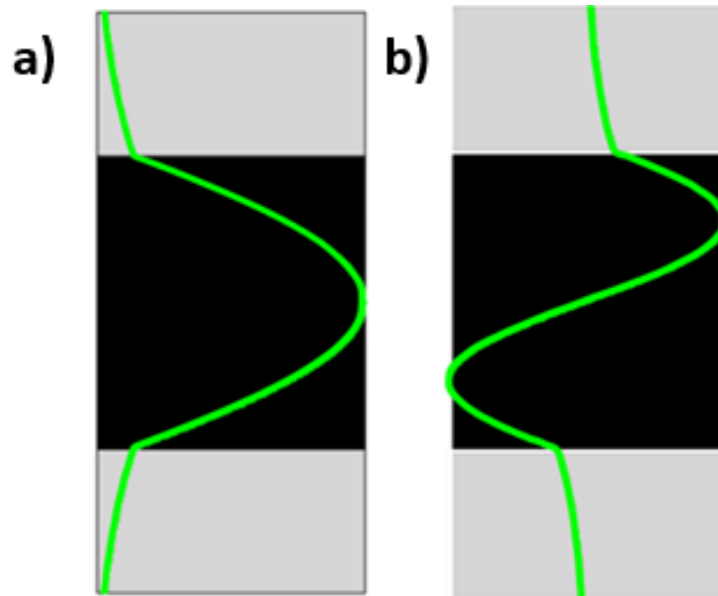
Rys. 3.5. Krzywe dyspersji dla zadanych parametrów modelu podanych w Tab. 3.2 [7].

Tab. 3.2. Parametry krzywych teoretycznych dyspersji sygnału w pokładzie węgla o miąższości 2m.

	Miąższość (m)	Fala P (m/s)	Fala S (m/s)	Gęstość (kg/m ³)	Dobroć Qp	Dobroć Qs
Strop		Vp=4500	2600	2600	350	140
Węgiel	2	2400	1400	1400	150	60
Spąg		4500	2600	2600	350	140

Rys. 3.5 przedstawia zależność prędkości fazowej od częstotliwości. Wynika z tego, że dla fali kanałowej, jako szczególnego przypadku fali dyspersyjnej, nie jest możliwe jednoznaczne określenie jednej prędkości fali, jak ma to miejsce w przypadku fal objętościowych.

Najczęstszym praktycznym podejściem do wykorzystania fal kanałowych w analizie prędkości ich rozchodzenia się jest analiza minimum fazy Airy'ego ze względu na mniejsze tłumienie fali w tym zakresie [22]. W zależności od składowej, którą mierzymy, można wyznaczyć minimum fazy fali Love'a i Rayleigh'a.



Rys. 3.6. Rozkład amplitud fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a w pokładzie węgla, a) składowa Z oraz b) składowa X. Zielona linia przedstawia rozkład amplitudy, czarny kolor pokład węgla, szary otaczające skały.

4. Metodyka wyznaczania prędkości sejsmicznej fali kanałowej w pokładzie węgla na podstawie modelowania numerycznego 3D

4.1. Wstęp teoretyczny do modelowania metodą różnic skończonych

Do modelowania propagacji fali sejsmicznej w pokładzie węgla wykorzystano niekomercyjne oprogramowanie SOFI3D udostępnione przez Instytut Technologii w Karlsruhe [23]. Metoda różnic skończonych, wykorzystywana w modelowaniu sejsmicznym, została szczegółowo opisana w publikacjach [24] oraz Levander [25].

Przy rozważaniu przejścia fali sejsmicznej przez ośrodek należy rozważyć nieskończenie mały sześciąt, który jest jego częścią. W sześciacie znajdują się atomy, jony lub cząsteczki, które poruszają się w nieokreślony sposób. Gdyby możliwe było opisanie mikroskopijnego ruchu cząstek, możliwe byłoby również przewidzenie ich przemieszczenia, a zatem propagację fali sejsmicznej w ośrodku

Jedną z podstawowych zasad fizyki jest zasada zachowania pędu.

Całkowity pęd $\mathbf{P}$ w ośrodku może się zmienić na trzy różne sposoby:

1. Poprzez przepływ masy (adwekcję)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V \rho(x, t) v(x, t) dV \right\} = 0 \quad (4.1.)$$

Gdzie:

t czas,

$\mathbf{x}$ wektor położenia,

ρ rozkład gęstości,

$\mathbf{V}$ rozkład prędkości cząstek w skale.

2. W wyniku dodawania lub usuwania cząstek

$$\Phi = \int_A \rho v (v \cdot dA) \quad (4.2.)$$

3. Za pośrednictwem działania sił, na przykład ciśnienia hydrostatycznego $\mathbf{P}$ lub bardziej ogólnie naprężenia $\mathbf{p}_{ij}$ (siły powierzchniowe) i siły $\mathbf{f}_i$ działające na wszystkie cząstki w objętości (siły ciała).

Po krótkich obliczeniach otrzymujemy następujący układ liniowych równań różniczkowych pierwszego rzędu:

$$\rho \frac{dv_i}{Dt} + v_i \rho \nabla v_i = - \frac{\partial p_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (4.3.)$$

Równanie to jest spełnione dla każdej objętości, niezależnie od tego, czy jest ona wypełniona cieczą, gazem czy skałą. Do tej pory nie zaproponowano, w jaki sposób ośrodek odkształca się pod wpływem naprężeń zewnętrznych. Dla ośrodka **sprężystego** istnieje liniowa zależność między naprężeniem a odkształceniem:

$$p_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (4.4.)$$

Gdzie

λ, μ parametry Lamé'go

$\epsilon_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ tensor deformacji

$\theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$ Kubiczna dylatacja

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases}$ symbol Kroneckera

W przypadku ośrodka lepko-sprężystego zależność naprężenie-odkształcenie jest bardziej skomplikowana:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{ij} = & \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \{ \pi(1 + \tau^s) - 2\mu(1 + \tau^s) \} + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \mu(1 + \tau^s) \\ & + \sum_{l=1}^L r_{ijl} \quad \text{dla } i = j \end{aligned} \quad (4.5.)$$

$$\dot{p}_{ij} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \mu(1 + \tau^s) + \sum_{l=1}^L r_{ijl} \quad \text{dla } i \neq j$$

Ze zmiennymi pamięciowymi

$$\dot{r}_{ijl} = -\frac{1}{\tau_{ol}} \left\{ (\pi\tau^p - 2\mu\tau^s) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \mu\tau^s + r_{ijl} \right\} \text{ dla } i = j \quad (4.6.)$$

$$\dot{r}_{ijl} = -\frac{1}{\tau_{ol}} \left\{ \mu\tau^s \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + r_{ijl} \right\} \text{ dla } i \neq j$$

$\tau^s = \frac{2}{Q_s}, \tau^p = \frac{2}{Q_p}$ są powiązane z sejsmicznymi współczynnikami dobroci Q_s, Q_p odpowiednio dla fali S oraz P.

Aby rozwiązać równania (4.3) i (4.4) dla ośrodka sprężystego lub (4.3) i (4.5) dla ośrodka lepkosprężystego, prędkości cząstek v , naprężenia p_{ij} , parametry Lamé'go λ i μ są obliczane w dyskretnych współrzędnych kartezjańskich oraz w dyskretnych momentach czasu na siatce (4.7).

$$x = i \times dx, y = j \times dy, z = k \times dz \quad t = n \times dt \quad (4.7.)$$

gdzie dx, dy i dz , oznaczają przestrzenną odległość punktu siatki w kierunku x, y, z a dt różnicę między dwoma kolejnymi krokami czasowymi

$$i \in N \llbracket [1, NX], j \in N \llbracket [1, NY], k \in N \llbracket [1, NZ] \text{ i } n \in N \llbracket [1, NT] \quad (4.8.)$$

gdzie NX, NY, NZ oraz NT oznaczają liczbę punktów siatki przestrzennej oraz kroków czasowych.

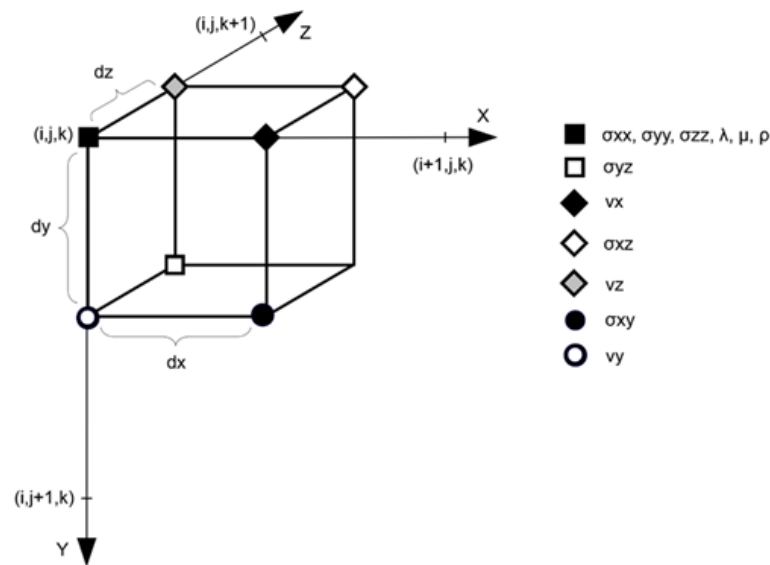
Na koniec pochodne cząstkowe są zastępowane przez (**różnice skończone**) operatory różniczkowania.

Pochodna funkcji y po zmiennej x może być aproksymowana przez operator przekształcający D^+ lub operator wsteczny D^- :

$$D_x^+ y = \frac{y[i+1] - y[i]}{dh} \quad (4.9.)$$

$$D_x^- y = \frac{y[i] - y[i-1]}{dh} \quad (4.10.)$$

Aby obliczać z większą odległością punktów siatki, zmienne są rozmieszczone na siatce naprzemiennej [24], [25] przedstawionej na Rys. 4.1. Standardowa siatka naprzemienna SSG (ang. standard staggered grid) to sposób dyskretyzacji przestrzeni, często stosowany w metodach numerycznych. Kluczową ideą jest **rozmieszczenie różnych zmiennych w różnych punktach siatki**, co pomaga uniknąć problemów numerycznych, takich jak oscylacje i niestabilność. Należy zauważyć, że oś pionowa jest oznaczona przez Y, np. indeksy składowych naprężeń są odpowiednio etykietowane. Aby spełnić warunek stabilności kodu SSG, gęstość ρ , odpowiednio parametr Lamé'go μ są uśredniane arytmetycznie i harmonicznie [26].



Rys. 4.1. Geometria siatki dla Standardowej Siatki Naprzemiennej (SSG). W sejsmice oś Y oznacza oś pionową [23].

4.2. Propagacja fali sejsmicznej przez trójwarstwowy model pokładu węgla

W celu realizacji modelowania propagacji fali sejsmicznej przez pokład węgla należy stworzyć geometryczny trójwarstwowy model 3D. Utworzono siatkę punktów SGG, wraz z przypisanymi im właściwościami zgodnymi z parametrami rzeczywistymi. W pracy zdecydowano się wykorzystać popularny język Python.

Na początku należy zdefiniować rozmiar siatki oraz odległość między punktami siatki tzw. Grid spacing.

```
# general parameters
g_s = 0.2 # grid spacing in m
# model dimension in grid points
x_gridp = 100 # horizontal 1 (x)
y_gridp = 1100 # vertical
z_gridp = 100 # horizontal 2 (pseudo y)
```

(4.11.)

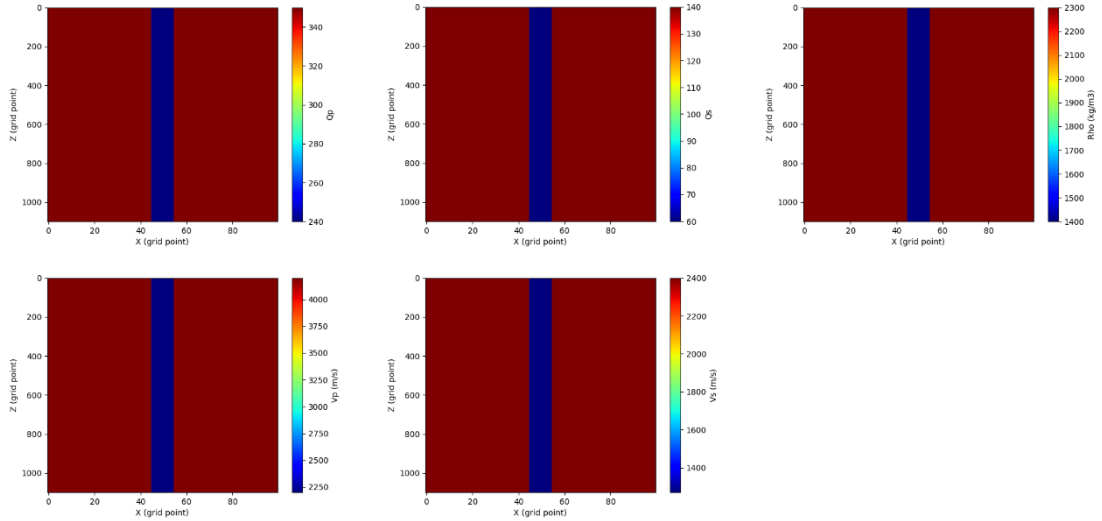
Rozmiar zakładanego modelu w tym przypadku wynosi 20x220x20 m. Należy nadmienić, że oś Z traktowana jest jako oś Y zgodnie z Rys. 4.1.

Następnie należy wprowadzić parametry fizyczne ośrodków: prędkości rozchodzenia się fal P oraz S, gęstość, dobroć (odwrotność tłumienia) dla fal P i S oraz miąższość pokładu H:

```
# -----physical properties-----
# Layer 1 - rock mass surrounded coal seam
vp_host_rock = 4200 # m/s
vs_host_rock = 2400 # m/s
rho_host_rock = 2300 # kg/m3
qp_host_rock = 350
qs_host_rock = 140
# Layer 2 - coal seam
vp_coal = 2200 # m/s
vs_coal = 1270 # m/s
rho_coal = 1400 # kg/m3
qp_coal = 240
qs_coal = 60
h_coal = 2 # seam coal thickness in m
r_coal = 9 # depth of seam coal roof in m
```

(4.12.)

Wynikiem są pliki zawierające informacje o modelu zrozumiałe dla oprogramowania SOFI3D, w którym nastąpi modelowanie propagacji fali sejsmicznej. Dodatkowo kod generuje wykresy rozkładu parametrów modelu w celu jego weryfikacji.



Rys. 4.2. Przekroje modelu 3D trójwarstwowego modelu ściany węgla (kolor niebieski) z podkładem i nadkładem (kolor brązowy), parametry tłumienia Q_p , Q_s , gęstość ośrodka Rho oraz prędkości propagacji fali pierwotnej V_p oraz wtórnej V_s .

Model można urzeczywistnić dodając strefę spękaną przy chodniku EDZ (ang. Excavation Damage Zone). Można ją zamodelować jako strefę o zmniejszonej prędkości i pewnej szerokości na brzegu modelu (chodnik przy ścianowy)

```
#excavation damage zone
```

```
edz_cof = np.linspace(0.7, 1, int(3 / g_s))
```

```
edz = np.ones((x_gridp, z_gridp, len(edz_cof)))
```

Strefa EDZ jest zamodelowana jako liniowy spadek prędkości fali od głębokości 3m (100% prędkości) do brzegu modelu (70% prędkości).

Model można uzupełnić dodatkowo o pewną anomalię prędkości. Może ona symulować różnego rodzaju rzeczywiste anomalie w pokładzie węgla takie jak pustki, spękania szczeliny jak i krawędzie historycznych pokładów nad ścianą.

W celu łagodnego rozkładu prędkości anomalii, co pozwala również na uniknięcie błędów numerycznych, zaproponowano wzór:

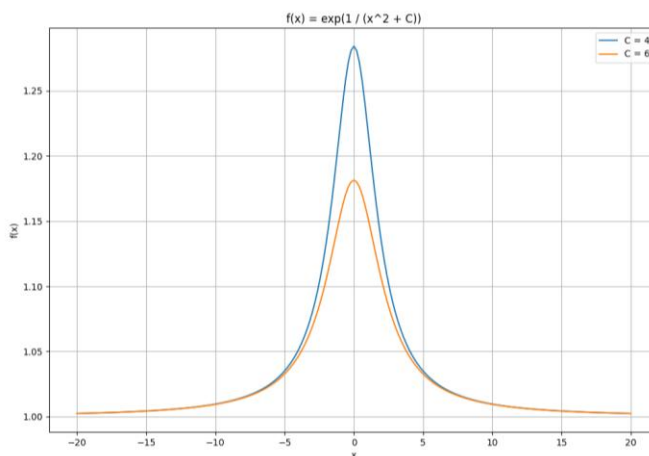
$$A = \exp\left(\frac{1}{x^2 + p}\right) \quad (4.15.)$$

```
#Anomaly
```

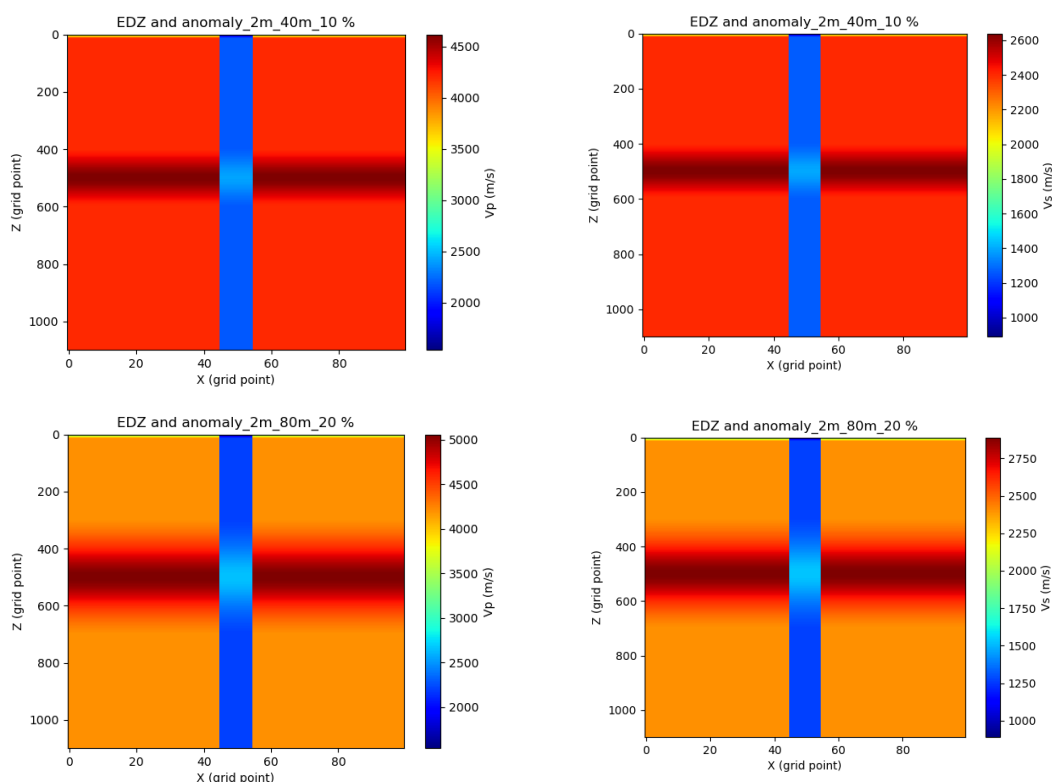
```
vel_cof = [np.exp(1 / (i ** 2 + 4)) for i in np.linspace(-3, 3, 200)]
```

$vel_cof -= \min(vel_cof) - 1$

$vel_anomaly = np.ones((x_gridp, z_gridp, 200))$



Rys. 4.3 Rozkład prędkości anomalii o szerokości 40m i parametru C równego 4 i 6.



Rys. 4.4. Przekroje 3D trójwarstwowego modelu ściany węgla (kolor niebieski) z podkładem i nadkładem (kolor czerwony) ze strefą spękaną EDZ oraz anomalią o szerokości 40m i 80m, przedstawiono prędkości propagacji fali pierwotnej Vp oraz wtórnej Vs.

Można przyjąć, że dla ograniczonego obszaru 5m wzrost prędkości dla anomalii o całkowitej szerokości 40m wynosi 10%, oraz w przypadku całkowitej szerokości 80m wynosi 20% (Rys. 4.4).

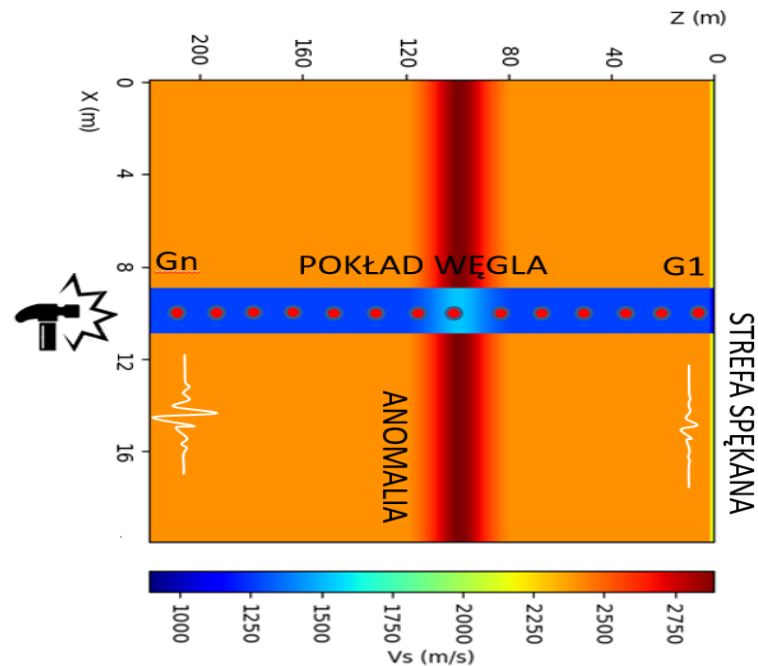
W celu rozpoczęcia procesu modelowania należy zdefiniować w plikach konfiguracyjnych oprogramowania SOFI3D:

- wielkość modelu (zgodną z wygenerowaną siatką SGG),
- oczko siatki,
- czas modelowania,
- krok czasowy,
- typ źródła sejsmicznego oraz jego koordynaty,
- macierz odbiorników (wirtualnych geofonów).

Parametry użyte do modelowania zestawiono w Tab. 4.1.

Tab. 4.1. Parametry modelowania w oprogramowaniu SOFI3D.

Parametr	Wartość	Jednostka
Wielkość modelu X Y Z	20x220x20	m
Oczko siatki	0,2	m
Czas modelowania	300	ms
Krok czasowy	10	us
Źródło sejsmiczne	Force Y 250	Hz
Koordynaty źródła X Y Z	10.0 200.0 10.0	m
Początkowy Geofon X Y Z	10, 0, 10	m
Końcowy Geofon X Y Z	10, 200, 10	m
Krok rozstawu geofonów	1	m



Rys. 4.5. Naniesiony na model pokładu węgla schemat eksperymentu, źródło znajdujące się w pobliżu wirtualnego geofonu Gn przechodzi przez pokład węgla z anomalią i jest rejestrowany po drugiej stronie ściany geofonem G1 w strefie spękanej.

4.3. Modelowanie numeryczne propagacji fali sejsmicznej przez model pokładu węgla

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem pomiaru drgań w kopalniach jest montowanie geofonu prostopadle do chodnika. Taki sposób zapewnia najlepszy kontakt z calizną górotworu oraz ułatwia poziomowanie czujnika. W przypadku wzbudzenia źródła po przeciwnej stronie chodnika, w osi składowej poziomej geofonu, możliwa jest rejestracja głównie fali podłużnej refraktującej po skałach stropowych, fali podłużnej bezpośredniej w węglu oraz częściowo fali poprzecznej spolaryzowanej pionowo (SV) w pokładzie węgla [8], [27], [28].

W przypadku fal kanałowych taki sposób montażu oraz tak usytuowane źródło zapewniają możliwość rejestracji głównie fali kanałowej typu Rayleigh'a. W związku z tym przeprowadzone modelowanie zostało ukierunkowane na ten rodzaj fal.

Na rysunkach Rys. 4.6a, Rys. 4.7a oraz Rys. 4.8a przedstawiono rejestracje trzech składowych geofonów umieszczonych w środku pokładu – od źródła po przeciwnej stronie ściany do odbiornika. Wzbudzenie odbyło się przy czujniku 500, oddalonym o 200 m. Po drugiej stronie chodnika zarejestrowano drgania zaznaczone kolorem

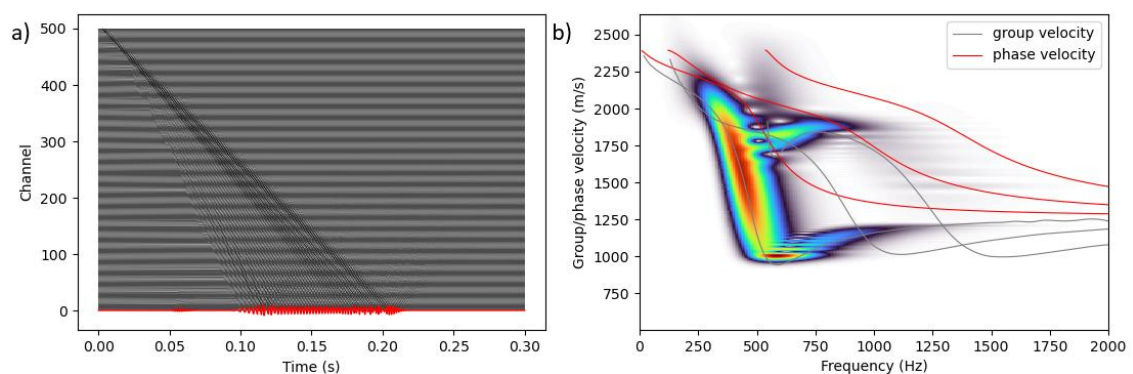
czerwonym. Można zaobserwować, że na wszystkich składowych zapis ten jest złożony i dyspersyjny (brak jednoznacznego momentu pierwszego wstąpienia fali).

Na rysunkach Rys. 4.6b, Rys. 4.7b oraz Rys. 4.8b przedstawiono analizę spektralną zarejestrowanej trasy w ociosie po drugiej stronie chodnika dla trzech składowych. Obraz spektralny zestawiono z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a dla tych samych parametrów modelu. Generalnie można zaobserwować, że najbardziej energetyczna fala Rayleigh'a w swoim modzie podstawowym została zarejestrowana na składowej pionowej. Podobne obserwacje zostały opisane w [22] i wynikają z rozkładu amplitudowego fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a przedstawionego na Rys. 3.6 dla składowej pionowej i poziomej.

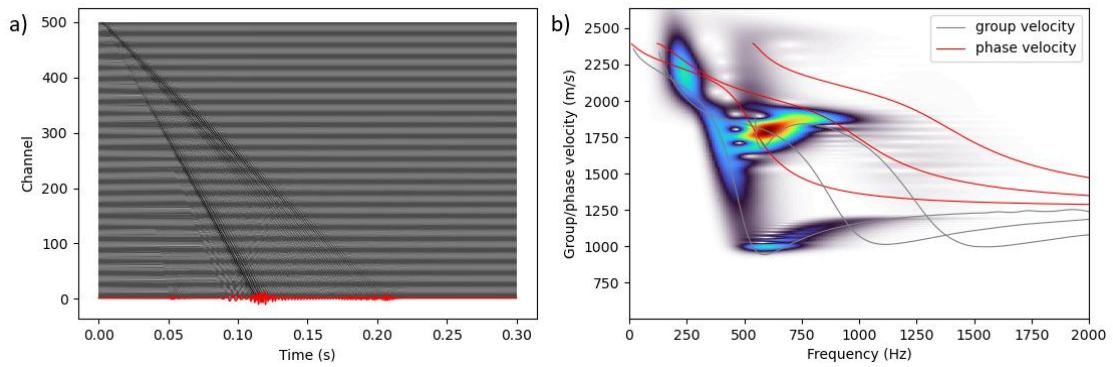
Składowa pozioma prostopadła do ociosu, czyli ta, którą zazwyczaj mierzymy w kopalni oraz w eksperymentach niniejszej pracy, również prezentuje fundamentalną modę. Na składowej poziomej równoległej do chodnika energia propaguje głównie w wyższych prędkościach i może być związana z falami poprzecznymi warstw stropowych.

Modelowanie pokazuje, iż najkorzystniejszym sposobem montażu geofonu do rejestracji fundamentalnej mody fali Rayleigh'a w takim układzie pomiarowym jest:

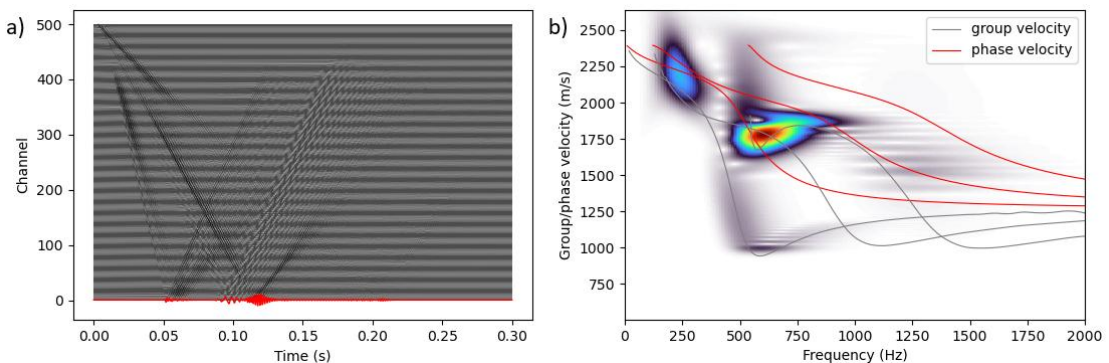
- umieszczenie geofonu do $\frac{1}{4}$ miąższości pokładu – w przypadku montażu w poziomie, prostopadle do chodnika,
- umieszczenie geofonu w środku pokładu – w przypadku montażu w pionie.



Rys. 4.6. Rejestracja składowej Y a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a.



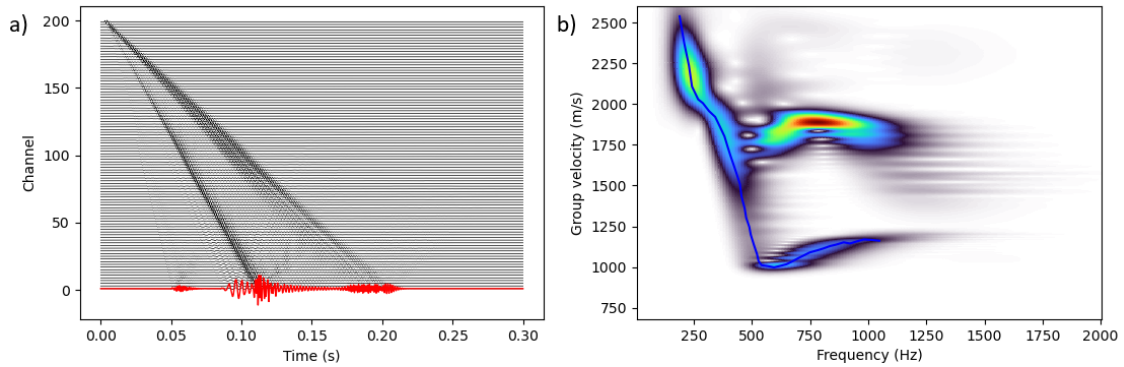
Rys. 4.7. Rejestracja składowej Z a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a



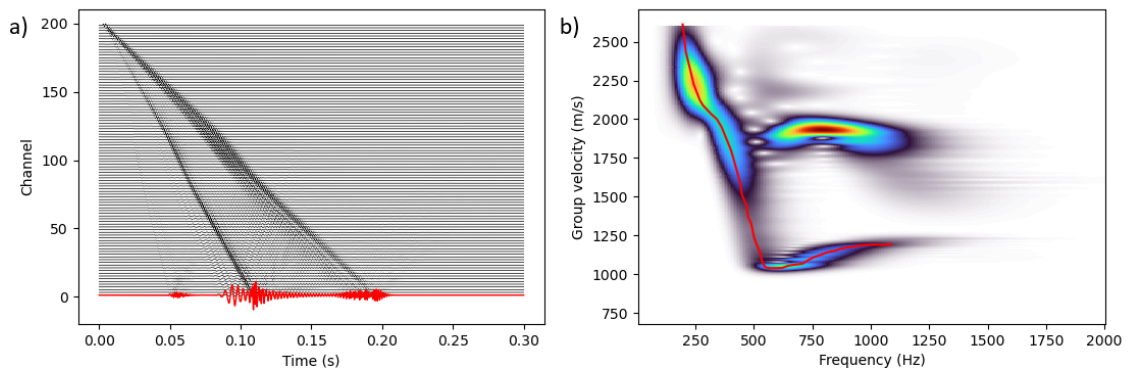
Rys. 4.8. Rejestracja składowej X a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a.

4.4. Obliczanie dyspersji sygnału na podstawie modelowania 3D

Celem wysokorozdzielczego monitorowania zmian prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w czasie z wykorzystaniem źródła pneumatycznego jest wyznaczenie zmian prędkości fal, które można odnieść do stopnia deformacji górotworu. Na rysunkach przedstawiono hipotetyczne sytuacje zmian prędkości, jakie można zaobserwować w górotworze oraz ich możliwość identyfikacji na krzywych dyspersji fali kanałowej. Rozważono dwie anomalie prędkości o różnej wielkości zgodnej z Rys. 4.4: wyniki modelowania przedstawiono na Rys. 4.9 oraz Rys. 4.10.



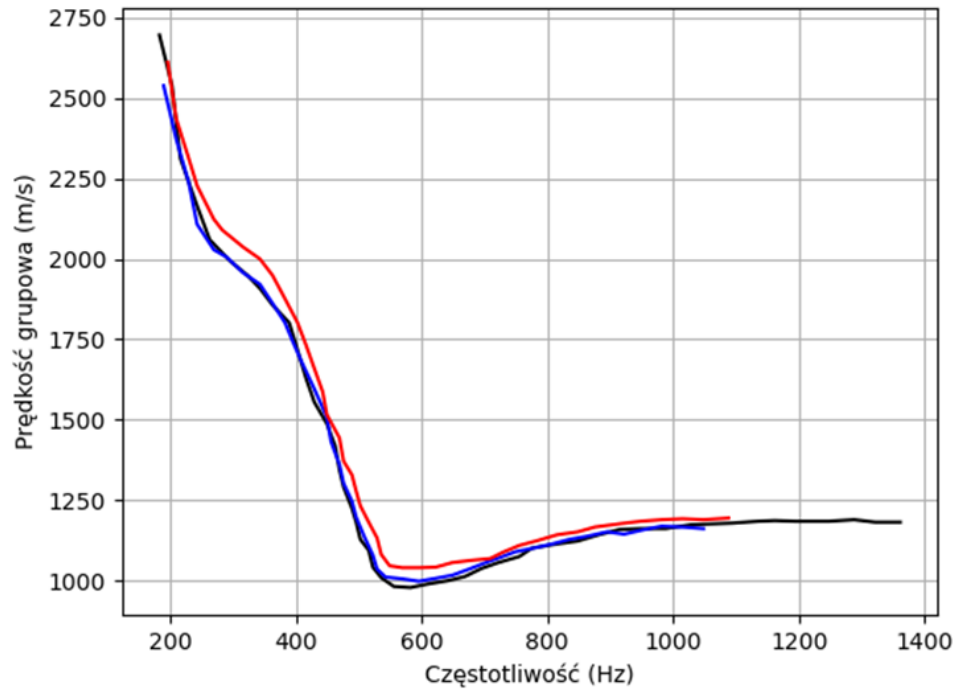
Rys. 4.9. Rejestracja składowej poziomej Y prostopadłej do chodnika oraz jej widmo spektralne dla modelu z anomalią prędkości 10%. Minimum fazy Airy'ego wzrosło o około 20 m/s w stosunku to modelu bazowego.



Rys. 4.10. Rejestracja składowej poziomej Y prostopadłej do chodnika oraz jej widmo spektralne dla modelu z anomalią prędkości 20%. Minimum fazy Airy'ego wzrosło o około 60 m/s w stosunku to modelu bazowego.

Na Rys. 4.11 dokonano porównania krzywych dyspersji fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a w odniesieniu do modelu bazowego (bez zmian prędkości). Można zaobserwować, że wzrost prędkości o 10% na odcinku 5 metrów powoduje przesunięcie minimum fazy Airy'ego o 20 m/s. Natomiast wzrost o 20% na długości 5 metrów powoduje zmianę minimum fazy Airy'ego o 60 m/s.

Zaproponowane anomalie, mimo niewielkich rozmiarów, są możliwe do rozróżnienia. Podobną metodykę śledzenia minimum fazy Airy'ego w odniesieniu do postępu ściany zaprezentowano na danych empirycznych z KWK ROW Ruch „Rydułtowy”, przedstawionych w rozdziale 9



Rys. 4.11. Porównanie fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a dla modelu bez anomalii (bazowego) oznaczonej kolorem czarnym oraz anomaliami 10% i 20% oznaczonych odpowiednio kolorami niebieskim i czerwonym.

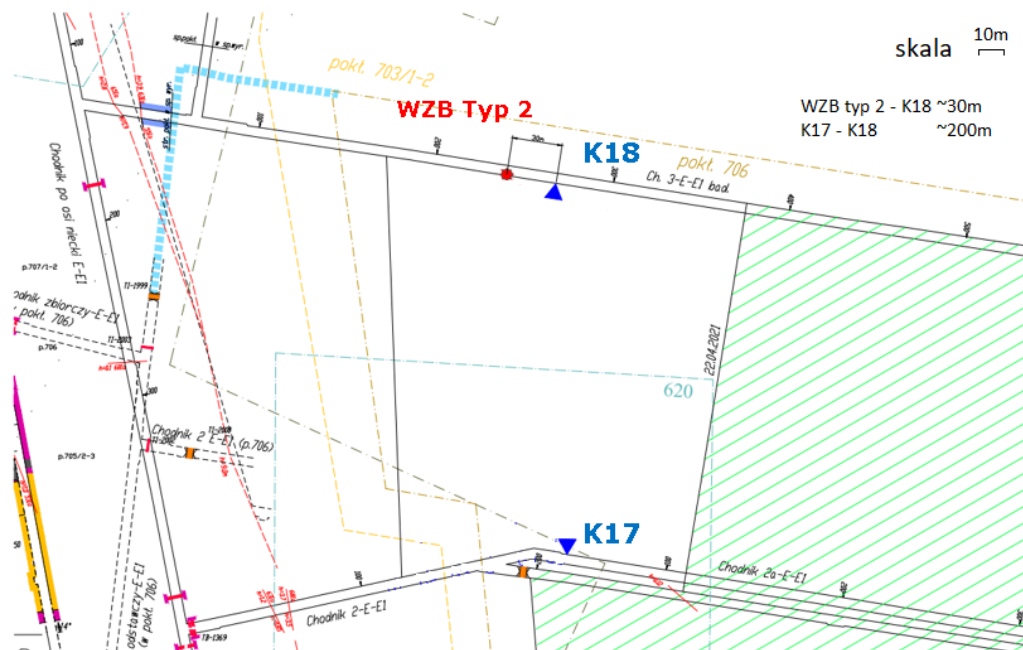
5. Iskrobezpieczny wzbudnik WZB-2

5.1. Testy demonstratora technologii wzbudnika WZB-2

Pierwszym założeniem pracy doktoranta było zaprojektowanie od podstaw pneumatycznego induktora o założonych parametrach. W trakcie analizy dostępnych na rynku pneumatycznych induktorów nie związanych z pomiarami sejsmicznymi zdecydowano się na kierunek zastosowania komercyjnego urządzenia PS-80 firmy OLI [29] i dostosowania go do zastosowań w podziemnych zakładach górniczych.

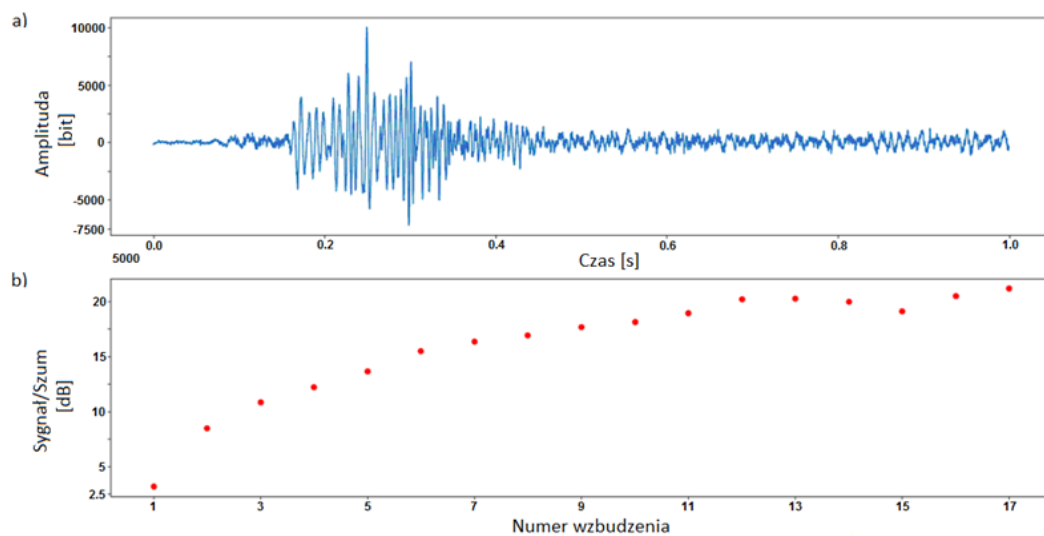
Ze względu na długi proces certyfikacyjny (pandemia COVID-19) zdecydowano się na testy demonstratora technologii wzbudnika jako urządzenia nieiskrobezpiecznego. W tym przypadku testy mogły odbyć się tylko przy ciągłym udziale obsługi oraz z ręcznym metanomierzem.

Testowanie wzbudnika przeprowadzono w KWK ROW Ruch „Rydułtowy” w dniu 24 kwietnia 2021 roku, w rejonie ściany III-E-E1, w pokładzie 713/1-2. W czasie pomiaru nie prowadzono robót wydobywczych. Wzbudnik został zamontowany w środku pokładu węgla na 4 kotwach o długości 2,5 m każda. Schemat pomiarowy przedstawiono na Rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat pomiarowy testu wzbudnika WZB Typ 2 (czerwona kropka). K18 i K17 (niebieskie trójkąty) – czujniki geofonowe.

Fale sejsmiczne generowane demonstratorem wzbudnika odbierano geofonami K18 oraz K17 podłączonymi do sejsmoakustycznej aparatury ARES-5/E będącej na wyposażeniu Kopalnianej Stacji Geofizyki Górniczej Geofony. Rozmieszczono je odpowiednio 30 m od wzbudzenia (geofon K18) oraz około 200 m od wzbudzenia fali po przeciwległej stronie ściany, w chodniku nadścianowym 2-E-E1 (geofon K17). System ARES-5/E rejestrował zapisy zarówno modulem detekcji wielokanałowej MI-820 z rozdzielczością 9 bitową, jak i nowo opracowanym modulem REX_LAN w trybie ciągłej rejestracji z rozdzielczością 16 bitową. Częstotliwość próbkowania wynosiła 4000 Hz. Podczas testu zarejestrowano impulsy wywoływane uderzeniami wzbudnika podczas jego testowania.



Rys. 5.2. Wynik sumowania 16 uderzeń prototypu wzbudnika WBZ Typ 2 jako sumarycznej rejestracji geofonu K17 (a). Stosunek sygnału użytecznego do szumu w zależności od liczby uderzeń (b) [30].

Na Rys. 5.2 przedstawiono wynik sumowania uderzeń wzbudnika zarejestrowanych geofonem K17. Test udowodnił możliwość rejestracji sygnału ze wzbudnika z dużą rozdzielczością korzystając z metody sumowania zapisów. Pełne wyniki testu wzbudnika przedstawiono na konferencji Szkoła Eksploatacji Podziemnej w 2021r. oraz opublikowano [30].

5.2. Założenia projektowe konstrukcji wzbudnika WZB-2

Założenia projektowe nowej konstrukcji wzbudnika wynikały z doświadczeń z projektu INGEO [5]. Tam podjęto pierwszą próbę projektu iskrobezpiecznego

wzbudnika sejsmicznego WZB-1, gdzie podstawowym założeniem było magazynowanie energii w napiętych sprężynach. W wyniku tego wzbudnik miał duże rozmiary, co spowodowało uciążliwą obsługę w podziemnych zakładach górniczych oraz brak zainteresowania ze strony użytkowników.

Postanowiono podejść do tematu od nowa i kosztem wyzwalanej energii zaprojektować wzbudnik bardziej kompaktowy.

Przystępując do opracowania nowej wersji wzbudnika przyjęto następujące założenia techniczne:

- wykonanie iskrobezpieczne,
- wykorzystanie wzbudnika firmy Oli i zasilanie pneumatyczne,
- sterowanie elektryczne (opcja ręczne),
- energia wymuszenia minimum 100 J,
- gabaryty i masa umożliwiające transport jednoosobowy (eliminacja sprężyn i siłowników)
- realizacja w dwóch wariantach, z modułem sterującym wewnątrz obudowy wzbudnika wersja „a” lub na zewnątrz „b”,
- współpraca z systemami produkowanymi w CTT EMAG: sejsmoakustycznym ARES-5/E oraz sejsmicznym ARAMIS M/E oraz innymi.

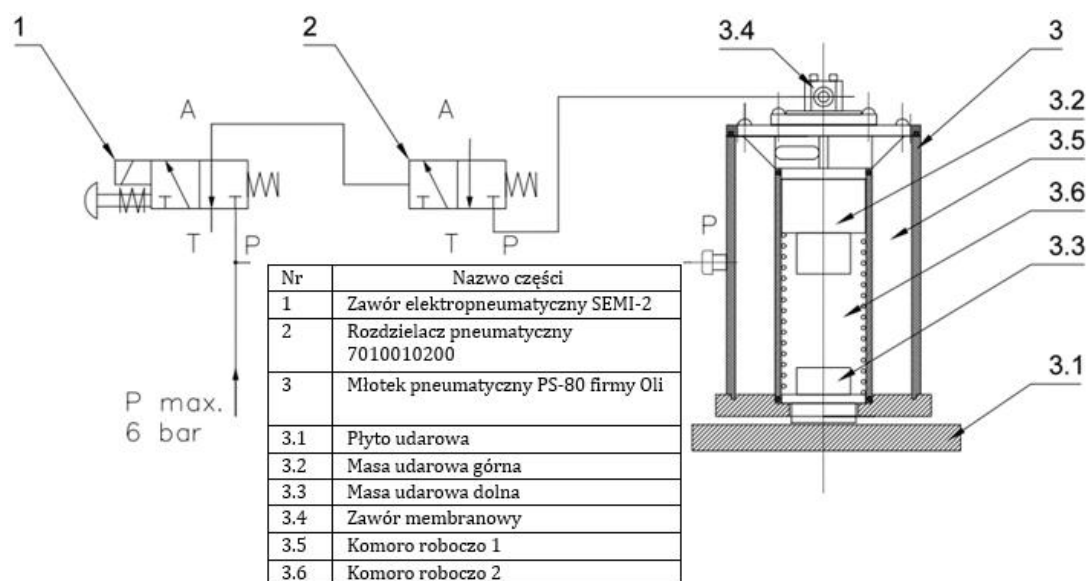
Tab. 5.1. Porównanie parametrów wzbudnika WZB-1 oraz nowo projektowanego WZB-2.

Parametry	Wzbudnik WZB-1 (INGEO)	Wzbudnik WZB-2 (prototyp)
Energia uderzenia	~300 J	~150 J
Zasilanie (powietrze)	8-10 bar	3-6 bar
Gabaryty (bez uchwytów)	Ø 430 x 340 mm	350x200x280 mm
Waga (bez płyty udarowej)	~50 kg	~25 kg
Magazyn energii	Sprężyny	Powietrze
Konstrukcja kafara	CTT EMAG	PS-80 (OLI)

W Tab. 5.1. przedstawiono porównanie parametrów wzbudnika nowo projektowanego z wzbudnikiem WZB-1 projektu INGEO.

5.3. Budowa wzbudnika WZB-2

Schemat blokowy nowo opracowanego wzbudnika przedstawiono na Rys. 5.3. Wzbudnik służy do wywołania w podłożu, z którym jest związany, fali sejsmicznej. Efekt ten uzyskiwany jest poprzez uderzenie masy udarowej (3.3) w zamocowaną do podłoża (ociosu) płytę udarową (3.1).



Rys. 5.3. Schemat pneumatyczny wzbudnika WZB-2.

W skład wzbudnika wchodzi: iskrobezpieczny, pneumatyczny zawór SEMI-2 do sterowania wraz z osprzętem pneumatycznym (1), zawór wykonawczy (2), młotek pneumatyczny pojedynczego uderzenia PS-80 (3) wraz płytą udarową z otworami do zabudowy kotwowej (3.1). Ze względu na części aluminiowe oraz wymagania norm całość zamknięta jest również w pyłoszczelnej obudowie o cechach typu IP54.

W stanie normalnym ciśnienie robocze o maksymalnej dopuszczalnej wartości 6 bar doprowadzone jest do:

- komory roboczej 1 młotka pneumatycznego PS-80 (3.5),
- elektrozaworu SEMI-2/P (1),
- zaworu wykonawczego (2).

Sprężone powietrze wypełniające komorę roboczą 1 (3.5) doprowadzone jest do zaworu membranowego (3.4), będącym integralną częścią młotka PS-80 (3) przez dyszę o małym przepływie. Zamknięty zawór membranowy oddziela komorę roboczą 1 (3.5) oraz komorę roboczą 2 (3.6).

Elektrozawór SEMI-2/P (1) otwiera zawór wykonawczy o dużym przepływie (2), który połączony jest z zaworem membranowym (3.4).

Powoduje to natychmiastowe otwarcie zaworu membranowego, połączenie się komór roboczych 1 oraz 2, a co za tym idzie wypchnięcie wewnętrznej masy uderowej górnej (3.2). Masa uderowa górna (3.2) uderza w masę uderową dolną (3.3), która z kolei uderza w płytę uderową (3.1). Powstały impuls uderowy przekazywany jest do podłoża.

Zasada działania obydwóch typów wzbudnika jest identyczna. Zmienia się tylko lokalizacja zaworu SEMI-2/P (1).

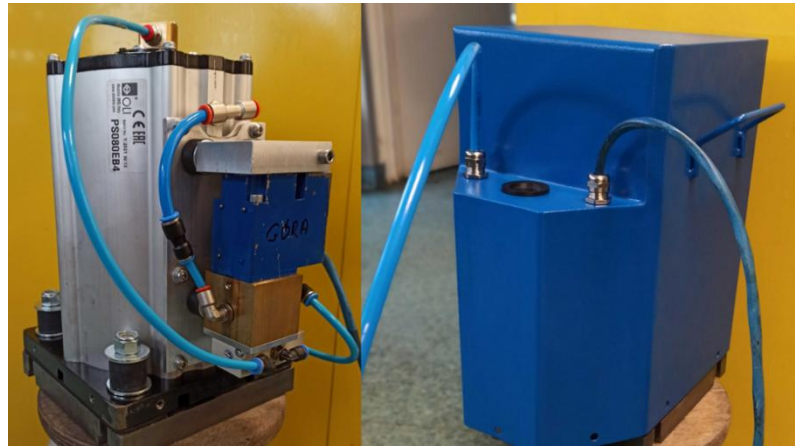
- wewnątrz obudowy wzbudnika WZB-2a,
- zewnątrz obudowy wzbudnika WZB-2b.

W związku z powyższym dopuszczalne jest, aby wzbudnik WZB-2a działał również w konfiguracji z zewnętrznym blokiem sterującym.

Na Rys. 5.4 przedstawiono różne wykonania wzbudnika WZB-2.



Rys. 5.4. Iskrobezpieczne wzbudniki w dwóch wykonaniach WZB-2a i WZB-2b.



Rys. 5.5. Wnętrze wzbudnika WZB-2a i jego obudowa.

Dane techniczne urządzenia w wersjach przedstawiono w Tab. 5.2.

Tab. 5.2. Dane techniczne wzbudnika WZB-2 w wersji a i b.

Parametr	Wartość
Energia uderzenia	~150 J
Zasilanie (powietrze)	3-6 bar
Gabaryty (bez uchwytów)	335x205x280 mm - WZB 2a
	368x205x210 mm - WZB 2b
Waga (bez płyty udarowej)	-25 kg WZB 2a
	-23 kg WZB 2b
Magazyn energii	Powietrze
Konstrukcja kafara	PS-80 (OLI)
Stopień ochrony IP	IP54
Temperatura pracy	+0'C+50'C

5.4. Proces certyfikacji wzbudnika WZB-2 do pracy w podziemnych zakładach górniczych z zagrożeniem metanowym

Doktorant uruchomił wzbudniki oraz przeprowadził ich wstępne badania laboratoryjne, po czym nadzorował ustalenie programu badań oraz ich badania atestacyjne w Ośrodku Badań, Atestacji i Certyfikacji OBAC Sp. z o.o. w Gliwicach w celu uzyskania certyfikatu badania typu UE.

Urządzenie w wykonaniu przeciwwybuchowym musi spełniać obowiązującą dyrektywę parlamentu europejskiego ATEX 2014/34/UE oraz obowiązujące normy.

Zgodnie z dokumentacją techniczną wzbudnika WZB-2 wymagania dotyczące jego parametrów zawarte są w następujących normach:

- PN-EN 50303:2004 Urządzenia grupy I kategorii M1 przeznaczone do pracy ciągłej w atmosferach zagrożonych metanem i/lub pyłem węglowym,
- PN-EN ISO 80079-36 Urządzenia nieelektryczne do atmosfer wybuchowych – Metodyka i wymagania,
- PN-EN ISO 80079-37 Urządzenia nieelektryczne do atmosfer wybuchowych – Rodzaje zabezpieczenia nieelektrycznego,
- PN-EN ISO 80079-38:2017-02 Urządzenia i komponenty stosowane w atmosferach wybuchowych występujących w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.

Tab. 5.3. Wstępna ocena źródeł zapłonu zgodnie z PN-EN ISO 80079-36.

Możliwe źródła zapłonu (Wykaz z PN-EN ISO 80079-36)	Związane z urządzeniami tak/nie	Uzasadnienie
Gorące powierzchnie	nie	niekonieczne
Płomienie, gorące gazy	nie	niekonieczne
Iskry generowane mechaniczne	tak	Uderzenie masy uderowej w kowadło może powodować powstanie iskier
Źródła pochodzenia elektrycznego	nie	niekonieczne
Prądy błędzące, katodowa ochrona przed korozją	nie	niekonieczne
Elektryczność statyczna	nie	niekonieczne
Uderzenie pioruna	nie	niekonieczne
Fale elektromagnetyczne	nie	niekonieczne
Promieniowanie jonizujące	nie	niekonieczne
Ultradźwięki	nie	niekonieczne

Możliwe źródła zapłonu (Wykaz z PN-EN ISO 80079-36)	Związane z urządzeniami tak/nie	Uzasadnienie
Sprężanie adiabatyczne i fale uderzeniowe	nie	niekonieczne
Reakcja egzotermiczna	nie	niekonieczne

Zgodnie z normą PN-EN ISO 80079-36 dokonano wstępnej oceny źródeł zapłonu przedstawioną w Tab. 5.3.

Zgodnie z punktem 6.4.2.1 normy PN-EN ISO 80079-36 należało ocenić czy udar kafarem może być potencjalnym źródłem zapłonu.

Zgodnie z tym punktem iskry generowane mechanicznie wywołane pojedynczym uderzeniem w górnictwie powinny być analizowane zgodnie z normą PN-EN ISO 80079-38.

Tab. 5.4. przedstawia analizę ocen źródeł zapłonu zgodnie z PN-EN ISO 80079-38

Tab. 5.4. Analiza ocen źródeł zapłonu zgodnie z PN-EN ISO 80079-38.

Potencjalne źródło zapłonu		Przykład zastosowanych środków celu uniknięcia, aby źródła zapłonu nie stało się efektywne	Uzasadnienie
Normalna praca	Usterki, które nie mogą być zignorowane		
Iskry generowane przez wnikanie obcych materiałów		Zastosowanie obudowy o odpowiednim IP54	PN-EN 80079-38 Annex C.3
Iskry generowane poprzez tarcie materiałów metalowych oraz ceramicznych		Brak stosowania materiałów ceramicznych	PN-EN 80079-38 Annex C.3

Potencjalne źródło zapłonu		Przykład zastosowanych środków celu uniknięcia, aby źródła zapłonu nie stało się efektywne	Uzasadnienie
Uderzenia z udziałem rdzy i metali lekkich		Ochrona elementów wykonanych z metali lekkich obudową ze stali	PN-EN 80079-38 Annex C.3
Uderzenia z udziałem metali lekkich o powierzchnie twarde		Ochrona elementów wykonanych z metali lekkich obudową ze stali	PN-EN 80079-38 Annex C.3
Uderzenie bijaka roboczego o kowadło		Zastosowanie stali nierdzewnej (nieiskrzącej) w powierzchniach czynnych bijaka oraz kowadła	PN-EN 80079-36 Pkt 6.4.2.2 UWAGA W niektórych przypadkach kombinacja stali nierdzewnej ze stalą nierdzewną może zapobiegać iskrzeniu spowodowanemu pojedynczym uderzeniem.

Dodatkowo należy ocenić bezpieczeństwo konstrukcyjne „c” zgodnie z normą PN-EN ISO 80079-37, przedstawione w Tab. 5.5.

Tab. 5.5. Bezpieczeństwo konstrukcyjne „c” zgodnie z normą PN-EN ISO 80079-37.

Bezpieczeństwo konstrukcyjne „c” (Wykaz z PN-EN ISO 80079-37)	Związane z urządzeniami tak/nie	Uzasadnienie
Ochrona przed wnikaniami	tak	Do urządzenia nie mogą wnikać elementy obce
Uszczelnienie części ruchomych	nie	niekonieczne
Środki smarne, chłodziwa i ciecze stosowane w urządzeniach	nie	niekonieczne
Drgania	nie	niekonieczne

Wymagania dla części ruchomych	tak	Części ruchome nie mogą stać się efektywnym źródłem zapłonu
Wymagania dla łożysk	nie	niekonieczne
Wymagania dla układów napędowych	nie	niekonieczne
Wymagania dotyczące sprzęgieł i sprzęgieł zmiennej prędkości	nie	niekonieczne
Sprzęgła podatne	nie	niekonieczne
Wymagania dla hamulców i układów hamulcowych	nie	niekonieczne
Wymagania dla resorów i układów tłumiących	tak	Amortyzatory gumowe nie mogą stać się efektywnym źródłem zapłonu.
Wymagania dla taśm przenośnikowych	nie	niekonieczne

Zgodnie z wynikiem analizy należało w urządzeniu zapewnić:

- eliminację iskier będących potencjalnym źródłem zapłonu. Uzyskano to poprzez zastosowanie nieiskrzącej stali nierdzewnej w kafarze na powierzchniach czynnych bijaka oraz kowadła,
- zastosowanie obudowy stalowej chroniącej metale lekkie,
- zastosowanie obudowy o odpowiednim stopniu IP54 uniemożliwiającej wnikanie materiałów obcych.

Zastosowany w wersji WZB-2a zawór SEMI-2/P czyni urządzenie również elektrycznym. Maksymalna temperatura powierzchni obudowy, na której może osadzać się warstwa pyłu węglowego (obudowa urządzenia) przy zasilaniu maksymalną mocą powinna nie przekraczać 150 °C. Uzyskano to dzięki zastosowaniu ograniczenia mocy wejściowej urządzenia do wartości 2,72 W (co zapewnia ograniczenie prądu w obwodzie sterującym elektrozawór bezpiecznikiem w module MP N/O), czyli poniżej 3,3W. Maksymalna temperatura powierzchni wzбудnika WZB-2 nie przekracza temperatury otoczenia.

W wyniku przeprowadzonych w OBAC badań wzbudnik WZB-2 producenta Centrum Transferu Technologii EMAG Sp. z o.o., które zatrudnia doktoranta uzyskał certyfikat badania typu UE OBAC 22 ATEX 0068X, wydanie 0, który dotyczy konstrukcji, oceny i badań przedmiotowego urządzenia, produktu lub systemu ochronnego zgodnie z Dyrektywą 2014/34/UE.



Rys. 5.6. Certyfikat badania typu UE urządzenia Wzbudnik WZB-2.

Ośrodek Badań, Atestacji i Certyfikacji OBAC Sp. z o.o. Jednostka Notyfikowana 1461 zgodnie z Artykułem 17 i Artykułem 21 Dyrektywy Parlamentu Europejskiego Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. zaświadcza, że urządzenie, produkt lub system ochronny sprawdzono na zgodność z zasadniczymi wymaganiami w zakresie zdrowia i bezpieczeństwa dotyczącymi projektu, konstrukcji, urządzenia, produktu lub systemu ochronnego przeznaczonego do użytkowania w atmosferach potencjalnie wybuchowych, które podano w załączniku nr II niniejszej dyrektywy. Wyniki oceny i badań oraz wykaz uzgodnionej dokumentacji technicznej podano w poufnym raporcie nr. OBAC /22/ATEX/ 0068 [31].

6. Przegląd i analiza rozdzielczości aparatur geofizycznych stosowanych w polskim górnictwie węglowym

6.1. Przegląd rozwoju systemów i urządzeń do oceny zagrożenia tąpaniami stosowanych w górnictwie węglowym i w kopalniach rud miedzi

Historia rozwoju górniczych systemów geofizycznych jest bardzo szerokim tematem, gdzie pod względem wdrażania urządzeń duży wkład wniosły takie instytucje jak Centrum Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa EMAG [32] (centrum EMAG), Zakład Elektroniki Górniczej Tychy (ZEG Tychy) czy Główny Instytut Górnictwa (GIG). Przypominając rozwój systemów i urządzeń do oceny zagrożenia tąpaniami [33] wspomnieć należy o pierwszych systemach transmisji sygnałów sejsmoakustycznych, kilkukanałowej aparaturze **SSA1** opracowanej w **GIG** i produkowanej w **ZEG Tychy**, w której sygnały z geofonów rejestrowane były za pomocą rejestratorów pisakowych o powolnym przesuwie papieru w postaci kresek o różnej długości, a następnie mozolnie (tysiące impulsów w okresie zmiany) zliczane w „klasach” amplitudowych przez operatorów określających aktywność sejsmoakustyczną. Należy również wspomnieć wdrażanie aparatury **Górnik 1** (później Górnik PCM) produkcji **GEOPAN**, importowaną aparaturę firmy **Racal Thermionic**, które wymagały jednak pracochłonnej analizy wykonywanej przez operatora w celu oceny lokalizacji źródeł wstrząsów oraz określania ich energii.

Pierwszym automatycznym i działającym w czasie rzeczywistym systemem był zabudowany w KWK Szombierki w 1971r **SMC-2s** [34] przeznaczony do klasyfikacji amplitud sygnałów sejsmoakustycznych zbudowany w oparciu o stałoprogramowany rejestrator.

Pierwszy modelowy iskrobezpieczny system sejsmoakustyczny wdrożono na terenie KWK Pokój. Zbudowano go z wykorzystaniem programowanego rejestratora sygnałów **SMC-3** (pierwszy minikomputer z 16 bitową magistralą równoległą opracowany w górnictwie). System sejsmoakustyczny wyposażony był w iskrobezpieczną naturalną, prądową transmisję sygnałów sejsmoakustycznych **TSA-32** (R.Giel, A.Rej) i umożliwiał automatyczną rejestrację sygnałów sejsmoakustycznych,

określanie zmian ich energii umownej oraz aktywności w kontrolowanych rejonach kopalni.

Naturalnym rozwinięciem tego systemu był nowoczesny jak na owe czasy pierwszy iskrobezpieczny w pełni automatyczny programowany 32-kanalowy system sejsmoakustyczny **SAK** [34], [35], [36] przeznaczony do oceny zagrożenia tapaniami z wykorzystaniem metody sejsmoakustyki. Specjalistyczny kanał wejściowy umożliwiał określanie parametrów szybkozmiennych sygnałów sejsmoakustycznych uzyskiwanych z elektrodynamicznych geofonów DF7G, niezbędnych do dalszego przetwarzania przez stosunkowo wolny minikomputer PRS-4. System SAK wykorzystywał tak jak jego opracowana wcześniej wersja modelowa analogową transmisję sygnałów **TSA-32** z centralnym iskrobezpiecznym zasilaniem części dołowej (nadajników z wzmacniaczami i modulatorem prądu umieszczonych w pobliżu geofonu) z powierzchni. Transmisja umożliwiała przesyłanie sygnałów o częstotliwościach 200-3000Hz przy spadku ich amplitudy na granicach pasma o 6dB.



Rys. 6.1. Minikomputerowe systemy z analogową transmisją danych SAK z lewej i SYLOK z prawej.

W latach 1981-1985 prowadzono zadanie związane z budową, badaniem i wdrożeniem dla potrzeb górnictwa pierwszego działającego w czasie rzeczywistym systemu lokalizacji i analizy wstrząsów sejsmicznych w ramach, którego opracowano, przebadano i wdrożono do produkcji w ZEG Tychy z wykorzystaniem minikomputera PRS-4 systemu mikrosejsmologicznego (tak go wówczas nazywano - sejsmicznego) **SYLOK** [33], [36], [37], [38], [39], [40]. System wyposażony został w iskrobezpieczną,

naturalną, prądową transmisję sygnałów sejsmometrycznych **TSS** (R.Giel, A.Rej) o szerokości pasma częstotliwości transmitowanych sygnałów 0,1-50Hz (6dB), ze wzmacniaczami usytuowanymi w pobliżu sejsmometrów typu SPI70 i zasilanych w każdym kanale centralnie z powierzchni przez linie teletechniczne. System jako jeden z pierwszych w kraju umożliwiał automatyczne wykrywanie zjawisk sejsmicznych, ich rejestrację cyfrową oraz pomiar niezbędnych do lokalizacji i określania energii wstrząsów parametrów sygnałów.

System **SYLOK** wdrożony został w polskich kopalniach w liczbie 17 sztuk, a w chińskich w liczbie 5 sztuk. KNOW-HOW na produkcję systemu **SYLOK** w ChRL podobnie jak w przypadku systemu **SAK** było przedmiotem korzystnego kontraktu zawartego w 1983 roku.

Równolegle w Głównym Instytucie Górnictwa rozpoczęto opracowywanie systemu mikrosejsmologicznego **LKZ** (J. Tylec, T. Mrozek), który wdrożono do przemysłowego stosowania, a jego nowsza wersja **AS1** współpracująca z transmisją analogową **TSS** lub z transmisją z modulacją częstotliwości **Górnik PCM** oferowana była w kilku kopalniach.

Od 1985 roku prowadzono prace związane z opracowaniem przebadaniem i wdrożeniem do produkcji iskrobezpiecznego mikrosejsmologicznego (sejsmicznego) systemu **ARAMIS** [33], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44] (**SYLOK** nowej generacji), wdrożonego na terenie 15 kopalń. System zbudowano na bazie opracowanego dla potrzeb górnictwa mikrokomputerowego sterownika **PSP-Z80** chronionego patentem. System **ARAMIS** w stosunku do systemu **SYLOK** charakteryzował się: większą dynamiką rejestracji i przetwarzania 72 dB (**SYLOK** 60 dB), różnorodną wizualizacją graficzną przebiegów, większą funkcjonalnością (dwustopniowe przetwarzanie, wizualizacja i archiwizacja w PC, filtracja, analiza widmowa sygnałów, różne metody lokalizacji i współpraca z systemem gromadzenia informacji o wstrząsach **AVIA**), możliwością synchronizacji podstawy czasu w rejestracji automatycznej ze stacją radiową **OMA** lub **DCF**. System współpracował również z analogową prądową transmisją sygnałów **TSS** zapewniającą centralne iskrobezpieczne zasilanie części dołowej z powierzchni na odległość do 10 km, której dynamika była ≤ 72 dB a średnio wynosiła 60 dB (słaba izolacja linii, brak symetrii, zakłócenia).

Należy tu wspomnieć, że Główny Instytut Górnictwa jako wiodący ośrodek w zakresie geofizyki górniczej również rozwijał równolegle swoje systemy. W GIG opracowano aparaturę sejsmometryczną **AMAX-GSI** do monitorowania drgań powierzchni wywoływanych eksploatacją górnictw oraz dedykowaną aparaturę sejsmologiczną **SOS GIG** - System Obserwacji Sejsmologicznej – do monitorowania i oceny zagrożenia sejsmicznego w podziemnych kopalniach surowców mineralnych. Cechą charakterystyczną opracowań GIG u jest stosowanie analogowych systemów transmisji i zaawansowanego oprogramowania do analizy rejestrowych zjawisk [45].

W latach 1988 - 1990 w Centrum EMAG realizowano CPBR pt. w wyniku, którego opracowano iskrobezpieczny system sejsmoakustyczny nowej generacji **ARES** (następca systemu **SAK**) z naturalną prądową transmisją sygnałów **TSA 3** i piezoceramicznymi czujnikami w obudowie rozpierającej je w otworach wierconych w ociosie lub w stropie. System zbudowano z wykorzystaniem mikroprocesorowego sterownika **MS-80**. System **ARES-3** [46] dedykowany był głównie dla kopalń o małym zagrożeniu tąpnięciami. Umożliwiał on rejestrację i przetwarzanie przebiegów sejsmoakustycznych w 8 kanałach pomiarowych. System ten i jego następna wersja **ARES-4** [33], [38], [39], [40], [47], [48] został wdrożony w kopalniach węgla kamiennego i zakładach wydobywczych rud miedzi w liczbie 52 sztuk.

Zasadniczą niedogodnością stosowanych w latach 80 tych systemów przeznaczonych do oceny zagrożenia tąpnięciami była niedoskonałość wykorzystywanych systemów transmisji. Wszystkie eksploatowane systemy wykorzystywały w swym działaniu analogowe systemy transmisji (sejsmoakustyczne **TSA 32**, **TSA 3**, mikrosejsmologiczne (sejsmiczne) **TSS** lub systemy z modulacją częstotliwości (**Thermionic**, **Górniki PCM**). Transmisje naturalne z modulacją prądu cechowała niewystarczająca odporność na zakłócenia przemysłowe i zmienność parametrów linii transmisyjnej, co uniemożliwiało uzyskanie dużej dynamiki rejestracji > 60 dB. Transmisje z modulacją częstotliwości były bardziej odporne na zakłócenia przemysłowe, jednak cechowała je zbyt mała dynamika rejestracji (< 60 dB) oraz ograniczone w górnym zakresie pasmo przenoszonych częstotliwości (< 150 Hz) i w związku z tym nie mogły być stosowane w systemach sejsmoakustycznych. Stosowane wówczas systemy transmisji nie rejestrowały sygnałów w przedziale częstotliwości od 50 Hz do 200 Hz i jak wykazały badania prowadzone w kopalniach

węgla kamiennego oraz zakładach górniczych rud miedzi utrudniało to właściwą rejestrację istotnych dla oceny zagrożenia tąpniętami zjawisk sejsmicznych.

W latach 1993-1994 w Centrum EMAG podczas realizacji projektu celowego pt. „**Cyfrowy iskrobezpieczny system sejsmologiczny dla kopalni węgla kamiennego Wujek**” zapoczątkowano prace nad opracowaniem cyfrowej transmisji sygnałów sejsmicznych. W wyniku realizacji projektu opracowano dwie wersje cyfrowej transmisji sygnałów sejsmicznych **CYTES** i **DTSS** [47], [49]. Obie wersje charakteryzowały się przetwarzaniem analogowo cyfrowym sygnałów sejsmicznych bezpośrednio przy sejsmometrze SPI70 z wykorzystaniem iskrobezpiecznych nadajników dołowych wyposażonych w 14 bitowe przetworniki. Przetworniki synchronizowane były w czasie i zasilane iskrobezpiecznie z powierzchni przez linie teletechniczne o długości 8 km (**CYTES**) i 10 km (**DTSS**). Te same linie teletechniczne transmitowały również cyfrowe dane na powierzchnię szeregowo w czasie rzeczywistym. Prototypowe wersje transmisji przebadano przy współpracy z systemem **ARAMIS**, w którym zastąpiono stosowaną dotychczas transmisję analogową **TSS**. Ze względu na większą prostotę konstrukcji i mniejszy pobór prądu oraz mocy przez nadajnik, co ułatwiło uzyskanie dopuszczenia do stosowania w kopalniach gazowych oraz niezawodny sposób synchronizacji i większy zasięg transmisji zdecydowano o wyborze do dalszego stosowania w systemie **ARAMIS** cyfrowej transmisji **DTSS**. Kolejne usprawnienia transmisji **DTSS** doskonaliły jej parametry [40], [50], [51]. Uzyskano poszerzenie pasma rejestrowanych częstotliwości sygnału w nadajniku dołowym cyfrowej transmisji **DTSS** do zakresu 0 – 150 Hz. Ponieważ system transmisji rejestrował składową stałą, to dolną granicę częstotliwości sygnałów sejsmicznych określał wyłącznie stosowany sejsmometr SPI70 lub niskoczęstotliwościowy geofon, którego sygnał wyjściowy lepiej był wykorzystywany, bo do częstotliwości 150 Hz. Zdecydowanie poprawiono dynamikę rejestracji i przetwarzania sygnałów sejsmicznych do 90 dB z nadajnikiem SN i 100 dB z nadajnikiem SN7, co zwiększyło zakres prawidłowo rejestrowanych zjawisk sejsmicznych o energii od 10^2J do 10^8J , bez zniekształceń i nasycień amplitudy sygnałów wysokoenergetycznych zjawisk. Wzrosła również odporność transmisji na zakłócenia przemysłowe.

Jako kolejną iterację uzupełniono aparaturę **ARES-3** o mikroprocesorowy extender **REX-32** uzyskując strukturę dwuprocesorową. W nowym rozwiązaniu

ARES-4 sterownik **MS-80** realizował wszystkie dotychczasowe funkcje, natomiast zadaniem nowego modułu **REX-32** była obsługa dostępu do lokalnej bazy danych z poziomu nadrzędnego komputera PC, co znacząco rozwinęło możliwości funkcjonalne systemu oraz zwiększyło szybkość jego działania. Udokładniono również pomiar czasu rzeczywistego poprzez zastosowanie zegara **RTC-72421A**.

W latach 1995-1996 w Centrum EMAG w ramach projektu celowego **Nr 1329/C.T12-9/95 pt. „Sonda pomiarowa przeznaczona do rejestracji aktywności sejsmoakustycznej górotworu, przystosowana do pracy w głębokich otworach”** opracowano i przebadano metody mocowania jednoskładowych i trójskładowych sond sejsmoakustycznych w głębokich otworach stropu (do 60 m) oraz sposobu cyfrowej transmisji danych z sond trójskładowych na powierzchnię [52]. W projekcie po raz pierwszy zastosowano jednopłytkowy mikroprocesor sterujący **MS GCAT 6000** z modułem wejść analogowych **MA GCAT 2600** wyposażonym w trzy analogowe kanały wejściowe umożliwiające maksymalną częstotliwość próbkowania sygnału 5 kHz i dynamikę przetwarzania A/C 72dB, który później stał się bazą sprzętową rozwiązań systemowych do monitorowania zagrożeń powierzchni wywoływanych eksploatacją górnictw **ARP 2000** [53], [54], [55], [56], [57], [58].

W latach 2000 - 2003 w Centrum EMAG realizowano projekt celowy zamawiany **PCZ-003-20** wspólnie z Centrum Mechanizacji i Automatyzacji Górnictwa KOMAG i Głównym Instytutem Górnictwa GIG pt. **„System monitorowania i wizualizacji oraz sterowania procesem pracy kompleksu ścianowego w restrukturyzowanych kopalniach węgla kamiennego”** [39], [40], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65] w zakresie 2 zadań głównych związanych z opracowaniem i realizacją systemu do tomografii rejonu ściany **GEOTOMO** oraz systemu **ARAMIS SA** do kontroli zjawisk dynamicznych przed frontem ściany wydobywczej. Opracowany w ramach projektu iskrobezpieczny system typu **GEOTOMO** [39], [40], [66], [67], [68], [69], [70], [71] przeznaczony był do kontroli względnych zmian naprężeń w stropie i pokładzie przed frontem ściany. System wykorzystywał do prześwietlania falę sejsmiczną wzbudzaną przez organ urabiający kombajnu. Umożliwiał lokalizację miejsc koncentracji względnych zmian naprężeń i ocenę przyczyn ich powstawania oraz związanych z tym zagrożeń. Opracowany pierwszy w polskim górnictwie iskrobezpieczny system typu **ARAMIS SA** [39], [40], [48], [69], [72], [73], [74], [75],

[76], wykorzystujący sondy trójskładowe przeznaczony był do oceny zagrożenia zjawiskami dynamicznymi przed frontem ściany. System umożliwiał wykrywanie, rejestrację, lokalizację metodą kierunkową, grupowanie oraz ocenę energii zjawisk sejsmicznych. Zapewniał identyfikację miejsc o intensywnym wzroście emisji oraz interpretację zagrożeń zjawiskami dynamicznymi w oparciu o nową funkcję ryzyka.

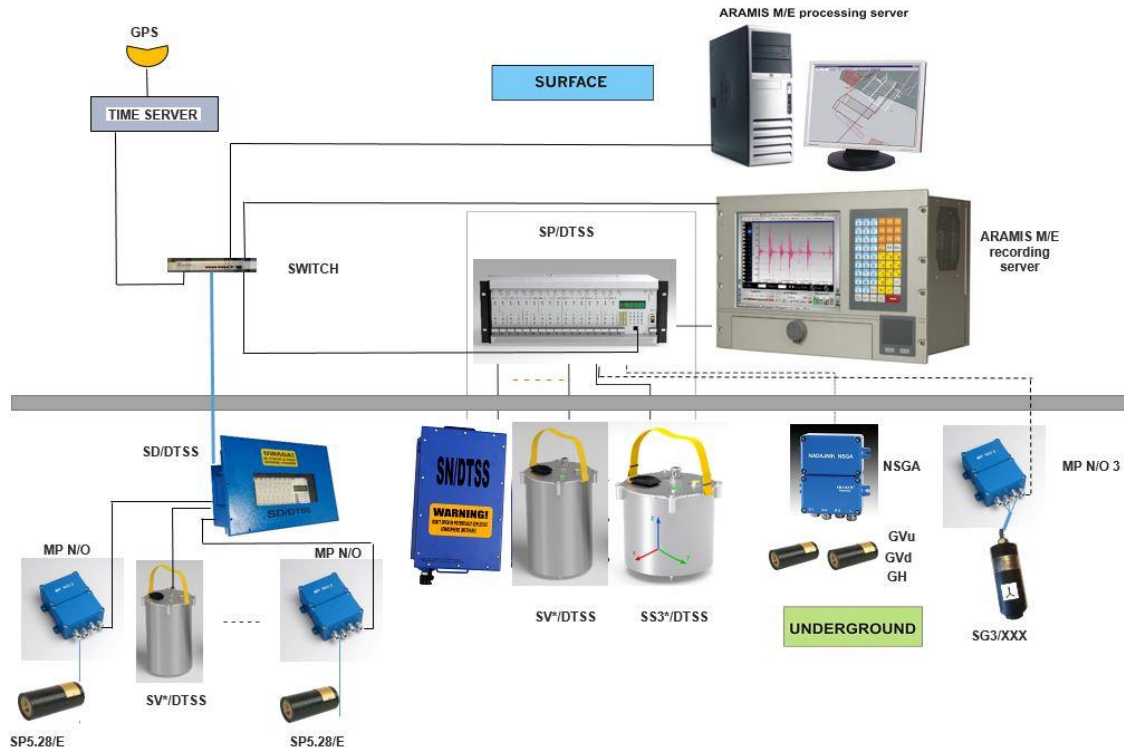
W latach 2004 – 2008 realizowano w Centrum EMAG prace związane z wykonaniem dużego międzynarodowego projektu **EUREKA E!3353 pt. „System do monitorowania zagrożeń w kopalniach, związanych z naruszeniem równowagi górotworu oraz środowiska”** [39], [40], [48], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89]. Projekt realizowany był przez dwóch zasadniczych partnerów: Centrum Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa EMAG (Polska), Instytut Problemów Kompleksowego Zagospodarowania Bogactw Naturalnych Rosyjskiej Akademii Nauk (IPKON RAN) w Moskwie i dodatkowo firmę ISS International Limited, Stellenbosch w Republice Południowej Afryki oraz Uniwersytet w Tuzli (UNIT) w Bośni i Hercegowinie na podstawie podpisanej umowy o współpracy.



Rys. 6.2. Współczesny iskrobezpieczny system sejsmoakustyczny ARES-5/E, kaseta pomiarowa, nadajnik dołowy oraz sonda pomiarowa.

W skład opracowanego systemu o akronimie **SAFECOMINE** wchodziły następujące podsystemy: iskrobezpieczny sejsmiczny **ARAMIS M/E** z transmisją cyfrową, iskrobezpieczny sejsmoakustyczny **ARES-5/E** z transmisją analogową, do kontroli podporności w stojakach obudowy hydraulicznej **MONSTER/E**, sejsmiczny **ARAMIS SA/E** z cyfrową iskrobezpieczną modemową transmisją sygnałów przeznaczony do rejestracji przy pomocy sond trójskładowych i analizy zjawisk dynamicznych w stropie, geotomografii **GEOTOMO/E** z transmisją cyfrową sygnałów w wersji iskrobezpiecznej przeznaczony do kontroli względnych zmian naprężeń przed frontem ściany poprzez automatyczną ocenę tłumienia rejestrowanej fali sprężystej wzbudzanej organem urabiającym pracującego kombajnu, sejsmiczny powierzchniowy **ARP 2000P/E** przeznaczony do monitorowania zagrożeń infrastruktury kopalni i powierzchni wywołanych eksploatacją górniczą. Możliwości funkcjonalne podsystemu były doskonałe podczas realizacji projektu jak i w latach następnych [39], [40], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101].

W prowadzonych pracach kierowano się dążeniem do doskonalenia parametrów metrologicznych podsystemów przeznaczonych do kontroli zagrożeń. Udoskonalono również programy umożliwiające automatyczne opracowywanie oceny zagrożeń zgodnie z opracowanymi w GIG, obowiązującymi i zatwierdzonymi przez Wyższy Urząd Górniczy metodami interpretacji: sejsmoakustyki, seismologii, wierceń małośrednicowych i metodą kompleksową (została opracowana pierwsza wersja oprogramowania **Hestia**).



Rys. 6.3. Współczesny iskrobezpieczny system sejsmiczny ARAMIS M/E z możliwością pracy na powierzchni (SP/DTSS) jak i w podziemiu kopalni (SD/DTSS) wraz z bogatym zestawem dołowych czujników pomiarowych.

Do dnia dzisiejszego podsystemy **ARAMIS M/E**, **ARES-5/E** oraz **AR2000P/E** są rozwijane i wdrażane na terenie Polski oraz ChRL. Tak szeroki zakres wdrożeń uzyskano dzięki prawidłowo zrealizowanej fazie badawczo rozwojowej, skutecznie przeprowadzonej akcji marketingowej, dobremu przygotowaniu komercyjnej, wielojęzycznej wersji systemu oraz jego pełnej dokumentacji dla potencjalnych użytkowników w kraju i za granicą. W roku 2013 Centrum Transferu Technologii EMAG Sp. z o.o. (**CTT EMAG**) stała się posiadaczem licencji na wyżej wymienione systemy i rozwija je do dzisiaj.

W latach 2014 – 2016 w Centrum EMAG realizowano projekt badań stosowanych **PBS2/B2/8/2013** o akronimie **INGEO** pt. „Innowacyjne metody i system do oceny zagrożenia tąpnięciami na podstawie probabilistycznej analizy procesu pęknięcia i geotomografii online”. W wyniku projektu opracowano i przebadano najnowszej generacji szerokopasmowy (sejsmoakustyka i sejsmika) iskrobezpieczny zintegrowany system do oceny zagrożenia tąpnięciami. System dedykowany dla kopalń głębinowych wykorzystuje w rejonie ściany wydobywczej różne metody tomografii pasywnej

i aktywnej realizowane na bieżąco oraz probabilistyczną analizę procesu pękania. W ramach projektu [5], [102] został opracowany, wykonany i przebadany prototyp niekomercyjny systemu **INGEO**. Stanowi on kontynuację rozwoju systemów sejsmicznego **ARAMIS M/E** i sejsmoakustycznego **ARES-5/E** poprzez ich wzbogacenie o nowe, innowacyjne technologie i metody analiz. System został wyposażony w cyfrową transmisję na powierzchnię z wykorzystaniem światłowodów i lokalną w rejonie ściany z wykorzystaniem linii przewodowych. Umożliwia ocenę zagrożenia tąpnięciami metodami standardowymi: sejsmoakustyczną, sejsmologią, hazardu sejsmicznego oraz w oparciu o tomografię rejonu przed frontem ściany: pasywną z wykorzystaniem wstrząsów górniczych i aktywną z wykorzystaniem wzbudników lub organu urabiającego kombajnu.

Prace wykonane w ramach projektu umożliwiły opracowanie nowoczesnych metod oceny zagrożenia tąpnięciami oraz ich implementację w opracowanym szerokopasmowym systemie pomiarowym. System **INGEO** po komercjalizacji miał pozwolić na stosowanie wzajemnie się uzupełniających metod sejsmicznej tomografii pasywnej i aktywnej oraz metody hazardu sejsmicznego, co w połączeniu z innymi uzupełniającymi metodami do oceny zmian naprężenia górotworu oraz jego deformacji, miały zapewnić kompleksową ocenę zagrożeń w rejonie ściany wydobywczej. Niestety opracowane w ramach systemu **INGEO** wzbudniki ze sprężynami gromadzącymi energię uderzenia i siłownikami pneumatycznymi cechowały się dużą masą, co utrudniało ich przebudowę w warunkach ruchowych kopalni i uniemożliwiło ich skuteczną komercjalizację.

Zasygnalizowana szczególnie w projekcie systemu INGEO potrzeba ciągłego w miarę możliwości monitorowania stanu górotworu wiązała się z koniecznością powszechnego zastosowania metod aktywnych wzbudzających fale sejsmiczne w górotworze w celu precyzyjnego określenia zmian prędkości ich rozchodzenia i związanego z tym szybkiego rozpoznania zmian panujących tam naprężeń i zagrożeń.

Niniejsza praca doktorska udowodniła, że możliwe jest skonstruowanie mobilnego iskrobezpiecznego i sterowanego pneumatycznego źródła sejsmicznego

o stosunkowo małej masie do bieżącej oceny stanu zagrożenia tapaniami szczególnie zagrożonych rejonów ściany wydobywczej.

W latach 2016-2025 w Centrum Transferu Technologii EMAG podjęto pracę nad opracowaniem i wdrożeniem w KGHM Polska Miedź S.A. jednolitego systemu sejsmicznego **ARAMIS -MSD** [103] przeznaczonego dla kopalń rudy miedzi.

System **ARAMIS-MSD** w dużym stopniu wykorzystuje doświadczenia uzyskane podczas eksploatacji systemów sejsmicznych **ARAMIS M/E** i sejsmoakustycznych **ARES-5/E** i sprzętowo jest z nimi jednolity. Wyposażony jest w trzy moduły; moduł sejsmiczny wykorzystujący nowoczesne sejsmometry z wbudowanym nadajnikiem cyfrowym SV* oraz SS3*/DTSS, moduł sejsmoakustyczny wykorzystujący nadajniki MP N/O w trybie szybkiego próbkowania oraz sondy geofonowe SP-5.28/E, moduł konwergencji wykorzystujący konwergometrię KG1/DTSS.

Jego rozproszona struktura wykorzystująca przewodową i światłowodową transmisję sieciową umożliwia pracę wielokasetową (system w O/ZG Rudna posiada 160 kanałów sejsmicznych) oraz wspólny monitoring sejsmiczny pomiędzy zakładami górniczymi. Synchronizacja czasu poprzez nowoczesny protokół **PTP IEEE 1588** umożliwia realizację dołowych stacji wyniesionych.

Historia rozwoju polskich systemów sejsmicznych jest niezwykle bogata. Trwałość i jakość techniczną tych systemów potwierdza fakt, że wiele z nich, w tym analogowe systemy **ARAMIS-S**, pozostaje w użyciu i jest aktywnie obsługiwana od lat 80. XX wieku. Tradycja ta jest kontynuowana, a niniejsza praca badawczo-wdrożeniowa stanowi tego przykład.

6.2. Analiza rozdzielczości sejsmoakustycznej aparatury pomiarowej wykorzystywanej w podziemnych zakładach górniczych

Systemami do pomiaru drgań sejsmicznych w ścianie węgla są iskrobezpieczne systemy mikrosejsmiczne, nazywane również sejsmoakustycznymi. Ich konstrukcja i parametry techniczne umożliwiają rejestracje mikropełnięć w pokładzie węgla, które w literaturze nazywane są również trzaskami lub impulsami sejsmoakustycznymi. Ze względu na założenie niewielkiej odległość czujnika od zjawiska oraz eliminacji

zjawisk akustycznych, częstotliwość sygnału zawiera się w pasmie akustycznym 20-1500Hz. Czułość czujnika musi być kompromisem pomiędzy głośną pracą urządzeń przy - ścianowych oraz niewielką amplitudą sygnału w zakresie um/s.

Aparaturą wykorzystywaną do pomiarów sejsmoakustycznych na terenie Polski oraz Chin jest iskrobezpieczny system ARES-5/E. System ten posiada dobrane parametry pracy na podstawie wieloletnich doświadczeń z projektów aparatur poprzednich generacji.

Przetwornikiem drgań systemu jest sonda pomiarowa SP-5.28/E wykorzystująca wysokoczęstotliwościowy geofon. Częstotliwość pracy przetwornika jest ustalona na zakres 28-1500Hz@3dB. Czułość podana przez producenta to $8,66 \left[\frac{V}{m/s} \right]$.

System ARES-5/E posiada iskrobezpieczną prądową transmisję danych o zasięgu do 10km. Nadajnikiem dołowym jest konwerter napięciowo-prądowy N/TSA-5.28/E o współczynniku konwersji $T_{N500} 59.19 \left[\frac{V}{mA} \right]$.

Częścią odbiorczą powierzchniową jest iskrobezpieczna karta odbiorcza OA-5/E o regulowanym wzmocnieniu konwersji prądowo-napięciowej, przedstawionej w Tab. 6.1.

Tab. 6.1. Wzmocnienia karty odbiorczej OA-5/E systemu Ares-5/E

$T_{OD(x)500}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wzmocnienie [dB]	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Wzmocnienie [mA/V]	16.2	21.6	28.8	38.4	51.2	68.3	91.1	121.5	162

System jest rozwijany do dnia dzisiejszego i obecnie posiada aż trzy karty z konwersją analogowo-cyfrową.

Karta MI-820 jest wyposażona w 8 konwerterów analogowo-cyfrowych 9-bitowych ADS7804 o zakresie pomiarowym +/-10V. Oznacza to konwersję sygnału w zakresie 268 bitów(+/-255 bit) oraz jego dynamikę (stosunek sygnału do szumu) na poziomie 54dB [104].

$$SQNR = 20 \log_{10} 2^Q \approx 6.02 Q [dB] \quad (6.1.)$$

$$SNQR_{9bit} = 6.02 * 9 \approx 54 [dB]$$

Kwant przetwornika 9 bitowego (najmniejsza wartość mierzona, jeden bit) przetwornika wynosi zatem:

$$q = \frac{\pm 10 V}{2^9} = \pm 39 mV \quad (6.2.)$$

Wraz z rozwojem aparatury zaprojektowano nową kartę REX-LAN posiadającą 8-wejściowy, 16 bitowy konwerter analogowo-cyfrowy AD7606 o zakresie pomiarowym +/-10V. Oznacza to konwersję sygnału w zakresie +/-2¹⁵ bitów (+/- 32768 bit) oraz jego dynamikę (stosunek sygnału do szumu) na poziomie 96dB.

$$SNQR_{16bit} = 6.02 * 16 \approx 96 [dB] \quad (6.3.)$$

Należy zauważyć, że zwiększanie dynamiki toru analogowego poprzez zwiększanie liczby bitów przetwornika A/C ma swoją fizyczną granicę ze względu na własności elektryczne linii teletechnicznej, co skutkuje rozbieżnością między wartościami teoretycznymi a praktycznymi. Sygnał, dla linii przesyłowej o długości 10 kilometrów, jest szczególnie narażony na zakłócenia.

Kwant przetwornika 16 bitowego (najmniejsza wartość mierzona, jeden bit) przetwornika wynosi zatem:

$$q = \frac{\pm 10 V}{2^{16}} = \pm 305 \mu V \quad (6.4.)$$

Trzecim konwerterem analogowo-cyfrowym systemu ARES-5/E jest Karta MI-821. Jest to specjalistyczny moduł zaprojektowany do analizy obwiedni impulsów sejsmoakustycznych, wykorzystywanych w wewnętrznym algorytmie systemu i nie ma dostępu do tych danych z zewnątrz.

Posiadając wszystkie powyższe parametry systemu można wyznaczyć czułość całego toru pomiarowego oraz jego zakres pomiarowy. Jako częstotliwość środkową przyjmuje się $f=500\text{Hz}$.

Czułość toru pomiarowego K_{500} dla częstotliwości charakterystycznej $f=500\text{Hz}$.

$$K_{500} = G_{SP500} * T_{N500} * T_{OD(x)500} \left[\frac{V}{\frac{m}{s}} = \frac{V}{\frac{m}{s}} \times \frac{V}{mA} \times \frac{mA}{V} \right] \quad (6.5.)$$

Tab. 6.2. przedstawia wyniki wzmocnienia toru pomiarowego.

Tab. 6.2. Wzmocnienie toru pomiarowego analogowej aparatury ARES-5/E.

Nastawa Wzmocnienia	OA-5/E [mA/V]	Wzmocnienie $T_{N500} * T_{OD(x)500}$	Wzmocnienie K_{500}
1	16.2	959	8304
2	21.6	1279	11072
3	28.8	1705	14762
4	38.4	2273	19683
5	51.2	3031	26244
6	68.3	4043	35010
7	91.1	5392	46697
8	121.5	7192	62279
9	162	9589	83039

Znając wartości wzmocnienia toru K_{500} oraz kwant przetwornika analogowo-cyfrowego można wyznaczyć teoretyczny zakres pomiarowy prędkości fali sejsmicznej.

Minimalny poziom rejestrowanego sygnału teoretycznie wyznacza nam kwant przetwornika analogowo-cyfrowego można zatem zapisać:

$$A_{min} = \frac{q}{K_{500}} \quad (6.6.)$$

Maksymalny poziom rejestrowanego sygnału wyznacza nam zakres pomiarowy przetwornika analogowo-cyfrowego:

$$A_{max} = \frac{10 V}{K_{500}} \quad (6.7.)$$

Tab. 6.3. Minimalne i maksymalne wartości amplitud dla systemu ARES-5/E.

Nastawa Wzmocnienia	Wzmocnienie Toru K_{500}	$A_{MIN} @ 9bit$ [μm/s]	$A_{MIN} @ 16bit$ [nm/s]	$A_{MAX} @ 9,16bit$ [μm/s]
1	8304	4,70	36,75	1204,24
2	11072	3,53	27,56	903,18
3	14762	2,65	20,67	677,41
4	19683	1,98	15,50	508,05
5	26244	1,49	11,63	381,04
6	35010	1,12	8,72	285,63
7	46697	0,84	6,54	214,15
8	62279	0,63	4,90	160,57
9	83039	0,47	3,68	120,43

Najnowszą aparaturą sejsmoakustyczną wdrożoną w polskim i zagranicznym górnictwie jest system ARAMIS-MSD w kopalniach grupy KGHM wykorzystujący najnowszy nadajnik MP N/O działający w trybie szybkiego próbkowania 2000Hz.

Nadajnik ten posiada 24 bitowy konwerter analogowo-cyfrowy ADS1282 o zakresie pomiarowym $\pm 5V$. Kwant przetwornika wynosi odpowiednio dla 16 bitów:

$$q = \frac{\pm 5 V}{2^{16}} = \pm 76,29 \mu V \quad (6.8.)$$

Oraz dla 12 bitów:

$$q = \frac{\pm 5 V}{2^{12}} = \pm 2,44 mV \quad (6.9.)$$

W związku z ograniczoną przepustowością transmisji cyfrowej DTSS nadajnik ten pracuje w trybie 12 bitowym w systemach z powierzchnią kasetą pomiarową SP/DTSS oraz 16 bitowym z dołową kasetą pomiarową SD/DTSS. Korzystając z tych samych zależności można wyznaczyć minimalne i maksymalne amplitudy sygnału dla systemu ARAMIS M/E i modułu pomiarowego MP N/O nadmienając, że wzmocnienie toru cyfrowego wynosi 1. W urządzeniu występuje wzmocnienie cyfrowe zaczynające się od wartości 2.

Tab. 6.4. Minimalne i maksymalne wartości amplitud dla systemu ARAMIS M/E z nadajnikiem MP N/O.

Wzmocnienie	Wzmocnienie Toru K_{500}	$A_{MIN} @ 12bit$ [um/s]	$A_{MIN} @ 16bit$ [um/s]	$A_{MAX} @$ 12,16bit [um/s]
2	17,32	140,96	8,81	288,68
4	34,64	70,48	4,40	144,34
8	69,28	35,24	2,20	72,17
16	138,56	17,62	1,10	36,09
32	277,12	8,81	0,55	18,04
64	554,24	4,40	0,28	9,02
128	1108,48	2,20	0,14	4,51
256	2216,96	1,10	0,07	2,26
512	4433,92	0,55	0,03	1,13

W Tab. 6.3 oraz Tab. 6.4 przedstawiono wyniki teoretycznych mierzalnych amplitud drgań dla aparatury Ares-5/E oraz ARAMIS M/E. Należy nadmienić, że wartości praktyczne amplitud minimalnych są uzależnione od poziomu szumu (szum mechaniczny, szum aparatury) i z pewnością są wyższe niż teoretyczne.

Analizując wyniki można jednoznacznie zauważyć większą rozdzielczość pomiarową systemu cyfrowego wynikającą z wykorzystania nowocześniejszego przetwornika A/C. Kluczowy jest tu parametr wzmocnienia sygnału prądowego w aparaturze analogowej, które musi być niezwykle duży by umożliwić pomiar w zakresie przetwornika A/C. Należy pamiętać, że parametr ten wzmacnia również szum własny czujnika oraz zakłócenia rejestrowane na całej długości linii teletechnicznej, która może mieć 10 km. Aparatura cyfrowa poprzez przeniesienie konwersji sygnału z analogowej na cyfrową w pobliżu czujnika pomiarowego, znacząco obniża poziom szumów, zakłóceń oraz zwiększa dynamikę rejestrowanego sygnału. Niska wartość kwantu przetwornika, w połączeniu z metodą sumowania, umożliwia rejestrację sygnału o wysokiej rozdzielczości i dużej dynamice, nawet w silnie zaszumionym środowisku frontu pokładu węgla. Takimi parametrami charakteryzują się systemy ARES-5/E z kartą REX_LAN oraz ARAMIS M/E z cyfrową transmisją danych DTSS.

7. Testy wzbudnika WZB-2 jako źródło sejsmicznego w tomografii sejsmicznej na poligonie badawczym KGHM O/ZG „RUDNA”

7.1. Wprowadzenie

Wyprzedzając harmonogram podjęto próbę testów prototypu wzbudnika podczas komercyjnych badań tomografii sejsmicznej w zakładzie górniczym KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Rudna.

Badanie miało wykazać możliwość zastąpienia ładunków wybuchowych wzbudnikiem pneumatycznym. Pozytywny wynik badań miałby szereg następstw w aktywnej tomografii sejsmicznej w górnictwie. Likwidacja materiałów wybuchowych podczas badania umożliwia zwiększenie rozdzielczości tomografii poprzez zwiększenie liczby punktów wzbudzenia. Obecnie ograniczona jest ona do kilku. Nie wymagane jest angażowanie służb ratowniczych i strażowych, co jest znaczącym kosztem dla kopalni. Dodatkowo zaangażowanie tak wielu służb ogranicza czas wykonywania badania i zawsze są one wykonywane w dużym pośpiechu.

Pierwszą próbę podjęto w dniu 19.12.2021r. Zakończyła się ona niepowodzeniem spowodowanym brakiem doświadczenia operatorów w eksploatacji nowego urządzenia. Wzbudnik został źle zamontowany i jego skuteczność była bardzo ograniczona.

Drugą próbę podjęto w dniu 26.06.2022r. W tym teście urządzenie było poprawnie złożone i udało się je uruchomić. Niestety próby synchronizacji urządzenia z aparaturą pomiarową nie powiodły się, a ograniczony czas badania komercyjnego nie pozwalał na więcej testów.

Wyniki testu przedstawiono w [105].

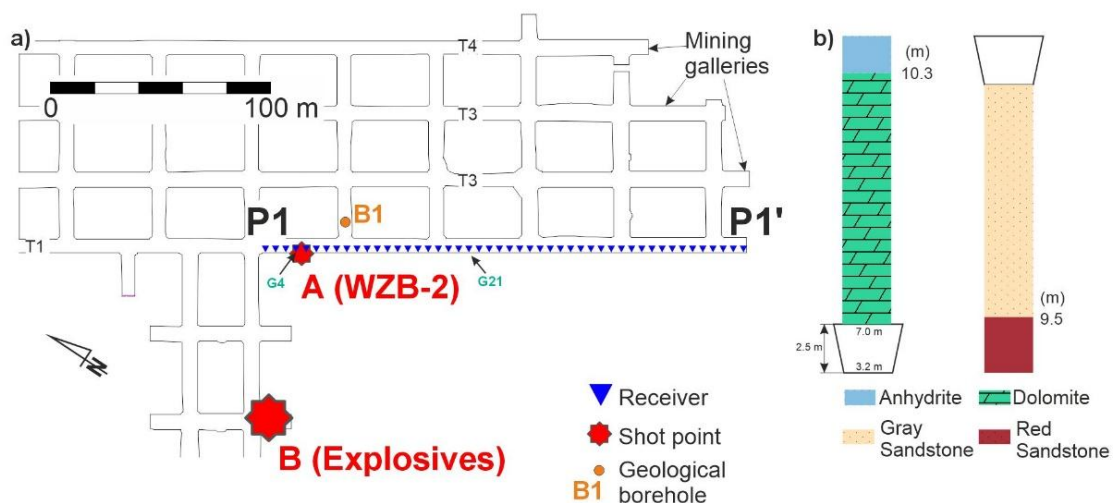
7.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań

Testy wzbudnika jako źródła sejsmicznego w tomografii sejsmicznej przeprowadzono w warunkach kopalni rudy miedzi Rudna, położonej w południowo-wschodniej części LGOM, Polska. Rudę miedzi wydobywa się na głębokości ponad

1000 m pod powierzchnią. Górnictwo prowadzi się metodą komorowo-filarową pojedynczego poziomu z ugięciem stropu i osłabianiem filarów za pomocą materiałów wybuchowych [106]. Geometria komór i filarów jest dobierana w zależności od lokalnych warunków geomechanicznych i parametrów wytrzymałościowych skały. Przekrój wyrobisk w badanym obszarze ma kształt zbliżony do trapezowego, o wysokości około 2,5 m oraz szerokościach około 7,0 m i 3,2 m dla górnej i dolnej podstawy. Wyrobiska są wykonywane metodą klasyczną z użyciem materiałów wybuchowych. W przekroju wyrobisk ogólnie występują dolomit, łupek miedzionośny i piaskowiec biały. Strop wyrobisk w badanym obszarze zawiera warstwę dolomitu o grubości około 10 m, a następnie warstwę anhydrytu. W bezpośrednim spągu znajduje się piaskowiec szary formacji Weissliegend o grubości około 9,5 m, który jest górną częścią piaskowca formacji Rotliegend [107]. Ogólnie rzecz biorąc, lokalne warstwy geologiczne w badanym obszarze zapadają pod kątem około 2-3 stopni na północny wschód i wykazują niewielką zmienność litologiczną (Rys. 7.1 b).

7.3. Schemat pomiaru

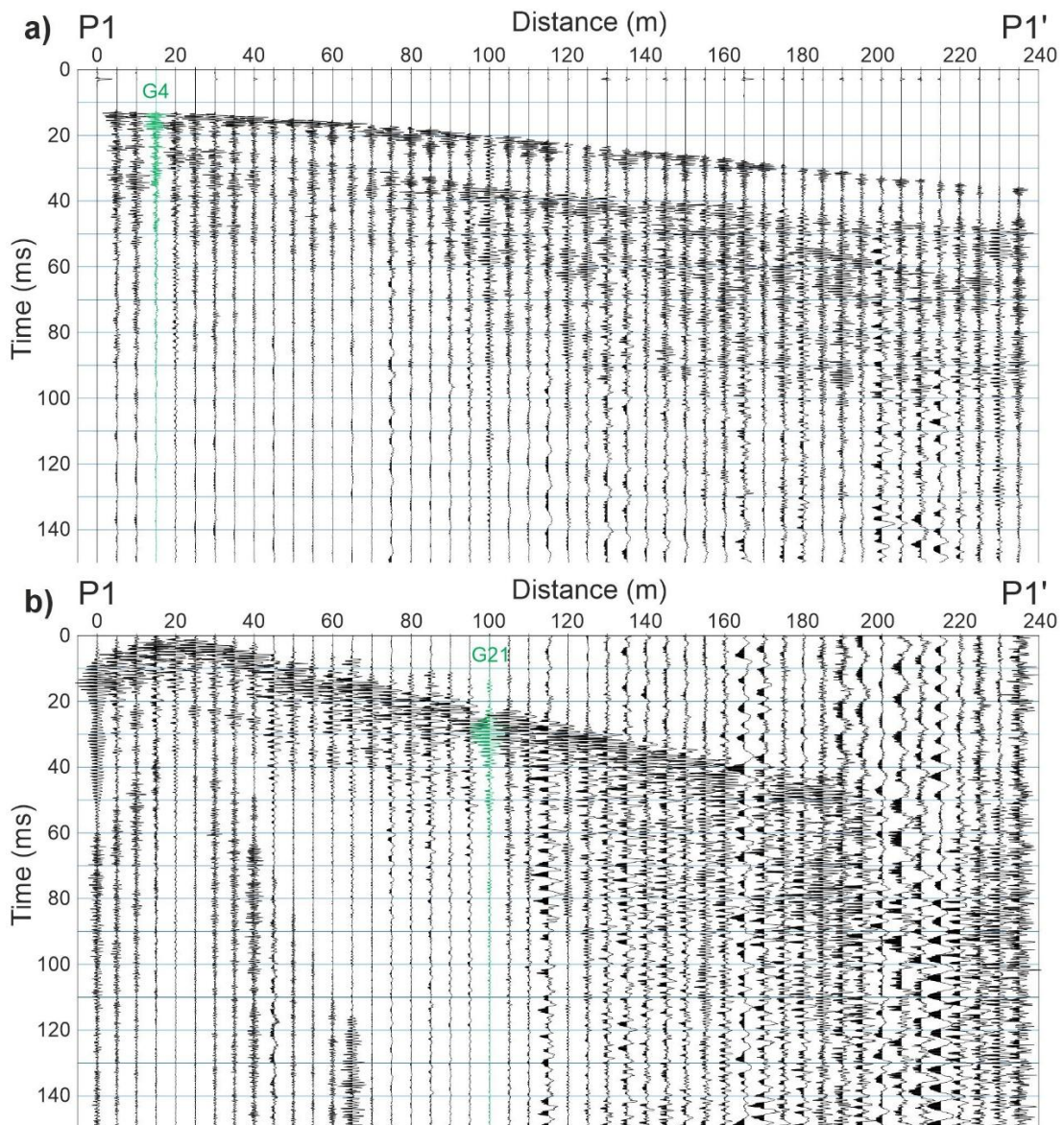
Profil pomiarowy P1-P1', składający się z 48 geofonów, znajdował się w galerii T1 (Rys. 7.1, a). Geofony były rozmieszczone w odstępach około 5 m w ścianie bocznej, około 0,5 m od stropu galerii w formacji dolomitowej. Częstotliwość naturalna geofonów wynosiła 100 Hz. Do rejestracji danych użyto dwóch systemów sejsmograficznych Geode-24 firmy Geometrics (USA).



Rys. 7.1. Schemat pomiarowy testu w O/ZG Rudna a) oraz profil geologiczny z otworu B1 b) [105].

7.4. Przetwarzanie i interpretacja danych

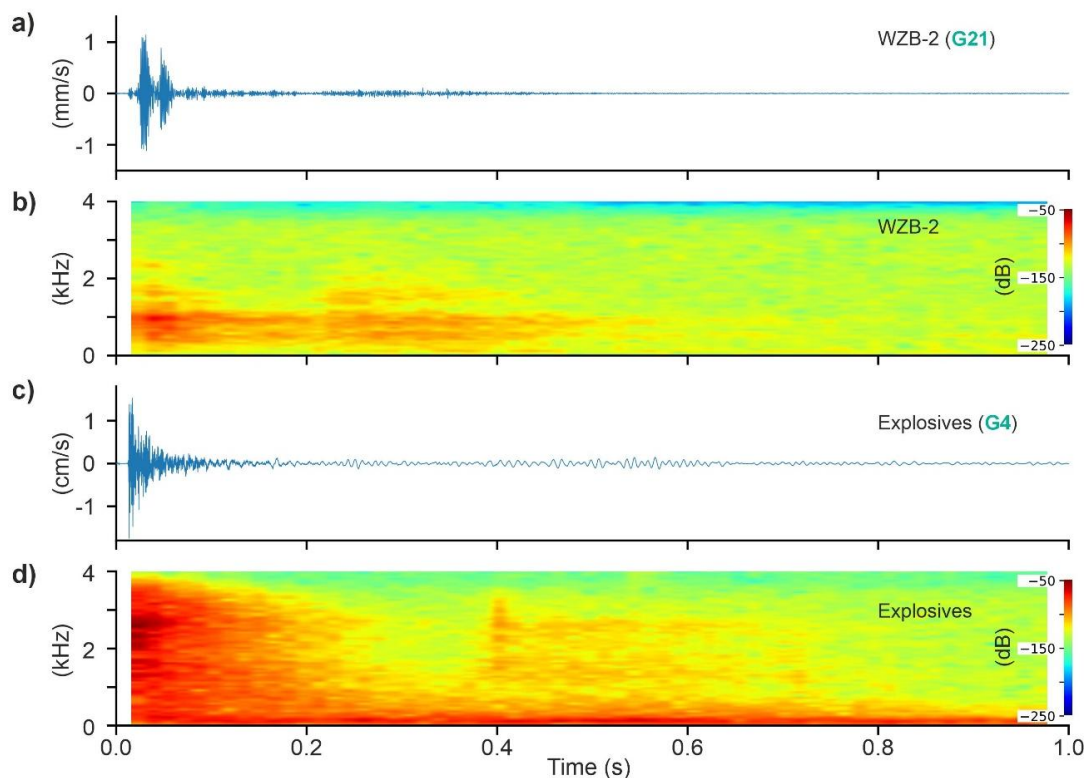
Porównano zapisy pola falowego generowanego w dwóch źródłach, A i B (Rys. 7.2). W punkcie A (około 20 m od P1) fale wzbudzano za pomocą prototypowego wzbudnika WZB-2, natomiast w punkcie B (około 80 m od geofonu nr 4) fale wzbudzano poprzez odpalenie 300 g materiałów wybuchowych w otworze o długości około 3,0 m.



Rys. 7.2. Zapisy fal sejsmicznych na 48-kanalowym sejsmografie GEODE, wzbudzonych przez materiał wybuchowy a) i wzbudnik WZB-2 b) [105].

Wyniki testów wykazały, że w warunkach kopalni rudy miedzi, dla pojedynczego uderzenia wzbudnika WZB-2, pierwsze załamania fal pierwotnych i wtórnych są wyraźnie widoczne odpowiednio do około 100 i 200 m od źródła (Rys. 7.2b). Dla

lepszego porównania obu źródeł pokazano sygnały zmierzone w odległości około 80 m od każdego źródła (Rys. 7.3). W tych warunkach pomiarowych nie było możliwe umieszczenie obu źródeł w tym samym chodniku kopalni. Należy wziąć pod uwagę, że w przypadku rejestracji fal sejsmicznych generowanych przez źródło A, rejestrujemy głównie fale bezpośrednie rozchodzące się wzdłuż ściany bocznej galerii górniczej, natomiast w przypadku rejestracji sygnału generowanego przez źródło B, zarejestrowano fale przestrzenne. Niemniej jednak maksymalna wartość amplitudy sygnału generowanego przez wzbudnik WZB-2 jest około 15 razy mniejsza niż amplituda sygnału generowanego przez odpalenie materiału wybuchowego. Analizując widma amplitud zarejestrowanych sygnałów, można zauważyć, że zakres częstotliwości generowany przez źródło A jest ponad dwukrotnie większy niż źródło B. Pomimo tych różnic, pierwsze wejścia fal są w przybliżeniu w tym samym czasie. Jest bardzo prawdopodobne, że jakość sygnału wytwarzanego przez wzbudnik WZB-2 można poprawić poprzez sumowanie. Niestety, problemy z wyzwalaczem rejestracji w tych warunkach pomiarowych utrudniły uzyskanie rejestracji porównywalnych w czasie.



Rys. 7.3. Zapis pojedynczego uderzenia wzbudnika WZB-2 przez geofon G21 (a) oraz zapis pojedynczej detonacji materiału wybuchowego przez geofon G4 (c) oraz ich spektrogramy (b, d) [105].

8. Wyznaczanie prędkości fal sejsmicznych z wykorzystaniem wzbudnika WZB-2 na poligonie badawczym KWK Mysłowice-Wesoła

8.1. Wprowadzenie

Kopalnia KWK Mysłowice-Wesoła wyraziła zainteresowanie nową metodą badawczą oraz prototypem urządzenia. Po konsultacjach z doktorantem nie była w stanie zapewnić dostępu do wszystkich mediów wymaganych do ciągłej rejestracji. Zaproponowano więc umowę na wypożyczenie urządzenia do testów przeprowadzonych przez kopalnię. Prośbę o przeprowadzenie badań wysłano do dyrektora kopalni w dniu 01.06.2023r.

Umowę o numerze 1/D/223 podpisano w dniu 19.07.2023 na półroczne nieodpłatne próby ruchowe nowego urządzenia, wzbudnika WZB-2. W związku z badaniami w obszarze dużego zagrożenia górniczego próby były wykonywane przez obsługę kopalnianej stacji geofizyki górniczej z nadzorem autorskim doktoranta. Zapisy były rejestrowane przez istniejącą aparaturę sejsmiczną ARAMIS M/E oraz sejsmoakustyczną ARES-5/E.

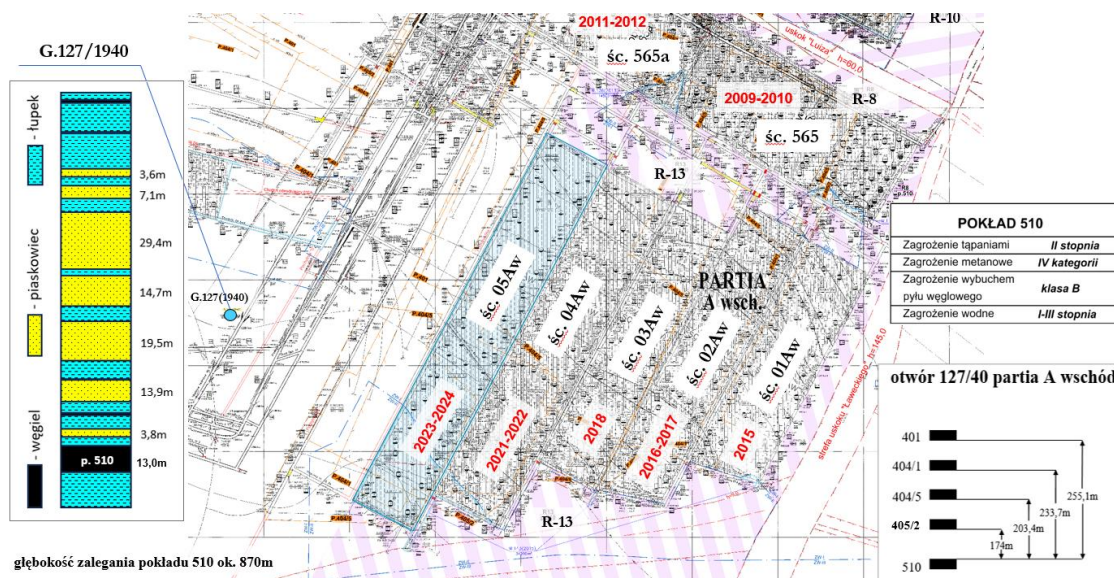
8.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań

Badania przeprowadzono w rejonie pokładu 510, w północnym ociosie chodnika III'' na głębokości ok. 870 m. Pokład 510 w tym rejonie posiadał miąższość od 9,4m do 12,7m oraz zapadał pod kątem ok. 6° w kierunku południowo – zachodnim [108].

Na podstawie otworu G.987/2022 bezpośrednio w stropie występuje warstwa łupku ilastego o miąższości 13,2m, nad nią warstwa piaskowca o miąższości 10,5m, a powyżej warstwa łupku ilastego o miąższości 2,0m. W spągu pokładu występuje warstwa łupku ilastego o miąższości 3,5m, pod nią warstwa piaskowca o miąższości 3,0m, a poniżej warstwa łupku piaszczystego o miąższości 1,5m.

Prowadzonej eksploatacji ścianami 01Aw - 05Aw towarzyszyło zagrożenie sejsmiczne, okresowo osiągające bardzo wysoki poziom, przejawiający się występowaniem wstrząsów górotworu o energiach rzędu 10^7 J i 10^8 J, a także rzeczywiste

zagrożenie tapaniami, objawiające się znacznymi skutkami w wyrobiskach dołowych, które w 4 przypadkach zakwalifikowano jako tąpnięcia. Eksploatacja ta prowadzona była w złożonych warunkach geologiczno-górnich, w części złoża wydzielonej uskokami, w grubym (ponad 10 m), zalegającym na dużej (ponad 800 m) głębokości i nieodprężonym pokładzie, w którego warstwach stropowych dominują wstrząsogenne utwory piaskowcowe.



Rys. 8.1. Eksploatacja pokładu 510 wraz z strukturą geologiczną na podstawie otworu geologicznego G.127/1940.

Zestawienie wstrząsów górotworu w czasie dotychczasowej eksploatacji warstwy podstropowej pokładu 510 przedstawiono tabelarycznie.

Tab. 8.1. Aktywność sejsmiczna ściany 05Aw w pokładzie 510.

Ściana	System	10^2 [J]	10^3 [J]	10^4 [J]	10^5 [J]	10^6 [J]	10^7 [J]	10^8 [J]	$\sum N$	$\sum E \cdot 10^6$ [J]
05Aw	poprzeczny	1407	880	207	28	18	2	0	2542	109,9

W okresie eksploatacji pokładu 510 ścianą 05Aw zarejestrowano łącznie 2 542 wstrząsy górotworu o sumarycznej energii $1,09 \times 10^8$ J. W związku ze wzrostem aktywności sejsmicznej podczas zbliżania się do linii zakończenia przedmiotowej ściany, na podstawie doświadczeń uzyskanych podczas dotychczasowego wykonywania robót górniczych w pokładzie 510 w partii Aw, kopalnia podjęła decyzję o rozpoczęciu przygotowania ściany do jej wyzbrojenia tj. do wykonania chodnika transportowego. Powyższe spowodowało, że ściana 05Aw nie osiągnęła frontem ścianowym

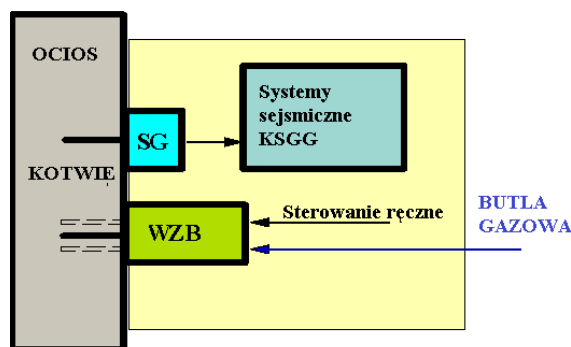
zaplanowanej linii zakończenia (ściana została skrócona o ok. 5m całkowitego wybiegu).
W I kwartale 2024 r. zakończono likwidację ściany 05Aw.

W trakcie prowadzenia badań od 01.09.2023 do 26.01.2024r postęp eksploatacji
ściany wyniósł ok. 350 m przy czym ściana została zatrzymana 15.12.2023r.

8.3. Schemat pomiaru

W trakcie testów wzbudnika zdecydowano się na wykorzystanie istniejącej
aparatury geofizycznej ARAMIS M/E znajdującej się w rejonie badań. Schemat
poglądowy rozmieszczenia wzbudnika i geofonów przedstawiono na Rys. 8.2 i Rys. 8.3.

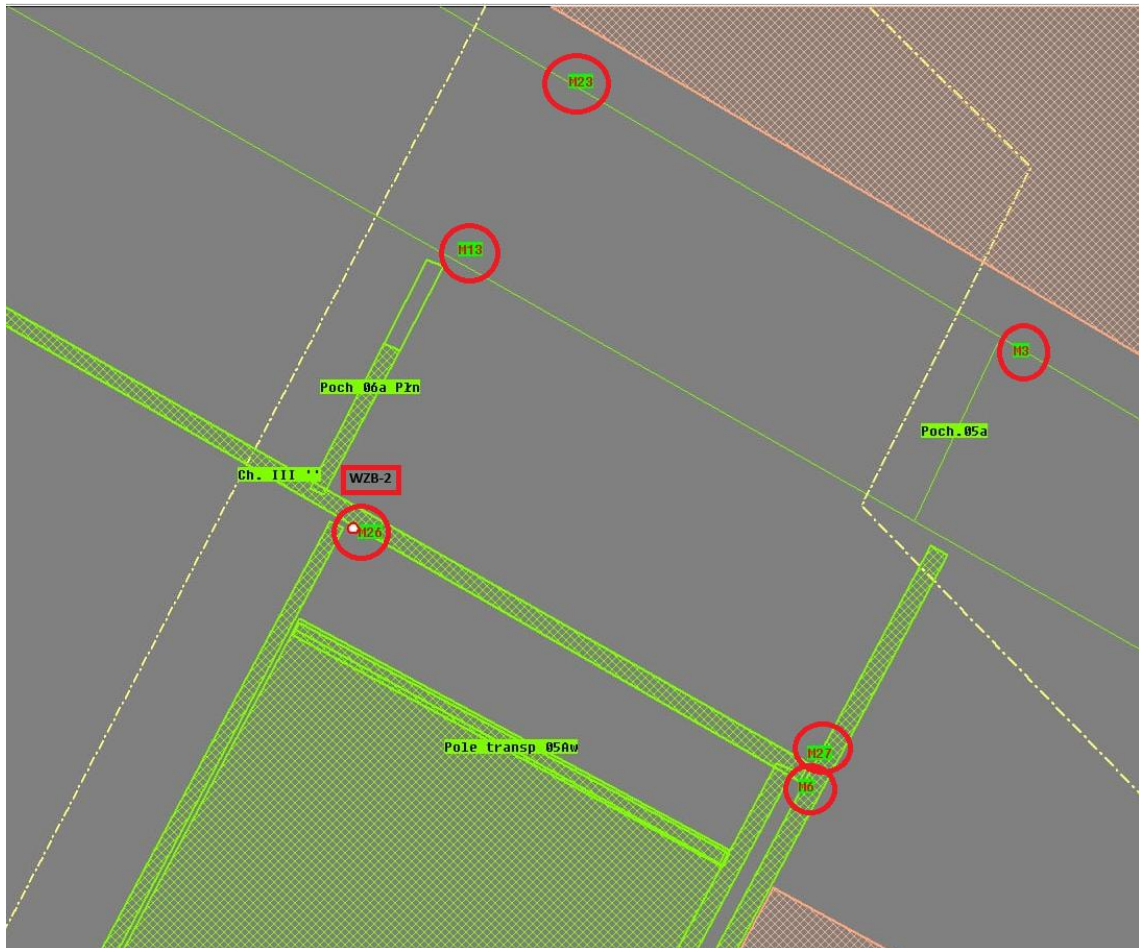
Od dnia 1.09.2023 r. wzbudnik zabudowany był w chodniku III” w pokładzie 510
w partii Aw. Z uwagi na relatywnie duże potencjalne zagrożenie tapaniami rejon ten
wyposażono w oddziałyowy system obserwacji sejsmologicznej i sejsmoakustycznej,
gdzie znajdowało się pięć sond sejsmometrycznych do obserwacji aktywności ściany
05Aw (w odległości do 210m od wzbudnika).



Rys. 8.2. Schemat pomiarowy oraz realizacja stanowiska badawczego w rejonie pokładu 510 w partii
Aw. Wzbudnik zasilany z butli gazowej oraz wyzwalany ręcznie.

Po wstępnych pracach przygotowawczych przeprowadzono 14 sesji pomiarowych
w różnych konfiguracjach zaczynając od 20.10.2023 do 26.01.2024r. W celach testowych

przeniesiono również wzbudnik na spąg, jednak wyniki były niezadowalające. Dodatkowo kilka testów wykonano również młotem i wzbudnikiem w celach porównawczych.

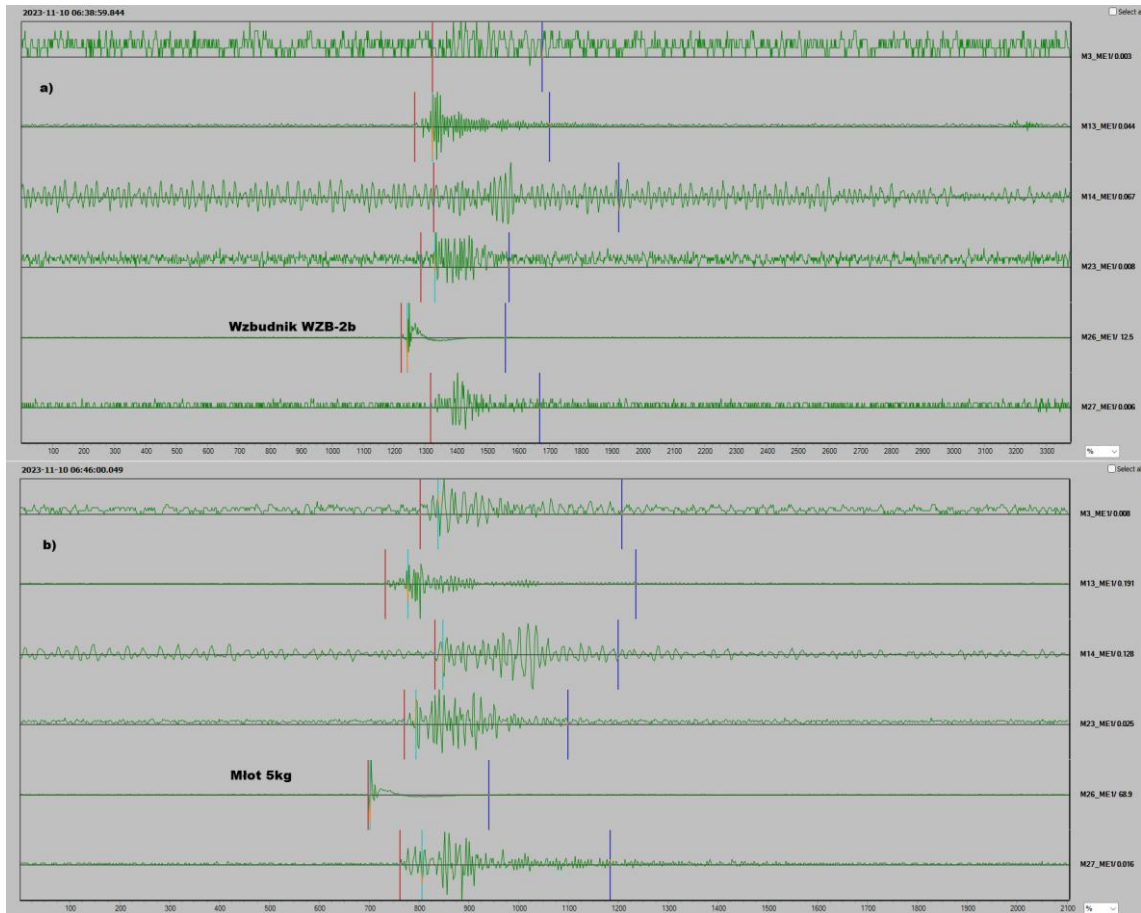


Rys. 8.3. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego w rejonie pokładu 510 w partii Aw na tle mapy. Na czerwono zaznaczono umiejscowienie wzbudnika WZB-2 oraz geofony odbiorcze. Źródło oprogramowanie systemu ARAMIS M/E.

8.4. Przetwarzanie i interpretacja danych

Do rejestracji i przetwarzania danych wykorzystano oprogramowanie systemu sejsmicznego ARAMIS_WIN. Na Rys. 8.4 przedstawiono przykładowy zapis uderzenia wzbudnika sejsmicznego i porównawczo zapis uderzenia młotem 5kg. Zarówno zapis wyzwolony wzbudnikiem jak i młotek 5kg był na tyle energetyczny by wyzwolić detektor w oprogramowaniu.

Widać delikatną przewagę energetyczną młota w stosunku do wzbudnika.



Rys. 8.4. Rejestracje z systemu ARAMIS M/E, wyzwolenie wzbudnikiem WZB-2b oraz b) wyzwolenie młotem 5kg.

Oprogramowanie systemu ARAMIS M/E posiada funkcję obliczania prędkości fali sejsmicznej na podstawie zapisów. Funkcja ta wykorzystywana jest w normalnym trybie do kalibracji algorytmu lokalizacyjnego.

Przykład obliczeń automatycznych prędkości fali pierwszego wstąpienia przedstawiono na Rys. 8.5. Algorytm lokalizacyjny dokładnie wyznaczył umiejscowienie wzbudnika przy czujniku M26. Odległości pozostałych czujników od źródła wzbudzenia zgadzają się ze stanem faktycznym.

The screenshot shows a software window titled "Wave velocity". It contains a table with 6 rows of data and a section for "Event coordinates".

	System	Sensor	Velocity [m/s]	Distance [m]	Time [ms]
1	ME1	M3	2022	207	102
2	ME1	M13	2042	91	44
3	ME1	M14	1947	207	106
4	ME1	M23	2292	150	66
5	ME1	M26	5099	5	1
6	ME1	M27	1610	154	96

Below the table, there is a section for "Event coordinates" with input fields for X, Y, and Z. The X field is labeled "From location" and contains the value 25033. The Y field contains -17285 and the Z field contains -566. There are buttons for "Calculate", "Save to file", and "Wydruk" (Print).

Rys. 8.5. Wynik obliczenia prędkości rozchodzenia się fali w oprogramowaniu ARAMIS_WIN. Wzbudnik znajduje się przy czujniku M26.

W Tab. 8.2. przedstawiono zestawienie pięciu uderzeń wzbudnika i obliczono średnią prędkość.

Tab. 8.2. Zestawienie obliczonej automatycznie prędkości 5 uderzeń wzbudnika z 05.01.2024r. Czujnik M26 znajdował się bezpośrednio przy wzbudniku.

Czujnik/Uderzenie	1	2	3	4	5	Średnia	Jednostka
M3	3302	2008	1851	1492	1741	2078,8	[m/s]
M13	1642	1642	1530	1584	1770	1633,6	[m/s]
M14	1996	1678	1631	1703	1890	1779,6	[m/s]
M23	1897	1577	1545	1513	1647	1635,8	[m/s]
M26	5099	5099	5099	5099	5099	5099	[m/s]
M27	1516	1266	1138	1459	1172	1310,2	[m/s]

W Tab. 8.3. przedstawiono automatyczne obliczanie prędkości dla pojedynczego czujnika M3 w pewnym zakresie czasu.

Tab. 8.3. Zestawienie obliczonej automatycznie prędkości dla czujnika M3 w okresie 03.11.2023 - 04.01.2024.

Czujnik	M3 [m/s]
03.11.2023	2444
10.11.2023	2022
01.12.2023	2261
15.12.2023	1960
05.01.2024	2008
12.01.2024	1998
19.01.2024	2120
04.01.2024	2225
Średnia	2129,75

W pracy przedstawiono wybrane wyniki eksperymentu. Wyniki uzyskane w trakcie badania były niespójne z kilku powodów. Prędkość propagacji fali obliczano automatycznie, z wykorzystaniem oprogramowania. Mimo że lokalizacja uderzenia była dość spójna i wskazywała na wzbudnik, rozdzielczość czasowa aparatury była niewystarczająca ze względu na bliskie położenie czujników odbiorczych. Ograniczone pasmo aparatury ARAMIS M/E (do 150 Hz) znacząco redukowało energię wzbudzenia w zakresie 200-500 Hz. Niemniej jednak, rozbudowa algorytmu obliczania prędkości o sumowanie uderzeń, korektę pierwszego wstąpienia fali oraz uśrednianie wyników umożliwiłaby wyznaczenie średniej prędkości czoła fali przy użyciu tej aparatury.

Ze względu na energię wzbudzenia w paśmie sejsmoakustycznym, uzyskane wyniki były pomocne w opracowaniu metodologii monitorowania zmian w systemie ARAMIS M/E z nadajnikiem MP N/O, pracującym w tym samym paśmie.

Testy wzbudnika zakończyły się pozytywną opinią techniczną z dnia 29.02.2024r., która stwierdza, że „Analiza rejestrowanych zjawisk pozwalała określić prędkości fali na poszczególnych czujnikach oraz ich zmianę pomiędzy kolejnymi cyklami pomiarowymi, co umożliwiało określenie zmian naprężeń w górotworze na przedpolu ściany 05Aw wraz z jej postępem.” [109].

9. Wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości fal sejsmicznych z wykorzystaniem wzbudnika WZB-2 w KWK ROW Ruch Rydułtowy

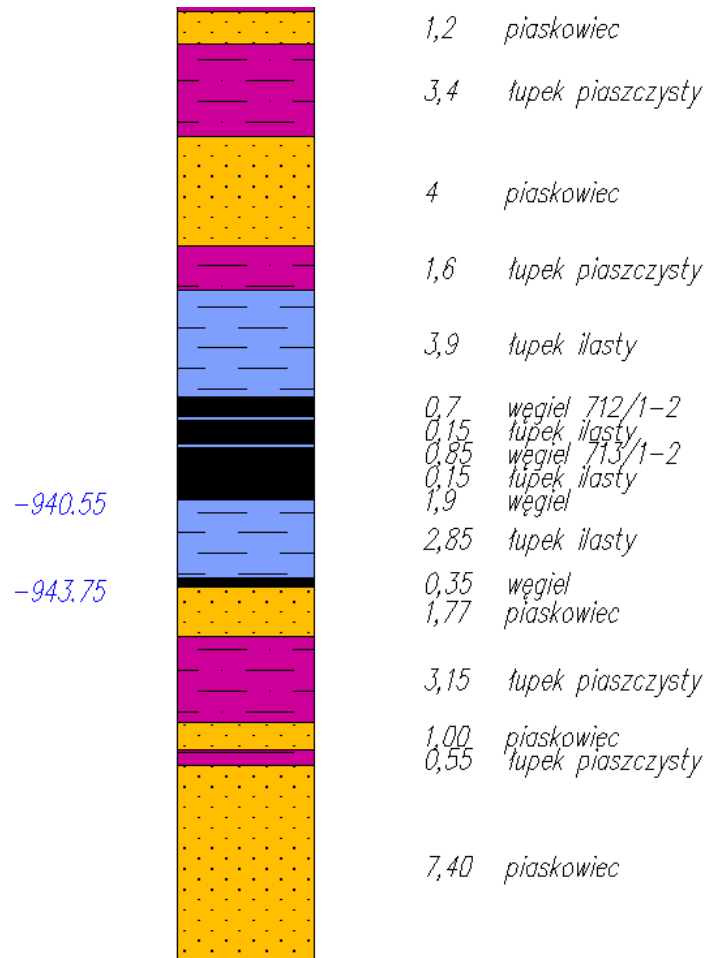
9.1. Wprowadzenie

W celu zbadania metodyki zaproponowanej przez Doktoranta zaplanowano badania w podziemnym zakładzie górniczym w trakcie eksploatacji pokładu węgla w rejonie ściany IV-E-E1 w pokładzie 712/1-2+713/1-2 w Kopalni Węgla Kamiennego ROW Ruch Rydułtowy. Było to przedsięwzięcie niezwykle trudne do zrealizowania, ze względu na zagrożenia panujące w rejonie badań oraz duży nakład pracy ze strony kopalni związanym między innymi z zapewnieniem dostępu do mediów przy jak najmniejszej ingerencji w harmonogram prac wydobywczych. Aby zminimalizować ryzyko zakłócenia produkcji uzyskano zgodę na przeprowadzenie badań w okresie końcowego biegu ściany IV-E-E1. W konsekwencji badania zostały wykonane w dniach 12.07.2023-27.07.2023 r.

9.2. Charakterystyka geologiczno-górnicza rejonów badań

Badania przeprowadzono w chodnikach przyścianowych ściany IV-E-E1 wydrążonych w pokładzie 712/1-2+713/1-2 na głębokości ok. 1200 m. Średnia miąższość pokładu 712/1-2+713/1-2 w tym rejonie wynosi ok. 3,8 m (Rys. 9.1). Nachylenie pokładu w rejonie ściany IV-E-E1 zmienia się w zakresie od 0 do 5° [110].

Na podstawie otworu O1 (Rys. 9.1) położonego w pobliżu rejonu badań odwierconego z nadległego pokładu 703/1-2 stwierdzono, że bezpośrednio w stropie pokładu 712/1-2+713/1-2 zalegają łupki ilaste lub piaszczyste, przechodzące w piaskowce. Spąg pokładu natomiast jest zbudowany z łupków ilastych z wkładkami węgla a następnie łupków piaszczystych przechodzących w piaskowce.



Rys. 9.1. Struktura geologiczna pokładu 712/1-2+713/1-2 na podstawie otworu geologicznego O1.

W rejonie prowadzonych badań w chodnikach przyścianowych nie stwierdzono zaburzeń tektonicznych w postaci uskoków tektonicznych. Najbliższa strefa uskokowa występuje w odległości ok. 50 m na zachód od miejsca prowadzonych badań i zaznacza się serią uskoków o zrzutach do maksymalnie 4 m i przebiegu w przybliżeniu południkowym. W odległości ok 100 m na północ od chodnika 4-E-E1 zlokalizowano strefę Uskoku Kolejowego o przebiegu równoleżnikowym i zrzucie ok. 50 m.

Ściana IV-E-E1 nadbudowana jest eksploatacją w pokładach:

- 703/1-2 zalegającym ~100 m nad pokładem 712/1-2+713/1-2;
- 706 zalegającym ~60 m nad pokładem 712/1-2+713/1-2.

Ponadto rejon ściany jest nadbudowany historyczną eksploatacją w pokładach 624, 620 i 615 jednakże ich odległość pionowa od pokładu 712/1-2+713/1-2 przekracza 440 m.

W trakcie przeprowadzonych przez Kopalnię badań laboratoryjnych stwierdzono szeroki rozrzut wartości wytrzymałości na ściskanie R_c co ma związek z różnorodnością wykształcenia pod względem strukturalnym i mineralogicznym badanych skał. Wyraźna jest zależność średniej wytrzymałości od wielkości uziarnienia. Na podstawie badań penetrometrycznych wykonanych w chodnikach przyścianowych określono następujące wartości parametrów geomechanicznych pokładu i skał otaczających:

- wytrzymałość na ściskanie R_c - strop [MPa]: 30,3-49,9 (łupki ilaste i piaszczyste) 81,3 (piaskowiec)
- wytrzymałość na ściskanie R_c - spąg [MPa]: 41,7- 45,7
- ciężar objętościowy skał χ [kN/m³]: od 25,31 do 26,19
- wskaźnik rozmakalności skał R_s : 0,8-1,0
- wytrzymałość na ściskanie R_c -węgiel [MPa]: 5,7

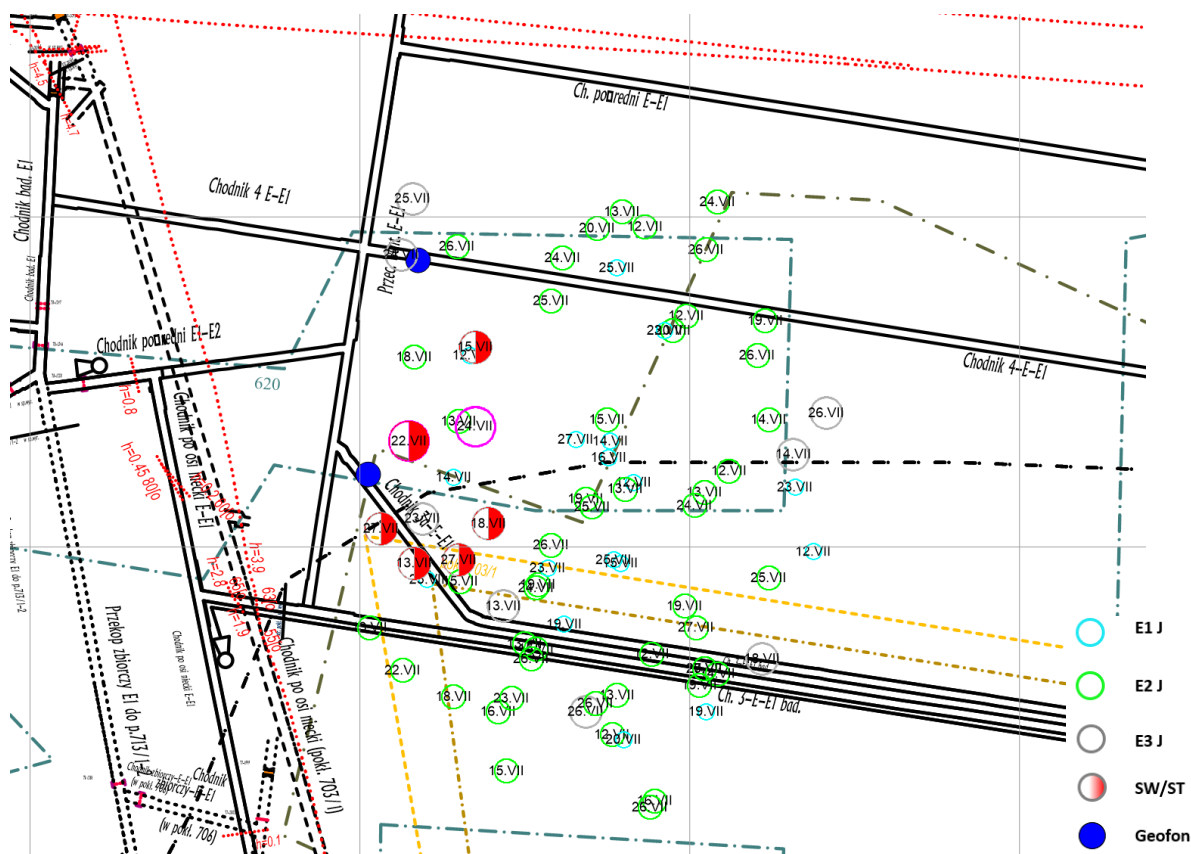
Wyżej wymienione parametry zostały zbadane punktowo. W wydrążonym wyrobisku parametry te mogły odbiegać od powyższych, zbadanych wartości.

W trakcie prowadzenia badań w dniach od 12 do 27 lipca 2023 postęp eksploatacji ściany był niewielki i wyniósł ok. 17 m (Tab. 9.1). W związku z tym zarejestrowana aktywność sejsmiczna była niska – wystąpiło 14 wstrząsów o energii rzędu 10^3 J i 2 wstrząsy o energii rzędu 10^4 J. Przedstawiono to na Rys. 7.3.

Tab. 9.1. Postęp ściany IV-E-E1 w trakcie badania.

Postęp ściany w [m]	Góra	Dół	Średnia	Suma
12.07.2023	2,5	1	1,75	1,75
13.07.2023	1	1,5	1,25	3
14.07.2023	0	0,5	0,25	3,25
15.07.2023	1	0	0,5	3,75
16.07.2023	0	0	0	3,75
17.07.2023	3	0	1,5	5,25
18.07.2023	0,5	1	0,75	6
19.07.2023	0,5	1,5	1	7
20.07.2023	1,5	1,5	1,5	8,5

Postęp ściany w [m]	Góra	Dół	Średnia	Suma
21.07.2023	0	0	0	8,5
22.07.2023	0	0	0	8,5
23.07.2023	0	0	0	8,5
24.07.2023	3	1,5	2,25	10,75
25.07.2023	2,5	2,5	2,5	13,25
26.07.2023	1	3	2	15,25
27.07.2023	0,5	3	1,75	17
SUMA	17	17	17	17



Rys. 9.2. Aktywność sejsmiczna rejonu ściany IV-E-E1 w okresie 12-27.2023r z zaznaczonymi geofonami biorącymi udział w eksperymencie.

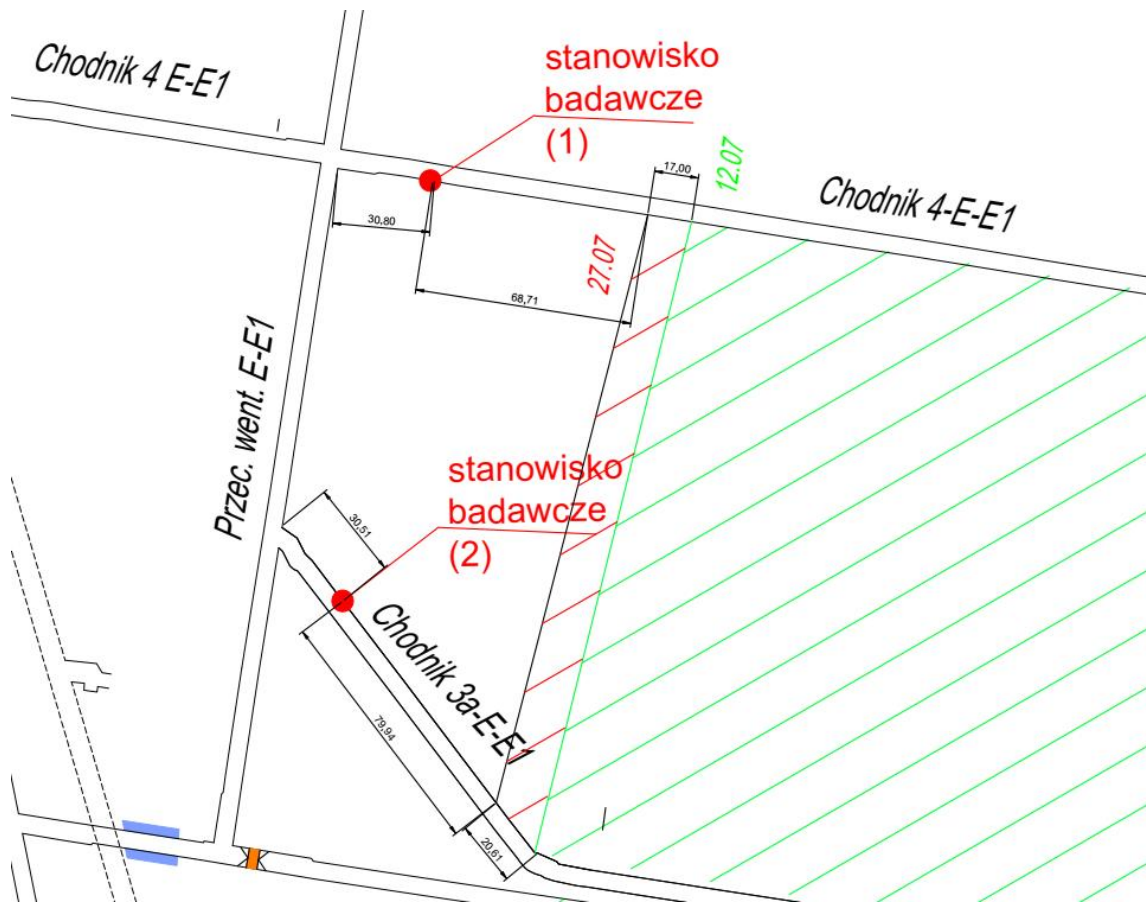
9.3. Schemat pomiaru

W związku z jak najmniejszą ingerencją w ruch kopalni doktorant zainstalował całkowicie niezależnie od systemów podstawowych Kopalnianej Stacji Geofizyki Górniczej system ARAMIS M/E z funkcją pomiaru sejsmoakustycznego.

Jako stanowiska dołowe zastosowano nadajniki MP N/O w trybie sejsmoakustycznym (częstotliwość próbkowania 2000Hz) z sondami pomiarowymi SP-5.28/E.

Nadajnik MP N/O zaprojektowano do obsługi wzbudnika sejsmicznego poprzez sterowane wyjście cyfrowe.

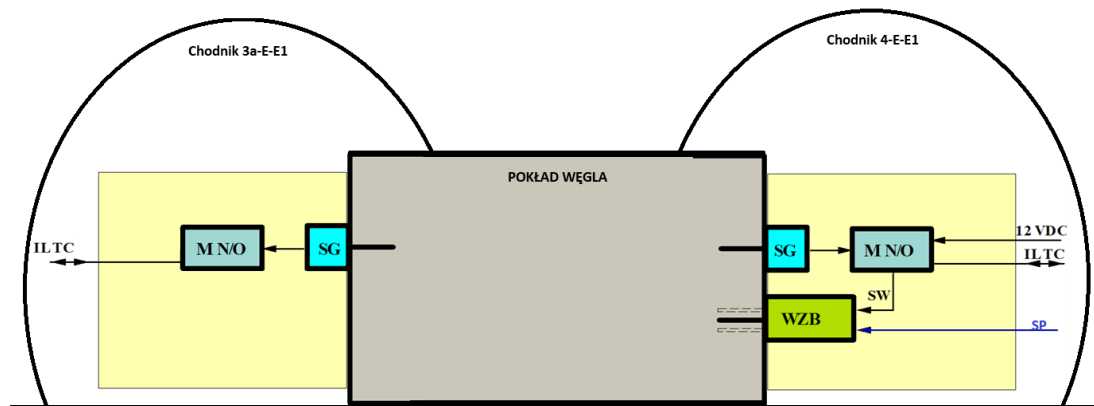
Schemat pomiarowy przedstawiono na Rys. 9.3.



Rys. 9.3. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego na ścianie IV-E-E1.

Zainstalowano wzbudnik na stanowisku badawczym 1 wraz z sondą pomiarową SP-5.28/E. Na stanowisku badawczym 2 znajdowała się sonda odbiorcza SP-5.28/E. W celu zadziałania całego systemu kopalnia użyczyła na stanowisku badawczym 1 iskrobezpieczną linię teletechniczną IL TC do transmisji danych z nadajnika MP N/O na powierzchnię, zasilanie 12 VDC do obsługi elektrozaworu wzbudnika WZB-2b, a także sprężone powietrze SP ze stałej instalacji przyścianowej jako zasilanie wzbudnika. Na stanowisku badawczym 2 użyczona została druga linia teletechniczna IL

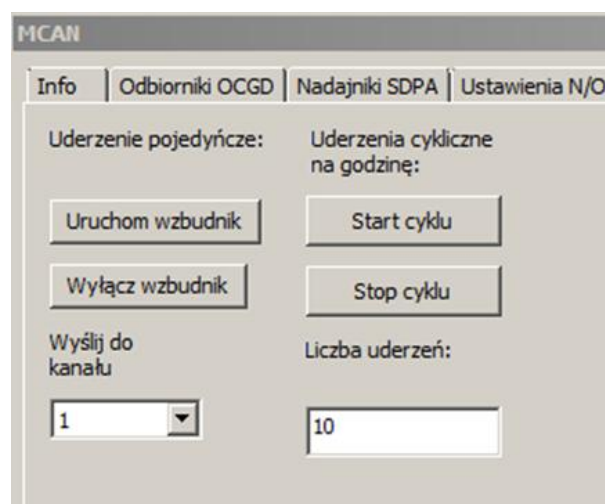
TC do obsługi nadajnika MP N/O. Schemat instalacji w chodniku przedstawiono na rysunku Rys. 9.4.



Rys. 9.4. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego w chodnikach 4-E-E1 oraz 3a-E-E1 z zaznaczonymi mediami udostępnionymi przez kopalnię.

Nadajniki MP N/O pracujące w trybie sejsmoakustycznym (próbkiwanie 2000Hz) podłączone zostały do kasety SP/DTSS zainstalowanej w Kopalnianej Stacji Geofizyki Górniczej. Kaseta poprzez interfejs LAN wysyłała strumień danych sejsmicznych do komputera z oprogramowaniem ARAMS-REJ. W związku z pierwszym takim badaniem zrezygnowano z detekcji sygnałów algorytmem i postanowiono zapisywać strumień sejsmiczny z całego okresu badań.

Sterowanie wzbudnika odbywało się poprzez interfejs CAN systemu oraz oprogramowanie dodatkowe MCAN z funkcją wyzwalania wzbudnika.



Rys. 9.5. Oprogramowanie MCAN z funkcją wyzwalania cyklicznego wzbudnika WZB-2.

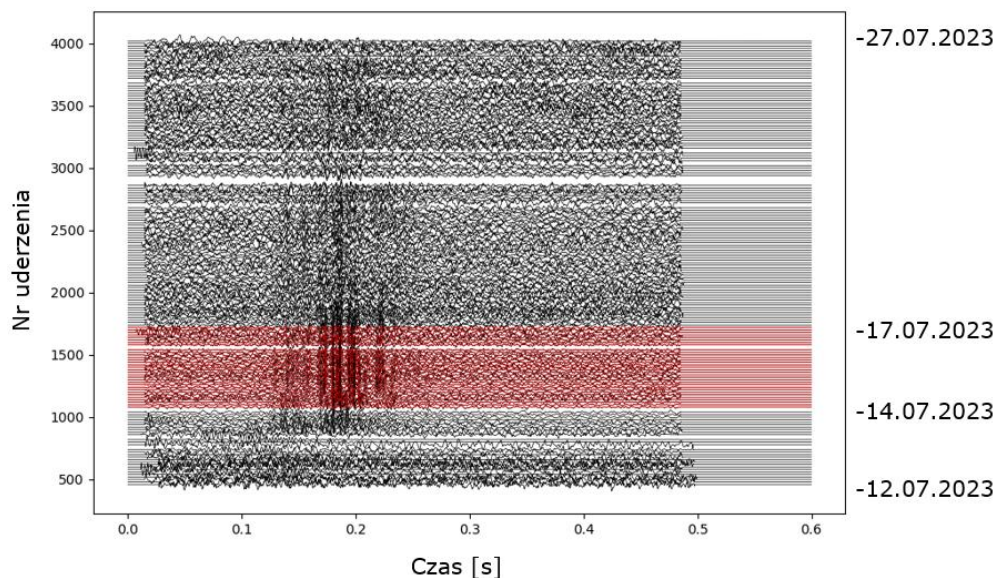
Ze względu na ograniczoną ilość sprężonego powietrza w instalacji przyścianowej zdecydowano się ograniczyć wyzwalanie wzbudnika do 10 uderzeń co minutę na początku każdej godziny.

Zgromadzono 80GB danych ciągłego zapisu sejsmicznego.

9.4. Przetwarzanie i interpretacja danych

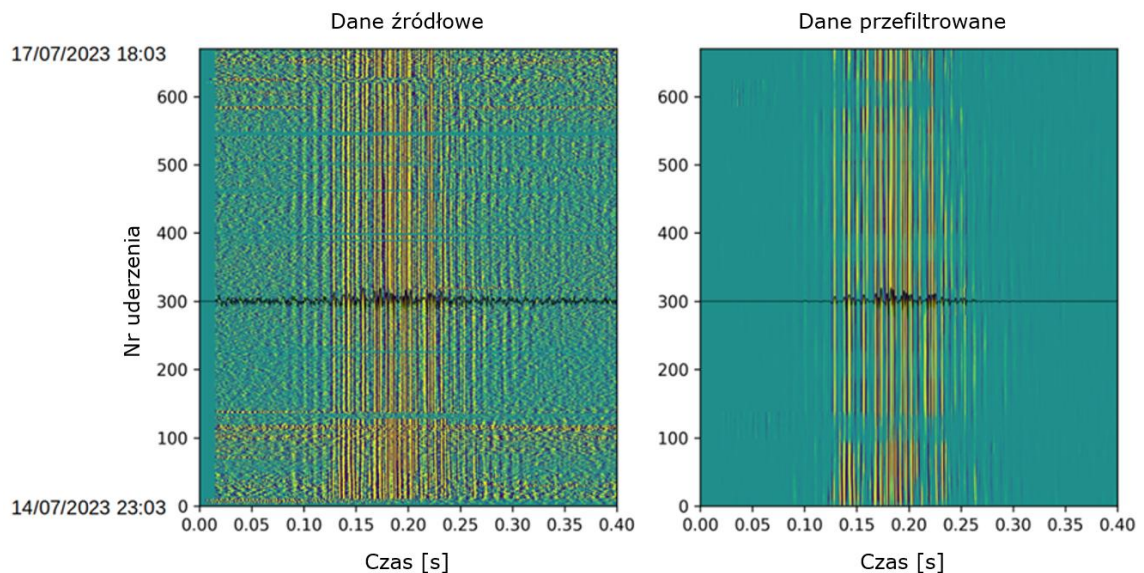
Dane zarejestrowane przez system ARAMIS M/E w postaci plików ciągłego zapisu nie nadają się bezpośrednio do analizy. Odtworzono je oprogramowaniem Vicorecs do obsługi ciągłego zapisu sejsmicznego systemu ARAMIS M/E. Oprogramowanie zostało wyposażone w funkcje automatycznej generacji plików w formacie ASCII, które zawierały pojedyncze uderzenie wzbudnika WZB-2b.

W celu zwiększenia sygnału użytecznego względem szumu, pliki zostały zsumowane w oknie dziesięciu uderzeń. Wynik został zaprezentowany na Rys. 9.6. Podczas pomiaru wystąpił problem z dostarczeniem odpowiedniego ciśnienia, dlatego część uderzeń, mimo sumowania, nie osiągnęła wystarczającej jakości do dalszej analizy. Ostatecznie skupiono się na okresie trzech dni – od 14 do 17 lipca (czerwone rejestracje na Rys. 9.6).



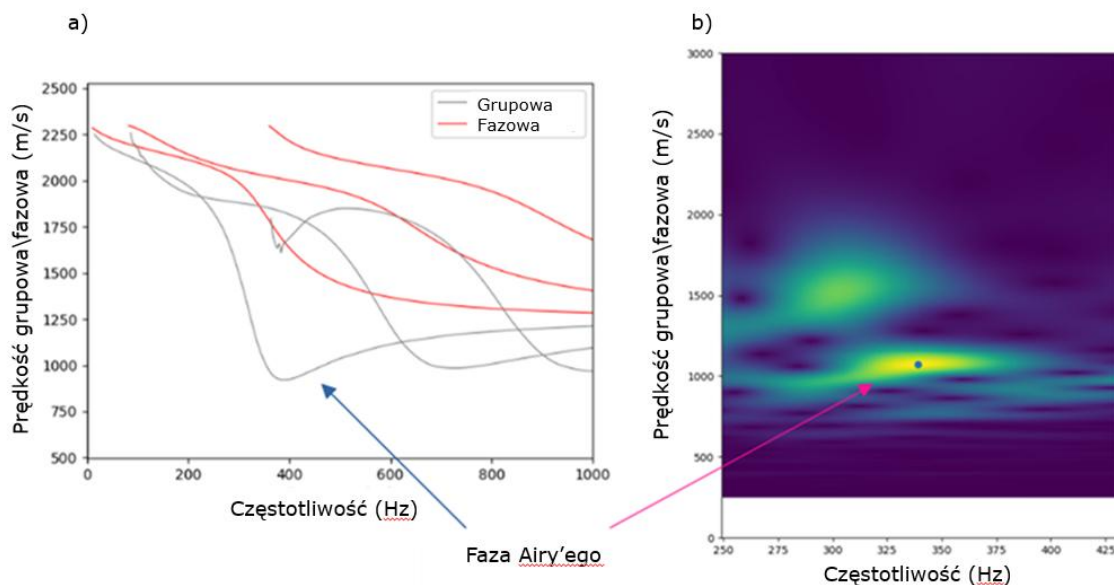
Rys. 9.6. Dane pomiarowe poddane obróbce z całego okresu badania. Kolorem czerwonym zaznaczono najbardziej spójne dane umożliwiające dalszą analizę.

Na wyszczególnionych danych zastosowano wagowane składanie fazowe (ang. phase-weighted stacking) [111] w oknie 10 sąsiednich uderzeń. Na Rys. 9.7 przedstawiono efekt zastosowania tej procedury. Można zaobserwować wyraźne amplitudy rejestrowane między 150 a 200 ms, co odpowiada prędkości około 1000 m/s, związanej z dyspersyjną falą kanałową.



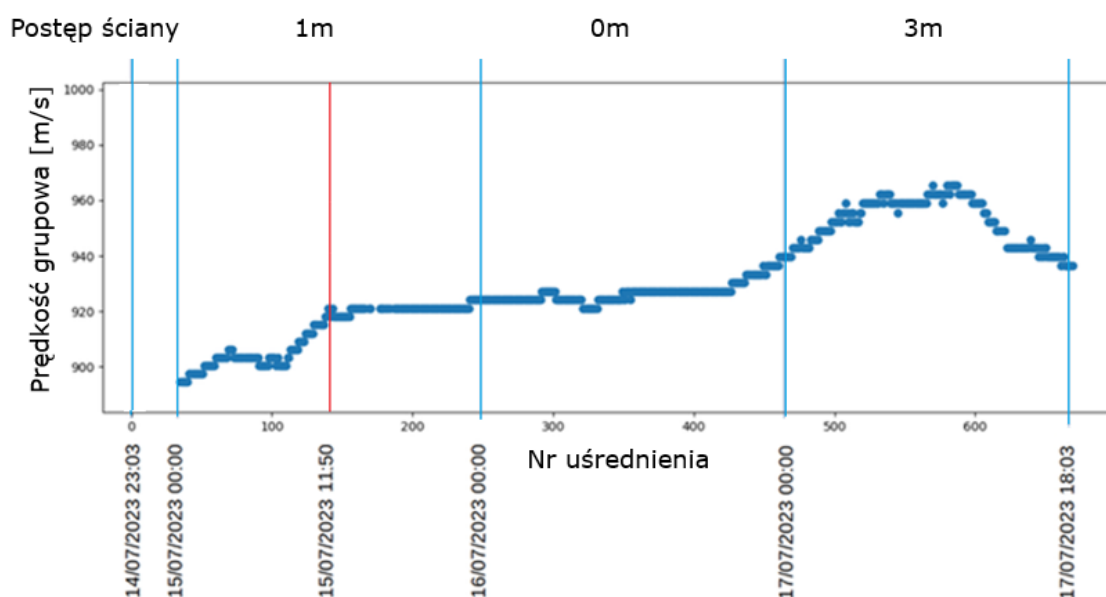
Rys. 9.7. Dane o największej koherencji, surowe oraz po filtracji, na środku pokazano jedną próbkę przebiegu analizowanego uderzenia

W kolejnym etapie każda rejestracja sejsmiczna została poddana analizie spektralnej, umożliwiającej wyznaczenie minimum fazy Aire'go, czyli najmniejszej prędkości grupowej rozchodzenia się fali kanałowej. W tym przypadku, z racji mierzonej składowej i zakresu częstotliwości dla 2-metrowego pokładu, dotyczy to fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a. Przykład takiej analizy zaprezentowano na Rys. 9.8.



Rys. 9.8. Krzywe teoretyczne linii dyspersji sygnału dla pokładu węgla o miąższości 3m a) oraz przykładowy wykres dyspersji rzeczywistego sygnału z prowadzonych badań z dnia 14.07.2023r b), zaznaczono fazę Airy'ego.

Zmiany prędkości grupowej fali kanałowej przedstawiono na Rys. 9.9.



Rys. 9.9. Minimum prędkości grupowej (faza Airy'ego) zarejestrowanego sygnału w okresie od 15-17.07.2023r. Na wykresie zaznaczono postęp ściany (linie niebieskie) oraz najsilniejszy wstrząs z danego okresu (linia czerwona).

Tab. 9.2. Wykaz wstrząsów zarejestrowanych w trakcie zawężonego okresu badania

Nr	Data	X	Y	Z	E
1	2023-07-15 00:42	37862	30493	-682	4,8e+2
2	2023-07-15 00:55	37723	30450	-733	1,1e+2
3	2023-07-15 02:27	37821	30539	-700	1,2e+2
4	2023-07-15 11:50	37679	30530	-885	2,1e+3
5	2023-07-15 12:26	37810	30442	-704	8,0e+1
6	2023-07-15 15:24	37936	30511	-695	1,3e+2
7	2023-07-16 01:02	37954	30421	-525	1,3e+2
8	2023-07-16 01:02	37746	30449	-587	6,7e+1
9	2023-07-16 01:37	37900	30516	-555	1,2e+2

W trakcie 4-dniowego pomiaru prędkości postęp ściany wyniósł 3 metry. Odległość ściany od czujników w momencie rozpoczęcia rejestracji wynosiła 83m. Zakres odnotowanych zmian prędkości wynosił 60 m/s (Rys. 9.9). Nie zaobserwowano żadnego istotnego energetycznie wstrząsu sejsmicznego na linii wzbudnik–czujnik w tym okresie. Najbliższy wstrząs wyniósł 2,1e+3 i znajdował się w pobliżu rejonu pomiaru. Niemniej jednak niewielkie zmiany prędkości można powiązać z postępującym frontem eksploatacji, tym samym przypuszczalnie zmieniającym się polem naprężenia oraz stopniem deformacji górotworu. Zmiany prędkości zaobserwowano podczas prowadzenia wydobywania w pierwszy i 3 dzień. Natomiast nie są one widoczne podczas postoju kombajnu (dzień 2). Maksymalny wzrost prędkości odnotowano trzeciego dnia.

Należy podkreślić, że udało się osiągnąć wysoką rozdzielczość pomiarów, niewielką zmianę prędkości grupowej z 900 m/s na 920 m/s w okresie doby, w bardzo zaszumionym środowisku frontu eksploatacji. Płaskie obszary wykresu wynikające z postoju ściany udowadniają, że metodyka pomiaru jest dokładna.

10. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza praca miała na celu opracowanie innowacyjnej metody analizy stanu górotworu, wykorzystującej istniejące systemy sejsmoakustyczne w połączeniu z nowo zaprojektowanym, bezpiecznym w warunkach zagrożenia wybuchem, pneumatycznym źródłem fal sejsmicznych. Proponowana metodyka pomiarowa umożliwia niemal ciągle śledzenie prędkości propagacji fal sejsmicznych przed frontem eksploatowanej ściany węglowej. Zastosowanie analizy dyspersji fal kanałowych, w miejsce konwencjonalnego podejścia opartego na detekcji pierwszego pojawienia się fali, pozwala na uzyskanie pomiarów o znacznie wyższej rozdzielczości, co umożliwia precyzyjne monitorowanie zmian prędkości rozchodzenia się fal.

Zasadniczą nowością zaproponowaną przez doktoranta w stosunku do znanych w literaturze rozwiązań (system INGEO) jest zastosowanie pneumatycznego wzbudnika WZB-2. Uzyskanie dla niego certyfikatu do pracy w zakładach zagrożonych wybuchem ATEX oraz przystosowanie do sterowania jego pracą z powierzchni z wykorzystaniem cyfrowej transmisji danych stosowanej w istniejących systemach kopalnianych pozwala na jego szybkie wdrożenie.

Wielokrotne wzbudzanie niskoenergetycznej fali i sumowanie wyników rejestracji umożliwia przetwarzanie sygnałów o amplitudzie porównywalnej z szumem sejsmicznym, co pozwoliło na zaprojektowanie mobilnego urządzenia o niewielkich gabarytach. Testy urządzenia przedstawione w rozdziałach 5.1, 7 oraz 8 są tego dowodem.

Podczas badań w KWK ROW Ruch Rydułtowy w dniach 12-27.07.2023r. opisanych w rozdziale 9, założono wyzwalanie wzbudnika 10rotnie w odstępach 1 minuty w każdej godzinie. Wzbudnik uruchamiany był 4000 razy co udowadnia możliwość stosowania metody w długich okresach eksploatacji pokładu węgla. Podczas eksperymentu wystąpił problem z ciągłym dostarczeniem odpowiedniego ciśnienia do wzbudnika, co spowodowało skrócenie okresu rejestracji poprawnych danych. Ostatecznie po odpowiednim odfiltrowaniu danych skupiono się na okresie trzech dni – od 14 do 17 lipca. Zmiany minimum prędkości grupowej fali kanałowej (faza Airy'ego) przedstawiono na Rys. 9.9. Niewielkie zmiany prędkości grupowej fali kanałowej można powiązać z postępującym frontem eksploatacji, tym samym przypuszczalnie

zmieniającym się polem naprężeń oraz stopniem deformacji górotworu. Natomiast nie są one widoczne podczas postoju kombajnu. Należy podkreślić, że pomiary zostały wykonane w wysoką rozdzielczością w zaszumionym środowisku frontu eksploatacji.

Opracowany i przebadany w ramach pracy system pomiarowy z nowym sterowanym pneumatycznym źródłem fali sejsmicznej wykazał się dużą niezawodnością. Zasygnalizowane w czasie badań problemy z stabilizacją ciśnienia w rejonie ściany mogą być z powodzeniem wyeliminowane poprzez zastosowanie akumulatora sprężonego powietrza.

Wyniki badań umożliwiły identyfikację zmian prędkości, świadczących o zmianach naprężeń, niedostępnych dla obecnych metod. Poprawia to skuteczność profilaktyki tapaniowej, zwiększając bezpieczeństwo górników i redukując wstrząsy o dużej energii, szkodliwe dla środowiska i infrastruktury.

Literatura

- [1] Mendecki, A.J., 1996. Seismic monitoring in mines. Springer Science & Business Media.
- [2] Dubiński J., Konopko W. 2000. Tąpania: ocena, prognoza, zwalczanie, Wydaw. Głównego Instytut Górnictwa, Katowice.
- [3] Nur, A., 1971. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. J. Geophys. Res. 76, 2022–2034.
- [4] Olivier, G., Brenguier, F., Campillo, M., Roux, P., Shapiro, N.M., Lynch, R., 2015. Investigation of coseismic and postseismic processes using in situ measurements of seismic velocity variations in an underground mine. Geophys. Res. Lett. 42, 1–9.
- [5] Isakow Z: kierownik projektu i współredaktor wydania. Współautorzy rozdziałów: Augustyniak A, Cianciara A, Cianciara B, Isakow Z, Juzwa J, Kuciara I, Makola R, Piwowarski W, Pysik A, Siciński K, Sierodzki P, Słoka Z, Innowacyjne metody i system do oceny zagrożenia tąpaniami na podstawie probabilistycznej analizy procesu pęknięcia i geotomografii online, Monografia - wynik realizacji projektu INGEO, 1, 1-156, 2016, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG, ISBN 978-83-63674-27-4.
- [6] Salmon, B.P., Goldswain, G., Lynch, R.A., Rebuli, D., Olivier, J.C., Kleynhans, W., 2019. Estimating changes in seismic wave velocity from a pneumatic source in an operational mine. Geophysics 84, Q49–Q56.
- [7] Czarny R, Malinowski M, Chamarczuk M, Cwiękała M, Olechowski S, Isakow Z, Sierodzki P, 2021 „Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of excavation damaged zone” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

- [8] Czarny, R., Malinowski, M., Cwiękała, M., Olechowski, S., Isakow, Z., & Sierodzki, P. (2020). Characterization of the Tunnel-Channel Wave around a Coal Mine Roadway Based on Synthetic and Real Data. *NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*, 2020(1), 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202020024>
- [9] Saenger, E.H., Bohlen, T., 2004. Finite-difference modeling of viscoelastic and anisotropic wave propagation using the rotated staggered grid. *Geophysics* 69, 583–591.
- [10] Sheriff R.E. i Geldart L.P. 1995: *Exploration Seismology* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge
- [11] Strutt J.W., 1885 „On the propagation of waves upon the plane surface of an elastic solid”, *Philosophical Magazine*
- [12] Love A, 1911 „Some problems of geodynamics”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*.
- [13] Krey T. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining. *Geophysics*. 1963;28:701–714. <https://doi.org/10.1190/1.1439258>!!!!
- [14] Pilecki Z, 2018, *Metoda sejsmiczna w geoinżynierii*
- [15] Jeffreys H, 1926 „On the Absorption of the Earth's Surface Waves”
- [16] Hamilton E.L. 1972: Compressional-wave attenuation in marine sediments. *Geophysics* 37,
- [17] Scholte J.G., 1947, „Over de voortplanting van golven in gelaagde media” Uniwersytet w Utrecht.
- [18] Rader, D., Schott, W., Ruter, H., 1985. Calculation of dispersion curves and amplitude-depth distributions of love channel waves in horizontal-layered media. *Geophys. Prospect.* 33, 800–816.
- [19] Buchanan, D.J., 1987. Dispersion calculations for SH and P-SV waves in multilayered coal seams. *Geophys. Prospect.* 35, 62–70.

- [20] Yang, X.H., Cao, S.Y., Li, D.C., Yu, P.F., Zhang, H.R., 2014. Analysis of quality factors for Rayleigh channel waves. *Appl. Geophys.* 11, 107–114. <https://doi.org/10.1007/s11770-014-0409-5>
- [21] Dresen, L., Ruter, H., 1994. Seismic coal exploration. Part B: in-seam seismics. *Seism. coal Explor. Part B in-seam Seism.* [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)87542-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)87542-5)
- [22] He, W., Ji, G., Dong, S., & Li, G. (2017). Theoretical basis and application of vertical Z-component in-seam wave exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.008>
- [23] Bohlen T, De Nil D, Kohn D, Jetschny S, 2021, SOFI3D - seismic modeling with finite differences 3D - acoustic and viscoelastic version Users Guide, Karlsruhe Institute of Technology
- [24] Virieux, J. 1986. P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finitedifference method. *Geophysics*, 51(4), 889–901.
- [25] Levander, A.R. 1988. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53(11), 1425–1436.
- [26] Bohlen, T., & Saenger, E.H. 2006. Accuracy of heterogeneous staggered-grid finitedifference modeling of Rayleigh waves. *Geophysics*, 71(4), T109–T115.
- [27] Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative seismology. In Book. [https://doi.org/10.1016/S0065-230X\(09\)04001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-230X(09)04001-9)
- [28] Essen, K., Bohlen, T., Friederich, W., & Meier, T. (2007). Modelling of Rayleigh-type seam waves in disturbed coal seams and around a coal mine roadway. *Geophysical Journal International*, 170(2), 511–526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03436.x>
- [29] Instrukcja obsługi „Młot pneumatyczny typu PS-80” firmy OLI

- [30] Sierodzki P, Remiorz L, Isakow Z, Czarny R, Ćwiękała M, 2024, „Pneumatyczne źródło sejsmiczne do monitorowania prędkości fal sejsmicznych w warunkach podziemnej eksploatacji węgla”, Inżynieria Mineralna
- [31] Confidential Report No. OBAC /22/ATEX/0068
- [32] Isakow Z: autoreferat pracy habilitacyjnej pt. „Opracowanie, badanie i rozwój systemów i urządzeń do oceny zagrożenia tąpniętami w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi”, czerwiec 2019, GIG
- [33] Isakow Z, Cianciara B: Wkład centrum EMAG w rozwój systemów do oceny zagrożenia tąpniętami oraz kontroli oddziaływania eksploatacji podziemnej na powierzchnię obszaru górniczego, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9-10/358, 146-159, 2000, EMAG,
- [34] Isakow Z, Rej A: Cyfrowy system wykrywania zagrożeń tąpniętami, Materiały konferencyjne VI Międzynarodowa Konferencja Automatyzacji Górnictwa ICAMC, Polska, Katowice 12-16.05.1980, IV, 200-210, 1980, Wydawnictwo Ministerstwa Górnictwa,
- [35] Isakow Z, Suchy J, Żymełka K, Krótki opis urządzenia regulacji wzmocnienia typu URW-1 przeznaczonego do pracy w systemie oceny zagrożeń tąpniętami metodą sejsmoakustyki, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2/157, 43-46, 1982, EMAG,
- [36] Isakow Z, Dworak M, Bierne i aktywne metody sejsmoakustyki w systemie oceny zagrożeń tąpniętami, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 11/164, 33-36, 1982, EMAG,
- [37] Dworak M, Isakow Z: System SYLOK - rejestracji i automatycznej lokalizacji wstrząsów, Materiały Konferencyjne XI Sympozjum „Automatyczna kontrola i wczesne wykrywanie zagrożeń w górnictwie”, Tresna, 25- 27.10.1982, 1, 140-151, 1982, EMAG,

- [38] Balicki W, Isakow Z: Rozwój systemów do kontroli zagrożeń naturalnych w kopalniach węgla kamiennego w Polsce, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 10/303, 38-42, 1995, EMAG,
- [39] Isakow Z: Ocena zagrożeń sejsmicznych w kopalniach w systemach opracowanych przez Centrum EMAG, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 5/412, 41-46, 2005, EMAG,
- [40] Isakow Z: autor rozdziału 7, Monografia. Innowacje dla gospodarki pod redakcją S Trenczka. Rozdział 7 - Systemy i urządzenia do monitorowania zagrożeń sejsmicznych w kopalniach i otaczającym środowisku, 1, 162-187, 2010, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG, ISBN 978-83-928970-5-7,
- [41] Isakow Z, Suchy J: Nowe kierunki rozwoju systemów dyspozytorskich w kopalniach polskich, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2/263, 10-14, 1992, EMAG,
- [42] Isakow Z, Suchy J: Problemy eksploatacji, wdrażania i rozwoju systemów do oceny zagrożenia tąpniętami oraz kontroli parametrów produkcji, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 5-6/277, 43-45, 1993, EMAG,
- [43] Isakow Z: Osiągnięcia Centrum EMAG w opracowywaniu i wdrażaniu w górnictwie podziemnym komputerowych systemów i urządzeń do oceny zagrożenia tąpniętami, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 8/290, 7-10, 1994, EMAG,
- [44] Isakow Z, Dworak M: Komputerowe systemy i urządzenia do oceny zagrożenia tąpniętami opracowane i oferowane przez Centrum EMAG, Materiały Konferencyjne Sympozjum Naukowo - Techniczne Tąpnięcia 1994, Rozwiązania inżynierskie w problematyce tąpnięć, Ustroń 23-25.11.1994, 1, 221-230, 1994, EMAG,
- [45] Mutke G, Kotyrba A, Lurka A, Olszewska D, Dykowski P, Borkowski A, Araszkiewicz A, Barański A: 2019, Upper Silesian Geophysical Observation System - a unit of the EPOS project, Journal of Sustainable Mining

- [46] Isakow Z, Dworak M: Przegląd systemów i urządzeń przeznaczonych do oceny stanu zagrożenia tąpniętami, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 7-8/258, 49-52, 1991, EMAG,
- [47] Isakow Z: Wykorzystanie systemów komputerowych do wykrywania, rejestracji i interpretacji zjawisk zachodzących w górotworze w celu oceny zagrożenia tąpniętami, *Materiały Konferencyjne II Szkoły - Konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo*, Zegrze k/Warszawy 22-25.05.1995, 3, 35-45, 1995, Wydział Wydawniczy WSOWŁ (Wojskowa Szkoła Oficerska Wojsk Łączności),
- [48] Isakow Z: Systemy do oceny zagrożeń sejsmicznych w kopalniach. Cz. 1, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 4/399, 5-18, 2004, EMAG,
- [49] Isakow Z, Mencil A: Wprowadzenie do systemów oceny zagrożenia tąpniętami nowej generacji urządzeń - cyfrowe transmisje sygnałów sejsmicznych, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 10/303, 98-105, 1995, EMAG,
- [50] Isakow Z, Koza J: Cyfrowy system transmisji sygnałów sejsmicznych dla kopalń węgla kamiennego i rud miedzi, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 12/328, 48-52, 1997, EMAG,
- [51] Isakow Z: Doświadczenia z eksploatacji w kopalniach węgla kamiennego systemu ARAMIS M z cyfrową transmisją sygnałów sejsmometrycznych DTSS, przeznaczonego do lokalizacji wstrząsów i określania ich energii, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2/374, 37-42, 2001, EMAG,
- [52] Isakow Z, Dworak M, Hersztowska B, Mencil A: Rejestracja zjawisk sejsmoakustycznych głęboko w stropie, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 11/316, 62-66, 1996, EMAG,
- [53] Cianciara B, Isakow Z: System zdalnego monitorowania zagrożenia powierzchni wstrząsami wywołanymi eksploatacją górnictw, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 12/328, 35-39, 1997, EMAG,

- [54] Cianciara A, Cianciara B, Isakow Z: Modele źródeł emisji sejsmicznej w warunkach górnictwa podziemnego, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 6-7/323, 148-153, 1997, EMAG,
- [55] Isakow Z, Dworak M: System oceny zagrożenia nowej generacji, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 6-7/323, 154-157, 1997, EMAG,
- [56] Isakow Z: Nowe formy wizualizacji w dyspozytorskich systemach oceny zagrożenia tąpnięciami, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 4-5/344, 57-69, 1999, EMAG,
- [57] Isakow Z, Hersztowska B, Mencil A, Szołtysek I: System ARP 2000 do zdalnego monitorowania przyspieszeń drgań powierzchni, budynków, obudowy szybowej lub obiektów hydrotechnicznych wywołanych wstrząsami górnictwymi, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 9/369, 160-171, 2001, EMAG,
- [58] Cianciara B, Isakow Z, Dworak M: Propozycja sposobu predykcji wstrząsów działającego na bazie systemu pomiarowego ARAMIS A, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 9/369, 172-178, 2001, EMAG,
- [59] Mironowicz W, Siciński K, Isakow Z: Złożony system monitorowania i wizualizacji pracy kompleksu ścianowego jako narzędzie wspomagania wybranych służb restrukturyzowanej kopalni, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 9/369, 45-60, 2001, EMAG,
- [60] Isakow Z: Nowa metoda identyfikacji w warunkach laboratoryjnych parametrów emisji sejsmoakustycznej, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 5/377, 23-32, 2002, EMAG,
- [61] Mironowicz W, Siciński K, Isakow Z: Sterowanie parametrami pracy zestawów obudowy zmechanizowanej w warunkach zagrożenia tąpnięciami, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 6/378, 29-41, 2002, EMAG,
- [62] Leśniak A, Cianciara B, Isakow Z: Efektywny system oceny zagrożenia tąpnięciami stropowymi, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 7/379, 5-10, 2002, EMAG,

- [63] Leśniak A, Isakow Z: Interpretacja danych z nowych systemów geofizycznych zwiększających bezpieczeństwo eksploatacji ścianowej, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9/381, 129-136, 2002, EMAG,
- [64] Siciński K, Isakow Z, Oset K: Monitorowanie pracy kompleksu ścianowego w celu podniesienia efektywności wydobywania ze ściany, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9/381, 113-120, 2002, EMAG,
- [65] Leśniak A, Cianciara B, Isakow Z: Efektywny system monitoringu zagrożenia tąpnięciami stropowymi, Materiały konferencyjne XXX Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN. V Konferencja Telekomunikacji w Górnictwie. Telekomunikacja i Systemy Bezpieczeństwa w Górnictwie, KTG 2002, Szczyrk 19 - 21. 06. 2002, 1, 113-122, 2002, Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, ISBN 83-915731-2-5,
- [66] Leśniak A, Isakow Z: Rozwiązanie zagadnienia inwersji dla tomografii tłumieniowej w warunkach długich frontów ścianowych, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 11/383, 45-51, 2002, EMAG,
- [67] Isakow Z: System do ciągłej kontroli zmian naprężeń przed frontem ściany, Materiały konferencyjne XXX Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN. V Konferencja Telekomunikacji w Górnictwie. Telekomunikacja i Systemy Bezpieczeństwa w Górnictwie. KTG 2002, Szczyrk 19 - 21. 06. 2002, 1, 99-111, 2002, Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, ISBN 83-915731-2-5,
- [68] Isakow Z: Wstępne doświadczenia z eksploatacji systemu do ciągłej kontroli zmian naprężeń przed frontem ściany, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 1/385, 32-52, 2003, EMAG,
- [69] Isakow Z: Wstępna informacja o nowych systemach do oceny zagrożeń sejsmicznych oferowanych przez Centrum EMAG, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 8/391, 49-53, 2003, EMAG,

- [70] Isakow Z: Systemy do oceny zagrożeń sejsmicznych w kopalniach. Cz. 2, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 5/400, 9-25, 2004, EMAG,
- [71] Z Isakow: Geotomography with the help of a cutter-loader working organ as a source of imaging waves, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46/7, 1235-1242, 2009, Elsevier,
- [72] Isakow Z, Leśniak A, Hersztowska B, Mencil A: Doświadczenia z eksploatacji systemu do oceny zagrożenia zjawiskami dynamicznymi, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9/392, 46-59, 2003, EMAG,
- [73] Cianciara B, Cianciara A, Isakow Z: Wstępne wyniki oceny zagrożenia tąpniętami uzyskane na podstawie analizy emisji sejsmicznej rejestrowanej w rejonie ściany 306 pokładu 507 KWK „Bielszowice”, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9/392, 67-71, 2003, EMAG,
- [74] Leśniak A, Isakow Z: Lokalizacja i grupowanie źródeł emisji sejsmicznej w warunkach długich frontów ścianowych na przykładzie KWK Bielszowice, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6, 3-8, 2005, Wyższy Urząd Górniczy WUG Katowice,
- [75] Isakow Z, Juzwa J: Experiences from Using a System for the Evaluation of Dynamic Phenomena Hazards, RaSiM6: Controlling Seismic Risk, Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings. Edited by: Y Potvin and M Hudyma, 1, 219-226, 2005, Australia, Perth, ACG Australian Centre for Geomechanics,
- [76] Leśniak A, Isakow Z: Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze -Bielszowice coal mine, Poland, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46/5, 918-928, 2009, Elsevier,

- [77] Isakow Z: Monitorowanie drgań i deformacji wywołanych eksploatacją górnictw, Materiały konferencyjne XXXII Międzynarodowej Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN. Telecommunication and Safety Systems in Mining. ATI 2004, Poland, Szczyrk 2-4 June 2004, 1, 59-70, 2004, Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, ISBN 83-915731-5-X,
- [78] Krzystanek Z, Wojtas P, Bojko B, Isakow Z: Zintegrowany system monitorowania zagrożeń naturalnych w kopalniach, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 9/404, 18-24, 2004, EMAG,
- [79] Wasilewski S, Isakow Z, Krzystanek Z: Monitorowanie zagrożeń naturalnych w polskich kopalniach głębinowych, Materiały I Seminarium Zintegrowanego Instytutu Naukowo-Technologicznego, Centrum EMAG, Katowice, 26, 1-12, 2005, EMAG,
- [80] Wojciechowski J, Isakow Z, Wojtas P: Systemy dyspozytorskie EMAG wczoraj, dziś i jutro, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 5/412, 63-76, 2005, EMAG,
- [81] Isakow Z, Berbic N, Gutic K: On line monitoring vibracija tonjenja tla i objekata izazvanih rudarskom eksploatacijom, Monografija Zbornika Radova, Trendovi u Savremenom Rudarstvu, University of Tuzla, Konferencja Międzynarodowa, 1, 157-158, 2006, Uniwersytet w Tuzli, Tuzla 2006, ISSN 1512-7044,
- [82] Cianciara A, Cianciara B, Isakow Z: Sposób monitorowania zagrożenia tąpnięciami oparty na analizie emisji sejsmoakustycznej metodą hazardu sejsmicznego, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 11/430, 5-11, 2006, EMAG,
- [83] Isakow Z, Krzystanek Z, Trenczek S, Wojtas P: Integrated System for Environmental Hazards Monitoring in Polish Mining, Materiały 21st World Mining Congress & Expo 2008 – Underground Mine Environment, 1, 129-141, 2008, Wyd. Agencja Reklamowo-Wydawnicza „OSTOJA”, Kraków 2008, ISBN 978-83-921582-7-1,

- [84] Isakow Z: Safecomine intrinsically safe system for monitoring of hazards in mines related to disturbance of the strata and environment equilibrium, *RaSiM7: Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines* Edited by C Tang, 2, 1045-1056, 2009, Rinton Press New York / New Jersey,
- [85] Isakow Z, Krzystanek K, Trenczek S, Wojtas P: Gas and rock-bump hazard monitoring in the Polish mining, *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 15/3, 229-232, 2009, Springer,
- [86] Isakow Z: Nowe kierunki rozwoju systemów geofizycznych, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 6/472, 31-36, 2010, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG,
- [87] Bojko B, Isakow Z, Krzystanek Z, Trenczek S: Zintegrowany system bezpieczeństwa dla dyspozytorni zakładów górniczych, *Wiadomości Górnicze*, 7-8, 434-439, 2010, Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o. Katowice,
- [88] Trenczek S, Oset K, Isakow Z: Wykrywanie anomalii w polu eksploatacyjnym dla zwalczania zagrożenia gazowego, *Przegląd Górniczy*, 1-2, 58-62, 2011, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice, ISSN 0033-216X,
- [89] Wojtas P, Isakow Z, Krzystanek K, Trenczek S: Importance of measuring instrumentation in the aspect of the methane explosion hazard and geophysical hazards, *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, 36/3, 405-413, 2012, AGH Kraków,
- [90] Kuciara I, Isakow Z: Nowe technologie teledetekcyjne w systemie do monitorowania deformacji i osiadania powierzchni na terenach pogórnich, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 9/404, 45-51, 2004, EMAG,
- [91] Cianciara A, Cianciara B, Isakow Z: Sposób oceny parametrów drgań gruntu w aspekcie ich oddziaływania na obiekty, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 6, 41-43, 2005, Wyższy Urząd Górniczy WUG Katowice,

- [92] Cianciara B, Cianciara A, Isakow Z: Problematyka opisu oddziaływania drgań wywołanych wstrząsami, na powierzchnię Ziemi, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2/409, 15-38, 2005, EMAG,
- [93] Cianciara A, Isakow Z: Modele sygnałów drgań rejestrowanych na powierzchni ziemi, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 3/457, 13-18, 2009, EMAG,
- [94] Isakow Z, Juzwa J, Kuciara I: Nowatorskie rozwiązania dotyczące problematyki monitorowania i oceny zagrożeń powierzchni terenu górniczego, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 3/481, 25-30, 2011, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG,
- [95] Wojtas P, Isakow Z, Krzystanek Z, Juzwa J: Modern tools for monitoring environmental hazards caused by mining activities in underground mines, The proceedings of the International Symposium SESAM 2011, SINAIA, RUMUNIA, 1, 164 -173, 2011, INSEMEX, ISSN 1843 – 6226,
- [96] Sikora M, Isakow Z, Krzystanek Z, Mazik P, Trenczek S: System monitorowania zagrożeń naturalnych - źródła danych i repozytoria, Rozdział w Monografii Praca Zbiorowa pod redakcją J Kabiesza pt. Zarządzanie prewencją zagrożeń górniczych wspomagane narzędziami informatycznymi. 115-134, 2012, Wydawnictwo GIG, Katowice ISBN 978-83-61126-49-2,
- [97] Isakow Z, Kuciara I: Monitorowanie gruntu i budowli na obszarach zagrożonych wstrząsami górotworu i skutkami eksploatacji podziemnej, Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 4, 50-57, 2012, Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o., Katowice, ISSN 1234-5342,
- [98] Oset K, Isakow Z, Trenczek S: Rozpoznanie stanu górotworu za pomocą nowoczesnej aparatury pomiarowej PASAT M, Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 4, 37-49, 2012, Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o., Katowice, ISSN 1234-5342,

- [99] Trenczek S, Mróz J, Krzystanek Z, Isakow Z, Małachowski M, Oset K: Rozwój systemowego monitorowania zagrożeń w podziemnym górnictwie, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 11/501, 3-19, 2012, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG,
- [100] Isakow Z, Kuciara I: Zastosowanie skal intensywności drgań do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją górnictw, *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 3, 25-38, 2014, Wydawnictwo Górnicze Sp. z o.o. Katowice, ISSN 1234-5342,
- [101] Piwowarski W, Isakow Z, Juzwa J: Estimation of the mining damage risk in the hypothetical impact area of the concurrent processes of rock mass disorders, *Archives of Mining Sciences* 60/4, 889-903, 2015, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków,
- [102] Isakow Z: - autor rozdziału 6, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG 40 lat innowacyjności dla gospodarki, Rozdział 6 - Monitorowanie zjawisk sejsmicznych oraz obiektów szczególnego nadzoru, Monografia pod redakcją S Trenczka, 1, 161-183, 2015, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG, ISBN 978-83-63674-20-5,
- [103] P Sierodzki, Isakow Z: „Dokumentacja techniczna systemu sejsmicznego ARAMIS -MSD”, Centrum Transferu Technologii Sp. z o. o. Katowice, czerwiec 2023.
- [104] Bennett W R., 1948, Spectra of Quantized Signals, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3
- [105] Sierodzki P, Remiorz L, Ćwiężka M, Krawiec K, 2026 „Intrinsically Safe Pneumatic Seismic Source for Rock Mass Monitoring and Imaging in Underground Mining in a Controlled Manner”, *Journal of Sustainable Mining*
- [106] Fuławka, K., Pytel, W. and Mertuszka, P., 2018. The effect of selected rockburst prevention measures on seismic activity—Case study from the Rudna copper mine. *Journal of Sustainable Mining*, 17(1), pp.1-10.

- [107] Pilecki, Z., Laskowski, M., Hryciuk, A., Wróbel, J., Koziarz, E., Pilecka, E., Czarny, R. and Krawiec, K., 2014. Identification of gaso-geodynamic zones in the structure of copper ore deposits using geophysical methods. *CIM Journal*, 5(3), pp.194-202.
- [108] KWK Mysłowice-Wesoła, (2024). Dane mierniczo-geologiczne, Pokładzie 510 w partii Aw. Dostęp 2024-02-29.
- [109] KWK Mysłowice-Wesoła, (2024). Opinia techniczna dotycząca induktora fal sejsmicznych – wzbudnika WZB-2, 2024-02-29.
- [110] KWK ROW Rydułtowy. (2022). Dane mierniczo-geologiczne, Ściana IV-E-E1 w pokładzie 712/1-2+713/1-2. Dostęp: 2021-06-22.
- [111] Schimmel, M., Stutzmann, E., & Gallart, J. (2011). Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale. *Geophysical Journal International*, 184(1), 494–506. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04861.x>

Streszczenie

Praca doktorska koncentruje się na opracowaniu i wdrożeniu nowej metody pozyskiwania parametrów górotworu w kopalniach węgla kamiennego, z wykorzystaniem istniejącej aparatury sejsmoakustycznej oraz nowo zaprojektowanego iskrobezpiecznego pneumatycznego wzbudnika sejsmicznego WZB-2. Celem pracy było umożliwienie quasi-ciągłego monitorowania prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych przed frontem ściany wydobywczej, co ma kluczowe znaczenie dla oceny zagrożenia tąpniętami. Wykorzystanie analizy dyspersji fal kanałowych do wyznaczania ich prędkości, w miejsce tradycyjnej metody opartej na pierwszym wstąpieniu czoła fali sejsmicznej, umożliwia wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości propagacji.

W pierwszej części pracy przedstawiono charakterystykę sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla, analizując rodzaje fal sejsmicznych, ich parametry dynamiczne i kinematyczne, w tym prędkość, tłumienie i dyspersję. Następnie, za pomocą modelowania numerycznego 3D metodą różnic skończonych, zbadano propagację fal sejsmicznych w trójwarstwowym modelu pokładu węgla, co pozwoliło na opracowanie metodyki wyznaczania prędkości fal kanałowych.

Kolejnym etapem było zaprojektowanie, wykonanie i certyfikacja iskrobezpiecznego wzbudnika WZB-2, dostosowanego do pracy w trudnych warunkach podziemnej eksploatacji węgla. Przeprowadzono testy laboratoryjne i poligonowe wzbudnika, w tym na poligonach badawczych KGHM O/ZG „RUDNA”, KWK Mysłowice-Wesoła i KWK ROW Ruch Rydułtowy, analizując jego przydatność w tomografii sejsmicznej i wyznaczaniu prędkości fal sejsmicznych.

W pracy dokonano również przeglądu i analizy rozdzielczości aparatury geofizycznej stosowanej w polskim górnictwie węglowym, oceniając możliwości istniejących systemów sejsmoakustycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań poligonowych i analizy danych, wykazano możliwość wysokorozdzielczego monitorowania zmian prędkości fal sejsmicznych z wykorzystaniem wzbudnika WZB-2, co może znacząco poprawić identyfikację subtelnych zmian prędkości świadczących o zmieniającym się polu naprężenia w obrębie ściany.

Wyniki pracy mogą przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa załóg górniczych oraz zmniejszenia występowania wstrząsów wysokoenergetycznych. Zaproponowane rozwiązania wpisują się w priorytetowe kierunki badań naukowych i rozwojowych, przyczyniając się do rozwoju innowacyjnych technologii w polskim górnictwie.

Abstract

The doctoral dissertation focuses on the development and implementation of a new method for acquiring rock mass parameters in coal mines, using existing seismic acoustic equipment and a newly designed intrinsically safe pneumatic seismic vibrator WZB-2. The aim of the work was to enable quasi-continuous monitoring of seismic wave propagation velocities in front of the mining face, which is crucial for assessing rock burst hazards. The use of channel wave dispersion analysis to determine their velocities, instead of the traditional method based on the first arrival of the seismic wave front, will enable high-resolution monitoring of propagation velocity changes.

In the first part of the work, the characteristics of the seismic wave field in the coal seam were presented, analyzing the types of seismic waves, their dynamic and kinematic parameters, including velocity, attenuation, and dispersion. Subsequently, using 3D numerical modeling with the finite difference method, the propagation of seismic waves in a three-layer coal seam model was investigated, which allowed for the development of a methodology for determining channel wave velocities.

The next stage involved the design, manufacture, and certification of the intrinsically safe vibrator WZB-2, adapted to work in the harsh conditions of underground coal mining. Laboratory and field tests of the vibrator were conducted, including at the KGHM O/ZG "RUDNA", KWK Mysłowice-Wesoła, and KWK ROW Ruch Rydułtowy research sites, analyzing its suitability for seismic tomography and determining seismic wave velocities.

The work also reviewed and analyzed the resolution of geophysical equipment used in Polish coal mining, assessing the capabilities of existing seismic acoustic systems. Based on the conducted field tests and data analysis, the possibility of high-resolution monitoring of seismic wave velocity changes using the WZB-2 vibrator was demonstrated, which can significantly improve the identification of subtle velocity changes indicating a changing stress field within the face.

The results of the work can contribute to increasing the safety of mining crews and reducing the occurrence of high-energy tremors. The proposed solutions align with the

priority directions of scientific research and development, contributing to the development of innovative technologies in Polish mining.

Spis rysunków

Rys. 2.1. Proponowany schemat pomiarowy a) oraz spodziewane wyniki w stosunku do rzadko wykonywanych tomografii pełnoskalowych b).	7
Rys. 3.1. Podstawowe rodzaje fal sejsmicznych, a) podłużna, b) poprzeczna, c) Rayleigh'a, d) Love'a.....	10
Rys. 3.2. Pokład węgla jako przykład ośrodka warstwowego, gdzie występuje fala kanałowa uwięziona w pokładzie węgla (zaznaczono symbolicznie).	11
Rys. 3.3. Przykładowe zapisy fal sejsmicznych z oprogramowania systemu ARAMIS-M/E, gdzie algorytm wyznaczył początek fali P (czerwony znacznik), fali S (jasno-niebieski znacznik) oraz koniec zapisu (ciemno-niebieski znacznik), skala czasu nie została zachowana.....	13
Rys. 3.4. Schemat ściany węgla o miąższości H jako ośrodka warstwowego z różnymi parametrami, z dwoma półpłaszczyznami d.....	15
Rys. 3.5. Krzywe dyspersji dla zadanych parametrów modelu podanych w Tab. 3.2 [7]......	17
Rys. 3.6. Rozkład amplitud fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a w pokładzie węgla, a) składowa Z oraz b) składowa X. Zielona linia przedstawia rozkład amplitudy, czarny kolor pokład węgla, szary otaczające skały.	18
Rys. 4.1. Geometria siatki dla Standardowej Siatki Naprzemiennej (SSG). W sejsmice oś Y oznacza oś pionową [23].	22
Rys. 4.2. Przekroje modelu 3D trójwarstwowego modelu ściany węgla (kolor niebieski) z podkładem i nadkładem (kolor brązowy), parametry tłumienia Q_p , Q_s , gęstość ośrodka ρ oraz prędkości propagacji fali pierwotnej V_p oraz wtórnej V_s	24
Rys. 4.3 Rozkład prędkości anomalii o szerokości 40m i parametru C równego 4 i 6.	25
Rys. 4.4. Przekroje 3D trójwarstwowego modelu ściany węgla (kolor niebieski) z podkładem i nadkładem (kolor czerwony) ze strefą spękaną EDZ oraz anomalią o szerokości 40m i 80m, przedstawiono prędkości propagacji fali pierwotnej V_p oraz wtórnej V_s	25

Rys. 4.5. Naniesiony na model pokładu węgla schemat eksperymentu, źródło znajdujące się w pobliżu wirtualnego geofonu Gn przechodzi przez pokład węgla z anomalią i jest rejestrowany po drugiej stronie ściany geofonem G1 w strefie spękanej.....	27
Rys. 4.6. Rejestracja składowej Y a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a.	28
Rys. 4.7. Rejestracja składowej Z a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a.	29
Rys. 4.8. Rejestracja składowej X a) oraz analiza spektralna b) wraz z analitycznymi krzywymi dyspersji fali kanałowej typu Rayleigh'a.	29
Rys. 4.9. Rejestracja składowej poziomej Y prostopadłej do chodnika oraz jej widmo spektralne dla modelu z anomalią prędkości 10%. Minimum fazy Airy'ego wzrosło o około 20 m/s w stosunku to modelu bazowego.....	30
Rys. 4.10. Rejestracja składowej poziomej Y prostopadłej do chodnika oraz jej widmo spektralne dla modelu z anomalią prędkości 20%. Minimum fazy Airy'ego wzrosło o około 60 m/s w stosunku to modelu bazowego.....	30
Rys. 4.11. Porównanie fundamentalnej mody fali kanałowej typu Rayleigh'a dla modelu bez anomalii (bazowego) oznaczonej kolorem czarnym oraz anomaliami 10% i 20% oznaczonych odpowiednio kolorami niebieskim i czerwonym.....	31
Rys. 5.1. Schemat pomiarowy testu wzbudnika WZB Typ 2 (czerwona kropka). K18 i K17 (niebieskie trójkąty) – czujniki geofonowe.	32
Rys. 5.2. Wynik sumowania 16 uderzeń prototypu wzbudnika WBZ Typ 2 jako sumarycznej rejestracji geofonu K17 (a). Stosunek sygnału użytecznego do szumu w zależności od liczby uderzeń (b).	33
Rys. 5.3. Schemat pneumatyczny wzbudnika WZB-2.	35
Rys. 5.4. Iskrobezpieczne wzbudniki w dwóch wykonaniach WZB-2a i WZB-2b.....	36
Rys. 5.5. Wnętrze wzbudnika WZB-2a i jego obudowa.	37
Rys. 5.6. Certyfikat badania typu UE urządzenia Wzbudnik WZB-2.....	42
Rys. 6.1. Minikomputerowe systemy z analogową transmisją danych SAK z lewej i SYLOK z prawej.	44
Rys. 6.2. Współczesny iskrobezpieczny system sejsmoakustyczny ARES-5/E, kaseta pomiarowa, nadajnik dołowy oraz sonda pomiarowa.....	49

Rys. 6.3. Współczesny iskrobezpieczny system sejsmiczny ARAMIS M/E z możliwością pracy na powierzchni (SP/DTSS) jak i w podziemiu kopalni (SD/DTSS) wraz z bogatym zestawem dołowych czujników pomiarowych.	51
Rys. 7.1. Schemat pomiarowy testu w O/ZG Rudna a) oraz profil geologiczny z otworu B1 b) [105].	60
Rys. 7.2. Zapisy fal sejsmicznych na 48-kanalowym sejsmografie GEODE, wzbudzonych przez materiał wybuchowy a) i wzbudnik WZB-2 b) [105].	61
Rys. 7.3. Zapis pojedynczego uderzenia wzbudnika WZB-2 przez geofon G21 (a) oraz zapis pojedynczej detonacji materiału wybuchowego przez geofon G4 (c) oraz ich spektrogramy (b, d) [105].	62
Rys. 8.1. Eksploatacja pokładu 510 wraz z strukturą geologiczną na podstawie otworu geologicznego G.127/1940.	64
Rys. 8.2. Schemat pomiarowy oraz realizacja stanowiska badawczego w rejonie pokładu 510 w partii Aw. Wzbudnik zasilany z butli gazowej oraz wyzwany ręcznie.	65
Rys. 8.3. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego w rejonie pokładu 510 w partii Aw na tle mapy. Na czerwono zaznaczono umiejscowienie wzbudnika WZB-2 oraz geofony odbiorcze. Źródło oprogramowanie systemu ARAMIS M/E.	66
Rys. 8.4. Rejestracje z systemu ARAMIS M/E, wyzwolenie wzbudnikiem WZB-2b oraz b) wyzwolenie młotem 5kg	67
Rys. 8.5. Wynik obliczenia prędkości rozchodzenia się fali w oprogramowaniu ARAMIS_WIN. Wzbudnik znajduje się przy czujniku M26.	68
Rys. 9.1. Struktura geologiczna pokładu 712/1-2+713/1-2 na podstawie otworu geologicznego O1.	71
Rys. 9.2. Aktywność sejsmiczna rejonu ściany IV-E-E1 w okresie 12-27.2023r z zaznaczonymi geofonami biorącymi udział w eksperymencie.	73
Rys. 9.3. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego na ścianie IV-E-E1.	74
Rys. 9.4. Schemat pomiarowy stanowiska badawczego w chodnikach 4-E-E1 oraz 3a-E-E1 z zaznaczonymi mediami udostępnionymi przez kopalnię.	75
Rys. 9.5. Oprogramowanie MCAN z funkcją wyzwiania cyklicznego wzbudnika WZB-2.	75

- Rys. 9.6. Dane pomiarowe poddane obróbce z całego okresu badania. Kolorem czerwonym zaznaczono najbardziej spójne dane umożliwiające dalszą analizę.76
- Rys. 9.7. Dane o największej koherencji, surowe oraz po filtracji, na środku pokazano jedną próbkę przebiegu analizowanego uderzenia77
- Rys. 9.8. Krzywe teoretyczne linii dyspersji sygnału dla pokładu węgla o miąższości 3m a) oraz przykładowy wykres dyspersji rzeczywistego sygnału z prowadzonych badań z dnia 14.07.2023r b), zaznaczono fazę Airy'ego.78
- Rys. 9.9. Minimum prędkości grupowej (faza Airy'ego) zarejestrowanego sygnału w okresie od 15-17.07.2023r. Na wykresie zaznaczono postęp ściany (linie niebieskie) oraz najsilniejszy wstrząs z danego okresu (linia czerwona).78

Spis tabel

Tab. 3.1. Parametry fali sejsmicznej w ośrodku sprężystym.....	9
Tab. 3.2. Parametry krzywych teoretycznych dyspersji sygnału w pokładzie węgla o miąższości 2m.....	17
Tab. 4.1. Parametry modelowania w oprogramowaniu SOFI3D.....	26
Tab. 5.1. Porównanie parametrów wzbudnika WZB-1 oraz nowo projektowanego WZB-2.....	34
Tab. 5.2. Dane techniczne wzbudnika WZB-2 w wersji a i b.....	37
Tab. 5.3. Wstępna ocena źródeł zapłonu zgodnie z PN-EN ISO 80079-36.	38
Tab. 5.4. Analiza ocen źródeł zapłonu zgodnie z PN-EN ISO 80079-38.	39
Tab. 5.5. Bezpieczeństwo konstrukcyjne „c” zgodnie z normą PN-EN ISO 80079-37.....	40
Tab. 6.1. Wzmocnienia karty odbiorczej OA-5/E systemu Ares-5/E	54
Tab. 6.2. Wzmocnienie toru pomiarowego analogowej aparatury ARES-5/E.	56
Tab. 6.3. Minimalne i maksymalne wartości amplitud dla systemu ARES-5/E.....	57
Tab. 6.4. Minimalne i maksymalne wartości amplitud dla systemu ARAMIS M/E z nadajnikiem MP N/O.....	58
Tab. 8.1. Aktywność sejsmiczna ściany 05Aw w pokładzie 510.....	64
Tab. 8.2. Zestawienie obliczonej automatycznie prędkości 5 uderzeń wzbudnika z 05.01.2024r. Czujnik M26 znajdował się bezpośrednio przy wzbudniku. .68	
Tab. 8.3. Zestawienie obliczonej automatycznie prędkości dla czujnika M3 w okresie 03.11.2023 -04.01.2024.	69
Tab. 9.1. Postęp ściany IV-E-E1 w trakcie badania.	72
Tab. 9.2. Wykaz wstrząsów zarejestrowanych w trakcie zawężonego okresu badania	79