

# PRZEGLĄD

założono 01.10.1903

ISSN 0033-216X

7/2014

# GÓRNICZY



## KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL BOARD

Wiesław Blaschke – Editor in Chief

Alina Goździk – Deputy in Chief

## REDAKTORZY TEMATYCZNI – THEMATIC EDITORS

Wacław Dziurzyński

Wiesław Kozioł

Andrzej Lisowski

Kazimierz Stoiński

Józef Sułkowski

Albin Zdanowski

## SEKRETARZ REDAKCJI – EDITORIAL ASSISTANT

Ilona Kansy

## REDAKTOR JĘZYKOWY – LANGUAGE EDITOR

Justyna Baic

## REDAKTOR STATYSTYCZNY – STATISTICAL EDITOR

Tadeusz Tumidajski

REDAKTOR ZESZYTU 7/2014

ZENON PILECKI

## OPRACOWANIE TECHNICZNE – TECHNICAL PREPARATION

## OPRACOWANIE GRAFICZNE – GRAPHICAL DESIGN

Dariusz Gawlik

## RADA NAUKOWA – SCIENTIFIC COUNCIL

Przewodniczący: Józef Dubiński – Polska

Ali Ishan Arol – Turcja

Jacek Charbuciński – Australia

Wojciech Ciężkowski – Polska

Piotr Czaja – Polska

Marian Dolipski – Polska

Pedro Riesgo Fernandez – Hiszpania

Lech Gładysiewicz – Polska

Stefan Góralczyk – Polska

Monika Hardygóra – Polska

Władysław Konopko – Polska

Johan de Korte – RPA

Mel Laurila – USA

Andy Meyers – Australia

Michael Myszkowski – USA

Julius Rubinstein – Rosja

R. K. Sachdev – Indie

Vladimir Slivka – Czechy

Marek Ściążko – Polska

Dieter Ziaja – Niemcy

## RADA PROGRAMOWA – PROGRAM COUNCIL

Zygmunt Folta

Aleksander Kabziński

Kazimierz Kozioł

Miroslaw Kugiel

Piotr Litwa

Roman Łój

Janusz Olszowski

Eugeniusz Ragus

Joanna Strzelec-Lobodzińska

Andrzej Tor

Dariusz Trzcionka

Herbert Wirth

Stanisław Żuk

PIERWOTNĄ WERSJĄ CZASOPISMA PRZEGLĄD GÓRNICZY JEST WERSJA PAPIEROWA

BIBLIOTEKI OBOWIĄZKOWO GROMADZĄCE ZBIORY PRZEGLĄDU GÓRNICZEGO.

LIBRARIES GATHERING OBLIGATORILY THE COLLECTIONS OF THE POLISH MINING REVIEW

Biblioteka Narodowa – Warszawa

Biblioteka Jagiellońska- Kraków

Biblioteka Śląska – Katowice

Biblioteka Uniwersytetu Łódzkiego

Biblioteka Uniwersytetu Warszawskiego

Biblioteka Uniwersytetu Opolskiego

Biblioteka Uniwersytetu Gdańskiego

Biblioteka Uniwersytetu im. M. Curie-Skłodowskiej – Lublin

Biblioteka Uniwersytetu im. A. Mickiewicza – Poznań

Biblioteka Uniwersytetu im. M. Kopernika – Toruń

Biblioteka Publiczna Miasta Stołecznego Warszawy

Biblioteka Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego

Książnica Pomorska – Szczecin

Biblioteka Uniwersytetu Wrocławskiego

WYKAZ JEDNOSTEK ABSTRAKTUJĄCYCH ARTYKUŁY NAUKOWE ZAMIESZCZANE W PRZEGLĄDZIE GÓRNICZYM

LIST OF UNITS ABSTRACTING OR OBTAINING SCIENTIFIC ARTICLES PUBLISHED IN THE POLISH MINING REVIEW

Institute for Scientific Information, Filadelfia – USA

Bibliothek Georgius Agricola

TU Bergakademie Freiberg, Freiberg – Niemcy

Publication Processing Department

Thomson Reuters, Filadelfia – USA

Engineering Information Inc Amsterdam – Holandia

Chemical Abstracts Service Columbus, Ohio, USA

Institute of Mining and Metallurgy Abstracts Londyn – Wielka Brytania

Minerals &amp; Mining Information Services, IMMM Londyn – Wielka Brytania

All – Russian Institute of Scientific and Technical Information (VINITI) Moskwa - Rosja

PRZEGLĄD GÓRNICZY JEST INDEKSOWANY W: THE POLISH MINING REVIEW IS INDEXED IN:

– wykazie czasopism Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego – 6 pkt

– Index Copernicus Journal Master List – ICRV = 5.98

– ogólnopolskiej bazie &lt;baztech.icm.edu.pl&gt;

Wydanie czasopisma jest dofinansowywane przez MINISTERSTWO NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO

Wydawca: STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW GÓRNICTWA ZARZĄD GŁÓWNY

Adres Redakcji: 40-952 Katowice, ul. Powstańców 25, tel: 48 32 255-46-48, e-mail: zgsekretariat@sitg.pl

Strona internetowa Przeglądu Górniczego: www.sitg.pl/strona-przeglad\_info.html

Skład, druk i oprawa: DRUKAT Sp. z o.o. 40-065 Katowice, ul. Mikołowska 100a, tel: 48 32 757-43-99

Nakład 600 egz

ISSN 0033-216X

© Copyright by of the Polish Association of Mining Engineers and Technicians

## Zastosowanie zjawiska emisji akustycznej do badania układu węgiel kamienny-gazy kopalniane w aspekcie sekwestracji CO<sub>2</sub> w pokładach węgla

Applicability of acoustic emission techniques to the study of coal-gas system for CO<sub>2</sub> sequestration in coals



Dr hab. inż. Zofia Majewska,  
prof. AGH<sup>\*)</sup>



Dr hab. inż. Stanisław Majewski,  
prof. AGH<sup>\*)</sup>



Dr inż. Jerzy Ziętek<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych ilustrujące możliwości wykorzystania zjawiska emisji akustycznej (AE) jako narzędzia do zdalnego badania wzajemnych oddziaływań matrycy węglowej z molekułami gazów. Badania te mają ścisły związek z dwoma nadal aktualnymi problemami, a mianowicie: z pozyskiwaniem metanu z pokładów węgla jako alternatywnego źródła energii oraz z koniecznością ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Jedną z technologii, która uwzględnia obecne uwarunkowania ekonomiczne i środowiskowe jest zatłaczanie CO<sub>2</sub> do pozabilansowych metanonośnych pokładów węgla z równoczesnym zintensyfikowaniem odzyskania metanu (CO<sub>2</sub>-ECBM). Poznanie wzajemnych oddziaływań w układzie węgiel kamienny-gazy kopalniane ma kluczowe znaczenie dla powodzenia tej technologii. Z przeprowadzonych, przez autorów, równoczesnych badań sejsmoakustycznych, sorpcyjnych i dylatometrycznych na kawałkowych próbkach węgla kamiennego o znanej budowie petrograficznej, uzyskano wiele cennych informacji. Eksperymenty prowadzono zarówno w reżimie pojedynczego cyklu sorpcja-desorpcja, jak również w kilku następujących po sobie cyklach, na próbkach swobodnych i skrzepowanych. Do opisu AE indukowanej w węglu procesami sorpcji/desorpcji gazów (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i ich mieszaniny binarne) wykorzystano tradycyjne parametry – aktywność akustyczną i intensywność wyzwolonej energii.

Najważniejsze uzyskane rezultaty:

- charakterystyki sejsmoakustyczne i kinetyki odkształceń wykazują istotne różnice w zależności od typu węgla i rodzaju użytego sorbatu,
- zarejestrowana AE i odkształcenia objętościowe podczas kolejnych cykli sorpcja/desorpcja gazów wskazują na przebudowę struktury badanego węgla podczas pierwszego cyklu, czyli na skutek pierwszego kontaktu węgla z sorbatem,
- podczas procesu sorpcji CO<sub>2</sub> na próbkach poddanych stałemu jednoosiowemu naprężeniu zaobserwowano indukowanie w próbce naprężenia sorpcyjnego (tzw. *self-stressing*), oraz redukcję AE i odkształceń objętościowych odpowiednio o 80% i 60%,
- badania współzależności zjawisk AE i odkształceń objętościowych węgla w funkcji ilości sorbowanego gazu wskazują na nieliniowość tej zależności, a ponadto na jej odmienny charakter, zależny od typu węgla i rodzaju użytego sorbatu (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>).

Uzyskane nowe informacje o charakterze zmian odkształceń objętościowych węgla, a także zaobserwowane zjawisko indukowania naprężenia sorpcyjnego w węglu jako skutek sorpcji CO<sub>2</sub>, przebiegającej na węglu poddanym zewnętrznemu naprężeniu, mogą mieć istotne znaczenie dla CO<sub>2</sub> - ECBM, zarówno na etapie projektowania jak, i predykcji skutków iniekcji CO<sub>2</sub>, z punktu widzenia długotrwałego składowania tego gazu.

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie

**Abstract:** This paper presents the results of unique simultaneous measurements of sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission (AE) on solid coal samples subjected to sorption of carbon dioxide, methane and their mixture. The following conclusions can be drawn from this study:

1. sorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> affected the two coals differently and there could be a connection between changes in the coal structure due to sorption of the gases and the character of the induced acoustic emission and strain,
2. a non-linear relationship between the volumetric strain and the amount of sorbed gas was found,
3. the AE and strain characteristics obtained indicated that some of the causes of sorption induced AE and strain are the same,
4. a set of data on strains, stress and AE indicated that the application of axial stress results in the development of internal stress within the coal and also in the reduction of both swelling and AE by about 60 % and 80 %, respectively.

The AE results obtained confirmed the usefulness of the AE technique for non-invasive characterization of coal-gas systems. In addition, the AE technique should be promising for control monitoring of gas movements within the coalbed and/or surrounding strata and, ultimately, towards the surface. This is of importance in regard to environmental safety and health aspects of CO<sub>2</sub> - ECBM/Sequestration.

### Słowa kluczowe:

emisja akustyczna, węgiel kamienny, naprężenia, sorpcja/desorpcja gazów, sekwestracja CO<sub>2</sub> w pokładach węgla

### Key words:

acoustic emission, sorption of gases, bituminous coal, coal swelling, CO<sub>2</sub> sequestration in coal seams

## 1. Wprowadzenie

Przedstawione w artykule badania mają ścisły związek z dwoma aktualnymi problemami, a mianowicie pozyskaniem metanu z pokładów węgla jako alternatywnego źródła energii oraz z koniecznością ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Jedną z technologii, która uwzględnia obecne uwarunkowania ekonomiczne i środowiskowe jest zatłaczanie CO<sub>2</sub> do pozabilansowych metanonośnych pokładów węgla z równoczesnym zintensyfikowaniem odzyskania metanu (CO<sub>2</sub>-ECBM).

Poznanie wzajemnych oddziaływań w układzie węgiel kamienny-gazy kopalniane ma kluczowe znaczenie dla powodzenia tej technologii.

Węgiel kamienny ma zdolność wchłaniania substancji małocząsteczkowych, takich np. jak woda i gazy. Zjawisko to nosi nazwę sorpcji. W węglu jako ośrodku o specyficznej porowatości z jednej strony, oraz wykazującym podobieństwo do polimerów z drugiej strony, zachodzi całe spektrum zjawisk sorpcyjnych: od adsorpcji poprzez procesy adsorpcyjno-absorpcyjne, aż do absorpcji; należy również uwzględnić rolę gazu wolnego w porach transportowych i sieci spękań [2, 38]. Powszechnie znane jest zjawisko pęcznienia/kontrakcji węgla towarzyszące procesom sorpcyjnym gazów, w szczególności CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> [2, 15, 16, 41-43].

Badania przebiegu procesów sorpcji/desorpcji, zarówno pojedynczych gazów, jak i ich mieszanin na węglu oraz indukowanych tymi procesami odkształceń węgla, dostarczają niezwykle ważnych informacji o fizycznych zjawiskach zachodzących w układzie węgiel – sorbaty [2-4, 6, 11, 13, 32].

Również metoda sejsmoakustyczna oparta na zjawisku emisji akustycznej okazuje się skutecznym narzędziem w badaniach układu węgiel-sorbat.

Zjawisko emisji akustycznej objawia się powstawaniem i propagacją fal sprężystych wygenerowanych w ośrodku podczas zachodzących w nim procesów dynamicznych [7, 44].

Fala sprężysta rozchodzi się od źródła do granic ośrodka i może zostać zarejestrowana przez czujnik akustyczny jako sygnał (impuls) akustyczny. Mechanizm tego zjawiska nie jest do końca wyjaśniony. Powszechnie przyjmuje się, że AE

w skałach należy wiązać z procesami pęknięcia na poziomach od submikroskopowego po makroskopowy oraz z poślizgami wzdłuż granic ziaren i istniejących pęknięć.

AE opisuje się za pomocą ograniczonej liczby parametrów w dziedzinie czasu i częstotliwości [44].

Zastanawiając się nad naturą źródeł AE w układach: węgiel-gazy i węgiel-woda, można stwierdzić, na podstawie wyników wieloletnich badań eksperymentalnych [17-31], że proces pęknięcia, będący wynikiem oddziaływania molekuł sorbatu z matrycą węglową jest jednym z głównych źródeł AE.

## 2. Materiał badawczy

Testy sorpcyjne prowadzono na dwóch typach węgla kamiennego różniących się stopniem uwęglania: typ 34.2 (gazowo-koksowy, oznaczony symbolem CK, miejsce pobrania KWK „Budryk”) oraz typ 41 (półantracytowy - opisany w tekście jako CA; próby kawałkowe pobrano w ZG „Chrobry” w Wałbrzychu). Wybrane wyniki analiz węgla zestawione są w tabeli 1.

**Tabela 1. Parametry technologiczne badanego węgla**  
**Table 1. Proximate analysis of tested coal**

Oznaczenie	Typ 41	Typ 34.2
Wilgotność analityczna $W^{(%)}$	1.71	2.20
Zawartość popiołu $A^{(%)}$	6.51	9.69
Zawartość części lotnych $V^{daf(%)}$	10.92	32.60
Zawartość pierwiastka $C^{daf(%)}$	92.33	87.45
Zawartość pierwiastka $H^{daf(%)}$	3.41	5.59

Węgiel typu CA charakteryzuje się jednakową budową z niewyróżnialnym warstwowaniem; widoczną siecią spękań o przebiegu zbliżonym do osiowego (w odniesieniu do osi podłużnej próbki) i poprzecznego; na przełomie charakterystyczną połyskliwością i jednorodnością. W węglu CA charakterystyczny jest wysoki udział macerałów grupy wityritu, oraz słabo zaznaczona obecność macerałów grupy egzynitu (0.9-5.6 %). Bardzo wyraźnie zaznacza się udział macerałów grupy inertynitu (9.7-14.6 %).

Węgiel typu CK ma charakter węgla matowego z cienkimi i rzadkimi pasmami węgla błyszczącego, oraz grubymi i częstymi pasmami węgla półbłyszczącego. Sporadycznie występują laminki i soczewki fuzynu. W systemie spękań przeważają spękania poprzeczne lub skośne do uławiczenia. W przypadku spękań poziomych widoczne są zbliżnienia kalcytem. W węglu typu CK wyraźnie zaznacza się obecność macerałów grupy egzynitu i silnie reprezentowana grupa inertynitu macerałów. Zawartość materiału mineralnego wynosi 0.8 - 3.0 %.

### 3. Metodyka badań

Badania prowadzono zarówno w reżimie pojedynczego cyklu sorpcja-desorpcja, jak również w kilku następujących po sobie cyklach na próbkach swobodnych i skrępowanych. W zależności od rodzaju prowadzonego eksperymentu używano jednego z trzech stanowisk pomiarowych. Dwa z nich wykorzystywano do badań na próbkach nieskrępowanych, a trzecie było stosowane w testach prowadzonych na próbkach poddanych naprężeniom [37]. Pierwszy układ pomiarowy pozwalał na równoczesny pomiar emisji akustycznej oraz odkształceń sorpcyjnych badanego węgla podczas testów sorpcja-desorpcja gazów. Schemat tego układu był wielokrotnie prezentowany [np. 25, 29-31].

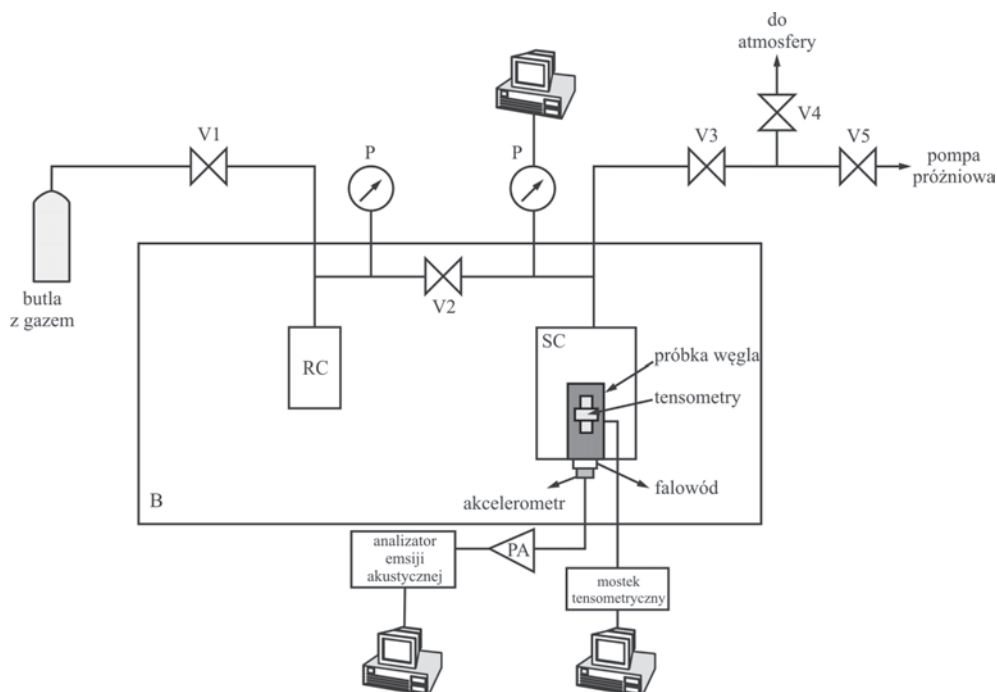
Dla wykonania innowacyjnych badań sorpcji-desorpcji gazów z równoczesnym pomiarem: kinetyk sorpcji-desorpcji, charakterystyk emisji akustycznej oraz kinetyk deformacji sorpcyjnej badanego węgla konieczna była modyfikacja stanowiska badawczego [32-33]. Polegała ona na połączeniu trzech niezależnych układów pomiarowych, a mianowicie układu umożliwiającego przeprowadzenie testów sorpcji-desorpcji gazów na węglu metodą objętościową, następnie układu do pomiaru odkształceń i kolejno układu do monitorowania emisji akustycznej.

Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1. Zasadniczymi elementami układu pomiarowego do przeprowadzenia testów sorpcja-desorpcja gazów metodą objętościową były: (i) 2 komory próżniowo-ciśnieniowe (pomiarowa SC i referencyjna RC), obie termostatowane, co pozwalało na prowadzenie pomiarów w stałej temperaturze (298 K); (ii) system zaworów próżniowo-ciśnieniowych (V1 - V5); (iii) dwa precyzyjne mierniki ciśnienia (P) skalibrowane dla przedziału ciśnień stosowanych w eksperymentach; (iv) pompa próżniowa oraz butla z gazem.

Objętości komór SC i SR oraz martwą objętość SC (objętość komory niezajęta przez próbkę) wyznaczono przy użyciu helu w procedurze kalibracyjnej.

Komorę pomiarową SC stanowiła komora ciśnieniowo-próżniowa zaopatrzona w stalowy falowód w kształcie walca oraz sześć przepustów. Falowód, uszczelniony oringami, częściowo znajdował się wewnątrz komory, stanowiąc podstawę, na której mocowano badaną próbkę węgla, natomiast do jego części znajdującej się na zewnątrz komory przymocowany był czujnik AE. Falowód i przepusty umożliwiały połączenie komory z dwoma torami pomiarowymi: rejestracji AE i odkształceń sorpcyjnych.

Emisję akustyczną indukowaną w węglu procesami sorpcji-desorpcji gazu monitorowano za pomocą układu pomiarowego, który składał się z detektora AE (typ SE1000-HI, z wbudowanym przedwzmacniaczem 40-90dB, produkcji DECI) szerokopasmowego i niskosumowego przedwzmacniacza ładunku oraz cyfrowej aparatury sejsmoakustycznej AEA. Sygnały sejsmoakustyczne z wyjścia detektora podawane były na przedwzmacniacz ładunku. Po wstępnym wzmocnieniu sygnał przekazywany był do kolejnych bloków funkcjonalnych cyfrowego analizatora AE, który poprzez interfejs połączony był z komputerem. Pakiet specjalistycznych programów komputerowych umożliwiał przeprowadzenie analizy badanej AE, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego [33]

Fig. 1. Schematic diagram of equipment in use to monitor strains and AE induced in coal samples by gas sorption (Majewska et al. 2009)

Analiza ta dotyczyła tzw. tradycyjnych parametrów AE, takich jak: aktywność akustyczna, intensywność wyzwalanej energii, średnia energia sygnałów oraz widmo częstotliwościowe wybranych sygnałów AE. Układ pozwala na monitorowanie AE w paśmie 100 Hz - 100 kHz. Podczas prowadzonych badań, biorąc pod uwagę wszystkie współpracujące ze sobą urządzenia, ustalono pasmo 10 - 100 kHz, całkowite wzmocnienie 90 dB.

Tor pomiarowy odkształceń oparty był na mostku tensometrycznym typu SGM-1C81 skonstruowanym w Zakładzie Mechaniki Górnotworu PAN. Miernik ten jest czterokanałowym urządzeniem do pomiarów lokalnych odkształceń przy użyciu tensometrów naprężnych rezystancyjnych. Dane pomiarowe zapisywane są w wewnętrznej pamięci mostka i po zakończonym pomiarze przesyłane na dysk twardy podłączonego komputera PC. Zakres pomiarowy miernika wynosi w przybliżeniu 4 promille przy rozdzielczości 0.001 promilla. Do pomiarów odkształceń używane były tensometry papierowe typu RL120 produkcji krajowej.

Próbki węgla, przed umieszczeniem ich w komorze pomiarowej, oklejone zostały w połowie wysokości tensometrami, po 2 na dwóch przeciwległych ściankach na każdej z nich dla pomiaru odkształceń równoległych i prostopadłych względem osi próbki, a tym samym prostopadłych  $\epsilon_T$  i równoległych  $\epsilon_L$  do uwarstwienia (próbki były wycięte prostopadle do warstwowania). Pomierzone wartości  $\epsilon_L$  i  $\epsilon_T$  pozwalały na obliczenie odkształcenia objętościowego próbki  $\epsilon_v$  z zależności:  $\epsilon_v = \epsilon_L + 2 \epsilon_T$ .

### 3.1. Procedura pomiarowa

Dla zachowania identycznych warunków początkowych każdy eksperyment zaczynał się odgazowaniem komór SC i RC do próżni  $10^{-5}$  Pa. W celu zwiększenia efektywności „oczyszczenia powierzchni węgla” z uprzednio zasorbowanych gazów i par, a w szczególności z przestrzeni mikroporów zastosowano wielokrotnie „przepłukiwanie” helem ( $p_{He} = 80$  mm Hg).

Pojedynczy test przebiegał w następujących etapach:

1. separacja komór SC i RC poprzez zamknięcie zaworu V2,
2. pomiar ciśnienia w komorach,
3. otwarcie zaworu V1 i wpuszczenie gazu z butli do komory RC, zamknięcie zaworu V1 i pomiar ciśnienia w komorze,
4. otwarcie zaworu V2, dozowanie gazu do komory pomiarowej S.C., a następnie zamknięcie zaworu,
5. pomiar ciśnienia w komorze RC,
6. start procesu sorpcji i równoczesnych pomiarów zmian ciśnienia w komorze pomiarowej SC (początkowo co 1 s, a potem co 10 s), oraz zmian indukowanych odkształceń i emisji akustycznej (w 1-minutowych interwałach); zakończenie sorpcji, gdy ciśnienie w komorze pomiarowej nie ulegało zmianom w okresie co najmniej 10 godzin,
7. wypuszczenie gazu z SC i redukcja ciśnienia do około 0.1 MPa; pobranie próbki gazu do analizy chromatograficznej w przypadku gdy sorbatem była mieszanina gazów,
8. równoczesne monitorowanie zmian ciśnienia, odkształceń i AE podczas desorpcji, początek rejestracji po upływie 1 minuty od momentu wypuszczenia gazu z komory pomiarowej.

W przypadku następujących po sobie kolejnych testów sorpcja/desorpcja po punkcie 8, próbka węgla była poddawana odgazowaniu i powtarzano procedurę pomiarową wg punktów 1 - 8.

### 4. Emisja akustyczna i odkształcenia objętościowe indukowane w węglu sorpcją gazu ( $CO_2$ , $CH_4$ , $CO_2+CH_4$ )

Emisję akustyczną generowaną w węglu procesami sorpcji/desorpcji gazu opisano za pomocą dwóch tradycyjnych parametrów AE, określonych dla grupy sygnałów wygenerowanych w pewnym obszarze (lub objętości) i zarejestrowanych w zadanym interwale czasu [44]:

- umowna intensywność energii - suma energii umownych sygnałów zarejestrowanych w jednostce czasu,
- intensywność skumulowana  $E_{sk}$  - całkowita ilość energii wyzwolonej z danej objętości skały od pewnego czasu  $t = 0$  do określonego czasu  $t$ .

Oba parametry przedstawiono w jednostkach umownych.

Rozwój odkształceń indukowanych w węglu procesami sorpcji/desorpcji gazu przedstawiony został w postaci przebiegu kinetyk odkształceń objętościowych ( $\epsilon_v$ ).

Badania z użyciem mieszanin binarnych prowadzono dla mieszanin gazów o następującym składzie procentowym (obj.): 25%  $CO_2$  + 75%  $CH_4$ ; 50%  $CO_2$  + 50%  $CH_4$  oraz 75%  $CO_2$  + 25%  $CH_4$  [33]. W artykule przedstawione zostały wyniki tylko dla mieszaniny 50%  $CO_2$  + 50%  $CH_4$ .

Zmiany emisji akustycznej i odkształceń omówiono kolejno dla dwóch typów węgla: typ 41 (CA) i typ 34.2 (CA).

Rozkłady wybranych parametrów AE i odkształceń objętościowych przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Charakterystyki sejsmoakustyczne wykazują istotne różnice w zależności od typu badanego węgla oraz użytego sorbatu. Dotyczą one przede wszystkim poziomu rejestrowanej emisji oraz jej rozwoju podczas procesu sorpcji. Wyraźnie wyższy poziom AE towarzyszy sorpcji  $CO_2$  aniżeli sorpcji  $CH_4$ , zarówno dla węgla CA, jak i CK (dla czytelności wykresów nie można było zastosować jednakowej skali, co utrudnia porównanie). Największa AE rejestrowana jest podczas pierwszych kilku godzin sorpcji  $CO_2$ , następnie obserwuje się hiperboliczny spadek AE. Natomiast rozkład AE indukowanej sorpcją  $CH_4$  jest wyraźnie odmienny (rys. 2c, d i rys. 3b, e), emisja akustyczna jest zdecydowanie niższa, bardzo charakterystyczne są okresy zupełnego braku emisji, szczególnie widoczne w przypadku węgla CA. Poziom AE podczas sorpcji mieszaniny 50%  $CO_2$  + 50%  $CH_4$  jest 8 razy niższy w porównaniu z AE indukowaną sorpcją  $CO_2$  i około 4 razy wyższy niż w przypadku sorpcji  $CH_4$ .

Zmiany odkształceń i AE rosły zgodnie, co dało podstawy do podjęcia próby poszukania korelacji pomiędzy nimi (rys. 4). Dane eksperymentalne opisano zależnością

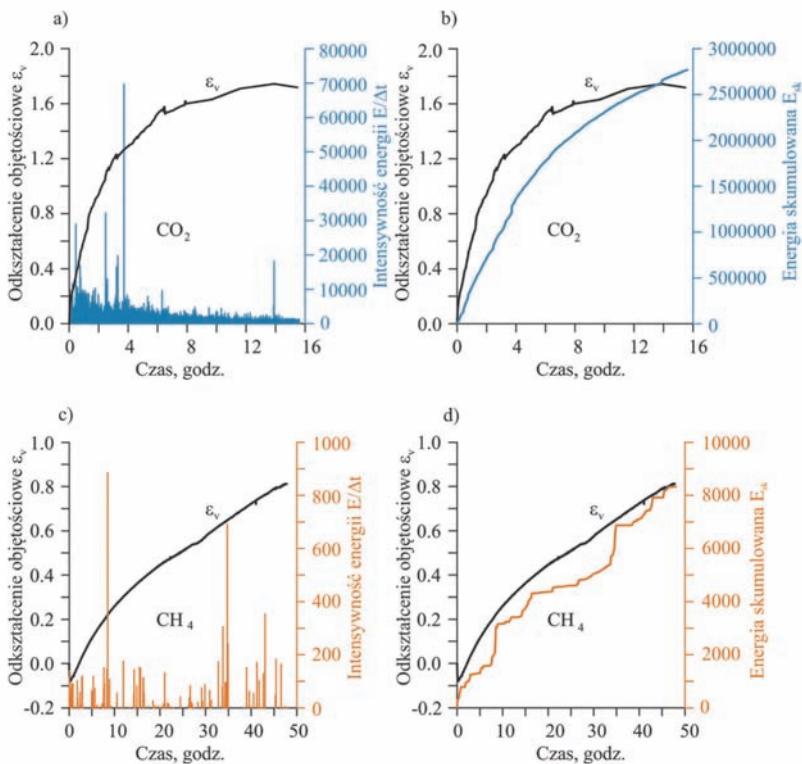
$$\epsilon_v = \exp(a \ln \sum E - b) \quad (4.1)$$

gdzie  $\epsilon_v$  jest odkształceniem objętościowym,  $\sum E$  jest skumulowaną intensywnością energii,  $a$  i  $b$  są stałymi zależnymi od własności węgla. Na obecnym etapie nie jest wyjaśnione ich znaczenie fizyczne. Stała  $a$  wynosiła około 0.5, natomiast wartość  $b$  oscylowała wokół 3.5.

Wzajemne relacje pomiędzy kinetykami odkształceń objętościowych i emisji akustycznej przedstawione na rysunku 3, wskazują na widoczną zgodność przebiegu zmian odkształceń objętościowych i AE, co może sugerować istnienie wspólnych źródeł tych zjawisk.

Najistotniejsze różnice w rozwoju odkształceń objętościowych, indukowanych odpowiednio sorpcją  $CO_2$  i  $CH_4$ , ilustrują rysunki 2c, d oraz rysunek 5.

W przypadku  $CO_2$ , zdecydowana większość odkształceń objętościowych węgla przypada na pierwsze 10 godzin jego ekspozycji na działanie  $CO_2$ . Pęcznienie, po początkowym szybkim wzroście, osiąga maksimum (ok. 1.4%), a następnie stopniowo maleje z czasem. Przyczyn opisanego spadku odkształceń badanego węgla może być kilka.



Rys. 2. Zmiany AE i odkształceń objętościowych węgla CA podczas sorpcji  $\text{CO}_2$  (a, b) oraz  $\text{CH}_4$  (c, d)  
 Fig. 2. Changes of AE and volumetric strain during sorption of  $\text{CO}_2$  (a, b) or/and  $\text{CH}_4$  (c, d) for coal CA

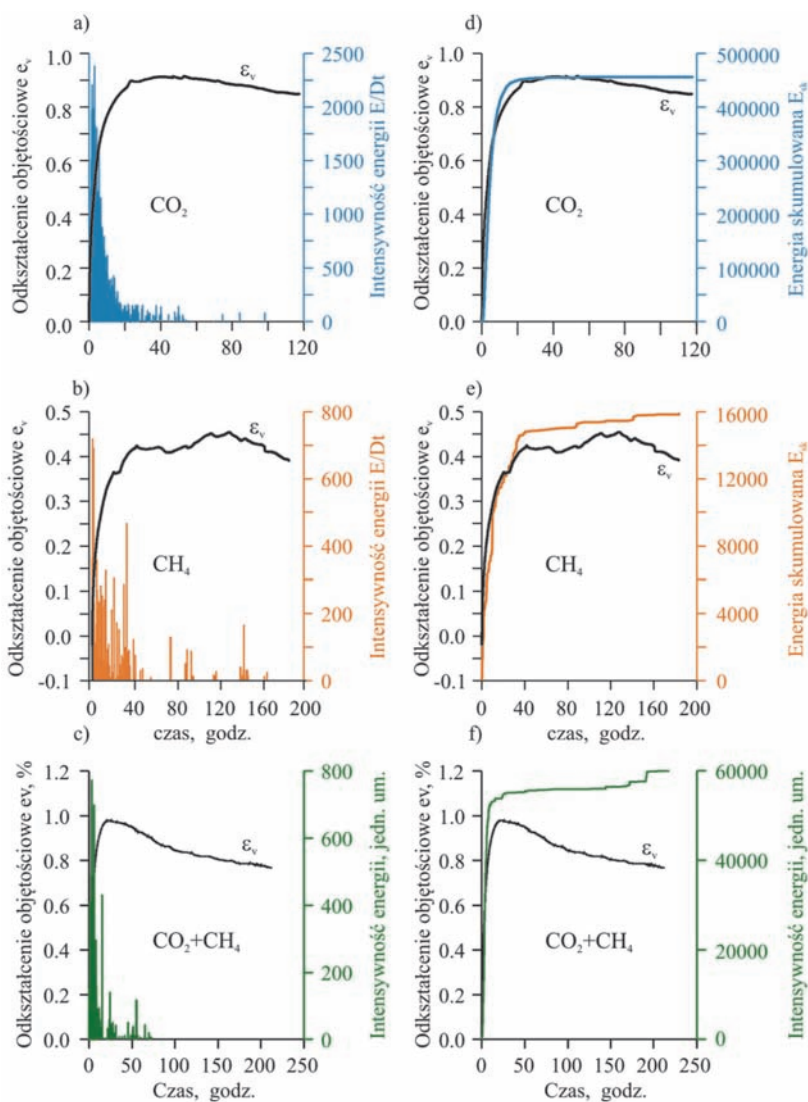
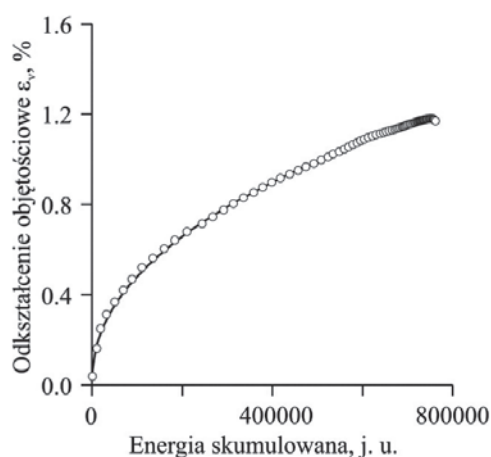


Fig. 3. Zmiany AE i odkształceń objętościowych węgla CK podczas sorpcji pojedynczych gazów i ich mieszaniny binarnej  
 Fig. 3. Changes of AE and volumetric strain during sorption of gases for coal CK

Po pierwsze, na zmiany odkształceń objętościowych węgla mają wpływ dwa procesy, a mianowicie pęcznienie węgla na skutek adsorpcji i absorpcji  $\text{CO}_2$  oraz kontrakcja matrycy węglowej na skutek ciśnienia gazu wolnego w szczelinach i porach [39]. Po drugie, jest bardzo prawdopodobne, że skład maceralny i obecność intensywnej sieci spękań mogą być odpowiedzialne za obserwowane zmiany. Omawiane próbki węgla zawierają dużo wityrnytu i inertynitu. Można przyjąć, że w wyniku absorpcji  $\text{CO}_2$  pęcznieją macerały grupy wityrnytu, co prowadzi do kompresji w obszarach o większej porowatości (np. inertynit) lub z otwartymi spękaniami. Może się zdarzyć, że kompresja zdominuje rozszerzalność, co zaznaczy się jako spadek odkształceń objętościowych. To wyjaśnienie znajduje potwierdzenie w badaniach Karacana [12], który wykazał, że pęcznienie węgla indukowane sorpcją  $\text{CO}_2$  jest procesem heterogenicznym, zależnym od składu maceralnego badanego węgla, a wielkości pęcznienia i kontrakcji zmieniały się pomiędzy  $\pm 15\%$ .



Rys. 4. Zależność pomiędzy emisją akustyczną a odkształceniami objętościowymi indukowanymi sorpcją gazu

Fig. 4. Relationship between volumetric strain and cumulative AE energy induced in coal by gas sorption; the dotted line represent the experimental data, whereas the solid black curve are the fits using equation (1)

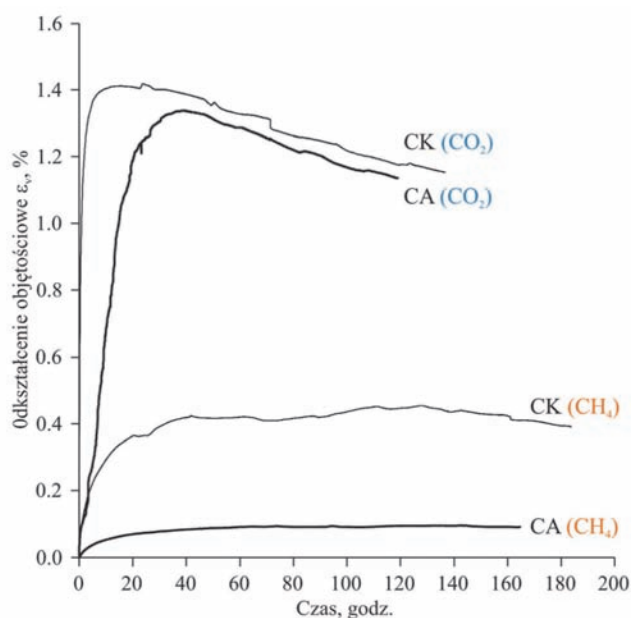


Fig. 5. Kinetyki odkształceń objętościowych indukowanych sorpcją gazu ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ )

Fig. 5. Volumetric strain in relation to time

Natomiast odkształcenia objętościowe indukowane w węglu sorpcją  $\text{CH}_4$  wykazują zdecydowanie odmienny charakter rozwoju w trakcie eksperymentu. Odkształcenia objętościowe rosną we wczesnej fazie procesu, ale stosunkowo szybko osiągają stan bliski równowadze. Cechą charakterystyczną odkształceń węgla CA jest obserwowany efekt skurczu matrycy węglowej na samym początku procesu sorpcji metanu (rys. 2c, d). Można przypuszczać, że podczas wstępnej fazy procesu sorpcji metanu efekt kompresji porów na skutek działania ciśnienia hydrostatycznego gazu wpuszczonego do komory ciśnieniowej jest większy niż rozszerzalność spowodowana sorpcją  $\text{CH}_4$ . Kinetyki odkształceń objętościowych indukowanych sorpcją mieszaniny binarnej (50/50) w węglu CA i CK przedstawiono na rys. 6.

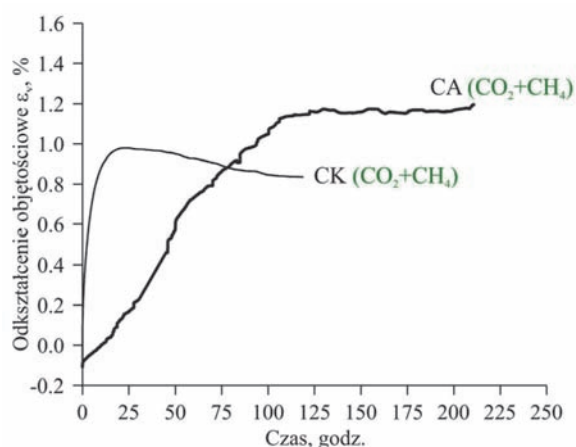


Fig. 6. Kinetyki odkształceń objętościowych indukowanych sorpcją mieszaniny binarnej ( $\text{CO}_2+\text{CH}_4$ )

Fig. 6. Volumetric strain in relation to time

W węglu CA, na samym początku procesu sorpcji występuje skurcz matrycy węglowej pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego, a następnie postępuje stopniowe pęcznienie węgla. Po osiągnięciu maksymalnej wartości, odkształcenie objętościowe nie wykazuje tendencji wzrostowej i utrzymuje się na tym samym poziomie. Natomiast odkształcenia objętościowe węgla CK, po początkowym szybkim wzroście, osiągają maksimum, a następnie stopniowo maleją z czasem.

Analiza odkształceń objętościowych węgla CA i CK dla tych samych sorbatów prowadzi do następujących wniosków:

- podczas sorpcji  $\text{CO}_2$  węgiel CA i CK doznają podobnego odkształcenia objętościowego,
- podczas sorpcji  $\text{CH}_4$  odkształcenie objętościowe węgla CA jest około 5 razy mniejsze od odkształcenia, którego doznał węgiel CK,
- podczas sorpcji mieszaniny binarnej odkształcenie objętościowe węgla CA jest o około 20% większe od odkształcenia, którego doznał węgiel CK,
- wielkość odkształcenia objętościowego węgla CA podczas sorpcji  $\text{CO}_2$  jest około 20 razy większa od odkształcenia zarejestrowanego w trakcie sorpcji  $\text{CH}_4$ , a dla węgla CK jest 4 razy większa.

W celu pełniejszego objaśnienia zaobserwowanych różnic w oddziaływaniach molekuł gazu z matrycą węglową należy wziąć pod uwagę również odmienną strukturę molekularną dwutlenku węgla i metanu. Cząsteczka  $\text{CO}_2$  ma kształt sferocylindryczny (długość 5.8 Å i szerokość 3.7 Å), cechuje ją duży moment kwadrupolowy, który decyduje o podwyższeniu energii oddziaływań cząsteczki z matrycą węglową. Cząsteczki  $\text{CO}_2$



z uwagi na niewielkie rozmiary, kształt i niską energię aktywacji mogą swobodnie penetrować strukturę substancji węglowej. Dominującym mechanizmem sorpcji  $\text{CO}_2$  na węglu jest więc objętościowa adsorpcja, aczkolwiek udział absorpcji jest znaczący.

W przypadku sorpcji  $\text{CH}_4$  powierzchniowa adsorpcja i absorpcja są głównymi podprocesami zachodzącymi w układzie węgiel-metan. Dzieje się tak, ponieważ sferyczna cząsteczka metanu początkowo podlega adsorpcji fizycznej, a dopiero na skutek dłuższego kontaktu węgla z metanem w wyniku dyfuzji cząsteczek  $\text{CH}_4$  w fazę molekularną i elastyczną fazę chłonną i relaksacji łańcuchów makromolekularnych, cząsteczki metanu wnikają do wnętrza struktury węgla. Sorpcja metanu na węglu ma złożony charakter adsorpcyjno-absorpcyjny [38].

Ponadto, należy wziąć pod uwagę temperaturę, w której prowadzone były eksperymenty (298°K). W tej temperaturze  $\text{CO}_2$  jest poniżej swojej temperatury krytycznej i zachowuje się jak sorbat w stanie pary, podczas gdy metan jest powyżej swojej temperatury krytycznej i zachowuje się jak gaz.

Bardzo ważne informacje uzyskano badając zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi węgla a ilością pochłoniętego gazu podczas procesu sorpcji (rys. 7 i 8).

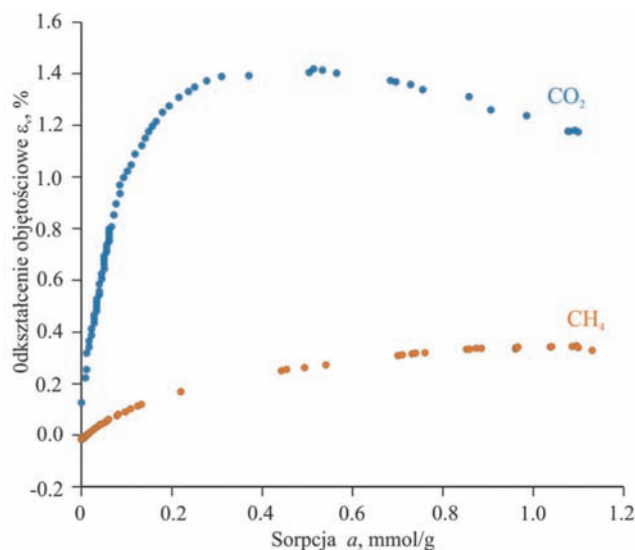
Charakter tej zależności był dla nas niespodziewany, bowiem generalnie, z bardzo nielicznymi wyjątkami [9, 40], przyjmuje się, że pęcznienie węgla jest praktycznie proporcjonalne do ilości pochłoniętego sorbatu [np. 1, 5, 8, 13, 16].

Krzywe na rysunku 7 wskazują, że wielkość odkształceń objętościowych dla identycznych ilości sorbowanego gazu jest wyraźnie większa dla  $\text{CO}_2$ . Rozwój odkształceń objętościowych dla  $\text{CO}_2$  jest inny niż w przypadku  $\text{CH}_4$ . Odkształcenia rosną gwałtownie na początku sorpcji  $\text{CO}_2$ , osiągają swoją

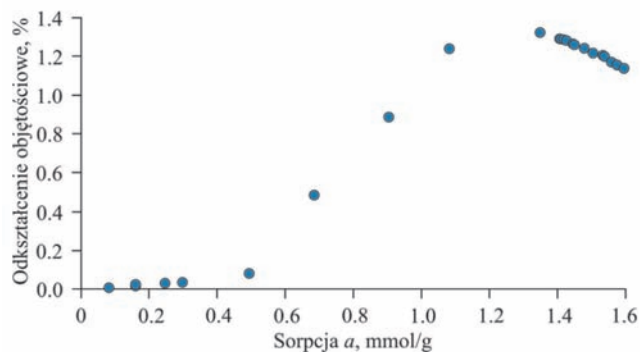
maksymalną wartość, a następnie zaczynają powoli maleć mimo wzrastającej ilości sorbowanego gazu. Ilość zasorbowanego  $\text{CO}_2$ , po przekroczeniu której obserwuje się spadek odkształceń odpowiada w przybliżeniu połowie pojemności sorpcyjnej danej próbki węgla. W przypadku węgla CA (rys. 8) początkowemu wzrostowi ilości sorbowanego  $\text{CO}_2$  nie towarzyszy wzrost pęcznienia, dopiero po przekroczeniu pewnej wartości zasorbowanego gazu pęcznienie zaczyna rosnąć i po osiągnięciu maksymalnej wartości obserwuje się jego spadek (od około 75% pojemności sorpcyjnej).

Podczas wstępnego etapu sorpcji  $\text{CH}_4$  odkształcenia objętościowe również rosną (rys. 9), ale mniej dynamicznie niż w przypadku sorpcji  $\text{CO}_2$ , dążą do wartości maksymalnej i szybko osiągają stan bliski równowagi. W przypadku obu sorbatów nie ma liniowej zależności pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością sorbowanego gazu, jeśli rozpatrywać całość procesu sorpcji. Natomiast w początkowym stadium sorpcji  $\text{CO}_2$ , kiedy odkształcenia gwałtownie rosną, można przyjąć, że zależność ta ma liniowy charakter.

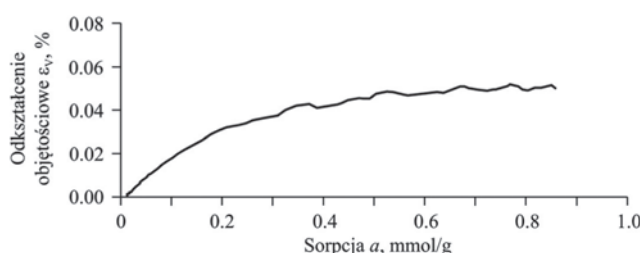
Zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi węgla a ilością pochłoniętego gazu podczas procesu sorpcji mieszaniny binarnej przedstawia rys. 10. Zależności te dla obu typów badanego węgla są zdecydowanie odmienne. Dla węgla CK zależność ta ma charakter bardzo podobny do opisanej powyżej zależności dla  $\text{CO}_2$  (rys. 7). Odkształcenia objętościowe rosną dość gwałtownie, na początku sorpcji osiągają stosunkowo płaskie maksimum dla pewnej ilości zasorbowanego gazu, a następnie zaczynają powoli maleć mimo wzrastającej ilości sorbowanego gazu. Węgiel CA zachowuje się zupełnie inaczej, na obecnym etapie badań trudno pokusić się o pełną analizę obserwowanych zachowań badanego węgla.



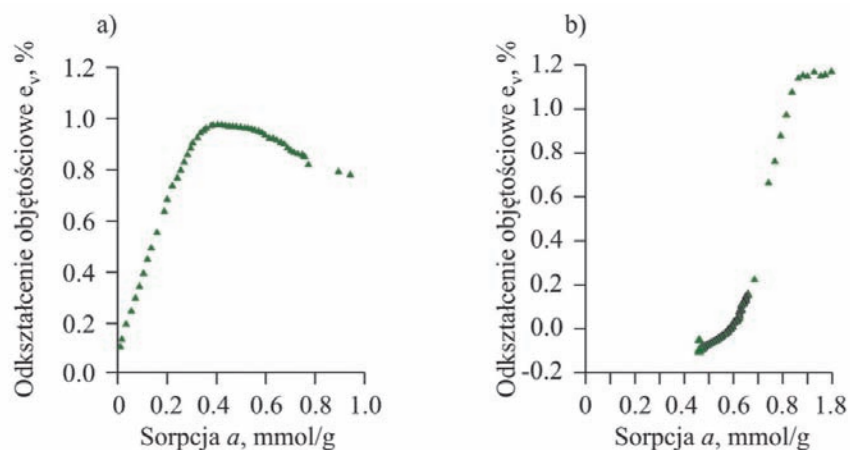
Rys. 7. Zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością zasorbowanego gazu dla próbek węgla CK [33]  
Fig. 7. Relationship between the volumetric strain and the amount of sorbed gas for coal CK



Rys. 8. Zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością zasorbowanego  $\text{CO}_2$  dla węgla CA [34]  
Fig. 8. Relationship between the volumetric strain and the amount of sorbed  $\text{CO}_2$  for coal CA

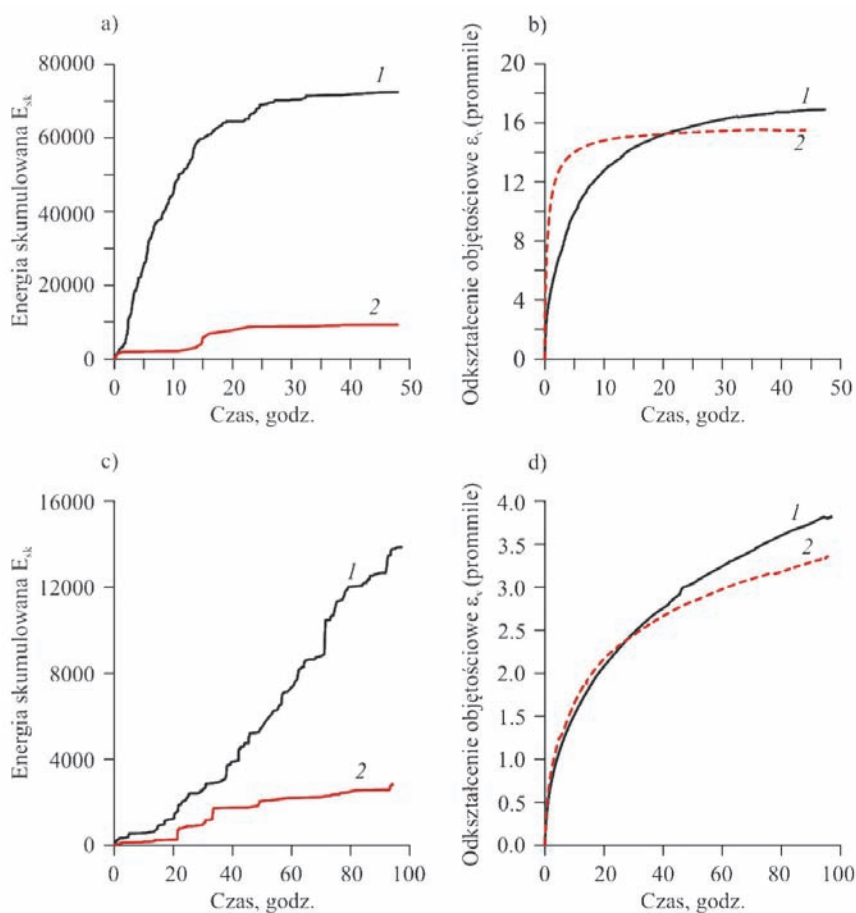


Rys. 9. Zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością zasorbowanego  $\text{CH}_4$  dla węgla CA  
Fig. 9. Relationship between the volumetric strain and the amount of sorbed methane for coal CA



Rys. 10. Zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością zabsorbowanej mieszaniny binarnej: (a) dla węgla CK oraz (b) dla węgla CA [33, 34]

Fig. 10. Relationship between the volumetric strain and the amount of sorbed binary gas mixture for coal CK (a) and for coal CA (b)



Rys. 11. Zmiany AE i odkształceń objętościowych węgla CK podczas dwóch kolejnych cykli sorpcji gazu:  $CO_2$  (a, b) oraz  $CH_4$  (c, d)

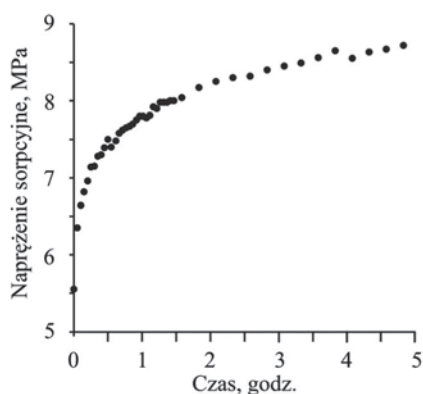
Fig. 11. Changes of AE and volumetric strain induced in coal CK during two successive cycles of gas sorption:  $CO_2$  (a, b) and  $CH_4$  (c, d)

Przedstawiony rozwój odkształceń objętościowych może mieć istotne znaczenie dla symulacji zmian przepuszczalności pokładu podczas zatłaczania  $\text{CO}_2$  i w trakcie jego magazynowania. O ile nam wiadomo, zaobserwowany przez nas charakter pęcznienia węgla nie był do tej pory opisany w literaturze.

Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu kolejne dwa eksperymenty nie zostały szczegółowo opisane, a jedynie przedstawiono najważniejsze otrzymane rezultaty.

Rozkłady parametrów AE oraz kinetyki odkształceń uzyskane podczas cyklicznych testów sorpcji/desorpcji (rys. 11) wskazują, że każdy z cykli sorpcji gazu odbywał się na węglu o nieco innej strukturze. Można założyć, że wzajemne oddziaływanie molekuł gazu z matrycą węglową w pierwszym cyklu, a następnie proces odgazowywania próbki węgla przed następnym cyklem sorpcji, spowodowały istotne zmiany w strukturze węgla, manifestujące się podczas badań zmianami charakteru i wielkości indukowanej sorpcją gazu AE oraz odkształceń. [29, 35-36]. Z punktu widzenia sekwestracji  $\text{CO}_2$  istotny jest fakt, że odkształceniom objętościowym węgla pod wpływem sorpcji  $\text{CO}_2$  towarzyszy przegrupowanie elementów strukturalnych, które w zależności od stopnia metamorfizmu węgla, ma różny kierunek [10-11, 15].

Testy sorpcji prowadzone na bliźniaczych próbkach swobodnych i skrzepowanych [37] wykazały, że zastosowa-



Rys. 12. Rozwój naprężenia podczas sorpcji  $\text{CO}_2$  na skrzepowanej próbce węgla CK [37]

Fig. 12. Development of stress induced in confined coal sample during  $\text{CO}_2$  sorption

nie osiowego naprężenia spowodowało rozwój naprężenia wewnątrz próbki (self-stressing) oraz redukcję zarówno AE jak i odkształceń objętościowych odpowiednio o 60% i 80% (rys. 12 i rys. 13).

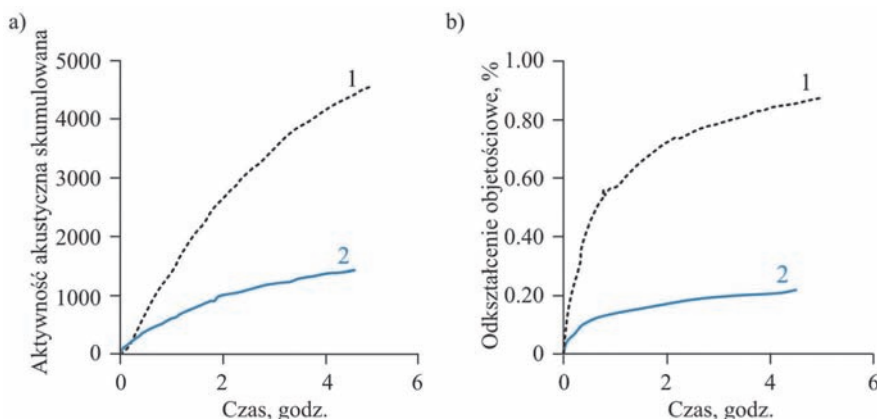
Rozwój naprężenia wewnętrznego może prowadzić, z jednej strony, do pęknięcia pokładu węgla i zwiększenia przepuszczalności, ale także należy wziąć pod uwagę możliwość penetracji  $\text{CO}_2$  do skał towarzyszących. Opisane badania mogą stanowić przyczynek do pełniejszego poznania wpływu stanu naprężeń na reakcję pokładu węgla na sorpcję ditlenku węgla.

Przeprowadzone badania emisji akustycznej węgla wskazują na możliwość wykorzystania metody sejsmoakustycznej jako nieinwazyjnego narzędzia do charakterystyki układu: węgiel kamienny-gazy kopalniane. Metoda ta może być również perspektywiczna w aspekcie kontrolnego monitoringu przepływu gazu w obrębie pokładu i skał towarzyszących.

## 5. Podsumowanie

Najważniejsze wyniki uzyskane w prowadzonych badaniach:

- Charakterystyki sejsmoakustyczne i kinetyki odkształceń wykazują istotne różnice w zależności od typu badanego węgla i rodzaju użytego sorbatu.
- Wzajemne relacje pomiędzy kinetykami odkształceń objętościowych i emisji akustycznej wskazują na istnienie wspólnych źródeł tych zjawisk.
- Stwierdzono nieliniową zależność pomiędzy odkształceniami objętościowymi a ilością sorbowanego gazu, a ponadto jej odmienny charakter, zależny od typu węgla i rodzaju użytego sorbatu ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2+\text{CH}_4$ ). Nowe informacje o charakterze zmian odkształceń objętościowych węgla mogą mieć istotne znaczenie dla  $\text{CO}_2$  - ECBM, zarówno na etapie projektowania, jak i predykcji skutków iniekcji  $\text{CO}_2$ , z punktu widzenia długotrwałego składowania tego gazu.
- Zaobserwowano zjawisko indukowania naprężenia sorpcyjnego w węglu jako skutek sorpcji  $\text{CO}_2$  zachodzącej na węglu poddanym zewnętrznym naprężeniom. Rozwój naprężenia wewnętrznego może prowadzić do spękań pokładu węgla i zwiększenia jego przepuszczalności, ale także należy wziąć pod uwagę możliwość penetracji  $\text{CO}_2$  do skał towarzyszących.



Rys. 13. Zmiany AE i odkształceń objętościowych w próbce nieskrępowanej (1) i skrzepowanej (2)

Fig. 13. Changes of AE (a) and volumetric strain (b) in unconfined (1) and confined (2) samples

– Emisja akustyczna i odkształcenia objętościowe zarejestrowane podczas kolejnych cykli sorpcja-desorpcja gazów wskazują na przebudowę struktury węgla na skutek pierwszego kontaktu węgla z sorbatem. Zmiany w strukturze węgla, manifestujące się podczas cyklicznych testów sorpcji zmianami charakteru i wielkości indukowanej sorpcją gazu emisji akustycznej oraz odkształceń, są istotne z punktu widzenia sekwestracji CO<sub>2</sub> ponieważ odkształceniom objętościowym węgla pod wpływem sorpcji CO<sub>2</sub> towarzyszy przegrupowanie elementów strukturalnych, które w zależności od stopnia metamorfizmu węgla, ma różny kierunek.

Przeprowadzone badania emisji akustycznej węgla wskazują na możliwość wykorzystania metody sejsmoakustycznej jako nieinwazyjnego narzędzia do charakterystyki układu: węgiel kamienny-gazy kopalniane. Metoda ta może być również perspektywiczna w aspekcie kontrolnego monitoringu przepływu gazu w obrębie pokładu i skał towarzyszących.

## Literatura

- Bustin M., R., Cui X., Chikatamarla, L.: Impacts of volumetric strain on CO<sub>2</sub> sequestration in coals and enhanced CH<sub>4</sub> recovery. *AAPG Bulletin* 92, 1, 2008, 15-29.
- Ceglarska-Stefańska G., Czapliński A.: Correlation between sorption and dilatometric processes in hard coals. *Fuel* 72, 1993, 413-417.
- Ceglarska-Stefańska G., Zarębska K.: Expansion and contraction of variable rank coals during the exchange sorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. *Adsorption Science & Technology* 20, 2002, 49-62.
- Ceglarska-Stefańska G., Zarębska K.: Sorption of carbon dioxide-methane mixtures, *International Journal of Coal Geology* 62, 4, 2005, 211-222.
- Cui X., Bustin M. R., Chikatamarla L.: Adsorption-induced coal swelling and stress: Implications for methane production and acid gas sequestration into coal seams. *Journal of Geophysical Research* 112, B10202, 2007, 1-16.
- Day S., Fry R., Sakurovs R.: Swelling of Australian coals in supercritical CO<sub>2</sub>. *International Journal of Coal Geology* 74, 2008, 41-52.
- Hardy H.R., Jr.: *Acoustic Emission/Microseismic Activity*. Vol.1. Principles, Techniques, and Geotechnical Applications, A.A. Balkema Publishers, 2003.
- Harpalani S., Chen G.: Estimation of changes in fracture porosity of coal with gas emission. *Fuel* 74, 1995, 1491-1498.
- Harpalani S.: Gas flow characterisation of Illinois coal. ICCI Project No. 03-1/7 1B-2. Final Technical Report, 2005.
- Hsieh S.T. and Duda J. L.: Probing coal structure with organic vapor sorption, *Fuel* 66, 1987, 170-178.
- Karacan C.Ö.: Heterogeneous sorption and swelling in confined and stressed coal during CO<sub>2</sub> injection. *Energy and Fuels* 17, 2003, 1595-1608.
- Karacan C.Ö.: Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO<sub>2</sub> sorption. *International Journal of Coal Geology* 72, 2007, 209-220.
- Keleman S.R., Kwiatek L.M.: Physical properties of dry block Argonne Premium bituminous coal related to CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> adsorption. Paper 0711, Proceedings of the 2007 International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 2007.
- Larsen J.W.: The effects of dissolved CO<sub>2</sub> on coal structure and properties. *International Journal of Coal Geology* 57, 2004, 63-70.
- Larsen J.W., Flowers R.A., Hall P.J. and Carlson G.: Structural rearrangement of strained coals, *Energy and Fuels* 11, 1997, 998-1002.
- Levine J.R.: Model study of influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs. *Coalbed Methane and Coal Geology*, 109. Geological Society Special Publication, 1996, 197-212.
- Majewska Z., Marczak H.: The Relationship between Acoustic Emission and Permeability of Rock under Stress. *International Mining Science and Technology*. 9, 1989, 169-179.
- Majewska Z.: Związek wysokoczęstotliwościowej emisji akustycznej górotworu z jego parametrami hydrodynamicznymi. *Zeszyty Naukowe AGH, Geofizyka Stosowana* 1989, z. 4.
- Majewska Z., Majewski St., Marczak H., Mościcki W., Tomecka-Suchoń, S., Ziętek J.: 1994a Acoustic emission of coal induced by: gas and water flow, gas sorption or stress. *Journal of Acoustic Emission* 12, Nos. 3-4/July-December 1994. Published by Acoustic Emission Group, Los Angeles, CA.
- Majewska Z., Majewski St., Mościcki W., Ziętek J., 1994b. Acoustic emission and temperature changes in hard coal during carbon-dioxide sorption-desorption. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering Proceedings of SPE/IRSM International Conference Eurock/94*, Delft, Netherlands, 29-31 August 1994. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Majewska Z., Lasocki St., Ziętek J.: Spectra of acoustic emission induced in coal by gas sorption. *Acta Montana, IRFM-AF-CR*, series A8, No(97), 1996.
- Majewska Z., Majewski St., Ziętek J.: Research into the origin of acoustic emission induced in hard coal by gas and water flow. In: *Rockburst and Seismicity in Mines*, ed. S.J. Gibowicz and St. Lasocki. A.A. Balkema Rotterdam Brookfield, 1997.
- Majewska Z., Majewski St., Ziętek J.: Acoustic emission and volumetric sorption expansion of coal. *Proceedings of The Sixth Conference on AE/MA in Geological Structures and Materials*. Penn State Univ., USA, June 11-13 Trans. Tech. Publ, 1998.
- Majewska Z., Mortimer Z.: Fractal description of acoustic emission produced in systems: coal - gas and coal- water. In: *Progress in Acoustic Emission IX*. Proc. of 14th International Acoustic Emission Symposium and 5th Acoustic Emission World Meeting. August 9-14, Hawaii, USA, 1998.
- Majewska Z., Ziętek J.: Acoustic emission generated in systems: coal -carbon dioxide and coal-methane. *Archives of Mining Sciences* 44, 2, 1999, 245-254.
- Majewska Z., Mortimer Z.: Studies of the non-linear dynamics of acoustic emission generated in rocks. *Journal of Acoustic Emission* 18,1-7, Published by Acoustic Emission Group, Los Angeles, CA, USA, 2000.
- Majewska Z., Mortimer Z.: Chaotic behavior of acoustic emission generated in materials under stress. In: *Rockburst and Seismicity in Mines-RaSiM5*. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, 181-190.
- Majewska Z., Mortimer Z.: Chaotic behavior of acoustic emission induced in hard coal by gas sorption-desorption, *Acta Geophysica* 54, 1, 2006, 50-59.
- Majewska Z., Ziętek J., 2007a. Changes of acoustic emission and strain in hard coal during gas sorption-desorption cycles. *International Journal of Coal Geology* 70, 4, 305-312.
- Majewska Z., Ziętek J., 2007b. Acoustic emission and sorptive deformation induced in coals of various rank by the sorption-desorption of gas. *Acta Geophysica* 55, 3, 324-343.
- Majewska Z., Ziętek J., 2008. Acoustic emission and volumetric strain induced in coal by the displacement sorption of methane and carbon dioxide. *Acta Geophysica* 56, 2, 372-390.
- Majewska Z., Ceglarska-Stefańska G., Majewski S., Ziętek J., Czerw K.: Differential swelling of coal. Accepted for presentation at 25th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 29 - October 2, 2008, Pittsburgh, PA USA, 2008.
- Majewska Z., Ceglarska-Stefańska G., Majewski S., Ziętek J.: Binary gas sorption/desorption experiments on bituminous C coal: Simultaneous measurements of sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission. *International Journal of Coal Geology* 77, 2009, 90-102.
- Majewska Z., Majewski S., Ziętek J., Ceglarska-Stefańska G.: 2010a. Volumetric strain induced in medium-rank coal by sorption of carbon dioxide, methane and their mixture Chapter 4 In: "Carbon Sequestration: Methods, Modeling and Impacts" Editor: Elke Hoch and Siegbert Grunwald, Nova Publishers, New York.

35. *Majewska Z., Majewski S., Ziętek 2010 b.* Swelling of coal induced by cyclic sorption/desorption of gas: Experimental observations indicating changes in coal structure due to sorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. *International Journal of Coal Geology* 83.
36. *Majewska Z., Majewski S., Ziętek J.*: Acoustic emission In rocks induced by various stimuli. In: *Theory and uses of acoustic emission*. Ed. Justin K. Burnett, Nova Publishers, New York 2012.
37. *Majewska Z., Majewski S., Ziętek J.*: Swelling and acoustic emission behavior of unconfined and confined coal during sorption of CO<sub>2</sub>. *International Journal of Coal Geology* 116-117, 2013, 17-25.
38. *Milewska-Duda J.*: The coal-sorbate system in the light of the theory of polymer solutions, *Fuel* 72, 1993, 419-425.
39. *Pan Z., and L.D. Connell*: A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling, *International Journal of Coal Geology* 69, 2007, 243-252.
40. *Pekot L.J., Reeves S.R.*: Modeling coal matrix shrinkage and differential swelling with CO<sub>2</sub> injection for enhanced coalbed methane recovery and carbon sequestration applications. Topical report, Contract No. DE-FC26-00NT40924, U.S. DOE, Washington, DC, 14, 17, 2002.
41. *Reucroft P.J., Patel H.*: Gas induced swelling in coal. *Fuel* 65, 1986, 816-820.
42. *Robertson E.P., Christiansen R.L.*: Measurements of sorption - induced strain, Presented at the 2005 International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 17-19 May. Paper 0532, 2005.
43. *Walker P.L., Verma S.K., Rivera-Utrill J., Davis A.*: Densities, porosities and surface areas of coalmaurals as measured by their interactions with gases, vapours and liquids . *Fuel* 67, 1988, 1615.
44. *Zuberek W.*: Wykorzystanie efektu emisji sejsmoakustycznej w geotechnice. Publ. of the Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc., M-11 (214), PWN, Warszawa, Łódź 1988.

---

## NACZELNY REDAKTOR

w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie

## POLEMIKI – DYSKUSJI.

Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.

**Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań  
– zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!**

## Geofony w sejsmice inżynierskiej

### An overview of technical parameters of geophones used in seismic engineering



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN.\*)*



*Mgr inż. Paulina Harba\*)*



*Inż. Andrzej Adamczyk\*)*



*Mgr inż. Krzysztof Krawiec\*)*



*Dr hab. inż. Elżbieta Pilecka, prof. PK\*\*)*

**Treść:** W sejsmice inżynierskiej czujniki służą jako rejestratory drgań mechanicznych ośrodka geologicznego. W pracy przedstawiono ich klasyfikację. Do najbardziej powszechnych należą geofony, które stosuje się do badań geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych, geotechnicznych, geomechanicznych oraz w górnictwie. Prawidłowy dobór ich parametrów technicznych ma znaczący wpływ na jakość uzyskanych danych oraz rozdzielczość metody. Najważniejszymi parametrami, które należy wziąć pod uwagę to: częstotliwość własna, czułość, tłumienie, zniekształcenia harmoniczne i oporność cewki. Bardzo istotny jest również sposób przytwierdzenia geofonu do podłoża, ponieważ może on znacząco wpływać na odpowiedź impulsową układu pomiarowego. Światowi producenci geofonów oferują szeroki zakres urządzeń o różnych wartościach parametrów technicznych do jak najlepszej akwizycji danych w konkretnych zastosowaniach sejsmicznych. Dodatkowo, nowoczesne geofony trójskładowe mogą rejestrować jednocześnie w trzech kierunkach, co ułatwia identyfikację fal sejsmicznych i opis pola falowego. W artykule dokonano możliwie szerokiego przeglądu podstawowych parametrów technicznych geofonów czołowych producentów na świecie. Sformułowano kryteria doboru geofonów do badań sejsmicznych.

**Abstract:** Sensors are used in seismic engineering to record mechanical oscillations of geological medium. This paper presents a classification of the applied detectors. The most common are geophones which used in geological engineering, hydrogeology, geotechnical engineering and mining. Proper choice of the geophone technical parameters is essential for the obtained data quality and seismic resolution. The most important parameters are natural frequency, sensitivity, damping, harmonic distortion and coil resistivity. Geophone coupling to the ground is crucial because of its great impact on impulse response. The global producers of geophones offer a wide range of devices with different technical parameters in order to obtain the best seismic acquisition. Moreover, the newest three-component geophones record in three dimensions simultaneously. It simplifies wave identification and characterization of the wave field. This paper presents a possibly wide overview of geophone basic technical parameters produced by the leading geophysical companies worldwide. Criteria of their selection were formulated as well.

\*) IGSMiE, Kraków \*\*) Politechnika Krakowska

**Słowa kluczowe:**

sejsmika inżynierska, klasyfikacja czujników sejsmicznych, sejsmometr, geofon, akcelerometr, czujniki trójskładowe, parametry techniczne geofonów, odpowiedź impulsowa, tłumienie

**Key words:**

seismic engineering, seismic sensor classification, seismometer, geophone, accelerometer, three-component sensors, geophone technical parameters, impulse response, damping

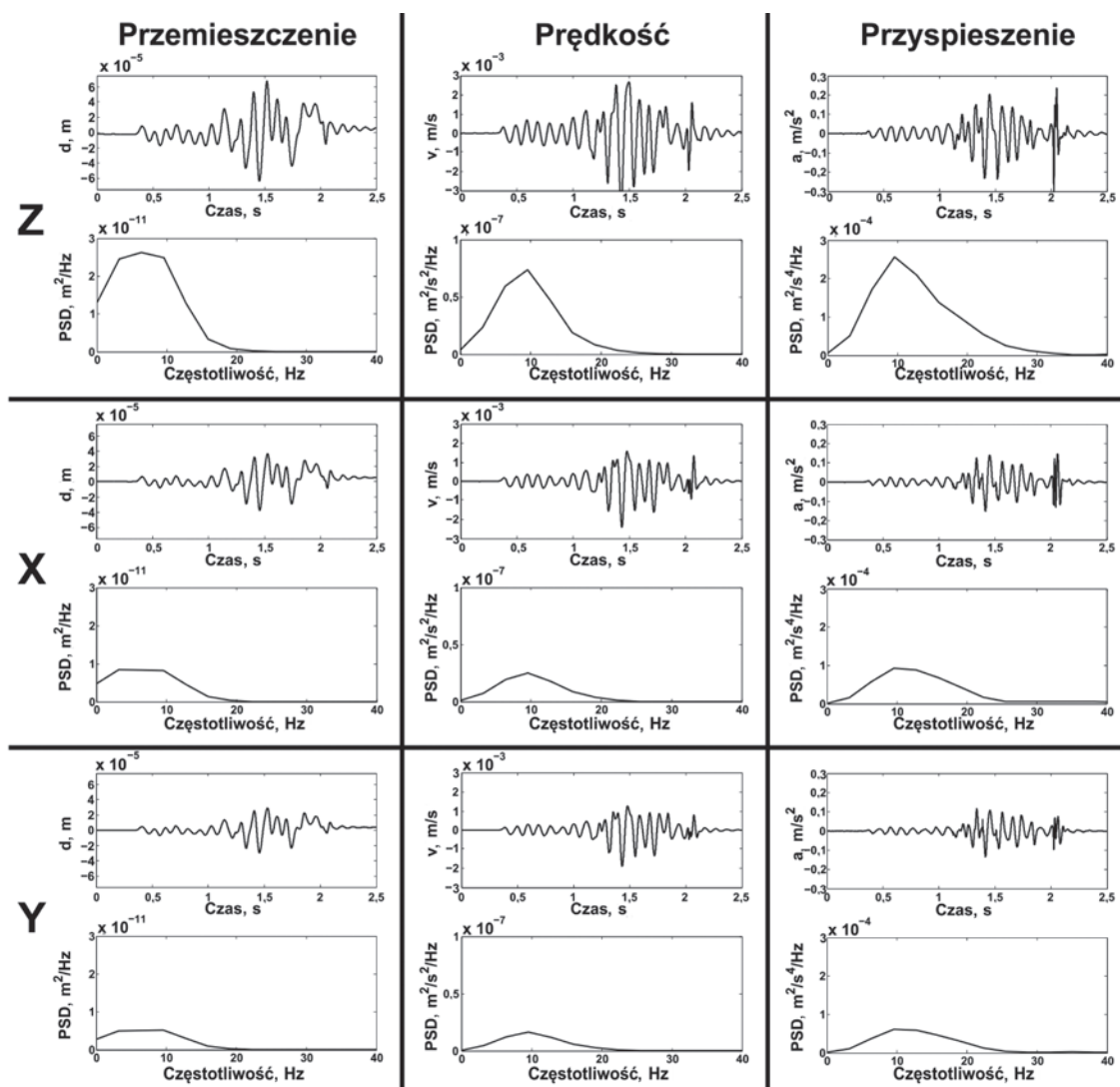
**1. Wprowadzenie**

Zakres badań sejsmiki inżynierskiej obejmuje wiele zagadnień m.in. geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne, geotechniczne, geomechaniczne, a także górnicze. W przypadku zastosowania metod sejsmicznych w górnictwie, obejmujących również zagadnienia tunelowania czy budowy obiektów podziemnych, wyodrębniła się specjalność nazywana geofizyką górniczą [3, 8, 12].

W sejsmice inżynierskiej czujniki służą do rejestracji drgań mechanicznych w ośrodku geologicznym w miejscu pomiaru. W literaturze angielskojęzycznej używa się różnych terminów

na określenie czujnika, najczęściej *detector*, *transducer*, *receiver*, lub konkretnie stosuje się nazwę czujnika. Czujniki rejestrują drgania wzbudzone przez źródła tzw. aktywne i pasywne [13].

W ogólnym ujęciu, czujniki sejsmiczne zamieniają drgania mechaniczne rejestrowane w czasie na sygnał elektryczny, zapisywany najczęściej w postaci cyfrowej i coraz rzadziej w postaci analogowej. W praktyce wyróżnia się trzy rodzaje czujników: sejsmometry, geofony i akcelerometry. Czujniki te pozwalają rejestrować różne wielkości opisujące drgania: przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie (rys. 1).

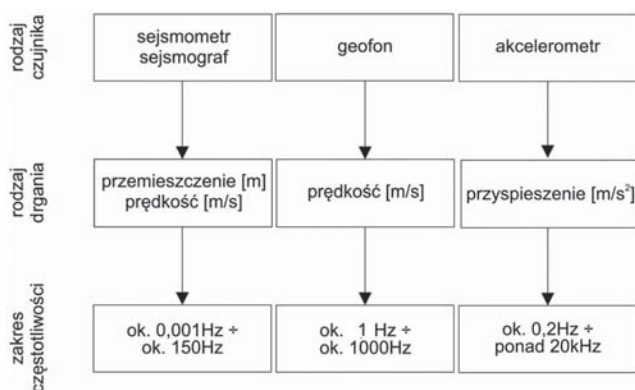


Rys. 1. Syntetyczne sejsmogramy składowych drgań: pionowej (Z), poziomych wzajemnie prostopadłych (X, Y) dla wstrząsu pochodzenia górniczego i ich widma amplitudowe zarejestrowane na powierzchni terenu w jednym punkcie w postaci przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań

Fig. 1. Synthetic seismogram of vibration components: vertical (Z), horizontal, perpendicular (X, Y) for mining-origin tremor and their amplitude spectra recorded on the ground surface at the same point as tremor, velocity and acceleration of vibration

W literaturze angielskojęzycznej przez pojęcie sejsmometr (ang. *seismometer*) często określa się każdy rodzaj czujnika sejsmicznego. Na przykład [16] przyjmuje, że o rodzaju mierzonej wielkości decyduje układ elektryczny czujnika, a zasada działania układu mechanicznego sejsmometru, geofonu i akcelerometru może być analogiczna.

Autorzy, mając na uwadze obecnie stosowane konstrukcje układów mechanicznych i elektrycznych czujników sejsmicznych oraz stosowaną w praktyce terminologię, proponują używać nazwy czujnika w zależności od rodzaju mierzonej wielkości sejsmicznej i zakresu częstotliwości sygnału (rys. 2). W dalszej części pracy scharakteryzowano wszystkie rodzaje czujników oraz szerzej omówiono geofon jako najbardziej rozpowszechniony czujnik stosowany w sejsmice inżynierskiej.



Rys. 2. Klasyfikacja czujników wykorzystywanych w sejsmice inżynierskiej ze względu na rodzaj drgania i zakres rejestrowanych częstotliwości

Fig. 2. Sensors used in seismic engineering classified by vibration type and frequency range

## 2. Charakterystyka czujników sejsmicznych

W zależności od celu zadania badawczego i oczekiwanego zakresu pomiarowego częstotliwości sygnału użytecznego,

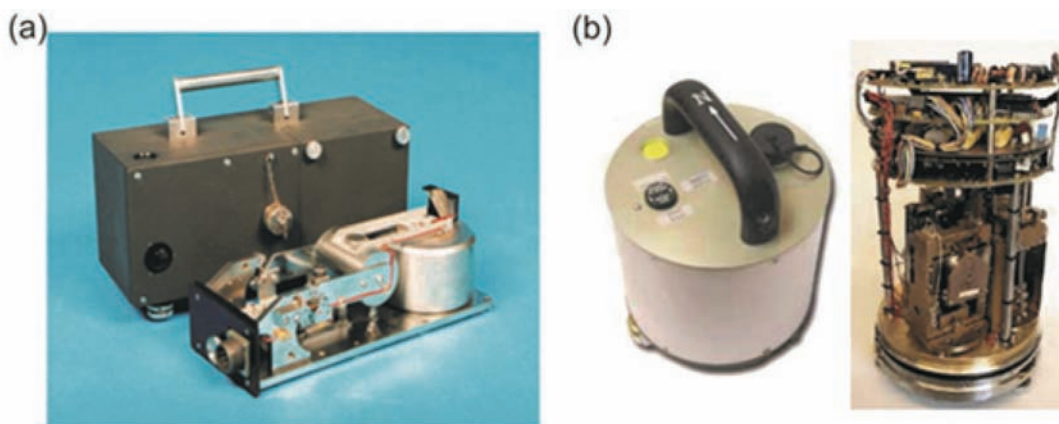
stosuje się konkretny rodzaj czujnika. Obecnie, coraz szersze zastosowanie mają czujniki trójskładowe w jednej obudowie, które pozwalają rejestrować pełne pole falowe w kierunku pionowym oraz dwóch poziomych i prostopadłych do siebie kierunkach, na ogół zorientowanych w kierunkach geograficznych. Istotnym elementem pomiaru drgań jest sposób instalacji czujnika, który równocześnie powinien zapewniać dobry kontakt z ośrodkiem, ograniczający straty energii sejsmicznej i zniekształcenie sygnału.

### 2.1. Sejsmometr

Jest to przyrząd zamieniający drgania mechaniczne na zmienny w czasie sygnał elektryczny w zakresie częstotliwości od ok. 0,001 Hz (okresie 100s) (rys. 2).

Sejsmometr ze względu na konstrukcję układu mechanicznego i elektrycznego rejestruje amplitudy składowej przemieszczenia lub prędkości drgań ośrodka (np. SPI-70, Guralp CMG, Willmore Mk). Dla nowoczesnych sejsmometrów odpowiedź zmian napięcia elektrycznego jest w przybliżeniu proporcjonalna do zmian składowej prędkości drgań wymuszających w ośrodku. Pierwsze sejsmometry o konstrukcji całkowicie mechanicznej, nazywane sejsmografami generowały odpowiedź w postaci składowej przemieszczenia. Sejsmografy, oprócz układu mechanicznego rejestrującego i równocześnie powiększającego niewielkie drgania ośrodka, posiadały układ mechaniczny do zapisu zmian amplitudy przemieszczenia na specjalnych bębnach z taśmą zaczernioną sadzą, a później na papierze światłoczułym lub termoczułym. Przykładem takiego urządzenia jest sejsmograf skonstruowany przez prof. Mainkę znajdujący się w Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Raciborzu (rys. 3).

W Polsce, sejsmometry znajdują zastosowanie w zagadnieniach inżynierskich, głównie jako czujniki drgań w ośrodku geologicznym wywołane wstrząsami pochodzenia górniczego. Dane pomiarowe są wykorzystywane do oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach oraz w zagadnieniach ochrony powierzchni terenu górniczego. Ostatnio sejsmometry znalazły zastosowanie w metodzie interferometrii sejsmicznej bazującej na rejestracji niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego [9].



Rys. 3. Sejsmometr SPI-70 stosowany powszechnie w polskich kopalniach węgla kamiennego [21] (a) oraz sejsmometr Guralp CMG, jeden z najnowocześniejszych obecnie sejsmometrów przenośnych z elektronicznym systemem gromadzenia danych [18] (b)

Fig. 3. SPI-70 seismometer commonly used in Polish coal mines [21] (a) and Guralp CMG seismometer which is one of the most modern portable seismometers with electronic data acquisition system [18] (b)





Rys. 4. Sejsmograf Mainki znajdujący się w Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Raciborzu [19]

Fig. 4. Mainki seismograph in Geophysical Observatory of Polish Academy of Sciences in Racibórz [19]

## 2.2. Geofon

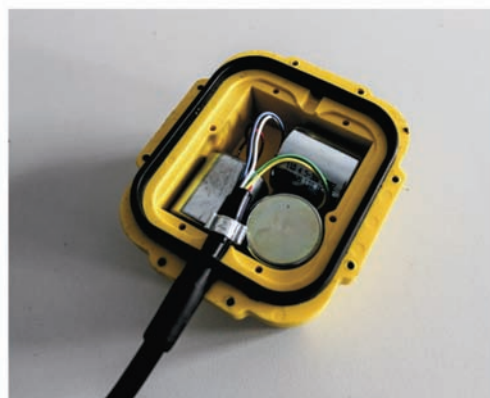
Działa na analogicznej zasadzie jak nowoczesny sejsmometr, lecz jego konstrukcja jest znacząco zminiaturyzowana (rys. 4a). Rejestruje on drgania mechaniczne ośrodka w postaci składowej prędkości drgań w zakresie częstotliwości od 1 Hz dla geofonów niskoczęstotliwościowych do ok. 1000 Hz dla geofonów wysokoczęstotliwościowych. Większość stosowanych w praktyce geofonów ma częstotliwość własną od

4,5 do 40 Hz i częstotliwości maksymalne od ok. 150 do 400 Hz. Według [1] geofony rejestrują amplitudę prędkości drgań cząsteczek ośrodka w zakresie od 0,00025 mm/s do 25 mm/s.

Geofon jest tak skonstruowany, że ruch jego układu drgającego odbywa się w jednym kierunku i w efekcie odpowiedź amplitudowa jest zorientowana wzdłuż jednej składowej prędkości drgania. W przypadku potrzeby rejestracji pełnego pola falowego stosuje się trójskładowe geofony 3C (ang. *three components*) (rys. 4b). W jednej obudowie geofonu 3C znajdują się 3 geofony zorientowane w układzie ortogonalnym. Na innej zasadzie działa hydrofon – odpowiednik geofonu stosowany w środowisku wodnym (Fot. 5). Rejestruje on zmiany ciśnienia na ogół za pomocą membrany z przymocowanymi czujnikami piezoelektrycznymi. Hydrofony mają podobny zakres częstotliwości jak geofony.



Rys. 6. Widok hydrofonu MP 24 L1 – 6Hz produkcji Geospace  
Fig. 6. MP 24 L1 – 6Hz Geospace hydrophone



Rys. 5. Widok geofonu pionowego 20DM - 40Hz produkcji Geospace – a i trójskładowego produkcji 11D - 4,5Hz produkcji Geospace – b

Fig. 5. 20DM – 40Hz Geospace vertical geophone (a) and 11D – 4,5Hz Geospace three-component geophone (b)

### 2.3. Akcelerometr

Jest czujnikiem, którego odpowiedź impulsowa jest proporcjonalna do przyspieszenia drgań w ośrodku (rys. 6). Nowoczesne akcelerometry oparte są głównie na technologii MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*), w tym wykorzystującej efekt piezoelektryczny. Zakres częstotliwości wynosi od ok. 0,2 Hz do ponad 20 kHz. Akcelerometry w zagadnieniach inżynierskich pełnią rolę podobną do geofonów.



Rys. 7. Widok trójskładowego czujnika przyspieszenia drgań, skonstruowanego na bazie przetworników akcelerometrycznych z wyjściem typu DeltaTron 457-005B (0,4 Hz – 6 kHz) produkcji Brüel&Kjær

Fig. 7. Three-component sensor of vibration acceleration constructed on the basis of accelerometric converter DeltaTron 457-005B (0,4 Hz – 6 kHz) Brüel&Kjær type

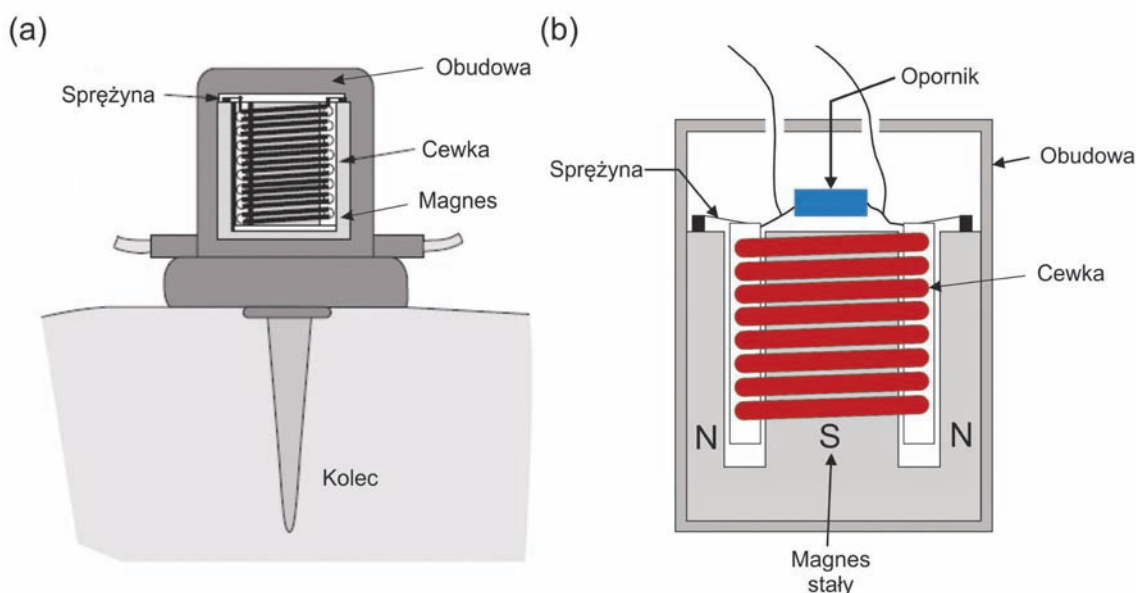
### 3. Budowa i zasada działania geofonu

Teoretyczny opis budowy i mechanizmu działania geofonu można znaleźć w wielu pracach i podręcznikach (np. [6, 7]).

Standardowy geofon zbudowany jest z następujących elementów głównych: obudowa, masa bezwładna, magnes, sprężyna oraz kolec (rys. 7a). Obudowa zapewnia ochronę elementów elektronicznych przed niekorzystnymi dla niego czynnikami zewnętrznymi, takimi jak wilgoć czy pyły. Elementem łączącym obudowę z podłożem jest najczęściej kolec o odpowiednio dobranej długości dla jak najlepszego odbioru energii mechanicznej. Wykorzystywane są również inne sposoby przenoszenia drgań z ośrodka geologicznego, takie jak metalowe płyty, metalowe kostki, kotwy, sondy rozporowe różnej konstrukcji lub różne sposoby klejenia [2].

Rozróżnia się dwa rodzaje konstrukcji mechanicznej geofonu, z ruchomą cewką lub ruchomym magnesem jako masą bezwładną. W standardowej konstrukcji masą bezwładną jest cewka nawinięta na rdzeń (rys. 7b). Jest ona przytwierdzona do obudowy geofonu za pomocą sprężyn, co daje jej możliwość względnego ruchu. Cewka znajduje się w polu stałego magnesu związanego sztywno z obudową geofonu. W przypadku, gdy obudowa wykonuje drgania wraz z cząsteczkami ośrodka, magnes porusza się wraz z nim, natomiast cewka zostaje wprawiona we względny ruch w stosunku do magnesu i obudowy. W wyniku tego ruchu generowane jest napięcie pomiędzy końcówkami cewki, proporcjonalne do prędkości ruchu cewki w polu magnetycznym i jednocześnie do prędkości drgań cząsteczek ośrodka.

Tłumienie w geofonach stosuje się w celu zmniejszenia czasu trwania drgań swobodnych masy bezwładnej oraz ograniczenia amplitudy drgań własnych. Zastosowanie tłumienia jest zadaniem jako odbiornik drgań gruntu. Właściwe tłumienie powoduje, że drgania własne geofonu są eliminowane. W tym celu wykorzystuje się efekt tłumienia elektromagnetycznego związanego z prądami indukcyjnymi w cewce, powstałymi podczas jej ruchu i wzajemnym oddziaływaniem wytworzonego pola elektromagnetycznego ze stałym polem magnetycz-



Rys. 8. Schemat budowy geofonu na podstawie [11] (a); model mechaniczno-elektryczny geofonu z ruchomą cewką (b)

Fig. 8. Geophone construction scheme based on [11] (a); electromechanical geophone model with moving coil (b)

nym. W celu zwiększenia tłumienia powszechnie stosuje się opornik (rezystor) bocznikowy, który odpowiada za ograniczenie przepływającego prądu przez cewkę. W pierwszych konstruowanych geofonach do tłumienia wykorzystywano ciecz lepka, w której całkowicie lub częściowo zanurzona była masa bezwładna [5]. Siły tarcia powstałe w trakcie ruchu masy bezwładnej w cieczy powodowały wytłumienie jej drgań swobodnych. Obecnie nie stosuje się tłumienia z użyciem cieczy, gdyż jest ono zależne od temperatury.

#### 4. Charakterystyka parametrów technicznych geofonów

##### 4.1. Parametry techniczne

Do najważniejszych parametrów technicznych geofonu należy: częstotliwość własna (inaczej rezonansowa lub naturalna), czułość, tłumienie, oporność cewki oraz zniekształcenia harmoniczne.

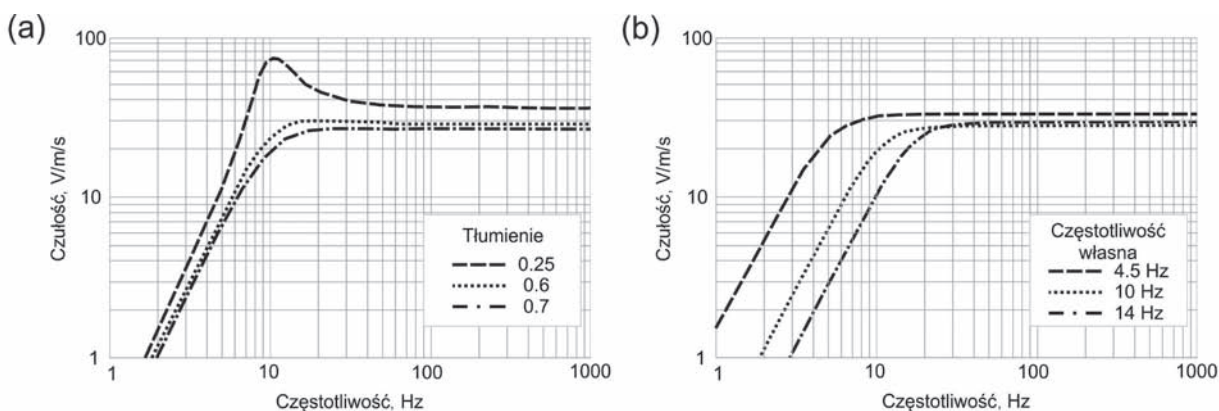
Geofon charakteryzuje się specyficzną dla niego **częstotliwością własną**, dla której układ drgający osiąga maksymalną amplitudę (rys. 8a). Dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości własnej odpowiedź geofonu jest silnie tłumiona. Ta cecha, w przypadku większości pomiarów sejsmicznych, jest wykorzystywana do usuwania niskoczęstotliwościowego szumu. Dla częstotliwości większych od częstotliwości własnej geofonu jego odpowiedź jest zazwyczaj liniowa i na tym

odcinku profesjonalnie zaprojektowane i wykonane układy mechaniczno-elektryczne powinny przenosić częstotliwości drgań bez znaczących zniekształceń (rys. 8b).

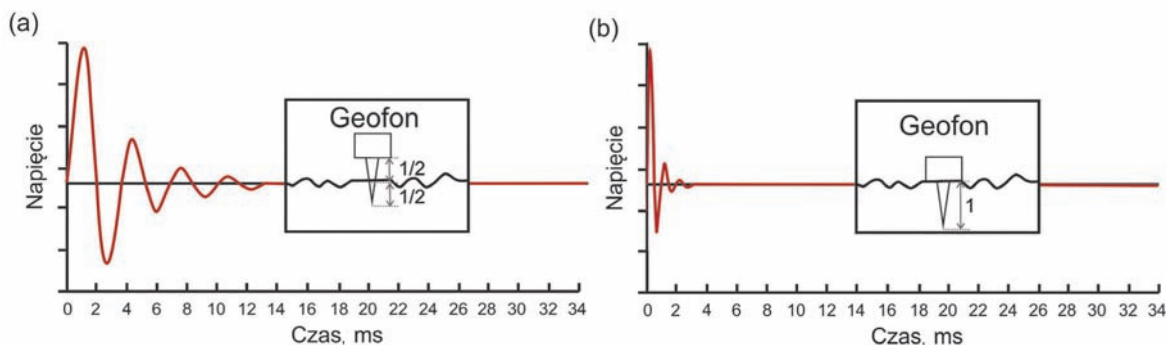
Na wartość częstotliwości własnej geofonu ma również wpływ kontakt z ośrodkiem za pomocą kolca lub płyty. Im kolec jest dłuższy lub większe rozmiary płyty, tym większa jest częstotliwość własna [15]. Średnia długość kolca w popularnych geofonach wynosi od 5-7 cm do 12 cm, a średnica jego górnej części może się zwiększać o 2 cm i więcej [4]. Niewłaściwe przytwierdzenie geofonu do podłoża skutkuje zaburzeniem odpowiedzi amplitudowej, a także skutkuje opóźnieniem czasowym sygnału rejestrowanego (rys. 9).

Czułość geofonu określona jest stosunkiem amplitudy wyindukowanego napięcia do amplitudy składowej prędkości drgań geofonu i jest opisana w V/m/s. Zależy ona od promienia oraz liczby zwojów cewki, a także od wielkości pola magnetycznego i tłumienia [17].

Maksymalna czułość geofonu jest osiągalna w przypadku, gdy os cewki jest zgodna z kierunkiem promienia fali sejsmicznej (rys. 10). Geofon jest tak skonstruowany, że układ drgający porusza się wzdłuż osi geofonu, lecz drgania wymuszające mogą być rejestrowane pod innym kątem, ze zniekształconą amplitudą. Oznacza to, że geofony są najbardziej czułe na sygnały dochodzące z określonego kierunku (geofon pionowy, poziomy), lecz są mniej czułe na sygnały dochodzące z innych kierunków. Znane są konstrukcje

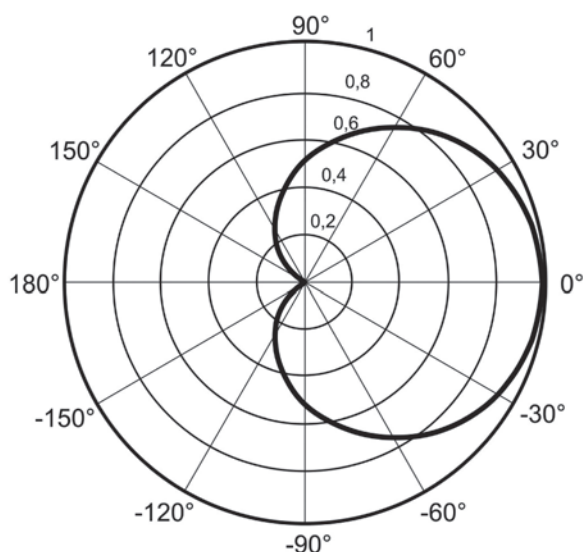


Rys. 9. Odpowiedzi amplitudowe dla geofonu o częstotliwości własnej 10 Hz dla różnych wartości współczynnika tłumienia (a); odpowiedzi amplitudowe dla geofonów o różnych wartościach częstotliwości własnej (b) na podstawie [20]  
 Fig. 9. Amplitude responses of geophone with 10 Hz natural frequency for different damping factor values (a); amplitude response of geophone with different natural frequency values (b) on the basis of [20]



Rys. 9. Odpowiedź napięciowa geofonu niewłaściwie przytwierdzonego do podłoża (a) oraz geofonu prawidłowo przytwierdzonego (b) na podstawie [10]  
 Fig. 10. Voltage response of geophone incorrectly coupled with the ground (a) and voltage response of geophone correctly coupled (b) on the basis of [10]

geofonu, które umożliwiają dookólną rejestrację drgań bez większych zniekształceń (ang. *omni-directional*), których koszt jest znacząco większy. Czułość geofonu zmniejsza się ze wzrostem tłumienia, zwłaszcza dla częstotliwości mniejszej od częstotliwości własnej oraz większej od częstotliwości maksymalnej (ang. *spurious frequency*). Współcześnie stosowane geofony charakteryzują się czułością z zakresu od ok. 15 do ok. 85 V/m/s.



Rys. 10. Przykład charakterystyki kierunkowej geofonu jednoelementowego

Fig. 11. Example of directional characteristics of one-component geophone

Współczynnik tłumienia jest jednym z kluczowych parametrów przy wyborze właściwego geofonu. Ma on wpływ zarówno na odpowiedź amplitudową, jak i fazową geofonu oraz wpływa na jego częstotliwość własną. W geofonach powszechnie stosowany współczynnik tłumienia wynosi od 0,5 do 0,7 [4]. Większe tłumienie powoduje spadek czułości geofonu, natomiast zbyt małe skutkuje wzmocnieniem czułości

dla częstotliwości własnej geofonu. Można to zaobserwować na wykresie zależności czułości geofonu od częstotliwości dla różnych wartości współczynnika tłumienia (rys. 8a). Dla większych wartości współczynnika tłumienia, maksymalna amplituda częstotliwości własnej zmniejsza się, aż do całkowitego zaniku [14]. Wartość tłumienia 0,7 przyjmuje się za wartość krytyczną w celu uniknięcia problemów ze zbyt zróżnicowaną czułością geofonu.

Drgania o wysokich amplitudach powodują, że cewka częściowo może się znaleźć w niejednorodnym polu magnetycznym. Skutkiem tego są **zniekształcenia harmoniczne** sygnału, zdefiniowane jako procentowy stosunek amplitud częstotliwości harmonicznych do amplitud dla podstawowej częstotliwości pracy geofonu. Z tego względu, najbardziej pożądane są jak najmniejsze wartości zniekształceń harmonicznych geofonów. Powszechnie wynoszą one 0,2% lub mniej [15].

#### 4.2. Porównanie parametrów technicznych geofonów

Geofony mają zróżnicowane parametry techniczne w zależności od warunków pomiarowych i celu zadania badawczego. Do wiodących światowych producentów geofonów należą takie firmy jak: Sercel (Francja), DTCC Dynamic Technologies (Kanada), LONGET (Chiny), Geospace (USA), IONGEO (USA), R. T. Clark Companies Inc. (USA), Chongqing Gold Mechanical & Electrical Equipment Co.(Chiny). Firmy te produkują geofony do różnych zastosowań, od płytkiej sejsmiki lądowej po głęboką sejsmikę morską (hydrofony). Porównanie wybranych parametrów technicznych dla geofonów produkowanych przez czołowych producentów zestawiono w tabeli 1.

Producenci geofonów podają nieprecyzyjnie częstotliwość maksymalną, z jaką mogą być zarejestrowane drgania ośrodka przy pozostałych parametrach technicznych. Przyjmuje się, że geofony, które są właściwie dobrane pod względem parametrów oraz odpowiednio zamontowane w ośrodku, mogą obecnie rejestrować częstotliwości nawet do 1000 Hz [4]. Bardzo ograniczona jest informacja o badaniach dotyczących skuteczności rejestracji drgań w ośrodku. Bardzo często publikowane dane są fragmentaryczne, a najczęściej brakuje pełnych charakterystyk amplitudowych.

Tablica 1. Wybrane parametry techniczne różnych typów geofonów

Table 1. Technical parameters of different types of geophones

Producent/Typ geofonu	Częstotliwość własna, Hz	Czułość V/m/s	Oporność cewki, $\Omega$	Współczynnik tłumienia, -	Częstotliwość maksymalna Hz
ION LF-24	$1 \pm 0,15$	15	b.d.	1,0	240
Gold CDJ+Z1/P1/S1	$1 \pm 0,1$	200	3400	0,32	-
Gold CDJ+Z1A/P1A/S1A	$1 \pm 0,1$	670	3500	0,32	-
SN4-IV	1	-	-	-	-
SN4-1H	1	-	-	-	-
Gold CDJ-Z2A/P2A/S2A	$2 \pm 0,2$	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z2B/P2B/S2B	$2 \pm 0,2$	350	13000	0,7	-
Gold CDJ-Z2C/P2C/S2S	$2 \pm 0,2$	200	6040	0,7	-
SN4-2V	2	-	-	-	-
Gold CDJ-Z2.5A/P2.5A/S2.5A	$2,5 \pm 0,25$	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z2.5B/P2.5B/S2.5C	$2,5 \pm 0,25$	350	13000	0,7	-
Gold CDJ-Z2.5C/P2.5C/S2.5S	$2,5 \pm 0,25$	200	6040	0,7	-
SN4-2.5V	2,5	-	-	-	-
SN4-2.5H	2,5	-	-	-	-
Gold CDJ-Z3A/P3A/S3A	3	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z3B/P3B/S3B	3	350	13000	0,7	-

Gold CDJ-Z3C/P3C/S3S	3	300	6040	0,7	-
SN4-4V	4	-	-	-	-
LONGET LGT-20D	4,5 ± 0,5	23,4	395	0,7	≥180
LONGET LGT	4,5 ± 0,45	28,8	375	0,6	≥180
Sercel L28LB	4,5	31,3	395	0,38	-
Sercel sg-5	5 ± 0,375	80	1850	0,6	-
DTCC DT-20DX	4,5 ± 0,5	23,4	395	0,7	≥160
DTCC DT-HP206V	4,5 ± 0,5	28,8	375	0,6	≥140
Geospace GS-11D	4,5 ± 0,75	32	380	0,34	-
ION Sensor SM-6 Acoil/Bcoil	4,5 ± 0,5	28	375	0,265	≥140
RTC – 4,5-395 – Vertical	4,5 ± 0,5	22	395	0,7	>160
ION sm-4	8 ± 0,5	12,8	71	0,3	160
ION sm-4	8 ± 0,5	28,8	395	0,315	160
ION sm-6	8 ± 0,5	28,8	375	0,315	150
DTCC DT-20DX	8 ± 0,4	23	395	0,38	180
Geospace GS-11D	8 ± 0,75	32	380	0,39	-
RTC 10Hz	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	250
Sercel SG10	10 ± 0,25	22,8	350	0,68	240
Sercel JF-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
LONGET LGT-20D	10 ± 0,5	28	395	0,3	≥250
LONGET LGT-10	10 ± 0,5	27,1	375	0,271	≥200
ION SM24	10 ± 0,25	28,8	375	0,25	≥250
ION sm-4	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	180
ION sm-4	10 ± 0,5	12,8	71	0,24	180
ION sm-6	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	180
Geospace GS-11D	10 ± 0,75	32	380	0,32	-
Geospace GS-30CT	10 ± 0,2	27,5	395	0,316	>160
Geospace GS-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	≥250
Geospace GS-20DM	10	19,7	280	0,7	300
Geospace GS-32CT	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	≥250
Geospace GS-32CT	10 ± 0,25	34,6	635	0,316	>250
DTCC DT-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
DTCC DT-20DXLD	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
DTCC DT-HP101	10 ± 0,2	27,5	395	0,316	160
DTCC DT-HP102	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	250
DTCC DT-HP103	10 ± 0,25	28,8	375	0,25	240
DTCC DT-HP104	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	240
DTCC DT-HP201	10 ± 0,25	22,8	350	0,68	240
DTCC DT-HP301	10 ± 0,35	85,8	1800	0,48	240
Sercel JF-20DX	14 ± 0,7	28	395	0,22	200
LONGET LGT-20D	14 ± 0,7	28	395	0,22	≥300
LONGET LGT-14	14 ± 0,7	20	375	0,2	≥250
ION sm-4	14 ± 0,7	12,8	71	0,17	190
ION sm-4	14 ± 0,7	28,8	375	0,18	190
ION sm-6	14 ± 0,7	28,8	375	0,18	190
DTCC DT-20DXLD	14 ± 0,7	28	395	0,22	250
DTCC DT-20DX	14 ± 0,7	28	395	0,22	240
Geospace GS-11D	14 ± 0,75	32	380	0,23	-
RTC 14Hz	14 ± 0,7	28	395	0,22	240
Geospace GS-20DM	14	17,7	240	0,7	>400
ION SM-45	15	45,5	1800	0,55	175
ION SM-7	20	16,5	375	0,68	500
Geospace GS-20DM	28	15,1	270	0,6	>600
Sercel JF-20DX	28	39	395	0,27	>350
LONGET LGT-20D28	28	39	395	0,27	≥400
LONGET LGT-28	28	31	385	0,6	≥400
DTCC DT-20DX	28	28	395	0,27	>350
DTCC DT-20DXLD	28	28	395	0,27	>350
RTC 28Hz	28	28	395	0,27	≥350
ION SM-11	30±1,5	30	360	0,55	≥500
ION SM-7	30	12,8	370	0,65	500
DTCC DT-20DX	35	29,6	575	0,39	>350

DTCC DT-20DXLD	35	29,6	575	0,39	>350
LONGET LGT-35	35	32,5	560	0,6	≥500
Geospace GS-20DM	40	15,1	270	0,42	>850
Sercel JF-20DX	40	42	575	0,37	>380
LONGET LGT-20D40	40	42	575	0,37	≥400
DTCC DT-20DX	40	30,4	575	0,37	>380
DTCC DT-20DXLD	40	30,4	575	0,37	>380
RTC 40Hz	40	30,4	575	0,37	>380
ION SM-7	50 ± 2,5	17,2	370	0,7	570
Geospace GS-100	100 ± 10	35,8	600	0,6	600
DTCC DT-20DX	100	32	1004	0,5	>400

## 5. Podsumowanie

W sejsmice inżynierskiej na właściwe wyniki badań składa się wiele czynników, w tym dobór właściwych czujników. Geofony należą do najpowszechniej stosowanych czujników w sejsmice inżynierskiej. Ich duży wybór i zróżnicowane parametry techniczne pozwalają na coraz lepsze dostosowanie do konkretnych zastosowań inżynierskich. Wybór właściwego geofonu wymaga wiedzy z zakresu zasady działania i znajomości parametrów technicznych, jak również doświadczenia w stosowaniu geofonów do konkretnych zadań badawczych.

Geofony są stosowane do płytkiego rozpoznania struktury i właściwości ośrodka geologicznego oraz procesów w nim zachodzących, a zwłaszcza w badaniach osuwisk i wałów przeciwpowodziowych, stref osłabień w ośrodku, w tym zjawisk zapadliskowych na terenach górniczych i pogórnicych, skomplikowanych warunków hydrogeologicznych i tektonicznych oraz w rozpoznaniu warunków geologiczno-tektonicznych i naprężeniowo-deformacyjnych w kopalniach.

W standardowych badaniach sejsmicznych używa się geofonów jednoskładowych, które rejestrują składową pionową lub poziomą drgań. Coraz większą popularnością cieszą się geofony trójskładowe, które jednocześnie rejestrują drgania ośrodka w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Zastosowanie geofonu trójskładowego umożliwia szybszą i bardziej wiarygodną identyfikację różnych rodzajów fal sejsmicznych, a także pozwala zredukować dodatkowe koszty związane z użyciem większej liczby geofonów.

W przypadku badań sejsmicznych metodą refrakcyjną zaleca się geofony o częstotliwościach własnych z przedziału od 4,5 do 40 Hz. Z kolei geofony o wyższych częstotliwościach własnych są zalecane do płytkich badań sejsmiki refleksyjnej o wysokiej rozdzielczości oraz w kopalniach i do innych zastosowań górniczych. Geofony o najmniejszych częstotliwościach własnych, tzw. geofony niskoczęstotliwościowe, są między innymi stosowane do obserwacji mikrosejsmicznych. Przy doborze częstotliwości własnej geofonu, powszechnie stosowaną regułą jest to, że powinna ona wynosić minimum 10% wartości z najwyższej częstotliwości przewidywanej do zarejestrowania [15]. Geofon niskoczęstotliwościowy powinien być pozycjonowany za pomocą libelli umieszczonej na obudowie. Jest to jeden z warunków prawidłowego pomiaru.

Czułość geofonu jest dobierana w zależności od oporu cewki i współczynnika tłumienia. Im wyższy opór cewki, tym większa czułość geofonu. Do geofonów z wysokooporowymi cewkami, a jednocześnie o dużej czułości, należą m.in. Sercel sg-5 oraz geofony marki Dynamic Technologies, takie jak DT-HP301 oraz DT-20DX. Najczęściej wybierane są geofony o czułości z przedziału 30-50 V/m/s dla pojedynczych geofonów oraz 80-120 V/m/s dla grup geofonów. Zbyt mała czułość powoduje, że osłabiona zostaje zdolność geofonu do rejestrowania słabych sygnałów, natomiast zbyt duża czułość

pojedynczego geofonu skutkuje tym, że będzie ona silnie zależna od strumienia magnetycznego [4].

Obecnie geofony są udoskonalane pod kątem uzyskania jak najlepszej czułości, w tym kierunkowej, zakresu rejestrowanej częstotliwości, zwłaszcza w dolnym paśmie oraz jak najmniejszego zniekształcenia rejestrowanego sygnału.

*Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE używanego w ramach Przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

## Literatura

1. Alcudia A., Stewart R., Kevin W. Hall K. Gallant E.: Field comparison of 3-C geophones and microphones to high-precision blasting sensors. CREWES Research Report — Volume 20 (2008), 1-20.
2. Czech E., Kornowski J., Pilecki Z., Sokolowski H., Waśko A.: Wpływ sposobu zainstalowania geofonu na wyniki rejestracji sejsmoakustycznej. „Przegląd Górniczy” 1990, nr 5, s. 6-9.
3. Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W. (red.): Badania geofizyczne w kopalniach – przeszłość, teraźniejszość i zamierzenia na przyszłość. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2001.
4. Guillin L., Gao Ch., Junyi Z.: Analysis of geophone properties effects for land seismic data. Applied Geophysics t. 6, nr 1, 2009, s. 93-101.
5. Gurwicz I. I.: Badania sejsmiczne. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1958, s. 50-54.
6. Kornowski J., Golda I.: Wybrane problemy obserwacji i estymacji energii zdarzeń sejsmicznych. Czujniki drgań i zagadnienie detekcji. „Górnictwo i Geologia” 2011, t. 6, z. 3, s. 87-113.
7. Lowrie W.: Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, 2007.
8. Marcak H., Zuberek W.: Geofizyka górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
9. Marcak H., Pilecki Z., Czarny R., Isakow Z.: Możliwości zastosowania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w druku).
10. Maxwell P.W., Faber K., Edelmann H.A.K.: Modern geophones: Do they meet the demands of shallow seismic measurements? Conference papers - 1994 SEG Annual Meeting, Los Angeles, California, s. 595-597.
11. Milsom J.: Field Geophysics. Wyd. 3. Chichester, Wielka Brytania, Wiley Publishing, 2003, s. 188-189.
12. Pilecki Z. (red.): Poradnik Geofizyka Górniczego. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków 1995.
13. Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz., Pszonka J.: Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w druku).
14. Sah S.H.: Seismic data Acquisition and Recording. Wyd. 1. Allied Publishers Ltd., 2000, s. 38-63.

15. *Sharma P.V.*: Environmental and engineering geophysics. Cambridge, Wielka Brytania, Cambridge University Press, 2002, s. 124-126.
16. *Sheriff R.E.*: Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Wyd. 4. Tulsa, Oklahoma, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2011, s. 2.
17. *Trzeźniowski Z.*: Jak odkryć ropę naftową. Agencja Reklamowo-Wydawnicza Media, Kraków 2005, s. 116-120.
18. [www.esands.com](http://www.esands.com)
19. [www.igf.edu.pl](http://www.igf.edu.pl)
20. [www.rtclark.com](http://www.rtclark.com)
21. [www.zbuiand.com.pl](http://www.zbuiand.com.pl)

---

---

## Przypominamy!

Na łamach Przeglądu Górniczego trwa  
**KONKURS O NAGRODĘ IMIENIA PROFESORA  
BOLESŁAWA KRUPIŃSKIEGO**

na

*najlepszy artykuł upowszechniający doświadczenia kopalń  
podziemnych w zakresie działań skutkujących poprawą  
bezpieczeństwa górniczego i ekonomicznej efektywności  
eksploatacji złóż.*

Doświadczenia, które gromadzą się w kopalniach są istotnym źródłem wiedzy i postępu. Dzielimy się swymi doświadczeniami!



## Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej

### An overview of vibration sources in seismic engineering



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki,  
prof. IGSMiE PAN\*<sup>1)</sup>*



*Mgr inż. Paulina Harba\*<sup>1)</sup>*



*Mgr inż. Rafał Czarny\*<sup>1)</sup>*



*Inż. Szymon Cielesta\*<sup>1)</sup>*



*Mgr Joanna Pszonka\*<sup>1)</sup>*

**Treść:** Źródła drgań służą do wyzwolenia energii sejsmicznej w postaci fali sejsmicznej, która jest następnie rejestrowana przez czujniki drgań. W zastosowaniach inżynierskich korzysta się ze źródeł aktywnych i pasywnych. Spośród źródeł aktywnych najbardziej rozpowszechnione jest użycie młota, kafara, materiałów wybuchowych oraz wibratorów. W zależności od rodzaju projektowanych badań sejsmicznych wybierane jest źródło dające oczekiwany zasięg głębokościowy o odpowiedniej rozdzielczości sejsmogramu. Materiały wybuchowe generują największą energią sejsmiczną w szerokim paśmie częstotliwości spośród przedstawionych w artykule źródeł sejsmicznych. Udar młotem jest najbardziej rozpowszechniony w zastosowaniach inżynierskich. Źródłami pasywnymi w sejsmice inżynierskiej są głównie drgania spowodowane przejeżdżającymi samochodami, pracą maszyn lub człowieka. W artykule szerzej omówiono niektóre aktywne źródła sejsmiczne wytwarzane przez światowych producentów, które mogą mieć zastosowanie w badaniach inżynierskich. Porównano parametry techniczne wybranych kafarów oraz wibratorów sejsmicznych. Sformułowano kryteria wyboru właściwego źródła w badaniach sejsmicznych.

**Abstract:** Vibration sources are used to generate seismic energy in the form of seismic wave which is recorded by vibration sensors. Active and passive seismic sources are applied in seismic engineering. Sledgehammers, weight-drops, explosives and vibrators are the most commonly-used among active ones. They are easy to operate and transport. Depending on the geological-engineering task the appropriate energy-efficient seismic source with expected penetration depth and resolution is being chosen. Explosives have the highest generated seismic energy in broadband frequency among seismic sources presented in this paper. However, they produce permanent destructions of the tested geological medium so that they are banned in urban areas. Vibrations generated by passive seismic sources used in seismic engineering are mainly produced by heavy vehicles, working machinery and human activities. This paper presents and describes the selected active seismic sources of the world's leading geophysical companies applied in seismic engineering. A comparison of technical parameters of the selected weight drops and seismic vibrators was devised. Finally, criteria for selecting the appropriate seismic source were formulated.

\*<sup>1)</sup> IGSMiE PAN, Kraków



**Słowa kluczowe:**

sejsmika inżynierska, źródło sejsmiczne, udar młotem, kafar, materiał wybuchowy, sparker, wibrator

**Key words:**

seismic engineering, seismic source, sledgehammer, weight-drop, explosives, sparker, vibrator

**1. Wprowadzenie**

Źródło drgań lub źródło sejsmiczne służy do wyzwiania energii sejsmicznej w postaci fali sejsmicznej, która jest następnie rejestrowana przez czujniki drgań, na przykład w wyniku udaru młotem, kafarem, eksplozji ładunku materiału wybuchowego lub wibracji [23]. Źródło powinno wzbudzać wystarczająco silny sygnał o określonej charakterystyce częstotliwościowej, pozwalający na uzyskanie oczekiwanego zasięgu głębokościowego badań przy jednoczesnej jak największej rozdzielczości rejestracji. Źródła sejsmiczne dzieli się na aktywne i pasywne w zależności od sposobu wyzwiania energii.

Źródła aktywne to takie, które wyzwalają energię sejsmiczną w sposób zamierzony i kontrolowany przez człowieka. Najpowszechniej stosowanymi źródłami aktywnymi są młot, kafar, materiał wybuchowy oraz lekkie wibratory inżynierskie.

Źródła pasywne wyzwalają energię sejsmiczną w sposób naturalny, niekontrolowany przez osobę prowadzącą rejestrację danych sejsmicznych. Wyzwalają one drgania w postaci szumu sejsmicznego o strukturze losowej. Źródłami pasywnymi mogą być w skali regionalnej trzęsienia ziemi, działalność wulkaniczna, falowanie mórz i oceanów, a zwłaszcza oddziaływanie prądów morskich na kontynenty lub oddziaływanie gwałtownych przepływów mas powietrznych, a w skali lokalnej wstrząsy indukowane działalnością górniczą, drgania spowodowane przejeżdżaniem pojazdów, pracą maszyn i urządzeń lub człowieka [18].

Ze względu na rodzaj generowanego sygnału wyróżnia się źródła impulsowe oraz ciągłe. Źródła impulsowe generują krótki, minimalnofazowy sygnał. Należą do nich wszelkiego rodzaju materiały wybuchowe. Źródła ciągłe związane są z wibratorami, które generują sygnał długotrwały wywołany mechanicznymi oscylacjami urządzenia.

Źródła sejsmiczne można również podzielić na niszczące, których działanie skutkuje trwałymi deformacjami w ośrodku oraz nieniszczące, które nie powodują trwałych deformacji w miejscu wzbudzenia. Do źródeł niszczących zalicza się głównie materiały wybuchowe oraz pośrednio wibratory i ciężkie kafary. Do źródeł nieniszczących należy zaliczyć udar młotem, lekkimi kafarami, sparkery (iskrowniki) oraz

odpalenie spłonek czy słabych ładunków gazowych.

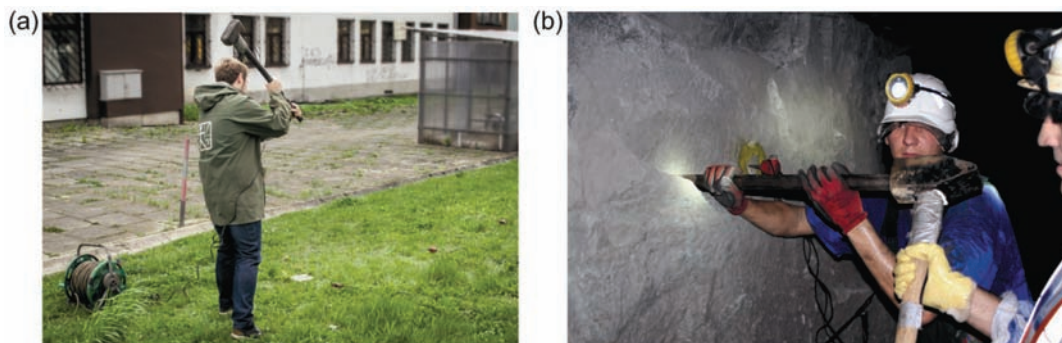
W artykule dokonano przeglądu obecnie stosowanych źródeł sejsmicznych w badaniach sejsmiki inżynierskiej. Pominięto źródła, zaawansowane technologicznie, stosowane w badaniach prospekcyjnych złóż na lądzie i na morzu. Artykuł ma na celu dostarczenie możliwie aktualnej wiedzy dla osób projektujących sejsmiczne badania inżynierskie, w tym w górnictwie. Szersze informacje na temat inżynierskich źródeł sejsmicznych można znaleźć między innymi w pracach [1, 3, 6, 16, 17, 27].

**2. Charakterystyka źródeł sejsmicznych****2.1. Źródła aktywne****2.1.1. Udar młotem (ang. sledgehammer)**

Udar w płytkę metalową lub gruby, krótki pręt stalowy przyłożony do powierzchni skały jest najbardziej rozpowszechnionym źródłem aktywnym stosowanym w sejsmice inżynierskiej (rys. 1a,b). Do jego głównych zalet, oprócz niskich kosztów zakupu i użytkowania, należą łatwość transportu i obsługi oraz minimalne skutki uboczne dla środowiska. Młot współdziała z płytką metalową umieszczoną bezpośrednio na podłożu gruntowym lub prętem stalowym przyłożonym do powierzchni nieodspojonego ociosu wyrobiska górniczego. Wymuszone drgania cząsteczek ośrodka są rejestrowane przez geofony lub inne czujniki sejsmiczne (rys. 2) [19].

Masa młota, za pomocą którego wzbudzane są fale, wynosi najczęściej od 3 do 10 kg. Stosowane płytki metalowe mają różne rozmiary i mogą być wyprodukowane z różnych materiałów. Najczęściej są to stopy z udziałem aluminium, odporne na kruche pęknięcie lub tworzywo sztuczne. Przeciętny udar młotem w płytkę wyzwala wystarczającą energię, aby uzyskać około trzydziestometrowy zasięg głębokościowy [20]. W przypadku zastosowań górniczych, zasięg odległościowy w górotworze, uzyskany udarem młota w pręt stalowy wynosi do ok. 300 m w utworach karbonu, dla rejestracji ze wzmocnieniem powyżej 100 dB.

Otrzymanie sygnału o dużej częstotliwości jest uwarunkowane zarówno masą młota, jak i rodzajem płytki. Młot o niewielkiej wadze i szerszej powierzchni udaru zmniejsza



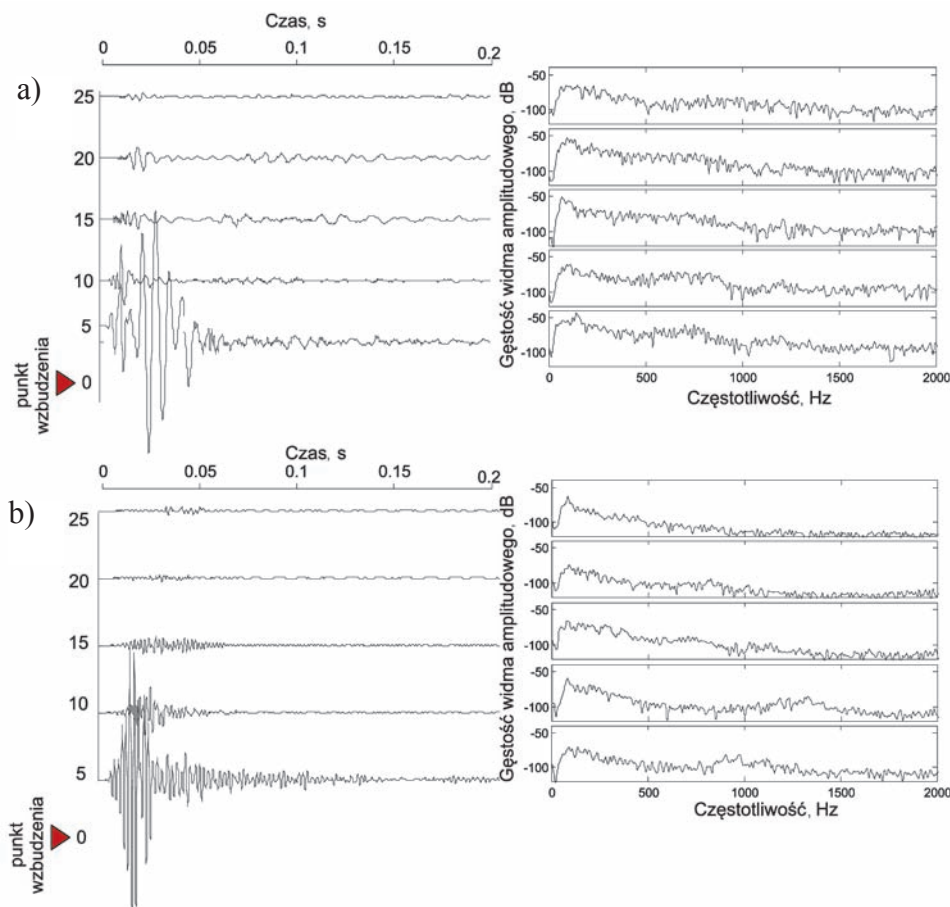
Rys. 1. Wyzwolenie energii sejsmicznej za pomocą udaru młotem w płytkę metalową – a oraz w pręt stalowy przyłożony do nieodspojonego ociosu wyrobiska górniczego – b

Fig. 1. Release of seismic energy using a sledgehammer in a metal plate (a) and steel rod applied to the side wall of excavation (b)

czas trwania sygnału, jednocześnie zmniejszając wyzwalaną energię. Czas trwania sygnału zmniejsza się w miarę wzrostu sztywności zastosowanej płytki. Powinna być ona wystarczająco lekka, aby znacząco przyspieszyć drgania wywołane uderzeniem młota [6]. Metalowa płytką zapewnia lepszy kontakt z podłożem w porównaniu z płytką plastikową, która ze względu na swoją mniejszą wagę jest na ogół niestabilna po uderzeniu w nią młotem i wykonuje dodatkowe, niepożądane

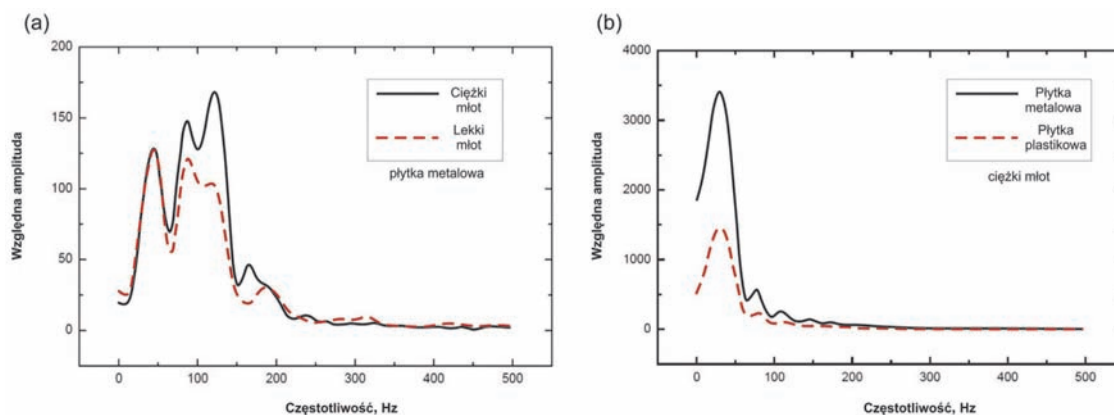
drżania. Istotna jest też masa młota. Im jest mniejsza, tym niepożądane drżania plastikowej płytki są mniejsze. Największą energię drgań uzyskuje się przy uderzeniu młotem o większej masie w płytkę metalową (rys. 3a, b).

Dodatkową zaletą uderzenia młotem jako źródła sejsmicznego jest powtarzalność sygnału. Uzyskanie sygnału o tej samej energii sejsmicznej jest jednak bardzo trudne. Należy uderzać z tą samą siłą i w to samo miejsce oraz dbać o to, aby po ude-



Rys. 2. Sejsmogram (lewa strona) oraz jego widmo amplitudowe (prawa strona) zarejestrowany w wyniku uderzenia młotem w pręt przyłożony do ociosu w wyrobisku dołowym wykonanym w warstwie piaskowca – a i w pokładzie węgla – b

Fig. 2. Seismogram (left-hand side) and its amplitude spectrum (right-hand side) recorded after using a sledghammer in a rod in a side wall of drift excavated in a sandstone layer a) and in a coal bed b)

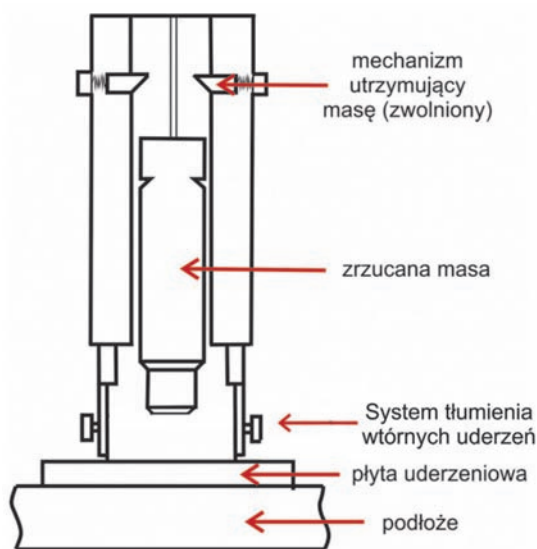


Rys. 3. Odpowiedź amplitudowa dla uderzenia młotem ciężkim i lekkim w metalową płytkę – a oraz młotem ciężkim w płytkę plastikową i metalową – b na podstawie [6]

Fig. 3. Amplitude response for using a heavy sledghammer and a light sledghammer in a metal plate (a) and a heavy sledghammer in a plastic plate and a metal plate (b), based on [6]

zeniu młot nie wykonywał powtórnych samoistnych uderzeń o płytkę. Powtórzenia uderu młotem powinna wykonywać konkretna osoba, ponieważ uderzenia innej osoby o odmiennym wzroście i budowie ciała mogą znacząco zmienić energię generowanych drgań [22]. Poprawienie stosunku sygnału do szumu, a tym samym jakości analizowanych danych, uzyskuje się poprzez składanie kolejnych rekordów otrzymanych w wyniku następujących po sobie uderzeń. Dziesięciokrotne zwiększenie stosunku sygnału do szumu wymaga w przybliżeniu stukrotnego powtórzenia uderzenia [20].

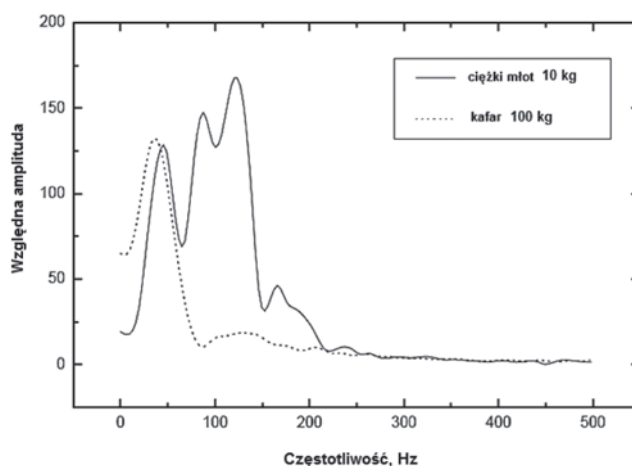
Kafar (ang. *weight-drop*) (rys. 4) działa na podobnej zasadzie jak uder młotem. Jest to urządzenie zamontowane najczęściej na specjalnie do tego przeznaczonym pojeździe lub ruchomej platformie (rys. 5). Działanie kafaru polega na swobodnym spadaniu bijaka na płytkę metalową z wysokości nawet do kilku metrów. Bijak jest podnoszony na zadaną wysokość przez suwnicę o napędzie elektrycznym lub ręcznie przez osobę obsługi kafaru. Po uderzeniu w płytkę metalową, bijak może wykonywać dodatkowe wtórne uderzenia, jeżeli



Rys. 4. Schemat budowy kafaru na podstawie [28]  
 Fig. 4. Weight-drop scheme based on [28]

nie zostanie włączone urządzenie do hamowania jego ruchów. Masa bijaka, w przypadku płytkich badań sejsmicznych w zastosowaniach inżynierskich, wynosi do 100 kg [6].

Ograniczeniem w zastosowaniu kafaru może być teren o skomplikowanej topografii, jak również większe koszty związane z jego zakupem i utrzymaniem w porównaniu do młota [27]. Porównanie odpowiedzi amplitudowej w przypadku drgań wygenerowanych przez kafar do uzyskanej przy uderze młotem pokazano na rysunku 6. Natomiast na rysunkach 7 i 8 porównano odpowiedzi amplitudowe dla uderu młotem w płytkę metalową oraz w pręt stalowy przyłożony do płytki, a także uderu lekkim kafarem w płytkę metalową w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła. Najkorzystniejszy efekt uzyskano dla uderu młotem, lecz wszystkie rejestracje i ich widma częstotliwościowe są podobne z punktu widzenia szerokości pasma częstotliwości oraz wielkości energii sygnału dla konkretnych składowych drgania.

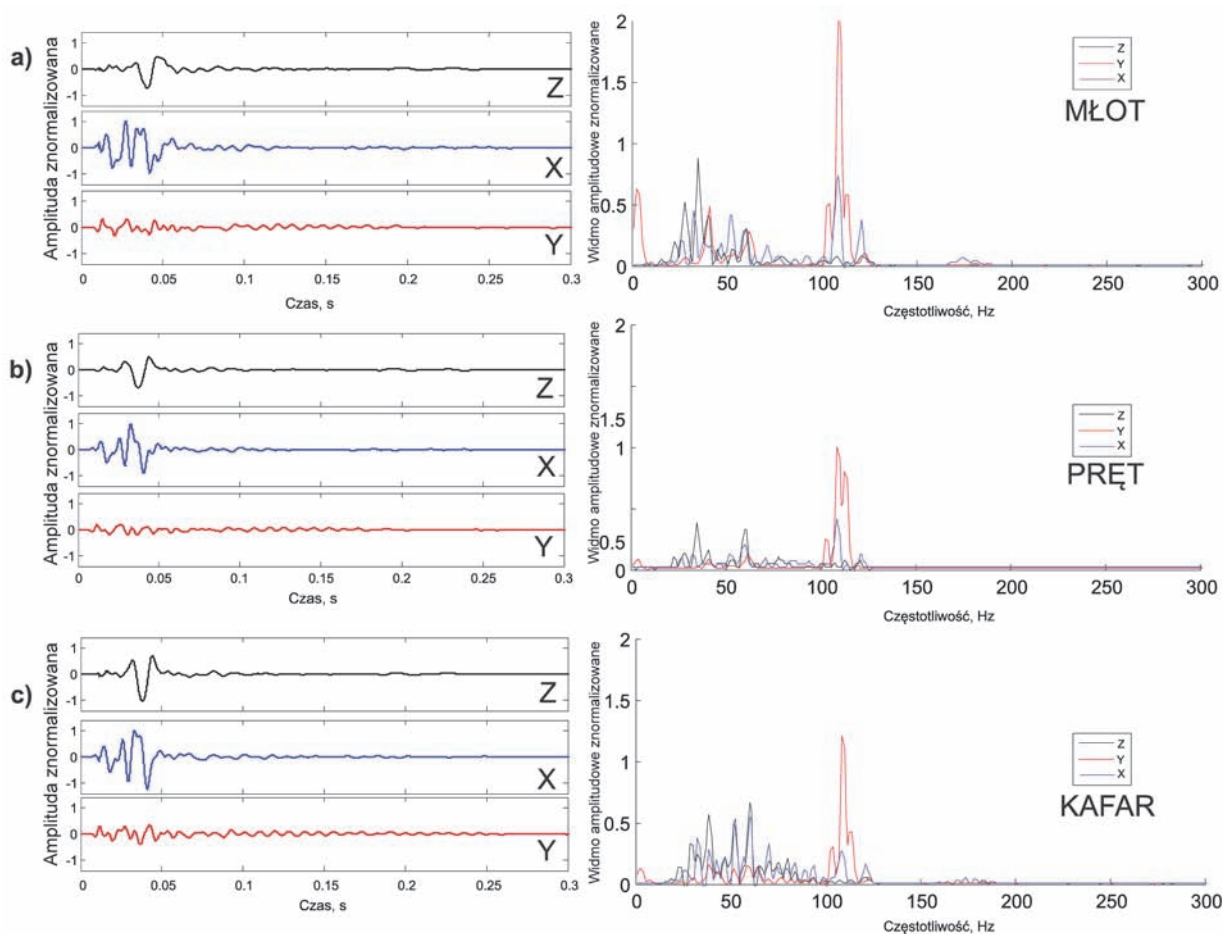


Rys. 6. Porównanie odpowiedzi amplitudowej dla uderu młotem o masie 10 kg w metalową płytkę i dla uderu kafarem o masie 100 kg bez płytki na podstawie [6]

Fig. 6. Comparison of the amplitude response for using the 10 kg sledgehammer in a metal plate to the amplitude response of 100 kg weight-drop without plate based on [6]

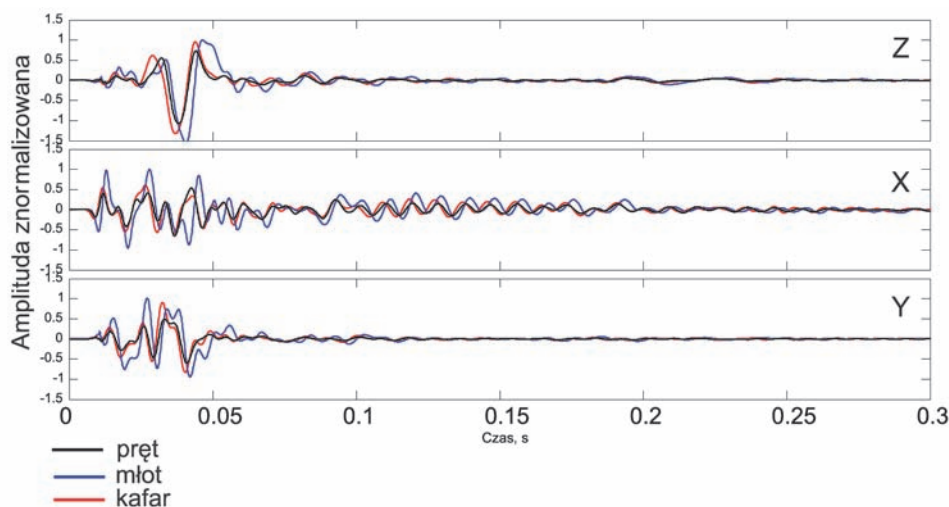


Rys. 5. Przykładowe kafary: Propped Energy Generator produkcji R.T Clark na podstawie [33] – a, ESS100 HM produkcji GISCO na podstawie [31] – b  
 Fig. 5. Examples of weight-drops: Energy Generator Propped- Clark RT, based on [33] (a) and HM ESS100- GISCO, based on [31] (b)



Rys. 7. Trójskładowa rejestracja fali sejsmicznej (lewa strona) i jej widmo częstotliwościowe (prawa strona) dla uderu 4 kg młotem w płytkę metalową – a; uderu 4 kg młotem w pręt i płytkę metalową – b; uderu kafarem – c; w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła

Fig. 7. Fig. 7. Three-component seismic wave record (left-hand side) and its frequency spectrum (right-hand side) for using a 4 kg sledgehammer in a metal plate a); using a 4 kg sledgehammer in a rod and a metal plate b); using a weight-drop c); under identical measurement conditions, at a distance of 4 m from the source



Rys. 8. Porównanie trójskładowej rejestracji fali sejsmicznej wzbudzonej źródłami jak na rysunku 5 w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła

Fig. 8. Comparison of three-component record of seismic wave induced by sources as shown in figure 5; under identical measurement conditions, at a distance of 4 m from the source

### 2.1.2. Źródła wibratorowe (ang. vibrator)

Są to obecnie bardzo często stosowane urządzenia w sejsmice inżynierskiej [10]. Ich zaletą jest przede wszystkim łatwa powtarzalność sygnału. Wibrator jest najczęściej montowany na pojeździe lub ruchomej platformie (rys. 9). Głównym jego elementem jest wibrująca płytka generująca drgania ośrodka geologicznego zgodnie z zaprogramowanymi parametrami impulsów elektrycznych. Energia generowanych fali sejsmicznych zależy od masy wibratora i siły nacisku płytki wibrującej na podłoże. W badaniach inżynierskich stosuje się wibratory o masie mniejszej od 1 tony, a w sejsmice poszukiwawczej stosuje się wibratory o masie do 32 ton [26]. W przypadku, gdy nie jest możliwe zastosowanie wibratorów o dużej masie, np. na terenach z rozwiniętą infrastrukturą budowlaną lub o skomplikowanej topografii, stosuje się wielokrotne składanie sygnału.

Sygnał generowany przez wibrator nazywany jest w terminologii angielskiej *sweep*. Charakteryzuje się on ustalonym pasmem częstotliwości, czasem trwania, amplitudą, fazą oraz czasem i sposobem narastania lub zmniejszania się amplitudy. Częstotliwości w paśmie 10-100 Hz są najbardziej powszechnymi częstotliwościami sygnału generowanego przez wibrator. Czas trwania drgań płytki wibratora, czyli długość sygnału wynosi przeważnie 10-20 sekund [26]. Częstotliwość sygnału generowanego przez wibrator może być stopniowo zwiększana (tzw. ang. *upsweep*) lub zmniejszana (tzw. ang. *downsweep*) w czasie. Zmiana częstotliwości może być liniowa, czyli równomierna w trakcie jego trwania lub nieliniowa. Zaprojektowanie sygnału o odpowiednich parametrach wymaga znajomości budowy i właściwości geologicznych badanego podłoża i jest wynikiem prac testowych prowadzonych przed właściwym badaniem sejsmicznym.

Główną wadą źródła wibratorowego są znacząco większe koszty zakupu i utrzymania w porównaniu do młota lub kafaru oraz ograniczenia związane z ich stosowaniem. W przypadku skomplikowanej topografii terenu, np. na terenach grząskich i podmokłych istnieje zagrożenie zapadania się wibratora i zniszczenie przypowierzchniowej warstwy ośrodka geologicznego. Wibratory są z powodzeniem stosowane na terenach suchych, a także zurbanizowanych.

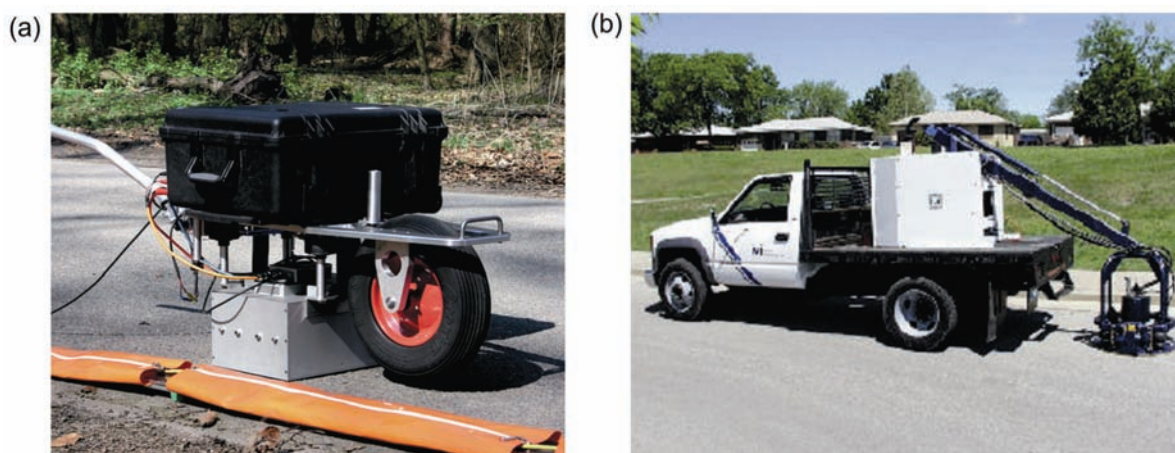
### 2.1.3. Materiały wybuchowe (MW) (ang. explosives)

Ze względu na swoje niszczące oddziaływanie, stosowane są jedynie w przypadkach, kiedy użycie innych źródeł jest niemożliwe oraz przy braku jakichkolwiek zastrzeżeń do ich użycia. W sejsmice inżynierskiej stosuje się niewielkie ładunki wybuchowe np. spłonkę lub kilka spłonek, lub 150 – 300 g MW, umieszczonego w krótkim otworze strzałowym. W celu lepszego kontaktu źródła z otaczającym ośrodkiem, otwory strzałowe wiercone z powierzchni terenu wypełniane są bardzo często wodą. Detonacja MW w otworach poniżej przypowierzchniowej strefy zwietrzalej w ośrodku geologicznym poprawia jakość rejestrowanych danych. Podobnie w wyrobiskach górniczych, ładunki MW należy detonować poza strefą spękań wokół wyrobiska dla uzyskania korzystniejszego stosunku sygnału do szumu. W przypadku badań prowadzonych w kopalniach podziemnych występują dodatkowe rygory związane z występującymi zagrożeniami naturalnymi i technicznymi.

Materiał wybuchowy generuje sygnał o dużej energii w szerokim paśmie częstotliwości. Zazwyczaj materiały wybuchowe stosowane w sejsmice inżynierskiej wyzwalają energię sejsmiczną w paśmie częstotliwości 100 – 200 Hz, a sporadycznie nawet powyżej 400 Hz [22]. Należy pamiętać, że częstotliwość uzyskanego sygnału zależy także od warunków geologicznych oraz sposobu instalacji geofonów.

### 2.1.4. Sparkery

Inaczej iskrowniki są źródłami sejsmicznymi o dużej rozdzielczości, których działanie jest uzależnione od obecności wody zmineralizowanej. Z tego względu, w zastosowaniach inżynierskich stosuje się tzw. sparkery otworowe (rys. 10). Są one zbudowane z elektrod zanurzonych w nasyconym roztworze soli w tubie ze stali nierdzewnej o średnicy około 90 mm. Elektrody są połączone metalowymi prętami z baterią kondensatora naładowaną do ponad 4 kV. Zanurzenie elektrod w elektrolicie umożliwia rozładowanie baterii kondensatora, a impuls sejsmiczny jest generowany przez powstałą iskrę pomiędzy elektrodą a metalową obudową tuby. Jedna iskra wyzwala energię do 1 kJ, a w sparkarach generujących impulsy silnie energetyczne może ona wynosić nawet do 15



Rys. 9. Przykłady inżynierskich wibratorów sejsmicznych: ElViS III S8 produkcji Geotomographie, na podstawie [30] – a oraz MiniVIB T-2500 produkcji Industrial Vehicles International Inc. – b, na podstawie [32]

Fig. 9. Examples of engineering seismic vibrators: ElViS III S8- Geotomographie based on [30] (a) and MiniVIB T-2500- Industrial Vehicles International, Inc. (b) based on [32]

kJ [24] lub 30 kJ [13]. Sygnał wyzwalany jest w szerokim paśmie częstotliwości, średnio 100 – 1600 Hz, a nawet do 3 – 5 kHz [3, 4, 9, 11, 12]. W związku z tym, że sparkery nie jest trwale instalowany w badanym ośrodku, tylko nieznaczna część energii jest przekształcana w fale powierzchniowe [24].



Rys. 10. Przykład sparkera otworowego skonstruowanego przez pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej [8]

Fig. 10. Example of borehole sparkler constructed by the staff of the University of Science and Technology in Cracow [8]

Sparkery znajdują zastosowanie w badaniach o dużej rozdzielczości i zasięgu głębokościowym do około 300 m [14], a nawet większym do ponad 1000 m, przy zachowanej rozdzielczości rzędu 2 – 3 m [20]. Jako źródła impulsowe, z powodzeniem zastępują źródła eksplozywne w miejscach,

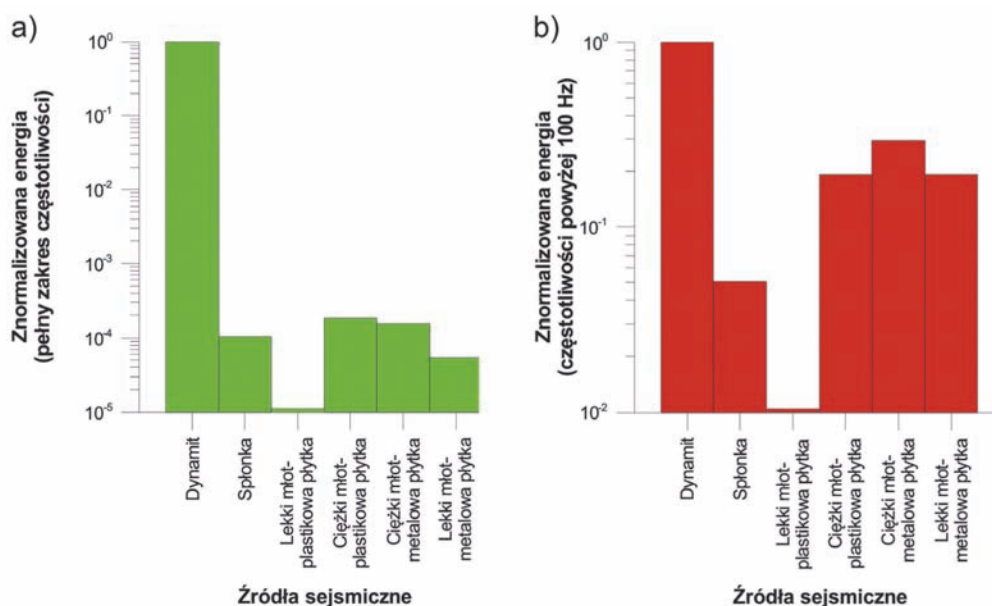
gdzie użycie materiałów wybuchowych jest zabronione. Wymagają jednak wiercenia otworów, dlatego są stosowane w otworach geologiczno-inżynierskich. Służą między innymi do rozpoznania geologicznego pod dnem jezior lub rzek przy projektowaniu tam, mostów, wiaduktów, tuneli, a także przy pogłębianiu dna w portach i kanałach [4, 9, 11].

Porównanie energii otrzymanej przy użyciu niektórych aktywnych źródeł sejsmicznych zilustrowano na rysunku 7. Przedstawiono znormalizowaną energię w pełnym paśmie częstotliwości bez użycia filtra górnoprzepustowego oraz znormalizowaną energię przy zastosowaniu filtra górnoprzepustowego powyżej 100 Hz. Zastosowanie filtra miało na celu sprawdzenie udziału dużych częstotliwości, umożliwiających większą rozdzielczość rejestracji, oczekiwanej w badaniach inżynierskich. Widać, że energia uzyskana dla dynamitu w pełnym paśmie częstotliwości jest niemal trzy razy większa od energii uzyskanej przy udarze młotem. Duża energia generowana przez dynamit zawiera się w szerokim paśmie częstotliwości i w dużej części powyżej 200 Hz, co jest jego zaletą [6]. Pozostałe źródła charakteryzują się podobną wartością generowanej energii. Wśród zastosowanych młotów, najmniejszą energię uzyskano przy udarze ciężkim młotem w plastikową płytkę.

## 2.2. Źródła pasywne

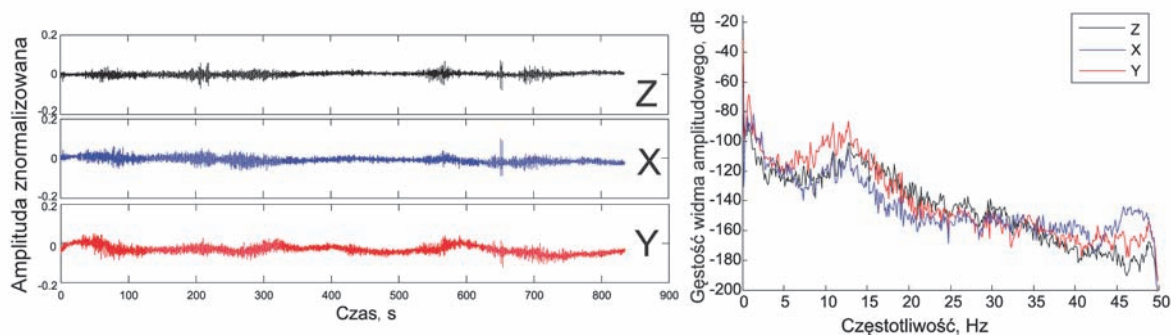
Źródła pasywne są coraz częściej używane przy rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich z uwagi na rozwój takich metod sejsmicznych, jak wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW (ang. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) i interferometria sejsmiczna IS (ang. *Seismic Interferometry*). Wykorzystanie ich jako źródeł sejsmicznych pozwala na wykonanie badań sejsmicznych.

Szum sejsmiczny jest złożeniem wielu zjawisk falowych zachodzących w różnym czasie i pochodzących z różnych źródeł wymienionych w rozdziale 1. Na rejestrowany szum sejsmiczny składają się fale wgłębne i powierzchniowe, z których większą część energii sejsmicznej przenoszą fale powierzchniowe (rys. 12) [25].



Rys. 11. Znormalizowana energia różnych źródeł sejsmicznych w pełnym paśmie częstotliwości – a); oraz w paśmie częstotliwości powyżej 100 Hz – b) na podstawie [6]

Fig. 11. The normalized energy diagram of various seismic sources in whole frequency band a) and in frequency band above 100 Hz b) based on [6]



**Rys. 12. Trójskładowa rejestracja szumu sejsmicznego na terenie górniczym – a) oraz jego widmo częstotliwościowe – b)**  
**Fig. 12. Three-component seismic noise record from a mining area a) and its frequency spectrum b)**

W ostatnich latach przeprowadzono wiele eksperymentów i badań przy wykorzystaniu źródeł pasywnych. Najczęściej jest to szum sejsmiczny pochodzący od przejeżdżających ciężkich pojazdów. Hauser [5] wykorzystał drgania wywołane przez maszynę drążącą tunel do zobrazowania ośrodka geologicznego wzdłuż projektowanej trasy przebiegu tunelu. Tego typu rozwiązanie pozwoliło na wykonanie rejestracji sejsmicznej bez konieczności wstrzymywania prac budowlanych.

Źródła pasywne znalazły także zastosowanie do monitorowania lawin śnieżnych [21] oraz do scharakteryzowania mechanicznych zmian w osadach u podstawy przemieszczającego się lodowca [2]. Ponadto, szum sejsmiczny generowany przez przelatujące samoloty może mieć zastosowanie do kontroli ruchu powietrznego [15].

Do rozpoznania ośrodka geologicznego prowadzi się badania sejsmiczne przy zastosowaniu często źródeł aktywnych i pasywnych [7].

### 3. Porównanie parametrów wybranych kafarów i wibratorów stosowanych w sejsmice inżynierskiej

Do ważniejszych światowych producentów kafarów i wibratorów należą: TerraPlus (Kanada), Industrial Vehicles International Inc. (USA), GISCO (USA), R.T. Clark (USA), B.W.S GEOFYSIK (USA) oraz GEOTOMOGRAPHIE (Niemcy). Porównanie parametrów technicznych dla wybranych kafarów zestawiono w tabeli 1, a wybranych wibratorów w tabeli 2.

Jednym z kafarów (produkcji B.W.S GEOFYSIK) przeznaczonych do zastosowań inżynierskich jest AWG GeoStrike o masie 45-55 kg, w pełni elektryczny i bardzo cichy podczas pracy. Może być montowany zarówno na samochodzie, jak i bezpośrednio na badanym podłożu. Składa się z płytki oraz tuby, w której umieszczony jest bijak oraz system hydrauliczny. Producent oferuje również model AWG GeoStrike 200 P/S WAVE, który generuje zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne. Do uderzania o płytkę system używa bijaka o masie 90 kg [29].

Interesujący jest kafar ESS100 (produkcji GISCO) z możliwością przyspieszania ruchu bijaka. Może być on zamontowany na wózku ESSCART umożliwiającym łatwe przemieszczanie źródła. Opcjonalny wyzwalacz radiowy pozwala na zdalne uruchamianie urządzenia. ESS100 wraz z całym oprzyrządowaniem waży 110 kg. System występuje w dwóch wersjach. Wersja ESS100HM jest zamontowana na samochodzie, natomiast druga wersja ESS100SC jest źródłem montowanym na wózku ESSCART. Źródło umożliwia wykonanie 1500 uderzeń z wykorzystaniem zasilania jednej baterii. Producent oferuje również źródło ESS200ATV [31] o większej, 90 kg masie bijaka.

Propelled Energy Generator PEG-40 (produkcji R.T. Clark) jest lekkim kafarem wraz z tubą, generatorem i płytką 100 kg. Masa bijaka napędzanego w tubie i uderzającego o płytkę o wymiarach 46 cm x 46 cm x 2,5 cm wynosi 36 kg. Źródło wykorzystuje elastomery w celu nadania bijakowi dużej prędkości. Pasma generowanych częstotliwości drgań wynosi 10-250 Hz [33]. Źródło jest łatwe w użyciu i może

**Tablica 1. Parametry techniczne wybranych kafarów do inżynierskich badań sejsmicznych**

**Table 1. Technical parameters of selected weight drops used in seismic engineering**

Producent	B.W.S GEOFYSIK			GISCO		R.T. Clark
	AWG GeoStrike 100-120 lb	AWG BWSgeofysik 120 lb H.E	AWG GeoStrike 200 P/S Wave	ESS100	ESS200ATV	PEG-40 kg
Zasilanie	AC/DC	-	-	12 V DC	12 V DC	12 V DC
Energia/siła udaru	-	-	-	191 J	-	-
Masa młota	45-55 kg młot	55 kg młot	90 kg młot	22,5 kg	90 kg młot	36 kg młot
Pasma częstotliwości	-	-	-	-	-	10-250 Hz
Masa zestawu	-	-	-	110 kg	-	100 kg
Mocowanie	auto/ATV*	ATV*	przyczepa	wózek	ATV*	auto/ATV*
Rodzaj fali	P	P	P/S	P/S	P/S	P/S

\*ATV – skrót od *All-Terrain Vehicle*, quad

być zamontowane zarówno na samochodzie, jak i bezpośrednio na badanym podłożu. Niewielka masa tego źródła oraz możliwość przymocowania do różnych pojazdów czyni go łatwym w transporcie i zwiększa tym samym możliwości jego zastosowania.

Źródło wibratorowe VIBSIST-20 (produkcji TerraPlus) jest jednym z najmniejszych źródeł znajdującym zastosowanie w pomiarach sejsmicznych dla płytkich oraz średnich zasięgów głębokościowych o dużej rozdzielczości. Oparte jest ono na technice SIST (ang. *Swept Impact Seismic Technique*) łączącej technikę Vibroseis z techniką zastosowaną w źródle wibratorowym Mini-Sosie. Sygnały sejsmiczne generowane są jako serie drgań zgodnie z wcześniej zaprogramowaną sekwencją. Użycie źródła pozwala osiągnąć szerokie widmo częstotliwościowe sygnału nawet, gdy kontakt ze skalą lub gruntem jest względnie słaby. VIBSIST-20 zapewnia głębokość penetracji podobną jak przy użyciu źródła eksplozywnego, ale przy dużej rozdzielczości. Duży stosunek sygnału do szumu osiągnięty jest przy energii sygnału wynoszącej 10 kJ w czasie 25 s. Użycie VIBSIST-20 zapewnia lepszą identyfikację pierwszych wstąpień fali podłużnej, niż przy uderzeniu młotem dzięki wyzwoleniu większej energii uderzenia w tym samym czasie. Model VIBSIST-50 firmy TerraPlus jest oparty o tę samą technikę co VIBSIST-20 i ma te same zastosowania. Różni się on natomiast energią generowanego sygnału. Jest ona większa i wynosi 15 kJ w czasie 25 s, co pozwala na osiągnięcie większej rozdzielczości. Widmo częstotliwościowe sygnału jest szerokie i osiąga 1500 Hz [34].

Źródło wibratorowe MiniVIB T-2500 (produkcji Industrial Vehicles International Inc.) (fot. 3b) jest montowane na dwu lub czteroślupowym pojeździe. Źródło przeznaczone jest do badań sejsmicznych o dużej rozdzielczości. Generuje sygnał w paśmie częstotliwości od 10 do 550 Hz, najszerszym w swojej klasie. Producent oferuje specjalną nakładkę umożliwiającą wytwarzanie fal poprzecznych. Konstrukcja nakładki umożliwia obracanie poziomo zamocowanego siłownika wibratora pod każdym kątem względem linii pomiarowej [32].

Wibrator EIViS III S8 (prod. GEOTOMOGRAPHIE) jest zamontowany na przenośnym stelażu. Generator sygnału

z 16-bitowym konwerterem generuje analogowy sygnał, jednocześnie uruchamiający urządzenie rejestrujące (rys. 9). Możliwe jest odwracanie kierunku polaryzacji sygnału. Długość trwania sygnału oraz pasmo częstotliwościowe są zmienne i mogą być ustawiane indywidualnie. Absorbery drgań tłumią wibracje pomiędzy źródłem i stelażem. Są one kontrolowane przez czujniki ciśnienia. Pasma częstotliwości uzyskiwanego sygnału wynosi 5-320 Hz, a osiągnięta maksymalna głębokość penetracji to około 100 m. Masa źródła wynosi około 35 kg, natomiast całego urządzenia wraz ze stelażem i zasilaniem około 130 kg [30]. Stosunkowo niewielka masa pozwala na łatwy transport urządzenia i zwiększa możliwości jego zastosowania w terenie o skomplikowanej morfologii.

#### 4. Kryterium wyboru właściwego źródła sejsmicznego

Wybór właściwego źródła sejsmicznego w projektowaniu badań sejsmicznych jest jednym z kluczowych zadań mających na celu uzyskanie jak najlepszych wyników akwizycji sejsmicznej. Nadrzędnym celem jest wygenerowanie sygnału, który zapewni wystarczający zasięg głębokościowy o odpowiednio dużej rozdzielczości danych.

Przy wyborze źródła należy zdefiniować cel zadania geologiczno-inżynierskiego, a tym samym oszacować zasięg głębokościowy rozpoznania sejsmicznego. Bardzo często przed podjęciem właściwych badań sejsmicznych wykonuje się pomiary testowe, które pomagają przy wyborze właściwego źródła. Ponadto, należy rozemnić warunki pomiarowe i możliwe ograniczenia związane z zastosowaniem źródła np. konieczność ochrony zwierciadła wód podziemnych, obiektów budowlanych, infrastruktury itp.

Zakup, utrzymanie i obsługa źródeł sejsmicznych jest również istotnym zagadnieniem organizacyjnym, prawnym i ekonomicznym. Kluczowym kryterium są też możliwości sprzętowe związane z zakresem pracy, wytrzymałością i mobilnością źródła.

**Tablica 2. Parametry techniczne wybranych inżynierskich wibratorów sejsmicznych**  
**Table 2. Technical parameters of selected engineering seismic vibrators**

Producent	TerraPlus		Industrial Vehicles International Inc.	GEOTOMOGRAPHIE
Model	VIBSIST-20	VIBSIST-50	MiniVIB T-2500	Shearwave Vibrator EIViS III S8
Zasilanie	115V/60 Hz 230V/50 Hz	115V/60 Hz 230V/50 Hz	Silnik 37 konny, 2400 RPM	12/24 V DC, 90 Ah
Max pobór prądu	14 A	25 A	-	-
Współczynnik powtórzeń	10-30/s	5-18/s	-	-
Energia/siła uderu	20 J (1.5 kW młot)	55 J (1.8 kW młot)	27 N	450 N
Masa młota	-	-	141 kg	-
Pasma częstotliwości	50-2500 Hz	50-1500 Hz	10-550 Hz (5,8 oktav)	5-320 Hz
Charakterystyki sygnału	każdy kształt lub zaprogramowany liniowy sygnał	każdy kształt lub zaprogramowany liniowy sygnał	każdy kształt: liniowe i nieliniowe	każdy kształt
Czas trwania sygnału	2,5-20 s	4-30 s	-	-
Masa zestawu	21,4 kg	59 kg	1100 kg	130 kg
Mocowanie	wózek	wózek	auto	taczka
Rodzaj fali	P/S	P	P/S (wybór)	S



Osoba projektująca badania sejsmiczne musi mieć również na uwadze, że osiągnięcie większego zasięgu głębokościowego jest możliwe przy użyciu źródła niskoczęstotliwościowego, ale jednocześnie uzyskiwana jest mniejsza rozdzielczość rejestracji. W doborze źródła ważne jest możliwie jak najbardziej dokładne studium warunków geologicznych badanego terenu oraz dobra znajomość parametrów konkretnych źródeł sejsmicznych i możliwości ich wykorzystania.

## 5. Podsumowanie

W sejsmice inżynierskiej najczęściej stosowanymi źródłami sejsmicznymi są młoty i kafary, a rzadziej materiały wybuchowe, wibratory i sparkery. W zależności od warunków pomiarowych, właściwy dobór źródła pozwala na uzyskanie oczekiwanych zasięgów głębokościowych dla satysfakcjonującej rozdzielczości rejestracji sejsmicznych. Są to źródła na ogół łatwe w transporcie i proste w obsłudze. Z powodzeniem są stosowane w terenie o zróżnicowanej morfologii, jak również na terenach zurbanizowanych.

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że uderzenie młotem pozwala uzyskać najbardziej satysfakcjonujące wyniki w płytkim rozpoznaniu sejsmicznym w typowych warunkach pomiarowych. W trudniejszych warunkach pomiarowych, w ośrodku o większym tłumieniu, sprawdza się cięższy kafar o masie bijaka od 30 do 100 kg. W zastosowaniach w górnictwie, w wyrobiskach podziemnych, uderzenie młotem w pręt stalowy o większej średnicy w nieodspojony ocios jest porównywalny z uderzeniem młota w płytkę metalową.

W ostatnich latach coraz częściej w rozwiązywaniu zadań inżynierskich wykorzystuje się źródła pasywne. Jest to związane z rozwojem takich metod jak: MASW, interferometria sejsmiczna lub mikrosondowanie sejsmiczne. Szum sejsmiczny generowany na przykład przez przejeżdżające ciężkie pojazdy lub pracę maszyn jest cennym źródłem wykorzystywanym do badania budowy i właściwości ośrodka przypowierzchniowego i może służyć do czasoprzestrzennej obserwacji różnych procesów fizyczno-mechanicznych.

Podstawowym kryterium zastosowania źródła sejsmicznego jest zdefiniowanie celu zadania geologiczno-inżynierskiego, które jest przedmiotem badań sejsmicznych.

**Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE, uzyskanego w ramach przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

## Literatura

1. *Bhokonok O., Prado R. L., Diogo L. A.*: Comparative tests of seismic sources and geophones aiming at shallow reflection seismic investigation in urban areas. *Revista Brasileira de Geofísica* 2006, nr 24(1), s. 81-89.
2. *Brisbourne A., Stuart G., Kulesa B.*: Passive seismic signatures of a fast-flowing Alpine glacier. *AGU Fall Meeting* 2007.
3. *Bühnemann J., Holliger K.*: Comparative test of various high-frequency seismic sources. 66th SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, Society of Exploration Geophysicists 1996, s. 880-883.
4. *Bühnemann J., Holliger K.*: Comparison of high-frequency seismic sources at the Grimsel test site, central Alps, Switzerland. *Geophysics* 1998, t. 63, nr 4, s. 1363-1370.
5. *Hauser E.C.*: Detection and Location of Obstructions Ahead of a Tunnel Boring machine using the Tunneling Vibrations as a Seismic Source: The First Successful Example. 2001 Symposium on Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP) 2001, CD Publication SSI-7.
6. *Karasthatis V.K., Louis I.F.*: Comparison test of seismic sources in shallow reflection seismics. *Annales Geologiques des Payes Helleniques* 2002.
7. *Liu Y., Luke B., Pullammanaoallil S., Louie J., Bay J.*: Combining active- and passive-source measurements to profile shear wave velocities for seismic microzonation. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics* 2005, s. 1-14.
8. *Marcak H., Pilecki Z.* (red.): Wyznaczanie właściwości utworów fliszu karpackiego metodą sejsmiczną dla potrzeb budownictwa tunelowego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2003.
9. *Marelli S., Manukyan E., Maurer H., Greenhalgh S.A., Green A.G.*: Appraisal of waveform repeatability for crosshole and hole-to-tunnel seismic monitoring of radioactive waste repositories. *Geophysics* 2010, t. 75, nr 5.
10. *Matula R., Czaja K.*: Implementation and application of ultralight-vibrator in shallow seismic acquisition. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w druku).
11. *Maurer H., Marelli S., Manukyan E., Green A.G., Greenhalgh S.A.*: Non-intrusive seismic monitoring of high-level radioactive waste repositories. *SEG Las Vegas Annual Meeting* 2012, s. 1-5.
12. *McCann D.M., Andrew E.M., McCann C.*: Seismic sources for shallow reflecting surveying. *Geophysical Prospecting* 1985, nr 33, s. 943-955.
13. *McCann D.M., Grainger P., McCann C.*: Inter-borehole acoustic measurements and their use in engineering geology. *Geophysical Prospecting* 1975, nr 23, s. 50-69.
14. *McGuinness W.T., Beckmann W.C., Officer C.B.*: The application of various geophysical techniques to specialized engineering projects. *Geophysics* 1962, t. XXVII, nr 2, s. 221-236.
15. *Meunier J., Menard J.P.*: Seismic noise without a seismic source. *EAGE 66th Conference & Exhibition*, 7-10 June, Paris, France 2004 – conference materials .
16. *Miller R.D., Pullan S.E., Steeples D., W., Hunter J.*: Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California. *Geophysics* 1992, t. 57, nr 5, s. 693-709.
17. *Miller R.D., Pullan S.E., Waldner J.S., Haeni F.P.*: Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics* 1986, t. 51, nr 2, s. 2067-2092.
18. *Okada H.*: The microseismic survey method. *Society of Exploration Geophysicists of Japan. Geophysical Monograph Series* 2003, nr 12.
19. *Pilecki Z., Harba P., Adamczyk A., Krawiec K., Pilecka E.*: Geofony w sejsmice inżynierskiej. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w druku).
20. *Reynolds J. M.*: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wyd. 2. Chichester, Wiley-Blackwell Publishing Wielka Brytania 2011, s. 154-169.
21. *Rubin M.J., Camp T., van Hervijnen A., Schweizer J.*: Automatically detecting avalanche events in passive seismic data. 11th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA) 2012, t. 1, s. 13-20.
22. *Sharma P.V.*: Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press Wielka Brytania 2002, s. 124-126.
23. *Sheriff R.E.*: Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Wyd. 4. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists Oklahoma 2011, s. 2.
24. *Singh S.*: High-frequency shallow seismic reflection mapping in tin mining. *Geophysical Prospecting* 1984, nr 32 s. 1033-1044.
25. *Toksöz M.N., Lacoss R.T.*: Microseisms: mode structures and sources. *Science* 1968, nr 159, s. 872-873.
26. *Trzeźniowski Z.*: Jak odkryć ropę naftową. Agencja Reklamowo-Wydawnicza Media2, Kraków 2005, s. 107-116.
27. *Van der Veen M., Buness H.A., Bükler F., Green A.G.*: Field comparison of high-frequency seismic sources for imaging shallow (10-250 m) structures. *JEEG* 2000, t. 5, nr 2, s. 39-56.
28. *Van Koughnet R.*: Accelerated weight drop for New Zealand seismic acquisition. *New Zealand Petroleum Conference* 21 September 2010.
29. [www.bgsisal.com](http://www.bgsisal.com)
30. [www.crosswellinstruments.de](http://www.crosswellinstruments.de)
31. [www.giscogeo.com](http://www.giscogeo.com)
32. [www.indvehicles.com](http://www.indvehicles.com)
33. [www.rtclark.com](http://www.rtclark.com)
34. [www.terraplus.ca](http://www.terraplus.ca)

## Strimery w sejsmice inżynierskiej

### Streamers in seismic engineering



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki,  
prof. IGSMiE PAN.\*)*



*Mgr inż. Paulina Harba\*)*



*Inż. Mateusz Laszczak\*)*



*Inż. Andrzej Adamczyk\*)*



*Inż. Szymon Cielesta\*)*

**Treść:** W artykule przedstawiono przegląd strimerów sejsmicznych wykorzystywanych w badaniach sejsmiki inżynierskiej. Znajdują one zastosowanie przede wszystkim w badaniach podłoża gruntowego szlaków komunikacyjnych. Pomiaru takimi urządzeniami można również wykonywać w innych celach badawczych, lecz w warunkach terenowych o płaskim lub słabo zmienionym ukształtowaniu. Obecnie strimery sejsmiczne używane są w warunkach, gdzie długość i liczba profili pomiarowych zmuszają do wielokrotnego rozstawiania i składania sprzętu sejsmicznego. Autorzy definiują pojęcie strimera sejsmicznego. Opracowano klasyfikacje ze względu na rodzaje konstrukcji i sposoby mocowania czujników w strimerach. Scharakteryzowano i zilustrowano zasadę działania oraz opisano obecne stadium i kierunek rozwoju technologii strimerów. Przedstawione zostały możliwe konfiguracje strimerów sejsmicznych wraz z pojazdami ciągnącymi i źródłami sejsmicznymi wykorzystywanymi w pomiarach. Zaprezentowano przykłady strimerów sejsmicznych stosowanych w sejsmice inżynierskiej, ze szczegółowymi ich opisami. Dokonano porównania konstrukcji wybranych strimerów sejsmicznych.

**Abstract:** This paper presents a detailed overview of land streamers used in seismic engineering. They are commonly implemented in ground reconnaissance along communication routes. Other surveys can be also carried out with this systems, nevertheless field condition should be flat or moderately unchangeable. Nowadays land streamers are used when length and number of seismic profiles force us to make several changes in classical system set-up. Authors defined the term of land streamer. Classification is made due to construction and sensor handle. Characterization and illustration of land streamer principle of operation has been presented. Current direction of technical development was described. The authors presented possible configurations with different towing vehicles and seismic sources. Exemplary land streamers used in industry has been presented with a detailed description. Constructions of selected land streamers have been compered.

\* ) IGSMiE PAN, Kraków

**Słowa kluczowe:**

strimer sejsmiczny, sejsmika inżynierska, szlaki komunikacyjne, klasyfikacja strimerów sejsmicznych

**Key words:**

land streamer, seismic engineering, communication routes, land streamer classification

**1. Wprowadzenie**

Urządzenie opisane w artykule, nazywane jest w terminologii angielskiej jako *land streamer* (LS). Autorzy proponują przyjąć polską nazwę tego urządzenia jako sejsmiczny strimer. Dalej konsekwentnie będziemy używać tej nazwy lub skrótu LS.

Strimer sejsmiczny jest linearnym układem geofonów specjalnie połączonych taśmą lub linką, przystosowanym do ciągnięcia po powierzchni terenu. Koncepcja urządzenia powstała dla potrzeb sejsmiki morskiej, gdzie strimery są holowane za statkiem [14].

Po raz pierwszy lądowe strimery sejsmiczne były testowane dla potrzeb branży naftowej w rejonie arktycznym Ameryki Północnej w pierwszej połowie lat 70. XX wieku [1, 11]. Badania zostały wykonane na lodzie i śniegu, których gładka i śliska powierzchnia ułatwiała przemieszczanie się długiego profilu. Wówczas stwierdzono porównywalną jakość wyników uzyskanych LS z klasycznymi geofonami wbijanymi w podłoże, przy istotnym zmniejszeniu liczby ludzi niezbędnych do przeprowadzenia badań. Od tego czasu zaczęto szerzej wykorzystywać strimery sejsmiczne dla potrzeb sejsmiki płytkiej. LS znalazły szerokie zastosowanie dla pomiarów wzdłuż szlaków komunikacyjnych. Kilka lat po pierwszych testach na lądzie, rozwiązanie ciągniętego kabla sejsmicznego po powierzchni terenu zostało opatentowane przez Kruppenbacha i Bedenbendera [4].

Wiele prac zostało opublikowanych w okresie ostatnich 30 lat dotyczących LS, mających jednocześnie duży wpływ na metody rozpoznawania ośrodków przypowierzchniowych [2, 17, 18, 8, 3]. Prace porównujące techniki akwizycyjne wielokrotnie wykazały niemal identyczne wyniki dla LS i klasycznej metodyki pomiarowej [19].

Wraz z postępującym rozwojem technologicznym i wzrostem zainteresowania w stosowaniu LS na przestrzeni lat powstało wiele różnych ich konstrukcji. LS ze względu na rodzaj konstrukcji można podzielić na taśmowe i linkowe (tab. 1). Taśmowe strimery sejsmiczne różnią się materiałem z jakiego zostały wykonane. Możemy wśród nich wyróżnić

taśmy parciane, gumowe, stalowe, wzmacniane kevlarem czy też obudowy węży strażackich. Wśród linkowych strimerów sejsmicznych wyróżniamy strimery jedno i dwulinkowe. Na szczególną uwagę zasługuje obudowa węży strażackiego, która charakteryzuje się wyjątkowo dużą trwałością (rys. 1). LS można również podzielić, ze względu na sposób mocowania czujnika (tab. 2). Wyróżniamy strimery z wkręcanymi czujnikami, samoorientujące się głowice typu „gimbal” i połączenia kardanowe.

**Tabela 1. Klasyfikacja strimerów sejsmicznych ze względu na konstrukcję**

**Table 1. Land streamer classification based on the type of construction**

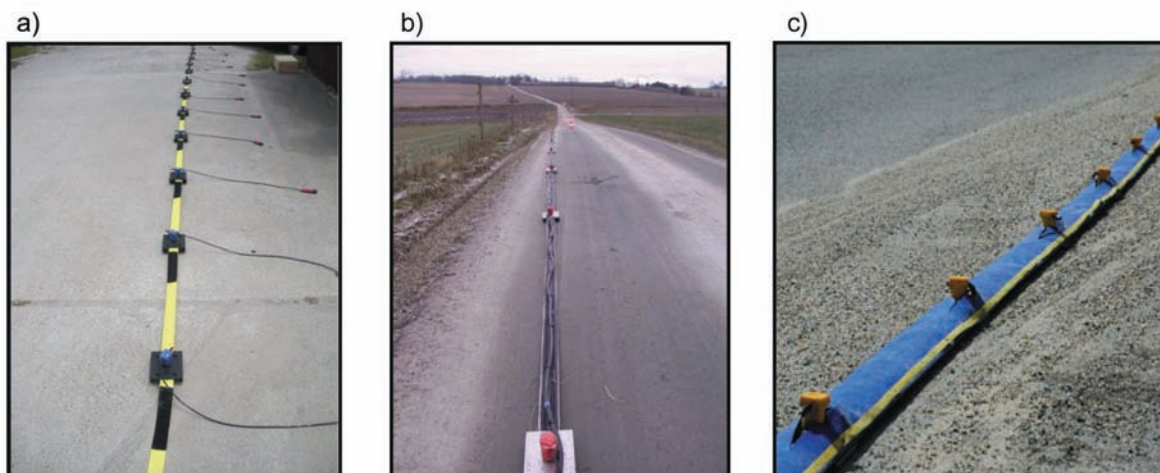
Rodzaj sejsmicznego strimera	
Taśmowe	Linkowe
Parciane	Jednolinkowe
Gumowe	Dwulinkowe
Stalowe	
Tworzywo wzmacniane kevlarem	
Obudowa węży strażackiego	

**Tabela 2. Klasyfikacja strimerów sejsmicznych ze względu na sposób mocowania czujnika**

**Table 2. Land streamer classification based on the type of sensor mounting**

Sposób mocowania czujnika		
Wkręcane Wkręty śrubowe Śrubowe (Galperiniego)	Kardanowe	Samoorientujące się głowice „gimbal”

Sposoby mocowania czujników dotyczą podstawek, które cechować się muszą szczególną trwałością i odpornością na ścieranie oraz stabilnością. Obecnie na skalę przemysłową stosuje się różne rodzaje podstawek w zależności od ukształtowania terenu badań, rodzaju podłoża i warunków atmosferycznych. Wśród najpopularniejszych wyróżnia się



**Rys. 1. Przykłady strimerów sejsmicznych: taśmowy – a [21], dwulinkowy – b [22], obudowa węży strażackiego – c [23]**

**Fig. 1. Example of a land streamer: tape a) [21], dual-string b) [22], fire hose housing c) [23]**

drewniane, gumowe i stalowe. Są one często wyprofilowane w taki sposób, aby ułatwić mobilność i dokładność pozycjonowania czujników. W celu poprawienia jakości danych, stosuje się elementy o zwiększonej masie, które docierając układ czujnika poprawiają jego kontakt z podłożem.

## 2. Zasada działania strimera sejsmicznego

Strimer sejsmiczny zbudowany jest z czujników przymocowanych do elementu łączącego: linki lub taśmy oraz z systemu komunikacji z rejestratorem: zdalnym lub kablowym (rys. 2a).

Strimery sejsmiczne są wykorzystywane do pomiarów typu „start-stop”. Każdorazowo układ ciągniętych geofonów jest zatrzymywany w określonym krokiem dla potrzeb wykonania pomiaru. Od tego momentu akwizycja danych nie różni się od klasycznego pomiaru sejsmiki inżynierskiej. Jednostka rejestrująca najczęściej znajduje się na pojeździe samochodowym. Dane pomiarowe z czujników do jednostki rejestrującej przekazywane są drogą kablową lub w sposób zdalny, jak w przypadku strimera typu Seismobile-1, opracowanego w ramach projektu SEISMOBILE.

Strimery sejsmiczne są ciągnięte przez pojazdy mechaniczne, najczęściej samochody terenowe, ale także przez wibratory, quady czy samochody ciężarowe. Dobór pojazdu zależy przede wszystkim od warunków terenowych po jakich porusza się pojazd, a także od warunków atmosferycznych panujących w rejonie wykonywanych pomiarów.

Obecne stadium rozwoju zastosowań strimerów sejsmicznych pozwala na wykonywanie pomiarów w różnych konfi-

guracjach. Na ogół stosuje się układy połączonych ze sobą LS tworzących długie profile lub równoległe ułożonych zestawów LS tworzących układ 3D, np. Seismobile-1 (rys. 2b). Oprócz sposobu łączenia poszczególnych LS, można zmieniać także odsunięcie punktu wzbudzenia drgań i odległości między czujnikami. Konfiguracja układu LS zależy przede wszystkim od celu zadania geologiczno-inżynierskiego.

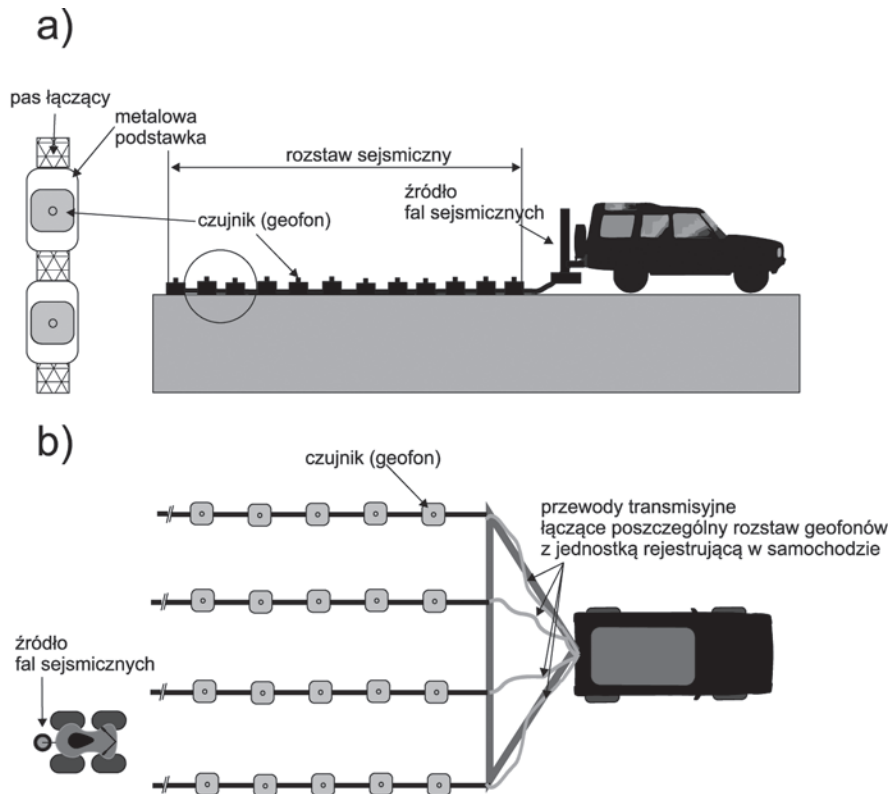
Praktycznie wszystkie rodzaje źródeł stosowanych w sejsmice inżynierskiej można wykorzystywać przy pomiarach strimerami sejsmicznymi. Wśród najpopularniejszych są mini-wibratory, kafary i młoty, zarówno mobilne, jak i montowane przy pojeździe ciągnącym układ LS.

## 3. Przegląd strimerów sejsmicznych stosowanych na świecie

### 3.1. Sejsmiczne strimery taśmowe (SST)

Przykładami taśmowych strimerów sejsmicznych wykorzystywanych do celów inżynierskich są:

- **LS-1**, produkcji Geostuff [24],
- **Land streamer**, produkcji ETH [17],
- **Land streamer KGS**, produkcji Kansas Geological Surveys Crew [20],
- **Bay Geophysical**, produkcji Geological Surveys, Japonia [20],
- **Tyrens** [16],
- **Terra Australis**, produkcji Geophysica Pty Ltd [15],
- **RAMBOLL** [19],
- **LS 12/ LS 24**, produkcji Geosym [25].



Rys. 2. Schemat przykładowego strimera sejsmicznego: pojedyncza linia LS ze źródłem zamontowanym na samochodzie ciągnącym układ – a); układ 4 linii z mobilnym źródłem – b)

Fig. 2. Example of a land streamer scheme: single line with source located on towing vehicle – a); 4-line array with mobile source – b)

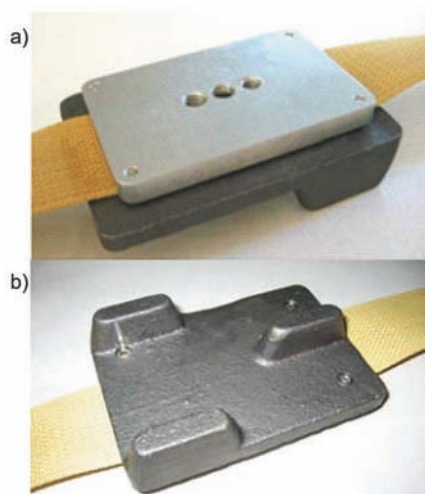
Typowym przykładem taśmowego strimera sejsmicznego jest LS-1 opracowany przez Geostuff - strimerLS-1 (rys. 3). Urządzenie składa się z metalowych podstawek na geofony oraz parciaonej taśmy utrzymującej stały odstęp między geofonami. Podstawki składają się z dwóch skręcanych ze sobą płytek. Górna płytka zawiera różnośrednicowe gwinty (rys. 4a) pozwalające na montaż oraz szybką wymianę geofonów.



Rys. 3. Taśmowa konstrukcja strimera sejsmicznego LS-1 produkcji Geostuff [24]

Fig. 3. LS-1 land streamer, Geostuff [24]

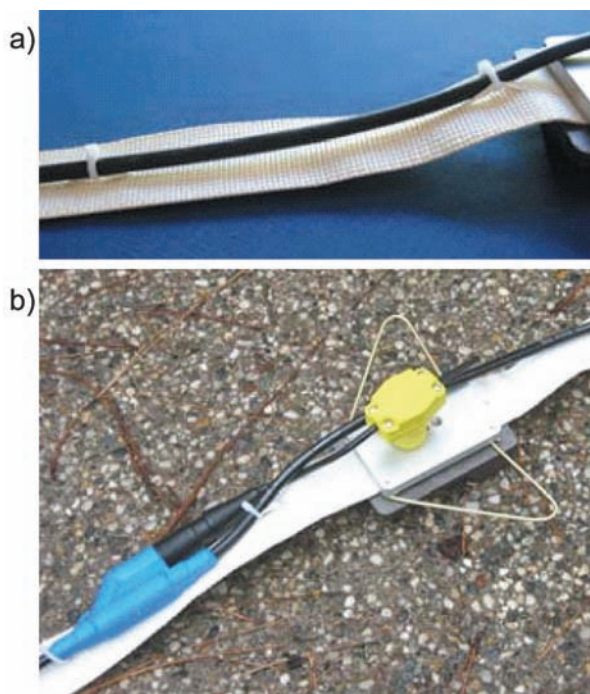
Dolna płytka wykonana jest z odpornego na ścieranie stopu stali Cr-Mn-Mo. Odlana jest w kształcie niewielkiego trójkąta (rys. 4b), zapewniając stabilność poprzez zagłębienie się w miękkim gruncie, a tym samym dobry kontakt z podłożem. Pomiędzy płytkami przeprowadzona jest taśma szerokości 5cm, wzmocniona kevlarem, dla zapewnienia dużej wytrzymałości na ścieranie oraz rozciąganie. Taśma wytrzymuje obciążenie masą 2200 kg. Kable geofonowe przypinane są do górnej części taśmy poprzez nylonowe obejmy (rys. 5), zapobiegając tarcia kabla o podłoże. W przypadku, gdy strimer ciągnięty jest po podłożu z dużymi odstępami między odbiornikami, stosuje się stelaże metalowe, zapobiegające przewracaniu się geofonów (rys. 5).



Rys. 4. LS-1: Górna płytka z gwintami pozwalającymi na montaż geofonów – a; dolna płytka podstawki – b [24]

Fig. 4. LS-1: Top plate is drilled and tapped for geophones a); the base plate b) [24]

Jest to urządzenie 24-kanalowe, a wykorzystywanym źródłem sejsmicznym jest 41-kilogramowy kafar, lub źródło impulsowe, niszczące - Betsy Gun. Liczba i rodzaj czujników jest dowolna. LS może być holowany za pomocą ATV lub samochodu.



Rys. 5. Nylonowe obejmy utrzymujące kabel geofonowy na wierzchniej stronie taśmy strimera – a; antyrotacyjne skrzydła strimera, zapobiegające przewracaniu się geofonów – b [24]

Fig. 5. Loops are woven into the webbing at short intervals so that the geophone cables can be secured to the top surface with nylon cable ties a); anti-rotation wing supplied with the system to add stability b) [24]

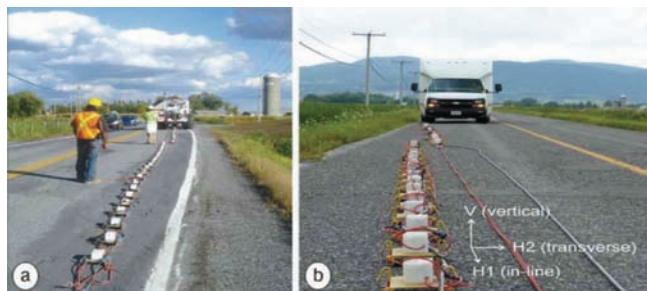
### 3.2. Sejsmiczne strimery linkowe (SSL)

Przykładami linkowych strimerów sejsmicznych wykorzystywanych do celów inżynierskich są:

- **Land streamer** produkcji Illinois State Geological Survey [20],
- **Land streamer** produkcji COWI [20],
- **Land streamer** produkcji Illinois State Geological Survey [8],
- **Land streamer** produkcji Kyoto University [7],
- **Land streamer**, Geological Survey of Canada [13],
- **Landstreamer 3C**, Geological Survey of Canada [9].

Linkowy strimer sejsmiczny wykonany przez Geological Survey of Canada przeznaczony jest do pomiarów wzdłuż utwardzonych dróg (rys. 6). Urządzenie składa się z 48 metalowych podstawek o masie 3 kg każda, połączonych liną o słabej rozciągliwości. Odległość pomiędzy czujnikami może być dobrana w zależności od celu badań. Najczęściej wynosi od 0,75 m do 3 m. Na każdej podstawie umieszczone są trójskładowe geofony 30Hz. Rejestracja danych wykonywana jest za pomocą sześciu 24-kanalowych sejsmografów inżynierskich Geometrics Geode. Źródłem drgań jest wibrator umieszczony na pojeździe holującym. Wibrująca płyta o masie 140 kg pozwala uzyskać sygnał typu sweep zorientowany pionowo lub poziomo w paśmie częstotliwości od 10 do 550

Hz. Odległość pomiędzy punktami wzbudzenia zazwyczaj wynosi od 1,5 do 6 metrów. System umożliwia wykonanie 3,5 - 4 km profilu sejsmicznego dziennie (rys. 7).



Rys. 6. Pomiary landstreamerem w Montérégie, Quebec – Minivib holujący 48-kanalowy landstreamer 3C – a; zbliżenie na geofony zamontowane na podstawkach – b [20]

Fig. 6. Data acquisition with land streamer in Montérégie, Quebec – Minivib with 48 channel LS a); geophones mounted on stands b) [20]

#### 4. Porównanie konstrukcji wybranych strimerów sejsmicznych

LS różnią się źródłami sejsmicznymi, pojazdami do ciągnięcia, liczbą i rodzajem czujników, sposobem mocowania czujnika lub też transmisją danych. Porównanie takich przykładowych konstrukcji zawiera tabela 3.

LS różnią się konstrukcją oraz możliwością doboru parametrów pomiarowych w zależności od takich czynników jak: metoda pomiarów i ich zakres, zasięg głębokościowy i warunki terenowe.



Rys. 7. Pomiary landstreamerem 3C [20]

Fig. 7. Acquisition with 3C land streamer [20]

Tabela 3. Porównanie konstrukcji wybranych strimerów sejsmicznych (na podstawie [6])  
Table 3. Comparison of constructions of selected land streamers (based on [6])

Nazwa LS	Producent	Rodzaj konstrukcji	Mocowanie czujnika, podstawki	Źródło sejsmiczne	Transmisja danych	Liczba i rodzaj czujników	Pojazd do ciągnięcia
-	Illinois State Geological Survey	Linkowa, dwulinkowa	Wkręcane do podstawki	45 kg kafar lub 1 kg młot	Nieosłonięte przewody, „Geode”	24 pionowe geofony 40Hz lub 2x12 poziome geofony 14Hz	Samochód terenowy
LS-1	Geostuff	Taśmowa, parciana, wzmocniona kevlarem	Wkręcane do dwuczęściowej podstawki z Cr-Mn-Mo stop stali <sup>1)</sup>	41 kg kafar lub Betsy gun	Nieosłonięte przewody	Dowolna	Samochód terenowy
2)	ETH-Swiss Federal Institute of Technology Institute of Geophysics	Taśmowa, taśma gumowa	Samoorientujące głowice „gimbal”, podstawki stalowe, profilowane	Mini Vie	Ekranowany kabel geofonowy	96 geofonów, 28 Hz	-
3)	COWI, Lyngby	Linkowa, jednolinkowa	Samoorientujące głowice „gimbal”, podstawki stalowe, profilowane	Mini Vib II	Ekranowany kabel geofonowy	95 geofonów, w odstępach 1,25-2,5 m, 28 Hz	Samochód ciężarowy (Mini Vib II)
IGS <sup>4)</sup>	Geological Survey of Canada	Linkowa, dwulinkowa	połączenie kardanowe, podstawki stalowe, profilowane	Młot	Ekranowany kabel geofonowy	48 geofonów, z interwałem 2 m, 10-28 Hz	Samochód ciężarowy (MiniVib)
KGS <sup>5)</sup>	Kansas Geological Surveys Crew	Taśmowa- wąż (strzački)	połączenie kardanowe, ew. łącznik śrubowy, podstawki stalowe, profilowane	Młot, kafar	Ekranowany kabel geofonowy	48 geofonów, z interwałem 1-2 m, 4,5- 10 Hz	ATV
BAY GEOPHYSICAL <sup>6)</sup>	Geological Surveys, Japonia	Taśmowa, nylonowo-gumowa	wkręty śrubowe, podstawki stalowe, profilowane	Młot	Ekranowany kabel geofonowy	48 geofonów, z interwałem 0,3-1 m, 10-28 Hz	-
RAMBOLL <sup>7)</sup>	-	Taśmowa, parciana, sprzęt modułowy	połączenie śrubowe, podstawki stalowe, profilowane, waga 4 kg	Vibe lub wibrator Failin T1100	Ekranowany kabel geofonowy	Dedykowana metodycznie długość kanałów oraz mieszany interwał geofonowy- zmienna ilość geofonów, 10-28 Hz	Samochód terenowy

TYRENS <sup>8)</sup>	-	Taśmowa, syntetyczna	połączenie śrubowe, podstawki stalowe, profilowane	Młot	Ekranowany kabel geofonowy	24 geofony OYO/ Geospace, 4,5 Hz	Samochód terenowy
MONTANA-Tech – USA <sup>9)</sup>	-	Taśmowa, gumowa	połączenie kardanowe, podstawki stalowe/ gumowe, skręcane	MiniVibe, (na zmodyfikowanym Land Tamerze)	Ekranowany kabel geofonowy	24 geofony	Samochód terenowy+ATV
SNOWSTREAMER-CALGARY	-	Taśmowa, parciana	połączenie śrubowe (Galperiniego), podstawki stalowe, profilowane	Młot	Ekranowany kabel geofonowy	Geofony 28 Hz	-
-	Kyoto University	Linkowa, dwulinkowa	-	Młot	Ekranowany kabel geofonowy	Geofony 4,5 Hz OYO	-
CALGARY CREWES <sup>10)</sup>	-	Taśmowa, parciana	połączenie śrubowe, podstawki stalowe, profilowane, taśmy metalowe, wypustki stabilizujące	IVI- Envirovibe	Ekranowany kabel geofonowy	20 geofonów, 10 Hz, 3C	ATV
GSC	Geological Survey of Canada	Linkowa, dwulinkowa	podstawki stalowe, profilowane	Minivib IVI (140 kg)	Ekranowany kabel geofonowy	Zmienna liczba odbiorników (3C) oraz ich rozstaw	Samochód ciężarowy (MiniVib)
-	ETH-Institute of Geophysics	-	połączenie kardanowe	Młot, 5 kg	Ekranowany kabel geofonowy	96 geofonów, 30 Hz	Samochód terenowy
-	Terra Australis Geophysics Pty Ltd	Taśmowa, parciana	połączenie kardanowe, podstawki stalowe, profilowane	Kafar, 50 kg z wysokości 1 m	Ekranowany kabel geofonowy	24 geofony, 4,5 Hz	Samochód terenowy
-	Illinois State Geological Survey	Linkowa, dwulinkowa	podstawki stalowe, profilowane	Kafar, 15-50 kg	Ekranowany kabel geofonowy	Geofony 40 Hz	Samochód terenowy
11)	Uppsala Universitet	Taśmowa, parciana	podstawki stalowe, profilowane	Młot, kafar lub wibrator	Ekranowany kabel geofonowy/ bezprzewodowo	Geofony DSU3	
LS 12/ LS 24	GeoSym	Taśmowa, parciana	podstawki stalowe, profilowane	wibrator	Ekranowany kabel geofonowy	-	-

Uwagi (opracowane na podstawie [6]):

- 1) Maksymalna długość układu pomiarowego wynosi około 400 m, skutkuje to słabą sterownością; wymagany jest pojazd o dużym uciążu; użycie jednego źródła pozwala tylko na pozyskiwanie danych sejsmiki refleksyjnej.
- 2) Wymagany jest pojazd o dużym uciążu; użycie jednego źródła pozwala na zastosowanie schematu przetwarzania z sejsmiki morskiej.
- 3) Wymagany jest pojazd o dużym uciążu; brak danych o wytrzymałości otuliny strimera sejsmicznego; znaczne wydłużenie czasu naprawy w terenie.
- 4) Nie jest wymagany pojazd o dużym uciążu; użycie jednego źródła pozwala na zastosowanie metodyki refleksyjnej bądź MASW; brak informacji o stosowaniu drugiego źródła dla pomiarów refrakcyjnych; geofony są mocowane bardzo blisko powierzchni gruntu.
- 5) Wymagany jest pojazd o dużym uciążu; użycie jednego źródła pozwala na zastosowanie schematu znanego z przetwarzania danych sejsmiki morskiej; wpływ silnika napędzającego wibrator na jakość danych jest nieznan; brak zabezpieczeń przed ścieraniem kabli geofonowych; stosowanym źródłem sejsmicznym jest wibrator Vibe (waga 3,5 t, wytwarzany sweep ma częstotliwości od 10 do 550 Hz) lub Failin T1100 (waga 12 ton, wytwarzany sygnał o częstotliwości od 10-120 Hz).
- 6) Wymagany jest pojazd o dużym uciążu; konstrukcja nie posiada żadnych zabezpieczeń, co może skutkować częstymi awariami sprzętu (np. okręcającymi się geofonami).
- 7) Wymagany jest pojazd o dużym uciążu; brak danych o dotychczasowej efektywności urządzenia i jakości pozyskiwanych danych.
- 8) Wykorzystywanym źródłem sejsmicznym, a jednocześnie pojazdem do uciążu strimera sejsmicznego jest IVI- Envirovibe o masie 8200 kg, generującym sygnał o częstotliwości 10 – 250 Hz.

## 5. Podsumowanie

Strimery sejsmiczne znajdują zastosowanie przede wszystkim w badaniach podłoża gruntowego szlaków komunikacyjnych. Pomiaru takimi systemami można również wykonywać w innych celach badawczych, lecz w warunkach terenowych o płaskim, lub słabo zmiennym ukształtowaniu. Przykładem takiego zastosowania są obwałowania lub większe powierzchnie terenu przeznaczone pod budowę wielkogabarytowych obiektów budowlanych.

Obecnie rozwój konstrukcyjny strimerów sejsmicznych zmierza w kierunku ergonomii pracy systemu oraz poprawienia parametrów wpływających na zwiększenie stosunku sygnału użytecznego do szumu.

W badaniach sejsmiki inżynierskiej, tam gdzie jest to możliwe, coraz częściej stosowane są strimery sejsmiczne zamiast klasycznych geofonów wbijanych do gruntu. Postęp technologiczny powoduje, że uzyskiwane wyniki mają coraz

lepszą jakość i są osiągnięte przy mniejszym nakładzie pracy i mniejszych kosztach.

Obecne stadium rozwoju strimerów sejsmicznych pozwala na montaż wielu rodzajów czujników i wykorzystanie wielu rodzajów źródeł w badaniach inżynierskich. O przydatności strimerów sejsmicznych w badaniach sejsmicznych świadczy coraz większa liczba produkowanych systemów o różnych konstrukcjach przeznaczonych do różnych celów badawczych.

## Literatura

1. Eiken O., Degutsch M., Riste P., Rod K., Snowstreamer: An efficient tool in seismic acquisition. First Break 7 (1989), 374 - 378.
2. Einarsson J., Brooks D., Bennett G., White A.: Seismic survey on the Beaufort Sea Ice. Geophysics 42 (1977), 148.
3. Inazaki T.: High-resolution S-wave reflection survey in urban areas using a woven belt type land streamer. Near Surface 2004, Expanded Abstracts, Paper A016.

4. *Kruppenbach J.A., Bedenbender J.W.*: Towed land cable. U. S. Patent 3 923 121. 1976
  5. *Link C., Goldberg W.*: Seismic Refraction Tomography using a Landstreamer for Estimating Void Volume in a Reclamation Project. Mat. Konf. 24rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2011, 245 - 255.
  6. *Matula R.*: System sejsmiczny dla potrzeb diagnostyki podłoża szlaków komunikacyjnych, Analiza techniczno-ekonomiczna, IGSMiE PAN, 2014 Kraków (praca niepublikowana).
  7. *O'Neill A., Safani J., Matsuoka, T.*: Landstreamers and surface waves: Testing and results. Mat. Konf. 19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006, 1065 - 1074.
  8. *Pugin A. J. M., Larson T. H., Sargent S.*: 3.5 km/day of high resolution seismic reflection data using a landstreamer. Mat. Konf. 17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2004, 1380 - 1388.
  9. *Pugin A. J. M., Pullan S. E., Duchesne M. J.*: Regional hydrostratigraphy and insights into fluid flow through a clay aquitard from shallow seismic reflection data. The Leading Edge 28(10) 2013, 1248 – 1261.
  10. *Pugin A.J. M., Pullan S.E., Hunter J.A., Oldenborger G.A.*: Hydrogeological prospecting using P- and S- wave landstreamer seismic reflection methods, Near Surface Geophysics 2009, Vol 7 Number 5-6, 315 - 327.
  11. *Pugin A.J.M., Pullan S.E., Hunter J.A.*: Multicomponent high-resolution seismic reflection profiling. The Leading Edge 2009, Volume 28, Issue 10, pp. 1182 - 1265.
  12. *Pugin A.J.M., Sargent S. Hunt L.*: SH and P wave seismic reflection using landstreamers to map shallow features and porosity characteristics in Illinois. Mat. Konf. SAGEEP 2006, 1094 - 1109.
  13. *Pullan S.E., Pugin A.J.M., Hunter J.A., Cartwright T., Douma M.*: Application of P-wave seismic reflection methods using the land-streamer/minivib system to near-surface investigations. Mat. Konf. 21st EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2008, 614 - 625.
  14. *Suarez G.M., Stewart R.R.*: Side-by-side comparison of 3-C land streamer versus planted geophone data at the Priddis test site. CREWES Research Report 2008, Volume 20, 1 - 16.
  15. *Suto K., Scott B.*: 3D treatment of MASW data for monitoring ground improvement at an uncontrolled fill site. ASEG Extended Abstracts 2009, Volume 1, 1 - 6.
  16. *Svenson M.*: Small scale use of land streamer and MASW- technique for soil mechanical and environmental purposes – Three case studies from Sweden. SAGEEP'06, Seattle Washington, USA, 2-6 April 2006, 1000 - 1011.
  17. *van der Veen M., Green A.G.*: Land-streamer for shallow seismic data acquisition: Evaluation of gimbal mounted geophones. Geophysics, Volume 63, 1408 – 1423.
  18. *van der Veen M., Spitzer R., Green A. G., Wild P.*: Design characteristics of a seismic land streamer for shallow data acquisition. Mat. Konf. 61th EAGE Conference & Exhibition 1999, Expanded Abstracts. 4 - 41
  19. *Vangkilde-Pedersen T., Dahl J.F., Ringgaard J.*: Five years of experience with landstreamer vibroseis and comparison with conventional seismic data acquisition. Mat. Konf. 19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006. 1086 - 1093.
  20. [www.geometrics.com](http://www.geometrics.com)
  21. [www.gehriginc.com](http://www.gehriginc.com)
  22. [www.gamut.to.it](http://www.gamut.to.it)
  23. [www.pega.it](http://www.pega.it)
  24. [www.geostuff.com](http://www.geostuff.com)
  25. [www.geosym.de](http://www.geosym.de)
- 
-



# Implementation and application of ultralight vibrator in shallow seismic acquisition

## Zastosowanie wibratora inżynierskiego w badaniach sejsmicznych przypowierzchniowej części ośrodka geologicznego



*Mgr inż. Rafał Matuła\**



*Mgr inż. Klaudia Czaja\**

**Abstract:** Optimal, subsurface imaging, especially in the areas with strong subsurface attenuation is still a challenge for shallow seismic techniques. The main problem connected with it is using an impact source whose energy is rapidly absorbed by gradual ground consolidation around the baseplate. This phenomenon has a great influence on data recording and its quality. The only solution is to send portions of seismic energy for longer time in the selected frequency spectrum, which can be transmitted through subsurface material. This paper presents an ultra-light, air-pressure vibrator as the answer to seismic needs connected with avoiding low effectiveness of impact sources in case of high near-surface heterogeneity. Experimental approach to the survey in space-limited urban area with high-level subsurface material disintegration is presented.

**Treść:** Wyzwaniem dla płytkich technik sejsmicznych jest zobrazowanie struktury przypowierzchniowej na obszarach o szczególnie dużym tłumieniu fal sprężystych. Głównym problemem z tym związanym są ograniczenia stosowania uderzeniowego źródła fali, którego energia jest szybko absorbowana przez grunt wokół płyty podkładowej. Zjawisko to ma bardzo znaczący wpływ na jakość rejestrowanych danych. Jedynym rozwiązaniem jest generowanie fali sejsmicznej przez dłuższy czas i w określonym przedziale częstotliwości. W artykule przedstawiono zastosowanie wibratora akustycznego jako źródła sejsmicznego o odpowiedniej wydajności, w przypadku badania strefy przypowierzchniowej o niejednorodnej budowie. Przedstawiono także eksperymentalne podejście do badań sejsmicznych na ograniczonej, zabudowanej przestrzeni miejskiej.

### **Key words:**

*seismic source, shallow seismic, seismic measurements in the urban area*

### **Słowa kluczowe:**

*źródła sejsmiczne, sejsmika przypowierzchniowa, pomiary sejsmiczne na obszarze zabudowanym*

## **1. Introduction**

The vibroseis device was invented and successively developed by John Crawford, Bill Doty, and Milford Lee in the early 1950s, mainly for oil explorations [4]. An interesting summary of use vibrators and other seismic sources in engineering seismic applications was presented by [8]. It turned out that, vibrators had several key advantages over explosive sources, which were commonly used at the very beginning of seismic surveys. Most important feature of vibrator was allowing precise control over the seismic signal sent into the ground. The frequencies at the sweep band could be adjusted easily. In this way the total length of the generated sweep and the amount of source energy, which is sending into the ground,

is controlled. Furthermore, the shape of the seismic wavelet might be changed by monitoring the time spent sweeping at each frequency for whole range of sweep spectrum. Moreover, group of vibrators were able to work simultaneously, which makes it possible to use more than one vibrator per record to enlarge the output energy, eventually to combine them spatially into source array to improve the signal-to-noise ratio (S/N). Thus, the vibrator quickly stayed the most universal seismic source, which provides more acquisition options than are gettable with an impact source. Additional advantage of vibroseis, which must be underline, is the ambient/incoherent noise removal by the correlation process [4].

Vibroseis is a general name for whole devices works as seismic signal generators. For today, they have many modifications, including rebuilding to very small and ultra-light forms. In this paper, light, loudspeaker-based one is presented.

\* ) AGH w Krakowie

Additionally, its application to shallow seismic investigation is shown.

## 2. Sweep generation and Klauder wavelet parameters

The emission and acquisition process using a vibratory source excited with sweep  $s(t)$  yields compression of long received signal to a short impulsive source-like record [9]

$$c(t) = R(t) * Q(t) * F(t) * F(-t) = R(t) * Q(t) * k(t) \quad [1]$$

where  $R(t)$  is the earth reflectivity function,  $Q(t)$  represents the ground absorption,  $F(t)$  is the reference signal (usually the ground force or its derivate) and  $k(t)$  is autocorrelation of this signal, known as Klauder wavelet

$$k(t) = F(t) * F(-t) \quad [2]$$

The wavelet  $k(t)$  acts as equivalent source signature and directly states the quality of seismic image. The signal  $F(t)$  emitted into the ground is never the same as the signal  $s(t)$  used to pilot the source because of the vibrator mechanical

properties and of source-to-ground-coupling. The dependency  $s(t) \rightarrow F(t)$  may be expressed using the transfer function  $T(t)$ . Two different Klauder wavelets are distinguished: the “ideal”  $k_0(t)$ , being the autocorrelation of sweep signal  $s(t)$  and the real  $k_F(t)$ , being the autocorrelation of the  $F(t)$  and:  $F(t) = s(t) * T(t)$  [9].

Assuming that the dependency  $s(t) \rightarrow F(t)$  is linear, it may be expressed in spectral domain using the coupling function  $C(f)$  [2]

$$C(f) = \frac{s(f)}{F(f)}$$

The most important Klauder Wavelet Parameters are bandwidth (B), central frequency ( $f_0$ ) and normalised bandwidth ( $B_n = B/f_0$ ). The higher  $B_n$  value the better signal quality (Fig.1).

## 3. Equipment

Portable vibrators are well known for their flexibility and are cost-effective. Their main advantage is the possibility to control the emitted signal which is not the case for impulsive

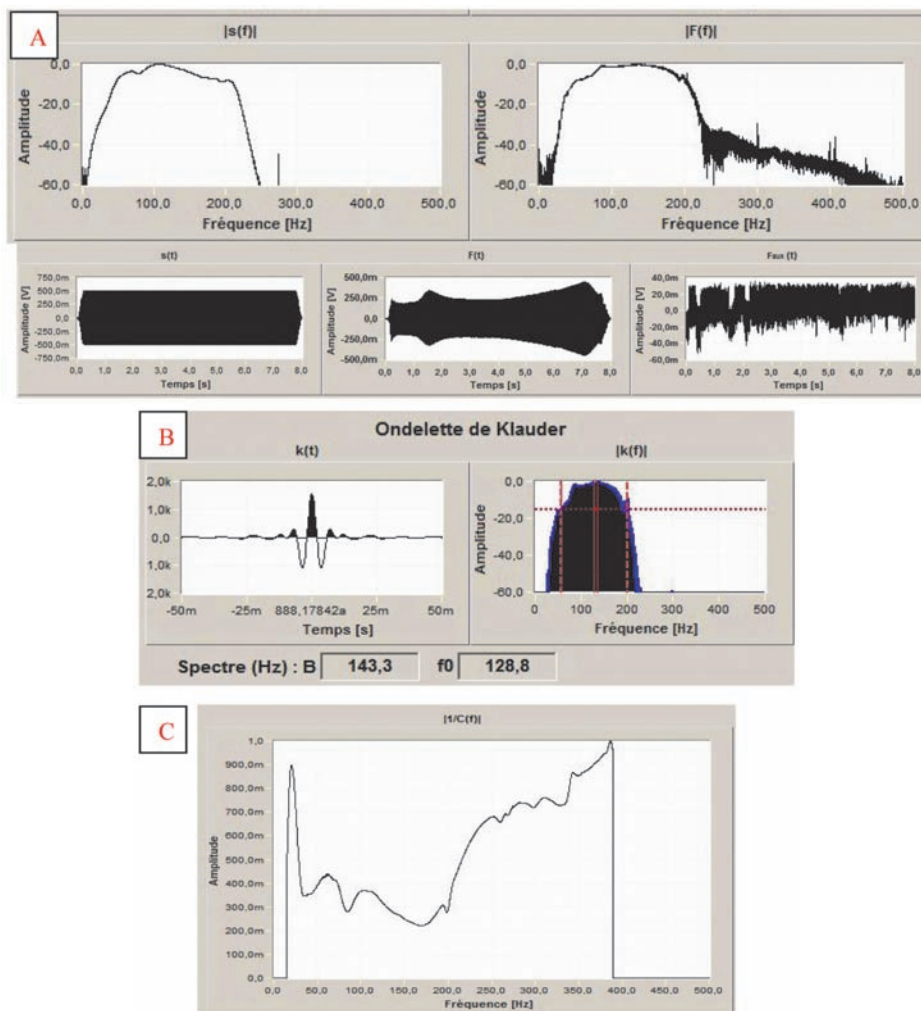


Fig. 1. A – an example of signal used as pilot  $s$  and signal emitted into the ground in frequency  $s(f)$ ,  $F(f)$  and time domain  $s(t)$ ,  $F(t)$ , B – Klauder wavelet with two parameters: bandwidth and central frequency, C - the coupling function for signal from fig. 1A

Rys. 1. A – przykład sygnału naprowadzającego i sygnał...

sources. Measurements were carried out with “Vib-PA” constructed at Ecole Centrale de Lille. “Vib-PA” is a prototype P-wave vibrator, made of a cylindrical steel frame housing the loudspeaker. In contrast to typical vibrators it does not use a base-plate for coupling to the ground. The vibrations of loudspeaker are transmitted to the ground by compression and decompression of air. This acoustic vibrator is powered by 700 W amplifier, its weight is 50 kg. A geophone placed close to the source is a reference signal source [3].

The special programme written in LabVIEW language by researchers from university Ecole Centrale de Lille was applied. This programme controls the vibrator, receives simultaneously the  $c(t)$ , determines automatically all Klauder Wavelet Parameters and compares them with the required value.

The following procedure in this programme has been applied. The site parameters (ground attenuation, layers, geometry) and the targets (required resolution) were set. The relation between Source Sweep Parameters, Klauder Wavelet Parameters and a given sweep  $s(t)$  is defined. The next step is emission of the proposed signal  $s(t)$ . Then the transfer function is determined during test emission and the compensation can be applied to  $s(t)$ . Afterwards the compensated  $s(t)$  is emitted and theoretically provides the expected Klauder wavelet [1].

**4. The aim of investigation and local geology**

Historically, region of North France was covered by chalk exploitation. For years many outcrops were appearing and successively reclaimed without any information about position of excavation. Lack of chalk in deposit/bed after extraction was fulfilled by unconsolidated clay-chalk mixture and other, available waste materials.

Underneath hard, silicosis chalk is present, dipping up to 25 m. This clay-chalk complex overlays the Marl and Limestone being outside of survey interests.

As it is exposed at Fig. 2, main refractor is connected with chalk complex, situated about 10 m depth. As it is shown on the right side of Fig.2, it can undulate in areas of historical chalk outcrops. In this case, any changes in elevation of ground in short time period, might be connected with rapid consolidation, as a result reaction of subsurface material for ambient, urban related vibrations.

For this reason an image of top of silicosis chalk layer must be performed. Its hypothetical variation in depth was an indicator of previous mine activity because natural, geological model is regularly layered.

**5. Measurements**

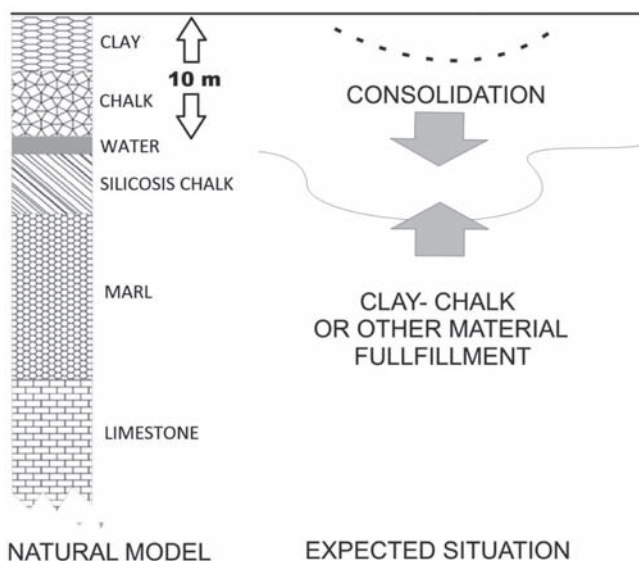
Seismic acquisition was extremely focused on determining any changes of elevation and estimated P-wave velocity of buried chalk complex. In comparison to other similar surveys, measurements conditions were difficult, because of totally disintegrated structure of subsurface material and limited investigation space. Surveys were carried out in azimuthal schema, fitted to in-field conditions. The 28 Hz geophones, were laid out at regular, 1m intervals, in cross-line pattern is shown in Fig.3. 48- channels seismograph, StrataView was used to record seismic data. Each seismic spread had a 24 active channels during acquisition. Measurements the first arrivals of the refracted energy were conducted firstly at the end of each seismic spread L1 and L2. In consequence, refraction blind zone with dominating direct wave, was estimated as a value of approximately 7 m. Respectively offset of remote sources was define as compromise between methodologically needs and available space-yellow line at Fig. 3. Used 10 m distance from extreme geophones was enough to preserve and observe refraction arrivals on every active receivers.

The generated disturbance was created by ultra-light, speaker-based vibrator, which was more adequate to avoid subsurface attenuation and near-source heterogeneity. At the stage of projecting surveys it was known that using heavy impact sources would be problematic and not effective to solving discussing problem. In case, when subsurface is disintegrated or extremely changed, great amount of massive sledge-hammer energy goes to ground consolidation around base plate. For described condition, well-known relation that heavy source introducing into ground gives strong refraction signal, wouldn't work properly.

Application of long sweep was similar to releasing enormous energy per one shot and gave more possibilities to manipulating emanating seismic signal. Furthermore, not every frequencies were preferred to travel cross the subsurface medium. Because of this reason sweep was corrected due to this assumption, as was mentioned in previous sections.

After many testes the sweep based on the Hamming window, with frequencies from 10 to 250 Hz and 8 seconds long was chosen as the best one for these conditions.

Additionally, vibrator grouping was carried out at remote source positions. For this purpose, small round area -centered around distant source position was chosen. Figure 3 describes mentioned idea. Each record obtained for three, showed vibrator localization was summed to final record. The method of external geophones was not applied because of existence blind zone and less important refraction information than from remote sources.



**Fig. 2. In the left hand side general a model of the local geology, right part of picture represents possible underground condition and general aim of investigations**

**Rys. 2. Ogólny model lokalnego przekroju geologicznego...**

This section illustrates a brief view of general geological model of survey area. As it is presented at Fig. 2, clay is the first layer under the surface. Its thickness varies from 2 to 3 meters. Beneath, up to 10 m follows poor-quality and highly disintegrated chalk (mud-formed) with water admixture.

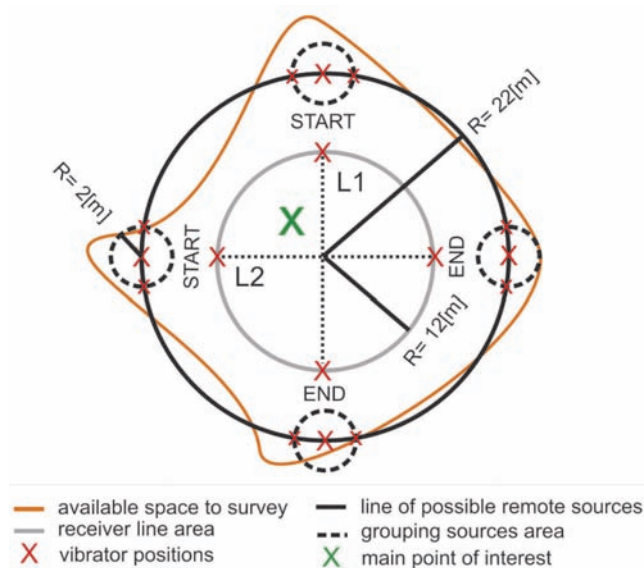


Fig. 3. Acquisition schema used during surveys  
Rys. 3. Schemat dla...

## 6. Interpretation and results

Interpretation of obtained data was based on the Generalized Reciprocal Method by Palmer [6,7]. Simply, one refractor model was considered. Forward and reverse travel times was processed using standard GRM function from Seismic Unix Package. Figure 4 A and B presents interpretation results for L1 and L2 line. As it is shown velocity in the weathering zone was taken as an average from clay and poor quality chalk velocities- equal to 450 m/s [5]. Velocity in the refractory varies slightly around 1800 m/s. Fig. 4 A

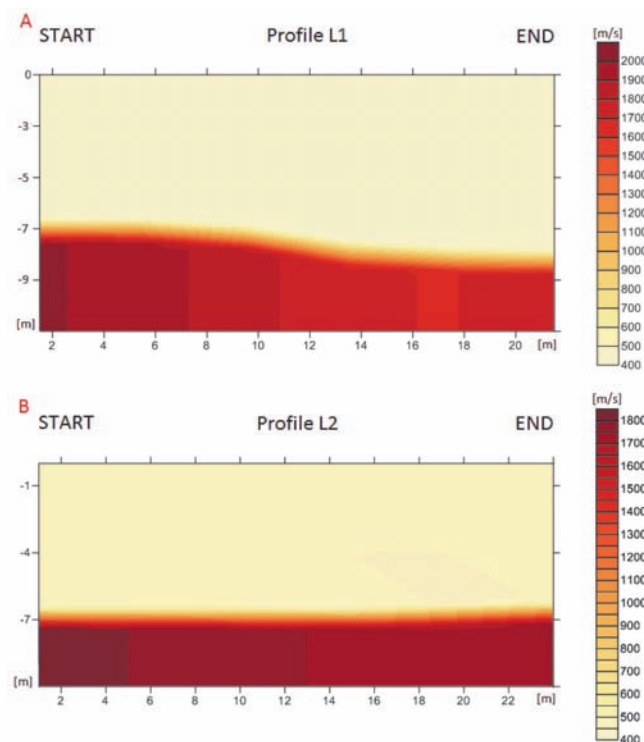


Fig. 4. Estimated velocity models exposed in depth domain, respectively, for L1 (A) and L2 (B) seismic spreads  
Rys. 4. Szacowane modele prędkości ze względu...

shows gently dipping surface of refractor - changes no greater than 10%. Model in Fig. 4B is regularly layered without any significant disturbances. Velocity in bedrock is similar to estimated on previous subsurface model and almost constant at all offsets range. Values of velocities in range from 450 to 1700 m/s are connected with interpolation tool used to graphical expositions of results. Both models are convergent in depth as well as velocity domain. Application of crossed receiver lines geometry remarkably reduces seismic ambiguity and obviously proves obtained models. No rapid fluctuation in P-wave velocity and shape of bedrock suggests that extracted model is generally natural. Local changes in subsurface morphology has no connection with geological discontinuities. Refraction first breaks were observed constantly along offset, so avoiding any bedrock interruption during interpretation is very low.

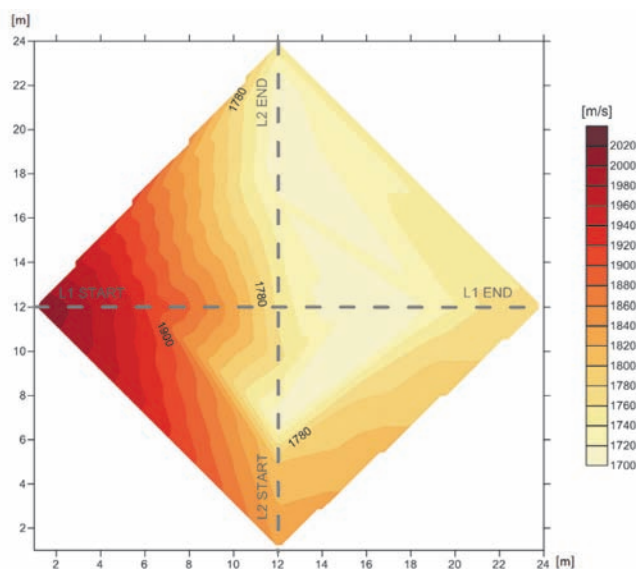


Fig. 5. Velocity distribution on refractor surface  
Rys. 5. Rozkład prędkości na...

Figure 5 shows interpolated velocity distribution form line L1 and L2. In this view it is possible to observe distinction into two areas with differences in velocity, approximately equal to 250 m/s. Hypothetically this fact can be connected with changes in compaction (or silica content), but observing slightly dipping refractor, probably water content must be taken into consideration. Finally must be state that silicosis chalk layer imaged in hereby articles differs from pure chalk due to its velocity. Nominal refraction velocity for mentioned sediments is about 2300 m/s [6]. But this case describes a boundary between highly disintegrated chalk – related complex with overburden silica – enriched chalk. It has physical meaning and stay with quite accurate correlation with general model showed in Fig. 1. Estimated, geophysical model in comparison to drilled/ geological one in Fig. 2 is shifted on about 1m, what means that enough acoustic impedance between layers to observe refraction, appears earlier than it should be expected from geology.

### Acknowledgements

Acknowledgements for Professor Bogdan Piwakowski form Ecole Centrale de Lille for providing equipment and consultations.

## References

1. *Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L.*: Sweep generation and emission for portable vibratory sources: a methodological approach, Extended Abstract, Near Surface, Finland 2006.
  2. *Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L.*: Optimising the Sweep Generation and Emission for Portable Vibratory Sources, Extended Abstract, 72<sup>nd</sup> EAGE Conference & Exhibition, Spain 2010.
  3. *Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L., Safinowski P.*: High resolution seismics investigation in salt mining context. Part I: Comparison of impulsive and vibratory seismic sources, (unpublished report)
  4. *Krehl P.*: History of Shock Waves Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference, Springer, Berlin 2009.
  5. *Mavko G.*: Conceptual Overview of Rock and Fluid Factors That Impact Seismic Velocity and Impedance, Stanford Rock Physics Laboratory, [<https://pangea.stanford.edu/courses/gp262/Notes>]
  6. *Palmer D.*: Uncertainty in Refraction Inversion – a GRM Strategy, 2011.
  7. *Sompotan A.F., Pasasa L.A., Sule R.*: Comparing models GRM, Refraction Tomography and Neural Networks to Analyze Shallow Landslide, ITB J. ENG Sci., vol. 43.3, 2011, 161-172
  8. *Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz.*: Źródła drgań stosowane w sejsmice inżynierskiej. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w druku).
  9. *Yilmaz O.*: Seismic Signal Processing, Society of Exploration Geophysicists 1987.
- 
-

# Zabezpieczenie komory Ferdinand d'Este jako działanie ograniczające zagrożenie wodne przy północnej granicy wielickiego złoża soli

Securing the Ferdinand d'Este Chamber as an operation limiting water hazard at the northern boundary of the Wieliczka salt deposit



Dr hab. inż. Kajetan d'Obyrn \*,\*\*)



Mgr inż. Jan Kucharz \*)

**Treść:** W artykule przedstawiono sposób zabezpieczenia jednej z komór w Kopalni Soli „Wieliczka”. Komora Ferdinand d'Este znajduje się w rejonie zaliczonym do III stopnia zagrożenia wodnego, przy północnej granicy złoża. Kopalnia Soli „Wieliczka” prowadzi systematyczne prace ograniczające zagrożenie wodne i zawałowe szczególnie przy północnej granicy złoża, poprzez zabezpieczenie lub likwidację komór w celu stabilizacji górotworu. W przypadku komór zabytkowych, których nie można zlikwidować wykonywana jest analiza geomechaniczna i hydrogeologiczna, a na ich podstawie powstaje projekt zabezpieczenia komory. Zabezpieczenie komory Ferdinand d'Este jest przykładem planowanych prac obejmujących zarówno obudowę kotwioną, obudowę podporową oraz szczelną likwidację, co stanowi przykład kompleksowego podejścia do występujących problemów hydrogeologiczno-górnicych w zabytkowej kopalni soli.

**Abstract:** This paper presents a procedure for securing one of the chambers of the “Wieliczka” Salt Mine. The Franz Ferdinand Chamber is located in a third degree water hazard zone at the northern boundary of the Wieliczka salt deposit. The “Wieliczka” Salt Mine conducts systematic works limiting water and cave-in hazards especially at the northern boundary of the salt deposit securing and liquidating chambers for the purpose of stabilizing the rock mass. Geomechanical and hydrogeology analyses are performed in the case of historic chambers that cannot be liquidated. Chamber-securing procedures are developed on the basis of the analyses results. Securing the Franz Ferdinand Chamber is an example of planned works including rockbolt supporting, chock supporting and tight-sealed liquidation being an example of a comprehensive approach to hydrogeology and mining problems that may arise in historic salt mines.

## Słowa kluczowe:

kopalnia soli, zagrożenie wodne, zagrożenie zawałowe, stabilizacja górotworu, zabezpieczenie komory

## Key words:

salt mine, water hazard, cave-in hazard, rock mass stabilization, securing the chamber

## 1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ponad siedmiu wieków w Kopalni Soli „Wieliczka” wykonano około 2 400 wyrobisk komorowych połączonych układem wyrobisk chodnikowych o długości ok 245 km, zlokalizowanych od poziomu I do poziomu IX, tj. od ok. 50 do 327 m p.p.t. Część tych wyrobisk wyeksploatowano przy północnej granicy złoża, w rejonach zaliczonych

do III stopnia zagrożenia wodnego. Wyrobiska położone przy północnej granicy złoża w przypadku utraty stateczności mogą spowodować powstanie obwałów i szczelin, a to z kolei może przyczynić się do uruchomienia dopływu wód pozazłożowych do kopalni. Wyrobiska te w zdecydowanej większości przewidziano do likwidacji. Jednak część komór stanowią wyrobiska zabytkowe, które nie mogą zostać zlikwidowane. Zabytkowość wyrobiska powoduje konieczność wykonania prac zabezpieczających, odbudowujących lokalnie statykę górotworu. Przykładem takiego wyrobiska jest komora Ferdinand d'Este.

\*) Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., \*\*) Politechnika Krakowska

## 2. Lokalizacja i stan techniczny komory Ferdynand d'Este

Komora Ferdynand d'Este zlokalizowana jest na III poziomie Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. (rys. 1) w rejonie szybu Regis i poprzeczną Ferdynand d'Este datowaną na lata 30. XIX stulecia (1834 r.) łączy się z komorą Ferdynand, a równoległym do granicy złoża chodnikiem z poprzeczną Wałczyn północ, wykonanym w latach 70. XX wieku (1976 r.). Wtedy komory te wraz z komorą Wałczyn zaadoptowano na cele magazynów dla potrzeb Ministerstwa Kultury i Sztuki – w wyrobiskach tych miały być przechowywane w wypadku konfliktu zbrojnego zbiory muzealne [7]. Przebudowane w latach 70. XX wieku poprzecznie Wałczyn północ, Ferdynand d'Este oraz łączący je chodnik zabezpieczono obudową ŁP, którą pokryto torkretem. Komory znajdują się w rejonie niemetanowym. Odległość omawianych komór od szybu Regis wynosi około 240 m.

Komora Ferdynand d'Este ma kształt prostopadłościanu o wymiarach: długość ok. 48 m, szerokość ok. 10,5 m i wysokościach ok. 11,5 m w części centralnej oraz wschodniej i ok. 10 m w części zachodniej. Na wlocie południowym do komory zabudowane są łuki ŁP (rys. 2), pokryte betonem. Na ociosie wschodnim komory, na wysokości 5 m znajduje się półka solna podbudowana konstrukcją drewnianą (kaszt + wypełnienie pod strop drewnem z odzysku). W południowo-wschodnim narożniku komory oraz północno-wschodnim znajduje się tzw. bono (konstrukcja drewniana ze stojaków i wypełniających je desek) o zróżnicowanym stanie technicznym (rys. 3).

Pomiędzy wlotem północnym i południowym do komory, na jej spągu znajduje się gruz solny pochodzący ze zniszczonego płaszczu solnego ociosów. Wlot do komory od strony północnej i cały chodnik (rys. 4) uległ całkowitej destrukcji i wymagać będzie szelnej likwidacji.

W północnej części komory na długości ok. 14 m w kierunku zachodnim, na ociosie północnym w jego części podstropowej nastąpiło zniszczenie skorupy solnej, której fragmenty leżą na spągu. Również w narożniku południowo-wschodnim, nad wlotem południowym do komory widoczne są odsłonięcia skał płonnych. Na ociosach komory i stropie widoczne są ślady wtórnej krystalizacji soli świadczące o istnieniu wycieków w komorze.



Rys. 1. Wycinek mapy poziomu III KS „Wieliczka” w rejonie komór Ferdynand d'Este

Fig. 1. Section of map of level III in “Wieliczka” Salt Mine in the area of Ferdinand d'Este chambers



Rys. 2. Wlot do komory Ferdynand d'Este. Widoczna korozja łuków ŁP i wypełnienie obudowy chodnika betonem natryskowym, fot.: A. Maj [11]

Fig. 2. inlet to Ferdinand d'Este chamber. Visible corrosion of arch and filling of the gallery lining with shotcrete, photo: A. Maj [11]



Rys. 3. Ocios wschodni, komora z półką solną podpartą obudową drewnianą, fot.: A. Maj [11]

Fig. 3. Eastern side wall of the chamber with salt shelf supported by timber lining, photo: A. Maj [11]



Rys. 4. Destrukcja ociosu północnego komory i chodnika w kierunku północnym, fot.: A. Maj [11]

Fig. 4. Destruction of the Northern side wall of the chamber and wall towards the North, photo: A. Maj [11]

### 3. Budowa geologiczna górotworu w najbliższym otoczeniu komór Ferdinand d'Este i Ferdinand

Wyroby w otoczeniu komory Ferdinand d'Este zostały wykonane w utworach bryłowej partii złoże Wieliczka, wykształconej w postaci brył soli zielonych - typowych ZBt oraz witrażowych ZBw, nieregularnie rozmieszczonych w skałach płonnych - rozsypliwych, zlustrowanych ilowcach marglistych i zubrach [5]. W skałach płonnych spotykane są egzotyki skał fliszu karpackiego - bloki szaro-kremowych piaskowców oraz pstrych ilowców. Rozwarstwienia skał zostały wtórnie zasklepione solami włóknistymi [10].

Według rozpoznania geologicznego z lat 70. XX wieku granicę złoże stwierdzono w chodniku biegnącym z komory Ferdinand d'Este, będącym przedłużeniem poprzeczni Ferdinand d'Este. Obecnie końcówka tego chodnika jest częściowo w stanie zawałowym i wypełniona urobkiem, zatem weryfikacja tej informacji nie jest możliwa bez wykonania prac rozpoznawczych-górnich. Komory Ferdinand d'Este i Ferdinand zostały wyeksploatowane w bryłach soli zielonej typowej ZBt (rys. 5.).



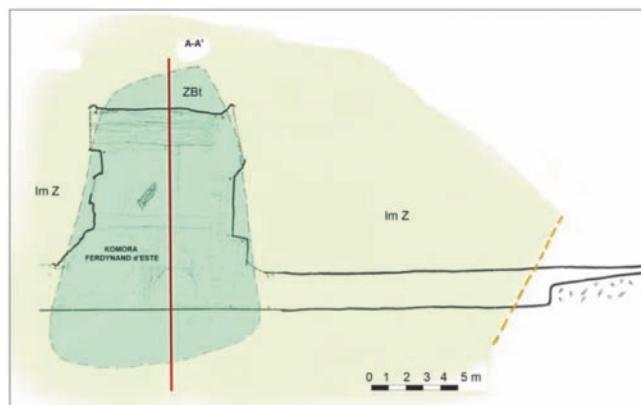
Rys. 5. Mapa geologiczna otoczenia komór Ferdinand d'Este i Ferdinand [2]

Fig. 5. Geological map of the surrounding of Ferdinand d'Este and Ferdinand chambers [2]

Bryła komory Ferdinand d'Este umiejscowiona jest w przygranicznej partii złoże, jej dłuższa oś rozciąga się na kierunku NWW-SEE. Bryła ta jest pochylona w kierunku północnym pod kątem około 45°. Jej wschodnią część rozpoznano podczas prac związanych z wykonaniem chodnika łączącego komorę z poprzeczną Wałczyn pfn. Podczas tych prac odsłonięto około 10 m bryły soli zielonej typowej ZBt, w której wyeksploatowano główne wyrobisko.

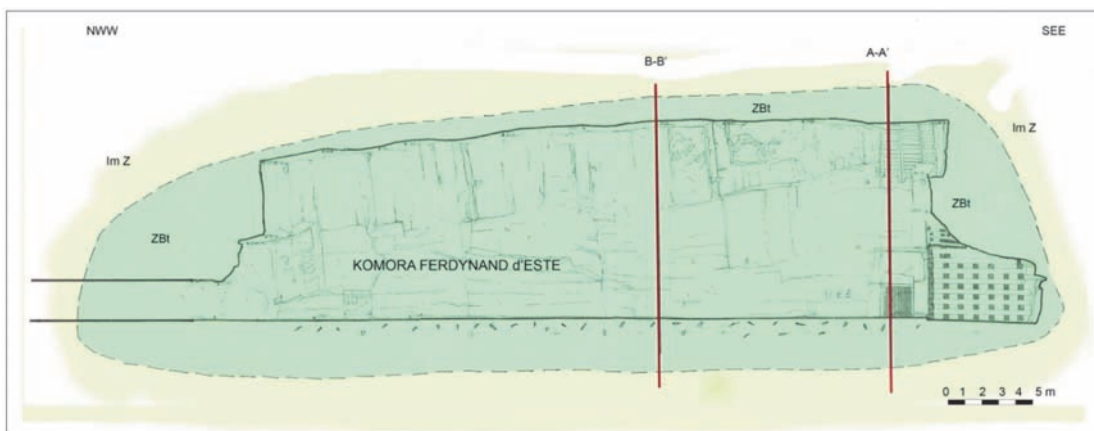
Zarys bryły komory przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Grubość skorupy solnej w stropie i w spągu wyrobiska została wyinterpretowana, aby ją potwierdzić należy wykonać wiercenia kontrolne (bezrdzeniowe, profilowanie otworów z uzyskanych zwiercin). W ociosach komory odsłaniają się skały płonne – ilowce margliste i zubry. Nad wejściem do komory z poprzeczni Ferdinand d'Este oraz w jej przedłużeniu w kierunku na północ widoczne są zaszalowania - obudowane drewnem odsłonięcia skał płonnych. W ociosie południowym wyrobiska, w jej środkowej partii, także widoczne są osłonięcia skał płonnych.

Charakterystyczną cechą brył soli zielonych typowych ZBt są miąższe na kilka centymetrów przewarstwienia, tzw. „soli jarczystych”, czyli warstewki białych, rozsypliwych soli. Na nich tworzą się pęknięcia i rozwarstwienia soli. Obwał skały solnej obserwowany w rejonie wlotu do komory poprzeczni Ferdinand d'Este powstał na bazie tych przewarstwień.



Rys. 6. Przekrój geologiczny A-A'. Zielonym kolorem oznaczono bryłę soli, której eksploatacja stworzyła komorę Ferdinand d'Este. Żółto-zielony kolor oznacza zuber solny o podwyższonej zawartości soli [2]

Fig. 6. Cross-section A-A'. Green colour indicates a lump of salt whose exploitation has formed the Ferdinand d'Este chamber. Yellow-green colour indicates the salt rock with increased content of salt [2]



Rys. 7. Przekrój geologiczny C-C, oznaczenia jak na rys. 7 [2]

Fig. 7. Geological cross-section C-C, designation as in fig. 7 [2]



#### 4. Warunki hydrogeologiczne

Komora Ferdynand d'Este znajduje się w partii złoże zaliczonej do III stopnia zagrożenia wodnego [8], [11]. Rozpatrywana partia górotworu zlokalizowana jest w strefie przylegającej do północnej granicy złoże z utworami chodenickimi, stanowiącymi największe zagrożenie wodne dla kopalni. Komorę wyeksploatowano w obrębie górnej, bryłowej partii złoże. Złoże bryłowe, ze względu na dominującą w nim obecność skał ilastych, w stanie nienaruszonym spełnia rolę naturalnej izolacji kopalni przed dopływem wód pozazłożowych ze źródeł stanowiących istotne jej zagrożenie, tj. z należących do neogenu warstw chodenickich (przyległych do złoże od północy) i z nadległego poziomu czwartorzędowego.

Bezpośrednią przyczyną migracji wód spoza złoże do kopalni jest naruszenie wyrobiskami północnej granicy złoże bądź zawalenie się komór wyeksploatowanych blisko tej granicy bądź zawalenie się komór wyeksploatowanych powyżej, aż do powierzchni terenu. W historii kopalni zanotowano wiele zawalów komór wyeksploatowanych na poziomie I i wyżej, dochodzących do powierzchni [4]. W wyniku tych zawalów powstały na powierzchni znacznych rozmiarów zapadliska, a do kopalni przedostawała się woda czwartorzędowa, poprzez spękania i szczeliny zruszonego górotworu. Komora Ferdynand d'Este znajduje się w bardzo bliskiej (6 – 10 m) odległości od północnej strefy granicznej. Nad rejonem komory nie występują żadne wyrobiska poeksploatacyjne ani wyrobiska pionowe (szyby, otwory podsadzkowe), a najbliższe usytuowane zapadliska dopowierzchniowe znajdują się w odległości większej niż 250 m na południowy wschód i na południe od komory Ferdynand.

W komorze Ferdynand d'Este nie ma zarejestrowanych wycieków, występują natomiast zjawiska wodne w postaci mocnego zawilgocenia skał solnych, jak i płonnych odsłaniających się zwłaszcza w przystropowych partiach komory oraz prowadzących do niej chodników. W okresach letnich obserwuje się występujące w komorze wycieki kropłowe, skoncentrowane przy wlocie do tej komory od strony zachodniej, rozciągające się wzdłuż jej osi – zgodnie z przepływem powietrza. Obecnie wycieki kropłowe w tej komorze wynoszą około 20 kropli/min. Podobne zjawisko ma miejsce w sąsiedniej komorze Wałczyn, gdzie strefa zawilgocenia i wycieków kropłowych (obecnie około 30 kropli/min) występuje na przedłużeniu chodnika Wałczyn północny. Natomiast północna końcówka poprzeczni Ferdynand d'Este na odcinku ok. 16 m od komory (tylko na takim odcinku jest drożna) jest sucha.

W przeszłości (w 1842 roku), w poprzeczni Ferdynand d'Este zarejestrowany był wyciek, ale informacje o nim są fragmentaryczne. Na mapach z 1935 roku zarejestrowany został pod nr 39, jego wielkość dopływu wynosiła  $0,86 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zawartość NaCl  $120 \text{ g}/\text{dm}^3$ . Następnie w latach 1943 – 1951 wielkość dopływu wahała się w przedziale  $0,004 - 0,091 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zawartość NaCl wynosiła  $312 \text{ g}/\text{dm}^3$ . Kolejna informacja dotycząca wycieku w poprzeczni Ferdynand d'Este pochodzi z roku 1967, kiedy to w rejestrze wycieków występuje pod nr VIII-10 i rejestrowany jest brak dopływu, a w roku 1971 stwierdzono zanik wycieku do poprzeczni Ferdynand d'Este.

Pomimo, iż w analizowanych komorach obecnie nie występują wycieki, a nad nimi górotwór nie został naruszony żadnymi wyrobiskami górniczymi, to rejon ich lokalizacji jest wyjątkowo niekorzystny z uwagi na bliskość północnej granicy złoże, z którą związane jest największe zagrożenie wodne dla kopalni. Obecnie w bliskim sąsiedztwie komory Ferdynand d'Este występują wycieki należące do grupy najważniejszych

wycieków w kopalni, a w przeszłości w bliskim sąsiedztwie ww. komór miała miejsce jedna z najważniejszych katastrof wodnych w Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. [5].

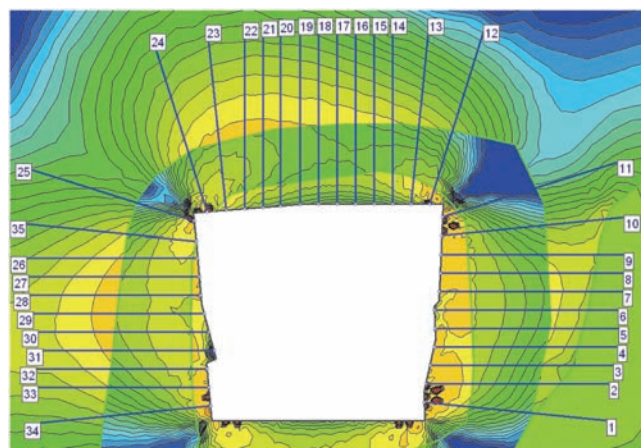
#### 5. Analiza geomechaniczna

Podstawą prac projektowych dotyczących zabezpieczenia zabytkowych komór w Kopalni Soli „Wieliczka” stanowią analizy geomechaniczne. Z uwagi na skomplikowaną budowę geologiczną złoże parametry geomechaniczne górotworu są bardzo zmienne. Powoduje to konieczność zindywidualizowanego podejścia do budowy modelu [6].

Ogólny stan stateczności komory ocenia się jako dobry, jednak stan wykonanych w tej komorze wzmocnień potwierdza potrzebę zastosowania wzmacniającej obudowy kotwowej. W celu optymalnego zaprojektowania prac zabezpieczających opracowano analizę geomechaniczną metodami numerycznymi dla komór Ferdynand d'Este [8], której celem było określenie rozkładu naprężeń i wytyczenia górotworu w ociosach i stropie komory oraz oszacowanie prędkości narastania maksymalnej siły osiowej w projektowanych kotwach wzmacniających (rys. 8).

Przy wykonywaniu obliczeń przyjęto kotwy w rozstawie  $1 \times 1 \text{ m}$  oraz następujące parametry projektowanych kotew wykonanych z włókien szklanych połączonych żywicą epoksydową (np. kotwy J64/27):

- długość żerdzi kotwiących 10 m,
- średnica żerdzi kotwiących 27 mm,
- moduł Younga szkła epoksydowego 80 GPa,
- nośność kotew 100 kN (przyjęta siła na wyrwanie kotwy z górotworu),
- siła niszcząca kotew 350-400 kN.



Rys. 8. Przekrój B-B komory z lokalizacją kotew i rozkładu naprężeń w górotworze po zabezpieczeniu komory [8]

Fig. 8. Cross-section B-B of the chamber with anchors and stress pattern in rock mass after securing the chamber [8]

Analiza prędkości narastania siły osiowej wykazała, że najszybciej narastać będzie siła osiowa w kotwi 25-ociosowej od strony południowej. Prędkość ta wynosi poniżej 10 kN na rok. We wszystkich innych kotwach maksymalna prędkość narastania siły osiowej maleje w funkcji odległości od ociosu i nie przekracza 5 kN na rok. Można oszacować, że graniczna wartość nośności kotwi zostanie po kilkunastu latach. Dla większości kotwi ten okres wydłuży się powyżej 25 lat. Biorąc pod uwagę wartość siły niszczącej kotwy, można szacować, że pierwsze zniszczenia (zerwania) w pojedynczych przekrojach kotwi nastąpią po czasie trzy razy dłuższym. Pęknięcie

zardzi kotwi wklejanej osłabia tylko jej działanie wzmacniająca, w odróżnieniu od kotwi o zamocowaniu punktowym, której pęknięcie całkowicie redukuje jej rolę wzmacniającą. Kotwie od strony północnej (w pobliżu zalegają niepełzające warstwy chodenickie) wykazują mniejszą prędkość narastania sił osiowych.

Wizualnie, stan ogólny stropu i ociosów komór Ferdinand jest zadawalający. Takie też uzyskano wyniki z analizy numerycznej wyteżenia stropu i ociosów, przy założeniu dobrego stanu otuliny solnej komór.

Z analizy numerycznej wynikają następujące wnioski:

- Wskaźniki wytrzymałości górotworu, niewiele przekraczające wartość 1, dla otuliny (płaszczka solnego) komór w części złożonej z zielonej soli bryłowej. Trzeba więc wzmocnić ociosy i strop obu komór obudową kotwową.
- Odsłonięte miejscami skały płonne, osłonięte obecnie deskami, świadczą o tym, że otulina solna może być cienka i mieć zaniżoną nośność. Ten fakt przemawia również za wzmocnieniem masywu skalnego obudową drewnianą typu bono oraz obudową kotwową.
- Warstwy chodenickie należy traktować jako potencjalnie zawodnione, mimo że chodnik będący przedłużeniem poprzeczni Ferdinand d'Este dotarł do warstw chodenickich, w których nie stwierdzono zawodnienia.
- Prędkość narastania sił osiowych w projektowanych kotwach będzie mała i nie przekroczy 4 kN/rok w większości kotew, co wynika z małej prędkości konwergencji komór.
- Wierząc otwory pod długie kotwy, należy stale kontrolować zwierciny. W przypadku stwierdzenia, że otwór dotarł do warstw chodenickich należy przerwać wiercenie i zastosować krótsze kotwy, niż projektowano.
- W miejscach odsłonięcia skały płonnej zastosować siatkę zabezpieczającą i wykładkę z drewna mocowaną kotwami długimi.

## 6. Koncepcja zabezpieczenia górniczego

Zabezpieczenie lub likwidacja poprzez podsadzenie komór przy północnej granicy złoża stanowi jeden z elementów stabi-

lizacji górotworu. Systematycznie prowadzone prace pozwalają, poprzez stabilizację górotworu, ograniczyć zagrożenie wodne [3], będące najgroźniejszym z zagrożeń występujących w kopalni. Na podstawie przeprowadzonych wizji lokalnych pod kątem określenia aktualnego stanu technicznego komory oraz przeprowadzonej analizy geomechanicznej i hydrogeologicznej dla komór Ferdinand d'Este, jak również po uwzględnieniu zaleceń konserwatorskich, do zabezpieczenia przedmiotowych komór zaproponowano zastosowanie obudowy kotwowej z kotew długich szkłoepoksydowych typu J64/27mm, o różnych długościach, utwierdzonych klejem KL lub Wieliczka I w zależności od stwierdzonego (podczas wierceń pod kotwy) stanu górotworu otaczającego komorę [10].

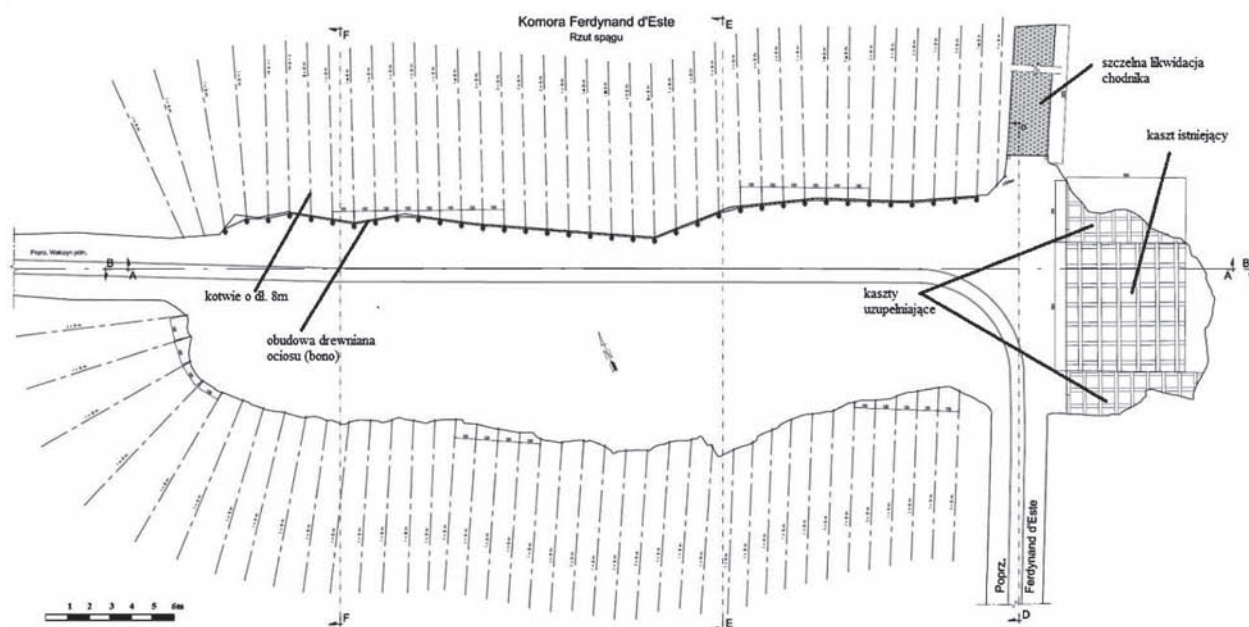
Przed przystąpieniem do zasadniczych prac zabezpieczających w komorze należy wykonać wstępne prace obejmujące:

- demontaż dotychczasowej (na ociosie południowym i północnym) zniszczonej obudowy drewnianej ociosów w postaci tzw. bona oraz zabudowanych pojedynczych elementów drewnianych (stojaki, rozpory itp.),
- przybierkę i obrywkę odpajających się od calizny fragmentów skał (dotyczy to głównie odcinka ok. 15 m, licząc od kasztu drewnianego przy ociosie wschodnim komory oraz w głąb komory),
- usunięcie gruzu skalnego znajdującego się na spągu i jego niwelacja.

Po wykonaniu wstępnych robót wykonane zostanie ostateczne zabezpieczenie komory poprzez:

1. Zabezpieczenie ociosu północnego (rys. 9,10).

W miejscach odsłonięć skał płonnych projektuje się opinkę siatką zabezpieczającą, np. Hucka lub inną o podobnych parametrach i właściwościach fizykomechanicznych. Siatka zabezpieczająca będzie mocowana do górotworu kotwami o długości 6 m. Kolejną czynnością będzie zabudowa przy ociosie obudowy drewnianej w postaci tzw. bona składającego się ze stojaków z okrągłaków  $\varnothing 20$  cm o długości do 6,0 m i dźwigarów pod stojaki piętrowe (również z okrągłaków  $\varnothing 20$  cm). Powierzchnia pomiędzy tymi elementami konstrukcyjnymi zostanie wyłożona deskami o gr.4 cm. Wolne przestrzenie między płaszczyzną ociosu północnego a ww. bono planuje się wypełnić pianą cementowo-mineralną, np.: durafonem lub



Rys. 9. Rzut spągu komory Ferdinand d'Este [11]

Fig. 9. View of the floor of Ferdinand d'Este chamber [11]

inną o podobnych właściwościach. Dodatkowym zabezpieczeniem obudowy drewnianej będą kotwy szkłoepoksydowe o długości 8 m z podkładkami i nakrętkami, zabudowane w siatce kotwienia 1,0 x 1,0 ± 0,2 m.

2. Ociós południowy (rys. 9,11) zostanie zabezpieczony obudową kotwową o długości 8 m w rozstawie 1,0 x 1,0 m ± 0,2 m. Miejsca odsłoneń skał płonnych projektuje się zabezpieczyć obudową drewnianą (bonem) w sposób analogiczny jak proponowany dla ociosu północnego oraz siatka bezpieczeństwa i kotwami stabilizującymi tę konstrukcję do calizny solnej.

3. Zabezpieczenie ociosu wschodniego komory Ferdynand d'Este (rys. 9,12).

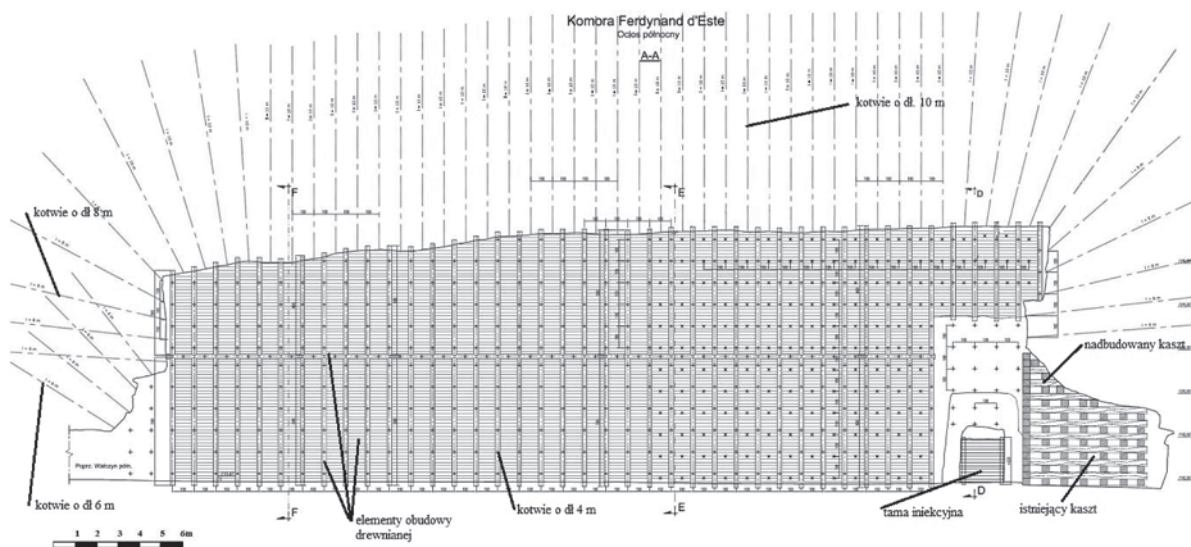
Aktualnie przy ociocie wschodnim znajduje się kaszt drewniany ażurowy wypełniony materiałem skalnym. Kaszt ten podpira półkę skalną. Górną część kasztu stanowi drewno z odzysku (okrągłaki) ułożone na pełno, wypełniając wolną przestrzeń między półką a kasztem. W miejscu tym projek-

towany jest demontaż górnej części obudowy drewnianej (drewno luźne i osłona z desek), dobudowa górnej części kasztu z okrągłaków ułożonych ażurowo i wypełnienie kasztu gruzem w celu dokładnego podparcia półki solnej. Konieczne jest także poszerzenie obecnego kasztu do ociosu północnego i południowego komory.

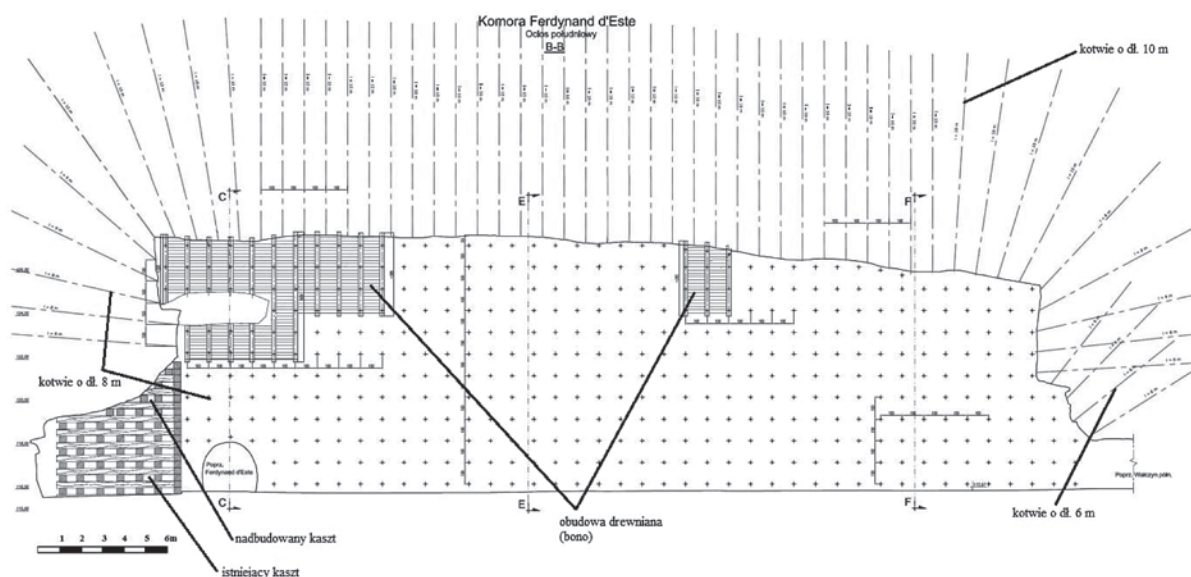
4. Do zabezpieczenia ociosu zachodniego (rys.9,13) zastosowana będzie obudowa kotwowa od długości 8m, z nakrętkami i podkładkami zabudowanych w górotworze w siatce kotwienia 1,0 x 1,0 m ± 0,2 m.

5. Strop komory (rys. 10-14) projektuje się zabezpieczyć obudową kotwową z kotew J64/27 mm, o długości 10 m z podkładkami i nakrętkami. Kotwy zabudowane w górotworze w siatce kotwienia 1,0 x 1,0 m ± 0,2 m.

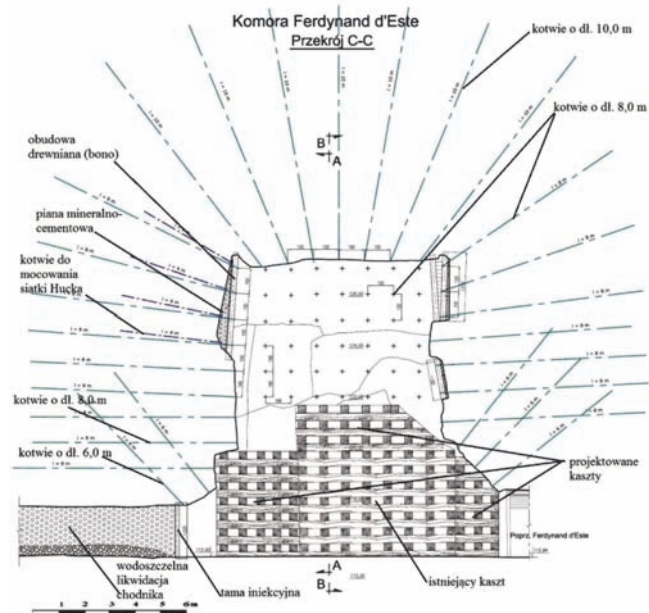
6. Ślepy chodnik, stanowiący wlot do komory od strony północnej (rys. 9 i 12), ze względu na stan zawałowy wyrobiska zostanie zlikwidowany poprzez wypełnienie materiałem iniekcyjnym. W tym celu zaprojektowano postawienie na



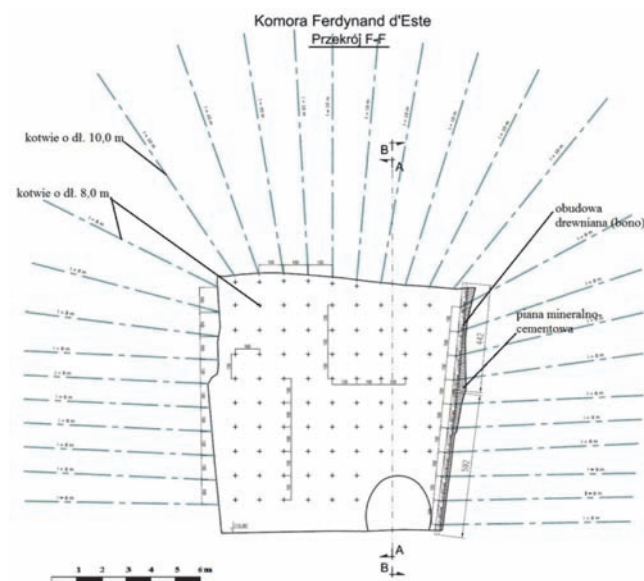
Rys. 10. Zabezpieczenie ociosu północnego komory [11]  
 Fig. 10. Securing the chamber's Northern side wall [11]



Rys. 11. Zabezpieczenie ociosu południowego komory [11]  
 Fig. 11. Securing the chamber's Southern side wall [11]



Rys. 12. Zabezpieczenie ociosu wschodniego komory [11]  
Fig. 12. Securing the chamber's Eastern side wall [11]



Rys. 13. Zabezpieczenie ociosu zachodniego komory [11]  
Fig. 13. Securing the chamber's Western side wall [11]

jego wlocie do komory tamy podsadzkowej (deski, płótno podsadzkowe). Jako iniekt zastosowany będzie durafonam lub inny środek o podobnych właściwościach chemicznych i fizykochemicznych.

## 6. Podsumowanie

Stan techniczny i lokalizacja komory Ferdynand d'Este przy północnej granicy złoża w części złoża zaliczonej do

III stopnia zagrożenia wodnego może stwarzać zagrożenie dla kopalni.

Stan techniczny tego wyrobiska wskazuje na możliwość rozwoju w jego obrębie zjawisk zawałowych, mogących prowadzić do lokalnej utraty stateczności przyległych partii górotworu, a to z kolei może przyczynić się do uruchomienia dopływu wód pozazłożowych do kopalni. Najprostszym, a zarazem najskuteczniejszym sposobem rozwiązania tego problemu jest zazwyczaj likwidacja takich wyrobisk, jednak komora Ferdynand d'Este jest wyrobiskiem zabytkowym, przewidzianym do zachowania w ramach docelowego modelu technicznego, wpisanej na listę UNESCO zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka”. Nie jest zatem możliwa poprawa stateczności górotworu w rejonie komory poprzez jej wypełnienie materiałem podsadzkowym.

Powyższe uwarunkowania powodują konieczność wykonania prac zabezpieczających, polegających na wzmocnieniu istniejącego płaszczu solnego komory w częściach stropowych i ociosowych, głównie poprzez zabudowę kotew szkło-epoksydowych o długości 8-10 m, mocowanych na klejach mineralnych oraz wykonaniu lokalnych zabezpieczeń obudową drewnianą. Wykonanie projektowanych prac poprawi statykę w tej części górotworu i może poszerzyć zakres udostępnienia wielickiej kopalni.

## Literatura

1. Bauer J.: Analiza geomechaniczna metodami numerycznymi dla komór Ferdynand d'Este na poz. III Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., materiał archiwalny Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. 2013.
2. Bromowicz A., Butra J., Chwałek J., Dębkowski R., Kidybiński A., Kucharz J., Kwapin J., Parchanowicz J., Suślik A.: Instrukcja stosowania obudowy kotwowej w Kopalni Soli „Wieliczka”. Archiwum Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., 2000.
3. d'Obryn K., Brudnik K.: Ograniczenie zagrożenia wodnego poprzez stabilizację górotworu w centralnym rejonie Kopalni „Wieliczka”, „Górnictwo i Geologia” 2012, t. 7, z. 4, str. 59-69.
4. d'Obryn K.: The analysis of destructive water infiltration into the Wieliczka Salt Mine – a unique UNESCO site. Geological Quarterly 2012 nr 56(1), str. 85-94,
5. d'Obryn K., Brudnik K.: Wyniki monitoringu hydrogeologicznego w Kopalni Soli „Wieliczka” po zamknięciu dopływu wody w poprzeczni Mina na poz. IV, „Przeгляд Górnicy” 2011, nr 6, str. 90- 96.
6. d'Obryn K., Hydzyk – Wiśniewska J.: Selected aspects of numerical modelling of the salt rock mass: the case of the “Wieliczka” Salt Mine, Archives Of Mining Sciences 2013, vol. 58, no 1, str. 73-88.
7. Jodłowski A., Charkot J., Gawroński W.: Studium historyczno-konserwatorskie komór Ferdynand d'Este na poziomie III w Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. Muzeum Żup Krakowskich. Wieliczka, lipiec 2013 r.
8. Materiały mapowe – archiwum Działu Mierniczy Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., 2013 .
9. Parchanowicz J., Maj A., Brych K., Przybyło J., Stecka J., Charkot J., Bauer J., Struzik H.: Koncepcja robót zabezpieczających w komorach Ferdynand d'Este wraz z analizą geomechaniczną i hydrogeologiczną, KGHM Cuprum CBR, Wrocław 2013.
10. Przybyło J.: Dane i materiały geologiczne – archiwum Działu Geologicznego Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., 2013.
11. Przybyło J., Stecka J.: Analiza hydrogeologiczna dla komór Ferdynand d'Este na poz. III Kopalni Soli „Wieliczka” S.A., archiwum Działu Geologicznego Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. 2013.

# Kinematyka konwergencji górotworu solnego oraz przemieszczeń punktów w rejonie szybu Kinga KS „Wieliczka” S.A.

**Kinematics of convergence of the rock mass and displacements of benchmarks in the area of the shaft St. Kinga at the salt mine “Wieliczka” S.A.**



*Dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski, Dr inż. Agnieszka Malinowska<sup>\*)</sup>  
Prof AGH<sup>\*)</sup>*

*Dr hab. inż. Kajetan d'Obyrn<sup>\*)</sup>, <sup>\*\*) \*\*\*)</sup>*

**Treść:** Pomiar konwergencji stosowane są w górotworze celem badania i lokalizacji miejsc szczególnie zagrożonych naprężeniami występującymi wskutek koncentracji eksploatacji w danym rejonie lub szczególnych właściwości geologicznych górotworu. Wyniki takich pomiarów mają zatem kluczowe znaczenie dla oceny zagrożeń geomechanicznych w kopalniach głębinowych. Stanowią również podstawę dla budowy i estymacji parametrów modeli teoretycznych. Analiza wyników pomiarów konwergencji w odniesieniu do całego masywu naruszonego górotworu jest niezwykle złożona i może być obciążona znacznymi błędami. Zebrano i przeanalizowano wyniki wieloletnich wysokościowych pomiarów geodezyjnych. Zgromadzono także wyniki dostępnych pomiarów konwergencji z kilku komór solnych. W artykule podjęto próbę prowadzenia analizy łącznie z oceną ruchów punktów wysokościowych w wyrobiskach kopalnianych i rurze szybowej. Analiza przestrzenna zestawiająca całość wyników z sytuacją górniczo-geologiczną pozwala na łatwiejsze i obciążone mniejszą niepewnością wnioskowanie. Tego typu analizy pozwalają na lokalizację związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy konwergencją komór a przemieszczeniami punktów, a tym samym na lokalizację zagrożonych rejonów kopalni. Wdrożenie geograficznych systemów informacyjnych (GIS) pozwoliło na wykazanie celowości tego typu analiz.

**Abstract:** One of the main goals of convergence measurements in underground mining is assessing the risks related to caves deformations. Those deformations might be caused by the concentration of mining activities in a given region or by specific geological conditions. The results of such measurements are crucial for assessing the stability of caves in underground mines. The results of measurements are also used for improving the parameters and accuracy of theoretical models. The analysis of the convergence measurements and underground leveling is an extremely complex process, burdened with significant error. The results of the leveling and convergence measurements were gathered in the database. The presented research was focused on the analysis of the movements in mine chambers and in the shaft. The spatial analysis based on mining and geological factors can be used for defining the cause-and-effect relationships between the convergence of the chambers and the displacements of the measurement point. In this way the endangered areas could be established. Implementing of the geographical information systems (GIS) in the research enabled to work out complex analysis.

## **Słowa kluczowe:**

*konwergencja wyrobisk, pomiary geodezyjne, deformacje górotworu, górotwór solny*

## **Key words:**

*convergence of the salt chambers, surveying, deformation of the rock mass, salt rock mass*

## **1. Wprowadzenie**

Jednym z podstawowych problemów w kopalniach głębinowych są ruchy górotworu spowodowane jego naruszeniem

przez roboty górnicze. Przemieszczenia i deformacje oraz ich rozkład w masywie górotworu mają zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa ludzi pracujących pod ziemią, czy jak w przypadku kopalni Wieliczka – zwiedzających historyczne, unikalne w skali światowej wyrobiska. Ruchy górotworu przenoszą się aż do powierzchni, powodując przekształcenia rzeźby terenu w postaci powstających niecek obniżeniowych,

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie <sup>\*\*) Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., Wieliczka” <sup>\*\*\*)</sup> Politechnika Krakowska</sup>

zapadlisk, bądź innych zjawisk zagrażających użytkownikom powierzchni. Przemieszczenia i deformacje górotworu są efektem naprężeń i mogą być mierzone poprzez pomiar konwergencji, czyli zmiany odległości bazy pomiarowej np. między ociosami wyrobiska. Analiza tych ruchów jest niezwykle złożona i często mało wiarygodna ze względu na brak, lub zbyt małą liczbę danych pomiarowych pozyskanych bezpośrednio w górotworze i co za tym idzie, trudność opisu zjawisk zachodzących w górotworze [8]. Wiedza na temat faktycznego przebiegu ruchów górotworu powinna być budowana w oparciu o monitoring *in situ*. Wyniki takiego monitoringu mogą stanowić następnie podstawę do budowy modeli matematycznych służących do predykcji przemieszczeń i deformacji górotworu [7]. W kopalniach, w których występują znaczne zagrożenia zjawiskami dynamicznymi, pomiary konwergencji wyrobisk i chodników wykonywane są rutynowo, nawet w interwale dobowym [4]. W kopalniach soli, ze względu na znacznie mniejszą prędkość konwergencji, pomiary wykonywane są w odstępach kilkuletnich [1, 5, 6]. Do monitoringu górotworu należą również inne pomiary wykonywane przez kopalnianą służbę mierniczą. Są to głównie pomiary wysokościowe reperów zlokalizowanych w poszczególnych wyrobiskach kopalni oraz pomiary sytuacyjno-wysokościowe wykonywane celem inwentaryzacji wyrobisk. Obraz pola przemieszczeń w rejonie kopalni dopełniają powierzchniowe pomiary wysokościowe i sytuacyjno-wysokościowe prowadzone zazwyczaj w osnowach geodezyjnych również zakładanych i mierzonych przez kopalnianą służbę mierniczą [5].

Interpretacja wyników pomiarów prowadzonych w podziemnych wyrobiskach górniczych wymaga dużego doświadczenia oraz umiejętności analitycznych. Celem jest poszukiwanie związków przyczynowo-skutkowych zachodzących między aktywnością górniczą (wykonywaniem nowych wyrobisk, przebudową starych, kotwieniem, podsadzaniem i likwidacją wyrobisk zagrożonych) a ruchem górotworu. Umiejętność uogólnienia wyników interpretacji pozwala na eliminację zagrożeń, a także na właściwe projektowanie przyszłych robót górniczych i profilaktycznych [9]. W tym sensie zadania wykonywane przez służbę mierniczą należy zaliczać do podstawowych działań z zakresu bezpieczeństwa kopalni.

W niniejszym artykule podjęto próbę pokazania, w jaki sposób możliwe jest budowanie uogólnionej wiedzy o ruchach górotworu w oparciu o wyniki pomiarów poprzez

równoczesną analizę konwergencji i przemieszczeń rejestrowanych w górotworze, w rejonie jednego z szybów kopalni soli „Wieliczka” S.A. Analiza dotyczyła szczególnie bezpieczeństwa samego szybu.

## 2. Charakterystyka warunków geologiczno-górnich w rejonie szybu św. Kingi

Szyb św. Kingi zlokalizowany jest w centralnej części dawnego obszaru górniczego kopalni soli „Wieliczka” S.A. Został wydrążony w połowie XIX w.

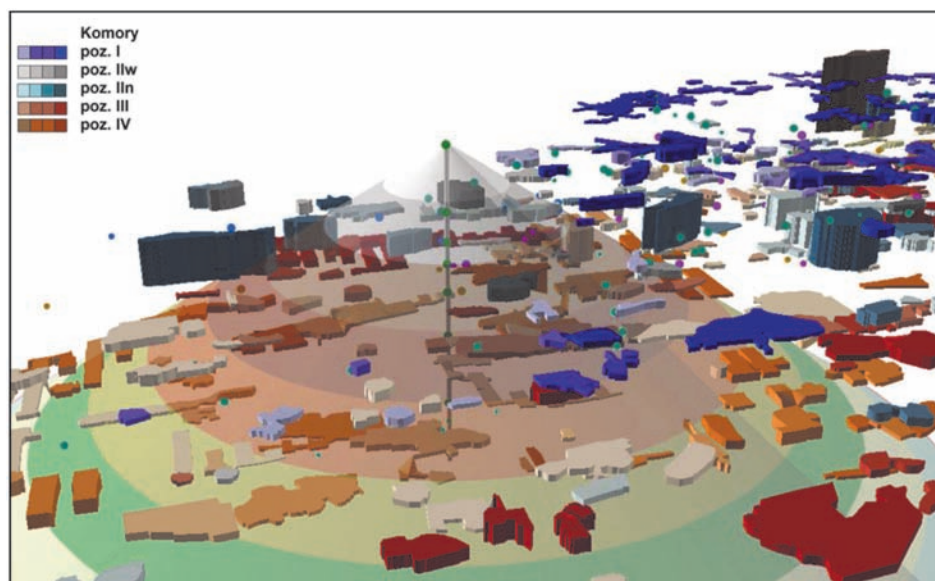
### 2.1. Warunki geologiczne

W rejonie szybu miąższość czwartorzędu waha się od 5,5 m do 6,6 m. W samym szybie utwory te występują do głębokości 13,5 m. Nad złożem bryłowym występuje praktycznie nieprzepuszczalna czapa gipsowa z łałami marglistymi. Miocenne złożo soli posiada dwudzielną budowę. Górna, bryłowa część złoża zbudowana jest ze skał płonnych występujących w postaci kryształów halitu, tkwiących w łałach i łałomarglach i określana jest jako zuber solny. W bezstrukturalnej masie skał płonnych znajdują się bryły soli o objętości od 1 do ponad 100 000 m<sup>3</sup>, które były przedmiotem eksploatacji. Dolna pokładowa część złoża zbudowana jest z naprzemianległych warstw soli oraz łałów i anhydrytów. Złożo pokładowe jest bardzo silnie sfałdowane przez przesuwające się w kierunku północnym Karpaty i tworzy trzy łuski tektoniczne.

W rejonie szybu nie występują istotne zagrożenia hydrogeologiczne, nie rejestrowano istotnych wycieków wody w rurze szybowej. Nieliczne, słabe wycieki kropłowe w głębszej partii szybu związane są z wodami technologicznymi.

### 2.2. Eksploatacja górnicza w rejonie szybu

Analiza dokonanej eksploatacji górniczej w rejonie szybu św. Kingi prowadzona była głównie dla wyrobisk zlokalizowanych w części górotworu objętej tzw. głównymi wpływami (rys. 1). Nie oznacza to jednak odciążenia pozostałych wyrobisk. Na rysunku 1. gradacja barw oznacza stopień podsadzania poszczególnych komór.



Rys. 1. Rozmieszczenie komór w rejonie szybu św. Kingi w poziomach I-IV  
Fig. 1. Salt chambers in the area of the shaft St. Kinga at levels I-IV

### Poziom I

W sąsiedztwie rury szybowej brak jest wyrobisk eksploatacyjnych na poziomie I.

### Poziom II wyższy

Na poziomie IIw eksploatacja realizowana była głównie na północ od rury szybu Kinga (rys. 1).

### Poziom II niższy

Komory znajdujące się na poziomie II<sub>n</sub> mogą mieć wpływ na rurę szybową. Biorąc pod uwagę głębokość, na której zalegają te wyrobiska ustalono, że w odległości do 170 m od rury szybowej komory mogą generować deformacje mające wpływ na szyb Kinga. W tej strefie znajduje się 17 komór. Część komór znajdująca się na północny-wschód od szybu eksploatowana była metodą filarowo-komorową. Wyrobiska te znajdują się na zmiennej głębokości.

### Poziom III

Wydobycie na poziomie III realizowane było częściowo metodą komorowo-filarową i częściowo metodą komorową. Większość wyrobisk znajduje się na stałej głębokości. Najintensywniejsza eksploatacja była prowadzona na północ od rury szybowej. W strefie buforowej wokół rury szybowej znajdują się 63 komory mogące mieć wpływ na deformacje w rejonie szybu Kinga.

### Poziom IV

Sytuacja górnicza na poziomie IV jest bardzo złożona. Intensywna eksploatacja prowadzona była na wielu głębokościach. Ponadto, gabaryty wyrobisk znajdujących się na tym poziomie są znaczne.

### Poziomy poniżej poziomu IV

Eksploatacja złoża pokładowego prowadzona była aż do poziomu VIII. Z uwagi na brak wyników pomiarów konwergencji oraz pomiarów wysokościowych nie prezentowano poziomów poniżej IV.

Wyrobiska w tych poziomach zostały praktycznie w całości podsadzone i zabezpieczone. Stąd dostęp do nich jest obecnie ograniczony bądź w ogóle niemożliwy.

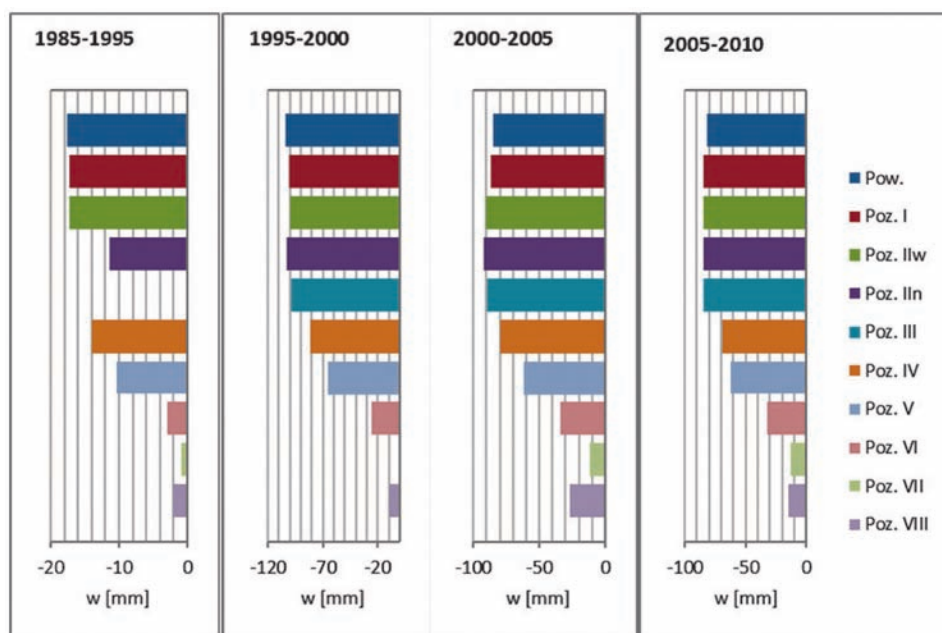
## 3. Charakterystyka pomiarów geodezyjnych

Regularne pomiary w rurze szybowej prowadzono od 1986 roku [9]. Natomiast pomiary historyczne wykonywane w rejonie lokalizacji szybu za okres 1926-1984 wykazały całkowite obniżenia przekraczające 0,9 m. Świadczyłyby to o średniej prędkości osiadania w granicach 15,5 mm/rok. O współczesnych przemieszczeniach pionowych zrębu szybu świadczą osiadania reperu zlokalizowanego na budynku nadszybia szybu św. Kingi. Analiza wykonana w artykule obejmuje przemieszczenia udokumentowane od 1985 r. W okresie 1985-2010 punkt ten obniżył się o 0,48 m (19,2 mm/rok). Prędkość obniżeń tego punktu nie była jednak stała, w latach 1990-2000 dochodziła do 23 mm/rok. Po roku 2005 nastąpiło wyraźne spowolnienie przemieszczeń pionowych.

Osiadania punktów w górotworze wzdłuż rury szybowej wykazywały podobne tendencje jak punkt powierzchniowy. Punkt 1-1 zlokalizowany na poziomie I obniżył się od 1985 r. do 2010 r. o 0,48 m (19,2 mm/r), a punkt 2w-1 na poziomie IIw o 0,49 m. Punkt 2n-2s na poziomie II<sub>n</sub> w tym samym okresie obniżył się o 0,504 m (20,2 mm/rok). Interesujące jest zmniejszanie się obniżeń w miarę wzrostu głębokości. Punkty obserwowane na poziomach niższych wykazywały znacznie mniejsze prędkości obniżeń i mniejsze wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych. Przykładowo, na poziomie V punkt 5-1 obniżył się w latach 1985-2010 o 0,351 m (14 mm/rok). Generalnie tendencja ruchów pionowych w szybie Kinga wskazuje na malejącą prędkość osiadań począwszy od poziomu IV do VI. Poziomy VII i VIII praktycznie nie wykazują przemieszczeń pionowych. Na rysunku 2 przedstawiono przyrosty przemieszczeń pionowych w szybie w okresach 1985-2010.

Jak widać, przyrosty osiadań wyraźnie zmalały po 2005 r. I ustabilizowały się w granicach ok. 80 mm/5 lat. Ponadto z wykresów na rysunku 2 można wnioskować, że największe przyrosty przemieszczeń pionowych mają miejsce w strefie do poziomu V.

Pomiary wysokościowe poza reperami zlokalizowanymi w rurze szybowej prowadzone są w osnowie kopalnianej o gęstości zróżnicowanej na różnych poziomach w górotworze



Rys. 2. Przyrosty przemieszczeń pionowych w szybie św. Kingi  
Fig. 2. Increments of subsidence in the shaft of St. Kinga

(Rys. 3, 4). Kolory poszczególnych punktów oznaczają odpowiedni poziom kopalni, a ich średnice obrazują dynamikę zmian przemieszczeń pionowych.

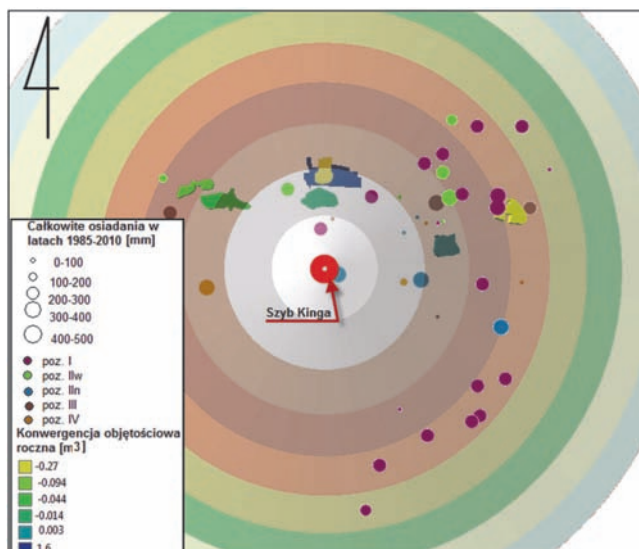
Na poziomie I pomiary wysokościowe obejmują 96 punktów. W zasięgu oddziaływania górotworu na rurę szybową znajduje się mała liczba punktów pomiarowych. Wynika to z faktu, że w rejonie rury szybu św. Kingi na tym poziomie znajduje się mało komór. Na poziomie IIw znajduje się 29 punktów niwelacyjnych. W strefie przy szybowej zlokalizowanych jest również niewiele punktów. Dopiero na poziomie IIn w rejonie szybu prowadzona była intensywniejsza eksploatacja. Na poziomie IIn. znajduje się 48 punktów pomiarowych. W rejonie strefy wpływów zlokalizowanych jest kilka punktów pomiarowych. Na poziomie III prowadzono pomiary niwelacyjne obejmujące 74 punkty pomiarowe. Na tym poziomie w rejonie szybu prowadzona była intensywna eksploatacja. Na poziomie IV prowadzono niwelację na 53 punktach. Generalnie w rejonie rury szybowej znajduje się stosunkowo niewiele punktów niwelacyjnych.

#### 4. Pomiary konwergencji wyrobisk komorowych

Pomiary konwergencji w rejonie szybu Kinga realizowane są od 1997 roku. Należy jednak podkreślić, że w niektórych komorach pomiary te prowadzone były od 2000 roku. Celem pomiarów jest monitoring ruchów górotworu w zabytkowej, centralnej części kopalni. Na rysunku 3 zaprezentowano lokalizację wyrobisk objętych pomiarami konwergencji w rejonie szybu św. Kingi w rzucie pionowym.

To samo przedstawia w rzucie aksonometrycznym rysunek 4. Pozwala to lepiej analizować wzajemne zależności między lokalizacją komór, ich konwergencją a ruchami pionowymi górotworu i samego szybu.

Z analizy wynika, że spośród znacznej ilości komór zlokalizowanych w pobliżu szybu św. Kingi (por. rys. 1) jedynie niewielka ilość objęta została pomiarami konwergencji. Komory objęte pomiarami zlokalizowane są głównie na poziomie IIw i III (por. rys. 3, 4). Z uwagi na rozmieszczenie baz konwergometrów, które często jest warunkowane lokalnymi ograniczeniami, istnieją problemy z przeliczaniem konwergencji liniowej na konwergencję względną, objętościową. Chodzi tu głównie o konieczność uogólnienia kształtu komory dla celów obliczeń objętości. Próba przeliczenia w oparciu o pewne założenia uogólniające pozwala na porównywanie



Rys. 3. Lokalizacja komór objętych pomiarem konwergencji w rejonie szybu św. Kingi

Fig. 3. Location of the salt chambers covered by the measurement of convergence in the area of the shaft St. Kinga

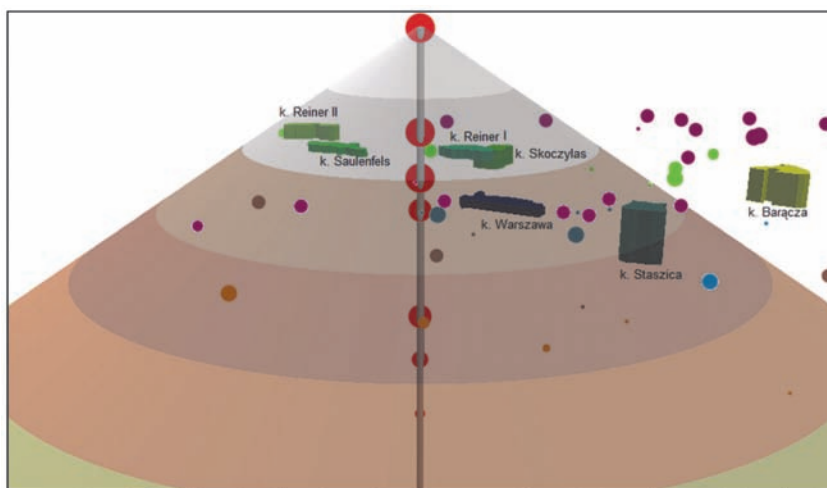
wzajemne konwergencji objętościowej – rocznej wielu komór, co zaprezentowano w tabeli (tab. 1).

Tablica 1. Konwergencja objętościowa, roczna, m<sup>3</sup>/rok w rejonie szybu św. Kingi

Table 1. Annual volumetric convergence [in m<sup>3</sup>/y] in the area of the shaft St. Kinga

Poz.	Nr Inw.	Nazwa	97_98	98_00	00_05	05_10
2w	IIw/1	k.Rainer I dolna			-0.12	-0.02
2w	IIw/3	k.Skoczylas				-0.22
2w	IIw/6	k.Saulenfles				-0.47
2w	IIw/7	k.Rainer	-0.02	0	-0.06	-0.05
2n	IIIn/209	k.Barączka			-1.38	-1.34
3	III/71	k.Staszica		0.01	-0.01	0.04
3	III/117	k.Warszawa				8.34

Według danych pomiarowych zawartych w tabeli 1. można mieć pewne wątpliwości co do konwergencji komory



Rys. 4. Lokalizacja komór objętych pomiarem konwergencji w rejonie szybu św. Kingi – widok przestrzenny

Fig. 4. Location of the salt chambers covered by the measurement of convergence in the area of the shaft St. Kinga – 3D view



Warszawa. Wartość dodatnia świadczy o dywergencji, zatem rozszerzaniu się komory. Przykład ten pokazuje, że oparcie się na zbyt małej liczbie baz pomiarowych może prowadzić do błędnych wniosków.

Z przedstawionych wyników pomiarów konwergencji wysnuć można także ogólne spostrzeżenia co do kinematyki procesu ruchów górotworu. Największe wartości konwergencji występowały w komorze Barącza (1,38 m<sup>3</sup>/rok w latach 2000-2005). Wyraźnie można zauważyć, że średnice punktów zlokalizowanych na poz. I i IIw, w rejonie tej komory (por. rys. 3 i 4) są większe niż punktów w innych rejonach. Czyli obniżenia tych punktów były większe niż pozostałych. Widać zatem jakościową i ilościową korelację konwergencji komory i przemieszczeń punktów w jej rejonie.

## 5. Podsumowanie

Zaprezentowany sposób podejścia do analizy ruchów górotworu wskazuje na możliwość stosowania z powodzeniem badań opierających się na następujących zasadach:

- lokalizacja baz konwergometrów w komorach, których monitoring jest uzasadniony istnieniem czynników potencjalnie zagrażających stabilności komory, obiektu istotnego dla kopalni lub powierzchni terenu,
- stosowanie pomiarów konwergencji w sposób umożliwiający również wyznaczanie konwergencji objętościowej, gdyż daje to możliwość porównywania zmian konwergencji różnych komór,
- lokalizacja punktów wysokościowych w rejonach ww. typów komór,
- pomiary geodezyjne w osnowach powierzchniowych i kopalnianych w okresach pozwalających na prowadzenie analiz przemieszczeń w pełnym zakresie czasowo-przestrzennym,
- integracja wyników pomiarów w systemach geoinformacyjnych, w sposób zaprezentowany w artykule.

Pomiary konwergencji w kopalni soli „Wieliczka” S.A. wykonywane są od wielu lat, jednak technologie pomiarowe, a co za tym idzie dokładności stale są doskonalone. Zastosowanie technologii skaningu laserowego daje pewne możliwości w aspekcie dokumentacji chwilowej objętości komory, nie zastąpi jednak pomiarów konwergencji z uwagi na istniejące wymagania dokładnościowe. Niewątpliwym wyzwaniem jest włączanie w monitoring konwergencji coraz większej liczby wyrobisk komorowych. Dzięki temu pozyskiwano by informacje o zachowaniu się górotworu, np. w rejonach intensywnych prac zabezpieczających, czy nowych tras turystycznych.

Podkreślić należy, że kompleksowe podejście do analiz ruchów górotworu (tj. konwergencja, przemieszczenia punktów osnów geodezyjnych), zaprezentowane w niniejszej pracy daje:

- możliwość wdrożenia w informatycznych systemach ostrzegania o możliwości wystąpienia potencjalnych zagrożeń wynikających ze zmian prędkości konwergencji i przemieszczeń punktów,
- pozwala na lepsze rozpoznanie dynamiki górotworu w fazie projektowania prac zabezpieczających,
- więcej informacji przydatnych w prognozowaniu przemieszczeń i deformacji górotworu i powierzchni terenu.

## Literatura

1. *Bieniasz, J., Wojnar, W.*: Zarys historii pomiarów i wybrane wyniki obserwacji zjawiska konwergencji wyrobisk w pokładowych złożach soli. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2007, t. 23, z.spec., s.133-142.
2. *D’Obyrn, K.*: Likwidacja pustek poeksploatacyjnych w otworowej kopalni soli, jako metoda ochrony powierzchni terenu. *Przeгляд Górniczy*, z.10, ISSN 0033-216X, 2010. str. 67-72
3. *d’Obyrn K., Hydzik-Wiśniewska J.*: Ocena ruchów górotworu na podstawie konwergencji w wybranych komorach Trasy Turystycznej Kopalni Soli „Wieliczka”, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe” 2014, nr 1, rok XX, str. 1-7.
4. *Hejmanowski R.*: Kinematyka deformacji górotworu i powierzchni terenu. Wydawnictwa Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Kraków, s.118.
5. *Hejmanowski R., Malinowska A., Kwinta, A., Ulmaniec P.*: Rock-mass stability in salt mines – risk factors. 12 Geokinematischer Tag. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Wissenschaftliche Hefte. 2011, s. 296–302.
6. *Kortas, J.* (red.): Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, t. 7, nr 3-4, Kraków 2004.
7. *Moreira N., Miranda T., Pinheiro M., Fernandes P., Dias D., Costa L., Sena-Cruz J.*: Back analysis of geomechanical parameters in underground works using an Evolution Strategy algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 33, January 2013, 2013. Pages 143-158.
8. *Pytel W., Świtoń J.*: Assessment of the impact of Geomechanical parameters variability on underground excavations stability using response surface method. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXV, No. 1, 2013, pp. 183-194. Wrocław 2013.
9. Wyniki obserwacji geodezyjnych w rejonie szybu Św. Kingi. Archiwum Działu Mierniczego Kopalni Soli Wieliczka (dokumenty niepublikowane kopalni).



## Ocena zagrożenia zapadliskami metodą GPR 4D dla potrzeb uzdatnienia podłoża budowlanego na terenach pogórnich

### Estimation of sinkhole hazard by GPR 4D method for the purpose of foundation treatments on post-mining areas

Dr hab. inż. Sylwia Tomecka-Suchoń\*)

**Treść:** W artykule przedstawiono wynik badań georadarowych prowadzonych w rejonie zapadlisk pochodzenia górniczego w Trzebinii-Siersza. Czasoprzestrzenne badania georadarowe, tzw. 4D pozwoliły na śledzenie zmian zachodzących w górotworze i na przewidywanie wystąpienia zapadlisk. Na podstawie badań georadarowych stwierdzono, że w analizowanym rejonie obserwuje się ciągle zmiany deformacji w górotworze, które mogą skutkować występowaniem deformacji nieciągłych w kolejnych latach. Wykazano potrzebę prowadzenia badań geofizycznych przed podjęciem prac naprawczych, jak również badań potwierdzających prawidłowość wykonanych prac uzdatniających podłoże. Badania prowadzone przez pracowników AGH miały charakter badań naukowych, ale okazało się, że mają one duże znaczenie użytkowe.

**Abstract:** This paper describes the subject of georadar (GPR) studies were carried out in the Trzebinia-Siersza area. Time-spatial GPR 4D studies allowed to control changes in the geological medium and to predict mining-origin deformations. Basing on GPR studies, it was concluded that permanent deformation changes may result in the occurrence of discontinuities in the future. This paper proves the usefulness of such studies for the prediction of mining-origin deformations. It also demonstrates the need for carrying out geophysical reconnaissance before undertaking preventive and reparative measures and studies confirming the correctness of the repairs that are to be carried out. Scientific studies performed by AGH scientists were found to be extremely useful especially in urban areas.

#### Słowa kluczowe:

metoda GPR, pustki i strefy rozluźnień, zapadliska, płytka eksploatacja górnicza

#### Key words:

Ground Penetrating Radar method, voids and loosened zones, sinkholes, shallow exploitation

## 1. Wprowadzenie

Znacząca część Małopolski Zachodniej była objęta płytką eksploatacją górniczą złóż rud cynku i ołowiu oraz pokładów węgla [9, 10, 8]. Pozostawione pustki i strefy rozluźnień skutkują rozwojem procesów zapadliskowych i w efekcie ujawnieniem się na powierzchni terenu różnego rodzaju deformacji nieciągłych. Przykładem takiego terenu jest gmina Trzebinia-Siersza, dawny ośrodek górniczy. Jest to teren pogórnich KWK „Siersza” prowadzącej eksploatację od końca XVIII wieku do 2001 roku. Efektem prowadzonej działalności górniczej są występujące na powierzchni terenu do czasów obecnych deformacje nieciągłe. Obserwuje się liczne szkody górnicze, zarówno na terenach prywatnych, jak i publicznych. Deformacje nieciągłe prowadzą często do uszkodzenia budynków.

Uzdatnienie terenów zagrożonych zapadliskami najczęściej prowadzi się za pomocą otworowego zatłaczania zaczynu popiołu z cementem. Zgodnie z ogólnie stosowaną metodyką tych prac, uzdatnieniu podłoża powinny towarzyszyć właściwie zaprojektowane i wykonane prace geofizyczne [5, 6, 7]. Brak takich badań lub niewłaściwe ich wykonanie może spowodować nieskuteczne uzdatnienie podłoża.

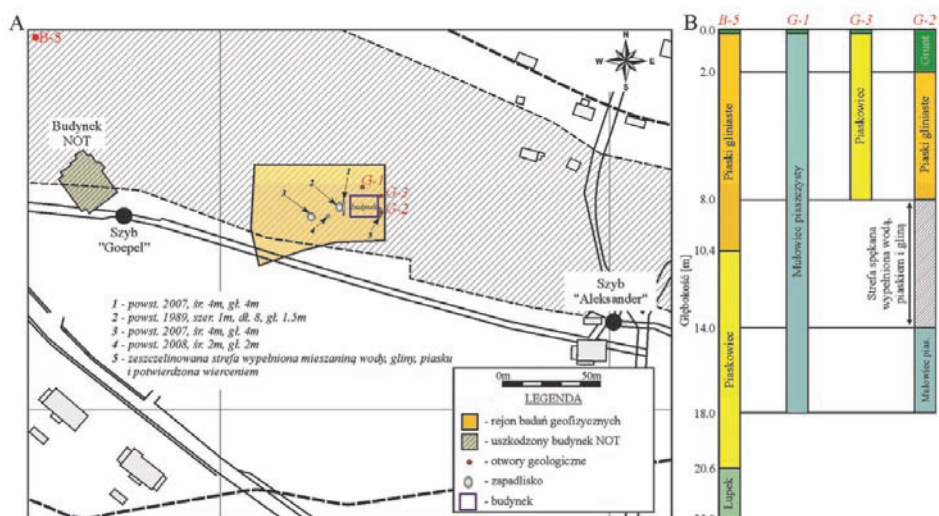
Kluczowym zagadnieniem skutecznego uzdatnienia podłoża jest również poznanie mechanizmu procesów zapadliskowych [2]. Rozwój deformacji niesprężystych w otoczeniu pustek poeksploatacyjnych związany jest najczęściej z przepływem wody przez ośrodek porowaty. W wyniku rozwoju procesu niszczenia fragmenty stropu opadają na dno pustki. Powstała pustka wtórna wyjaśnia przemieszczanie się procesu zapadliskowego w kierunku powierzchni terenu.

W związku z tym, że strefa spękań ma większą porowatość, a często większe zawilgocenie od otaczającego ośrodka, skutkuje to zmianą właściwości dielektrycznych ośrodka skalnego. Zmiana taka powoduje powstanie anomalii georadarowej. Na tej podstawie czasoprzestrzenne badania georadarowe pozwalają rozróżnić rejon, które są stabilne od tych, które anomalnie rozwijają się i skutkują powstaniem zapadliska.

## 2. Położenie rejonu badań

Rejon badań znajdował się nad wyrobiskami zamkniętej kopalni KWK „Siersza” (rys. 1). W rejonie tym eksploatację pokładu węgla kamiennego 207 rozpoczęto pod koniec XVIII wieku na głębokości ok. 26 m. Wybrano do badań ten teren, ponieważ od 1980 roku zaczęły pojawiać się tam zapadliska (rys. 2). Spowodowały one, między innymi uszkodzenie znaj-

\*) AGH w Krakowie



Rys. 1. Rejon badań geofizycznych w Sierszy nad obszarem eksploatacji pokładu 207; głębokość eksploatacji: 26 m, lata eksploatacji: 1808-1853, miąższość pokładu: 4,20 m [4]

Fig. 1. Mining and geological information from the site of GPR measurements in Siersza exploitation area of coal seam no. 207; depth: 26 m; years: 1808-1852; coal thickness: 4.20 m



Rys. 2. Zapadlisko na terenie badań w marcu 2007 roku (Fot. S. Tomecka-Suchoń)

Fig. 2. Sinkhole in the teseted area in March 2007

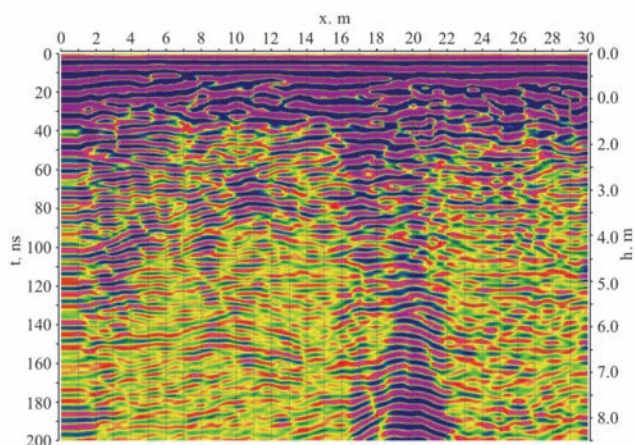
dującego się w sąsiedztwie budynku Naczelnej Organizacji Technicznej.

### 3. Metodyka badań georadarowych

Pomiary georadarowe w rejonie badań na terenie pogórnym KWK „Siersza” prowadzono wielokrotnie od 1997 roku. Badania te wykonywano wzdłuż tych samych profili. Pomimo, że na powierzchni terenu nie zaobserwowano żadnych oznak, które wskazywałyby na rozwój deformacji nieciągłych, pierwsze pomiary GPR wykonane w 1997 roku pozwoliły wyznaczyć silną anomalię na profilu przebiegającym bezpośrednio przy budynku mieszkalnym pomiędzy 16 a 22 m (rys. 3) [11]. Strefy wysokich energii sygnałów na echogramie (rys. 3) można korelować ze strefami pustek i rozluźnień w gruncie. Obszar zwiększonych amplitud zaznacza się na echogramie bardziej intensywnym kolorem fioletowym. W tym czasie, ze względu na brak odpowiedniego oprogramowania, interpretację prowadzono tylko w

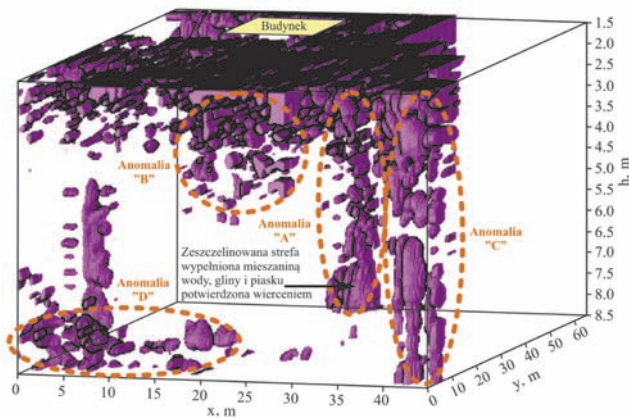
układzie 2D. W wyniku wykonanych otworów kontrolnych przez Kopalnię „Siersza” okazało się, że anomalia ta pochodzi od strefy silnych rozluźnień. Ponadto stwierdzono obecność mieszaniny wody i piasku.

Dalszy rozwój oprogramowania pozwolił na zaawansowane, cyfrowe przetwarzanie danych pomiarowych oraz trójwymiarową wizualizację stref o anomalnym rozkładzie właściwości dielektrycznych [1]. Dzięki takiej interpretacji uzyskano z tych samych danych znacząco bardziej informatywny obraz wyników z pierwszej sesji pomiarowej z 1997 roku (rys. 4) [4]. Wyinterpretowano nowe strefy anomalne, które przyczyniły się do zainicjowania systematycznych prac badawczych w tym rejonie. Kolejne badania wykonywano w kilku seriach, zawsze wzdłuż tych samych równoległych profili przy użyciu anten ekranowanych o częstotliwościach 250 i 500 MHz oraz nieekranowanych o częstotliwościach 50 MHz i 200 MHz.



Rys. 3. Echogram pomiarowy dla profilu z zaznaczającą się strefą anomalaną w postaci wzrostu amplitudy

Fig. 3. Radargram of profile with anomalous zone in the form of amplitude increase



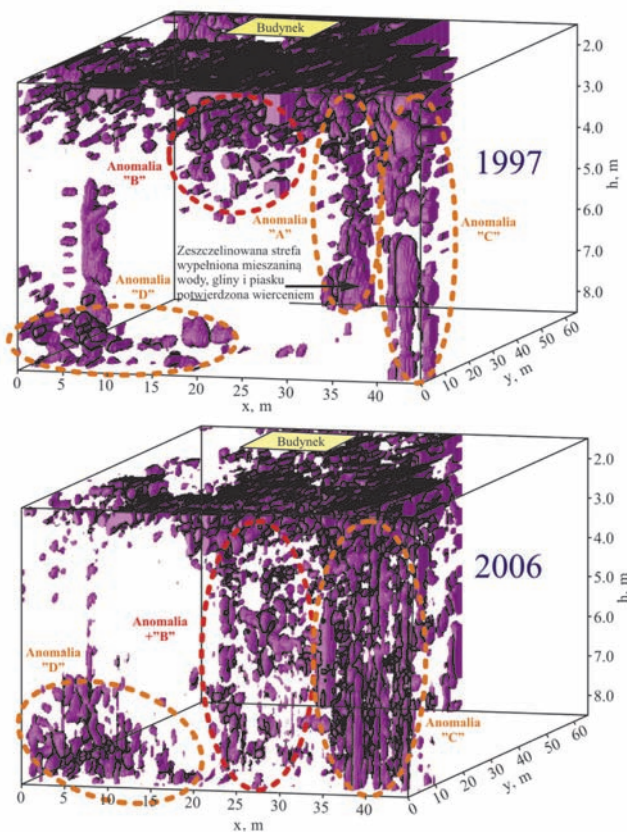
Rys. 4. Trójwymiarowy rozkład amplitud chwilowych sygnałów georadarowych dla pierwszej serii pomiarowej w 1997 roku [4]

Fig. 4. 3D distribution of GPR signal envelopes after first measurement session in 1997

#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie zapisów georadarowych z 1997 i 2006 roku. Interpretację rozkładów amplitud dokumentującą rozwój pustki przedstawiono na rysunku 6 [1].

Wewnątrz badanego obszaru (rys. 4) zaznacza się wyraźna anomalia B pochodząca od strefy pustek i rozluźnień górotworu. Anomalia taka nie została zarejestrowana w badaniach z roku 1997. Widać wyraźnie, że rozbudowała się ona w kierunku pionowym. Analiza porównawcza [1] obydwu wyników

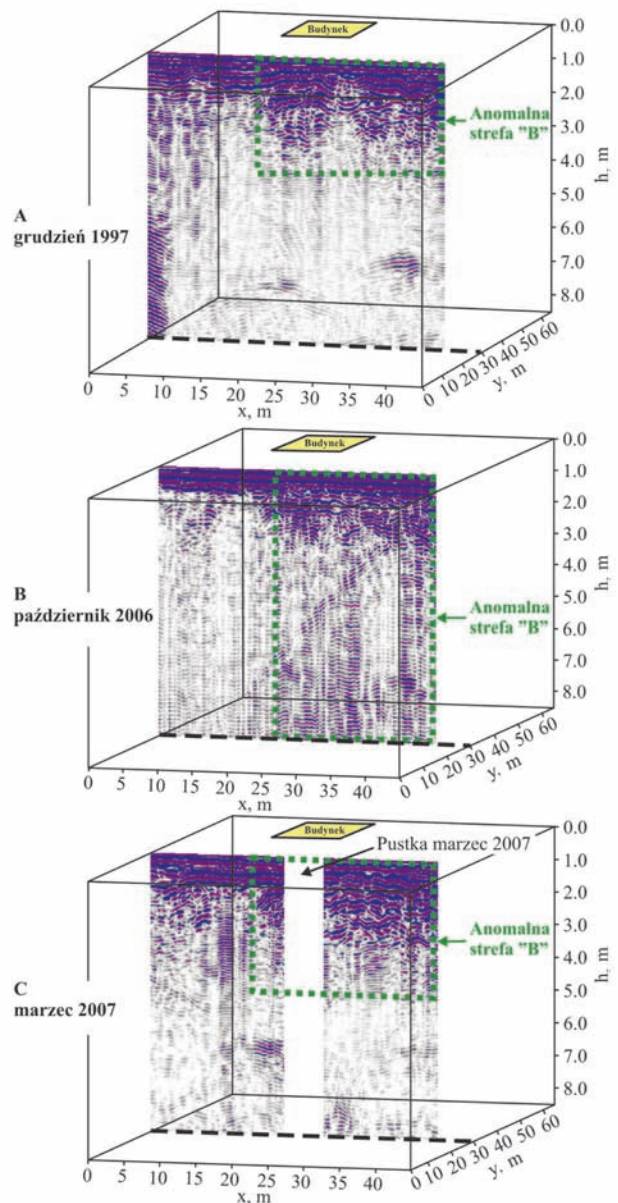


Rys. 5. Porównanie rozkładu anomalii georadarowych w latach 1997 i 2006 [4]

Fig. 5. Comparison of 3D distribution of GPR signal envelopes in the tested area in 1997 and 2006

z 1997 i 2006 roku wykazała przypuszczalnie niebezpieczny rozwój deformacji, wskazujący na prawdopodobieństwo powstania zapadliska. Jak się okazało, w miejscu tym 5 marca 2007 roku pojawiło się zapadlisko o średnicy i głębokości równej 4 m, co zostało odnotowane w „Gazecie Małopolskiej” w 2007 roku w artykule *Zapadła się ziemia*. Na rysunku 6 A w środkowej części profilu widać strefę anomálną rozciągającą się do głębokości ok. 3 m. Na rysunku 6 B widać, że nastąpiło poszerzenie obszaru anomalii w wyniku rozwoju procesu zapadliskowego ku powierzchni terenu, który najprawdopodobniej spowodował powstanie w marcu 2007 roku zapadliska powierzchniowego. Na rysunku 6 C obserwujemy zanik części głębszej strefy rozluźnień gruntu po powstaniu zapadliska. Fakt ten związany jest przypuszczalnie z kompaktacją gruntu.

Wyniki naszych badań zostały przekazane do Urzędu Miasta Trzebinia. Pojawienie się zapadliska dokładnie w pół roku po opracowaniu wyników badań potwierdziło, że interpretacja wyników była prawidłowa, a tym samym i przydatność badań geofizycznych.



Rys. 6. Cięcia przestrzenne poprowadzone przez środek anomalii B [4]

Fig. 6. Cross-section through the centre of anomaly B

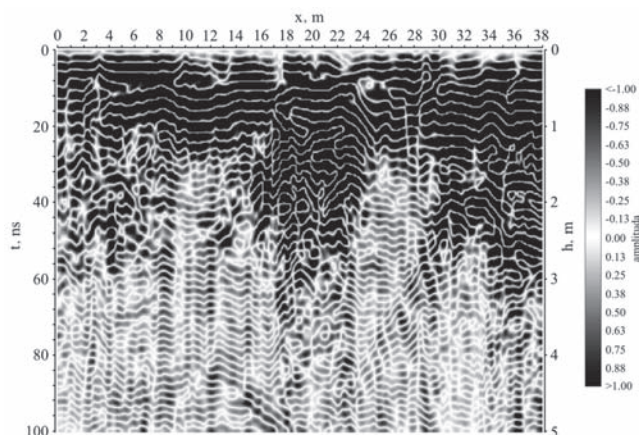
W kwietniu 2008 roku powstało kolejne zapadlisko o średnicy i głębokości 2 m (rys. 7), które również zostało poprzedzone stwierdzoną anomalią w wyniku badań georadarowych przeprowadzonych w 2007 roku (rys. 8).

Podjęte prace uzdatniające metodą zatłoczenia zaczynu cementowo-popiołowego w 2013 roku pokazały, że zagrożenie zapadliskowe jest poważne. Po ich zakończeniu, w miejscu uzdatnienia wystąpiło zapadlisko (rys. 9 i 10).



Rys. 7. Zapadlisko, które powstało w kwietniu 2008 roku (Fot. S. Tomecka-Suchoń)

Fig. 7. Sinkhole that appeared in April 2008



Rys. 8. Echogram dla profilu nr 16 wykonanego w 2007 roku. Anomalna strefa znajduje się pomiędzy 15 a 24 metrem profilu

Fig. 8. Radargram of profile no. 16 in 2007. The anomaly zone is located between the 15 and 24 meter of the profile



Rys. 9. Wiercenie otworu dla potrzeb uzdatnienia podłoża w 2013 r. (Fot. S. Tomecka-Suchoń)

Fig. 9. Drilling of the hole for the needs of foundation treatment in 2013 (Photo: S. Tomecka-Suchoń)



Rys. 10. Powstanie nowego zapadliska po zakończeniu uzdatnienia podłoża w 2013 r. (Fot. Maryla Pleskacz)

Fig. 10. New sinkhole which occurred after the foundation treatment in 2013 (Photo: M. Pleskacz)

## 5. Podsumowanie

Czasoprzestrzenne badania georadarowe, tzw. 4D pozwoliły na śledzenie zmian zachodzących w górotworze i na przewidywanie wystąpienia zapadlisk. Interpretacja tego rodzaju wyników badań daje możliwość pełnego wykorzystania informacji zawartych w georadarowych danych pomiarowych i pozwala na ocenę rozwoju procesów zapadliskowych.

Na podstawie dotychczasowych badań georadarowych można stwierdzić, że w analizowanym rejonie obserwuje się ciągle zmiany deformacji w górotworze, które mogą skutkować występowaniem deformacji nieciągłych w kolejnych latach.

Wyniki badań przedstawione w pracy pokazują, że uzdatnieniu podłoża powinny towarzyszyć badania geofizyczne. Występowanie zapadlisk w miejscach wskazanych anomalii geofizycznych potwierdza ich efektywność.

Badania prowadzone przez pracowników AGH miały charakter badań naukowych, ale okazało się że mają one duże znaczenie utylitarne.

*Projekt został sfinansowany ze środków Umowa nr: UMO-2011/01/B/ST7/06178 Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06178.*

## Literatura

1. Marcak H., Tomecka-Suchoń S.: Zastosowanie metod georadarowych do lokalizacji pustek. Miesięcznik WUG 2006, nr 12 s.10-14.
2. Marcak H., Gołębowski T., Tomecka-Suchoń S.: Zastosowanie metod georadarowych do lokalizacji pustek. Materiały konferencji „Ochrona środowiska na terenach górniczych”. Organizator Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Szczyrk, 319-329. Abstrakt: miesięcznik WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, Katowice 2006.
3. Marcak H., Gołębowski T., Tomecka-Suchoń S.: Analiza przestrzenno-czasowa danych georadarowych dla oceny ryzyka wystąpienia pustek poeksploatacyjnych. Materiały konferencji „Warsztaty Górnicze 2007”. Organizator: Instytut GSMiE PAN, Ślesin, 309-324; Abstrakt: miesięcznik WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, 2007, nr 6, s. 323-324.
4. Marcak H., Gołębowski T., Tomecka-Suchoń S.: Geotechnical Analysis and 4D GPR Measurements for the Assessment of the Risk of Sinkholes occurring in a Polish Mining Area. Near Surface Geophysics, 2008 233-243.

5. *Pilecki Z.*: The role of geophysical methods in the estimation of sinkhole threat in the post-mining areas of shallow exploitation in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 3/1, 2008, 27-40.
  6. *Pilecki Z.*: Methodology for A-1 motorway basement treatment effectiveness improvement by means of geophysical methods in the areas of metal ores shallow mining threatened with the sinkhole occurrence in the Upper Silesia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 25, z. 3, 2009, 319-331.
  7. *Pilecki Z.*: Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali. *Studia, Rozprawy, Monografie* 184. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2014.
  8. *Pilecki Z., Pilecka E., Pszonka J., Stanisław J., Morman J.*: Zagrożenia deformacjami nieciągłymi na obszarze górniczym Jaworzno III. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2012.
  9. *Pilecki Z., Popiołek E.*: Wpływ eksploatacji rud na zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi i jego badanie za pomocą metod geofizycznych. *Studia, Rozprawy, Monografie* 84, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2000.
  10. *Popiołek E., Pilecki Z.* (red.): Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2005.
  11. *Ziętek J., Karczewski J., Tomecka-Suchoń S., Carcione J., Padano D., Denis C.*: Observations and Results of GPR Modelling of Sinkholes in Upper Silesia (Poland). *Acta Geodetica Geophysica Hungarica*, vol. 36(4) 2001, 377-389.
- 
-



## Lokalizacja stref uskokowych metodą konduktometryczną na terenie GZW

### Location of fault zones using ground conductivity method (GCM) in the Upper Silesia Coal Basin

Mgr Sławomir Siwek\*)

**Treść:** Metoda konduktometryczna (GCM) w postaci wielopoziomowego profilowania przy zmiennym ustawieniu dipola anten jest często wykorzystywaną metodą geofizyczną w lokalizacji stref dyslokacji tektonicznych. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w warunkach przeobrażonego działalnością człowieka górotworu na terenach północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Miały one na celu rozpoznanie charakterystyki wybranych stref dyslokacji tektonicznych w przypowierzchniowej warstwie podłoża. Praca zawiera opis przeprowadzonych badań oraz analizę uzyskanych wyników w odniesieniu do danych geologiczno-górnictwowych.

**Abstract:** The ground conductivity method (GCM) in multilevel profile mode with changeable dipole mode is often used in the location of fault zones and examination of their structure. This paper presents the results of measurements carried out in test sites where natural geological conditions are transformed by exploitation (northern part of the Upper Silesia Coal Basin). The aim of the test measurements was to assess the possibilities of the method to identify such elements of fault zone structure as main fault plane and fault zone borders. This result was obtained only in one out of five cases tested.

#### Słowa kluczowe:

geofizyka stosowana, konduktometria, tektonika, obrazowanie geofizyczne

#### Key words:

applied geophysics, conductometry, tectonics, geophysical imaging

## 1. Wprowadzenie

Szczególnym rodzajem zagrożenia powierzchni na terenach objętych głęboką eksploatacją górniczą są strefy wychodni uskoków na powierzchni. Strefy takie stanowią naturalne bariery ograniczające prowadzoną eksploatację, przez co na przestrzeni lat w ich miejscu dochodzi do nałożenia się wielu zjawisk i procesów mogących powodować reaktywację tych stref. Może się to objawiać przemieszczeniami pionowymi gruntu, powstawaniem szczelin i rozwarć na powierzchni terenu.

Tereny objęte wielowiekową eksploatacją górniczą, do jakich możemy zaliczyć północną część GZW są bardzo trudnym ośrodkiem do prowadzenia prac geofizycznych. Poza wysoko rozwiniętą urbanizacją terenu, która często ogranicza możliwość optymalnego doboru metody geofizycznej do rozwiązywanego zadania geologicznego, na uzyskiwane rejestracje wpływa również silne przeobrażenie górotworu wskutek dokonanej eksploatacji węglowej i rudnej.

W pracy przedstawiono wyniki badań geofizycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody konduktometrycznej (GCM) w wariantach profilowania wielopoziomowego z zastosowaniem pionowego VD (ang. *Vertical Dipole*) i poziomego HD (ang. *Horizontal Dipole*) dipola anten. Celem prowadzenia prac była precyzyjna lokalizacja stref dyslokacji

tektonicznych w rejonach ich wychodni na terenach północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w warunkach obejmujących obecność różnorodnego nadkładu, zmiennym nachyleniu powierzchni uskokowych oraz różnych wysokościach zrzutu uskoków. Precyzyjne określenie lokalizacji polegało na wyznaczeniu granic strefy dyslokacyjnej oraz głównej powierzchni dyslokacji. W ramach realizacji pracy przebadano 6 stref uskokowych przebiegających w utworach karbońskich lub triasowych.

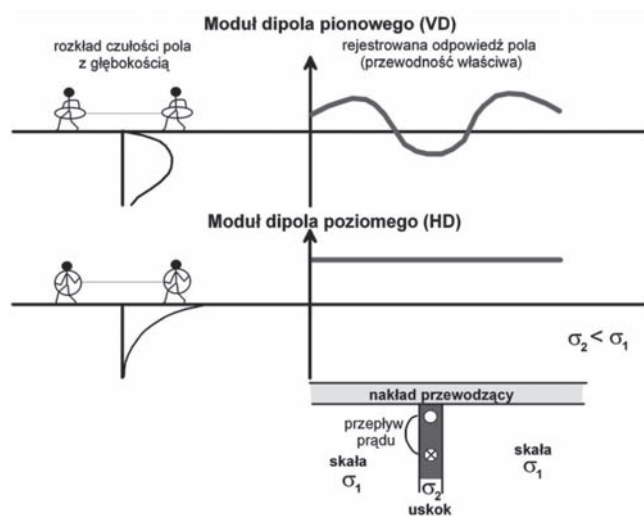
## 2. Podstawy fizyczne metody konduktometrycznej

Metoda konduktometryczna (GCM) wykorzystuje charakterystykę propagacji pola elektromagnetycznego w ośrodku geologicznym do określenia jego własności elektrycznych. Szczegółowe przedstawienie teorii metody jest przedmiotem wielu publikacji [4, 5, 6, 8], stąd poniżej zasadę działania metody opisano w dużym uproszczeniu.

W metodzie konduktometrycznej (GCM) układ pomiarowy złożony jest z przenośnych anten, nadawczej i odbiorczej, w kształcie cewek. Przepływ prądu elektrycznego o określonej częstotliwości w cewce nadawczej powoduje emisję do podłoża pola magnetycznego zgodnie z zasadą Lorentza (prostopadle do płaszczyzny cewki). Pole to wywołuje na obecnych w podłożu strukturach przewodzących powstanie prądów indukowanych, będących z kolei źródłem wtórnego pola magnetycznego rejestrowanego w cewce odbiorczej ukła-

\*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

du pomiarowego. Wzajemna relacja pola wtórnego do pola pierwotnego pozwala na określenie parametru przewodności ośrodka geologicznego. Zasięg głębokościowy metody jest zależny od odległości pomiędzy antenami (nadawczą i odbiorczą) oraz częstotliwości emitowanego sygnału. Dipol pionowy (VD) oznacza poziome ułożenie cewek w trakcie pomiaru, a dipol poziomy (HD) ich pionowe ustawienie. Metoda profilowania konduktometrycznego jest bardzo czuła na zmiany przewodnictwa elektrycznego ośrodka geologicznego i daje odmienne odpowiedzi przy zmianie orientacji dipoli anten, co ilustruje rysunek nr 1.



Rys. 1. Odpowiedź dla metody przewodności gruntu (przewodność pozorna,  $\sigma_a$ ) ponad uskokiem. Zasięg głębokości zmienia się z orientacją anten [3]

Fig. 1. Response of ground conductivity method over (apparent conductivity,  $\sigma_a$ ) fault. The depth penetration changes along with coil orientation [3]

W przyjętym przez McNeilla modelu jednorodnego górotworu o przewodności  $\sigma_1$  z obecną pionową niskoprzewodzącą strukturą uskoku  $\sigma_2$  (gdzie  $\sigma_1 > \sigma_2$ ), przy pionowym ułożeniu dipola anten (VD) aparatura konduktometryczna wykazuje wysoką czułość na obecność takiej struktury. Jest to powodem zarejestrowania anomalii w obrazie danych, której maksymalna amplituda przypada bezpośrednio ponad tą pionową strukturą. Dla poziomego ułożenia dipola anten (HD) aparatura nie wykazuje takiej czułości, dając dokładny pomiar przewodności w otoczeniu tej struktury. Charakter uzyskiwanych danych przy pionowym ułożeniu dipola (VD) jest więc bardzo użyteczny przy badaniu górotworu pod kątem obecności pionowych lub prawie pionowych zaburzeń w jego budowie do jakich zalicza się uskoki.

Należy zaznaczyć, iż przyjęty przez McNeilla model jest bardzo uproszczony. Jako równoważny możnaby było zastosować np. model z pionowym kontrastem oporności. Niemniej model McNeilla jest tutaj przytoczony i stanowi punkt odniesienia dla uzyskiwanych wyników, ponieważ stał się inspiracją do przeprowadzenia niniejszych badań. W celu dalszej analizy konieczne będzie stworzenie modeli o parametrach odpowiadających warunkom górotworu na terenie GZW.

Pomiary konduktometryczne dla potrzeb realizacji pracy badawczej wykonano aparaturą konduktometryczną EM34 – 3XL produkcji kanadyjskiej firmy Geonics Ltd..

Każdorazowo w pierwszej kolejności wyznaczano linię profilową o kierunku prostopadłym lub prawie prostopadłym do przebiegu danego uskoku. Na linii ustalano punkt przecięcia uskoku określony na podstawie materiałów archiwalnych

kopaliń. Od tego punktu odmierzano po 100 m w obydwu kierunkach wzdłuż linii profilowej, przez co długość każdego profilu wynosiła 200 m. Obserwowane na wykresach różnice w długości rejestracji dla kolejnych rozstawów wzdłuż profilu wynikają z konieczności dostosowywania profilu do istniejących warunków terenowych oraz faktu, iż punktowemu pomiarowi odpowiada punkt środkowy rozstawu anten. Przykładowo pomiar przy rozstawie VD/HD10 wymagał ustawienia anteny odbiorczej na -5 metrów (5 m przed 0 profilu), a anteny nadawczej na 5 mb profilu. Dla rozstawu 40 m odległości te wynosiły -20 i +20 m, co w niektórych przypadkach powodowało konieczność przesuwania początku lub końca profilu. Pomiary wykonywano kolejno dla każdego rozstawu anten i ułożenia dipoli, tj. HD10, VD10, HD20, VD20, HD40 i VD40. Pozwoliło to na uzyskanie danych z 4 poziomów głębokościowych: ok. 7,5 m (HD10), ok. 15 m (VD10 i HD20), ok. 30 m (VD20 i HD40) oraz ok. 60 m (VD40) ponieważ w metodzie GCM efektywna głębokość penetracji wynosi około 0,75 i 1,5 raza odległości między cewkami dla poziomego (HD) i pionowego dipola (VD) [8]. Pomiary wykonano poprzez przejście wzdłuż profilu przy zadanym taktowaniu sygnału (7ms) w ten sposób, iż w jednym kierunku wykonywano pomiar przy poziomym (HD) ustawieniu dipoli i wracając wykonywano pomiar przy pionowym (VD) ustawieniu dipoli dla danego rozstawu anten. Wykonanie w takim trybie badań pozwoliło na pokrycie profilu na poziomie 4 odczytów na mb profilu (średnio odczyt co 25 cm). Pomiary terenowe przeprowadzone zostały w okresie maj i wrzesień 2012 r.

### 3. Strefy uskokowe wytypowane do badań

Aby możliwe było przeprowadzenie pomiarów konduktometrycznych na terenach GZW konieczne było określenie kryteriów, jakie powinny zostać spełnione w rejonie strefy uskokowej. Strefa uskokowa jest rozumiana jako pas *mniejszej lub bardziej szerokiej strefy* w otoczeniu powierzchni uskokowej *wypełnionej produktami mechanicznego kruszenia skał lub pociętej przez podrzędne uskoki* [1]. Przy ich określaniu wykorzystano zalecenia producenta aparatury oraz doświadczenia własne ze stosowania metody konduktometrycznej w warunkach GZW. Przy doborze stref uskokowych zastosowano następujące kryteria:

1. Dostępność terenu – w miejscu wychodni uskoku na stropie utworów, w których występuje, brak jest powierzchniowej zabudowy terenu (budynki, wiaty, ogrodzenia, itp.) oraz podziemnej i naziemnej infrastruktury technicznej. Brak jest również naturalnych przeszkód terenowych w postaci cieków, wysokich skarp, gęstych zarośli, a więc przeszkód utrudniających swobodne wykonanie pomiaru (przejścia z aparaturą). Dostępność terenu istotna jest z uwagi na bardzo wysoką czułość aparatury konduktometrycznej na wymienione obiekty, a przede wszystkim na powstające od nich zaburzenia w propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku geologicznym, co znacząco pogarsza uzyskiwane dane i uniemożliwia ich poprawną interpretację.
2. Miąższość nadkładu – z uwagi na możliwości prospekcyjne zastosowanej aparatury konduktometrycznej przyjęto, że maksymalna miąższość utworów nadkładu ponad strefą uskokową nie może przekraczać 20 m, tak aby wykonane pomiary zapewniały penetrację falami elektromagnetycznymi strefy uskokowej, przy co najmniej trzech ustawieniach aparatury konduktometrycznej, tj. HD40 (do ok. 30 m p.p.t.), VD20 (do ok. 30 m p.p.t.) i VD40 (do ok. 60 m p.p.t.).
3. Wysokość zrztu uskoku – przyjęto, że minimalna wartość zrztu uskoku powinna wynosić co najmniej 10 – 15 me-



trów. Większy zrzut powoduje, iż na tej samej głębokości mogą znajdować się utwory o odmiennych własnościach elektrycznych. Dla małych zrzutów penetracja falami elektromagnetycznymi odbywa się w tych samych utworach, co zmniejsza szanse prawidłowego określenia szerokości strefy uskokowej.

4. Kąt upadu powierzchni uskokowej – powinien wynosić więcej niż  $50^\circ$  – przez co punkt maksymalnej amplitudy anomalii rejestrowanej na krzywej przewodności będzie odpowiadał bezpośrednio punktowi przecięcia powierzchni uskokowej [3].

Na podstawie takich kryteriów oraz w oparciu o dostępne w Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG materiały archiwalne z kopalni do badań wytypowano 4 uskoki w utworach karbonu oraz 2 w utworach triasowych, których charakterystykę zbiorczą przedstawiono w tabeli nr 1.

#### 4. Wyniki badań metodą konduktometryczną i ich analiza

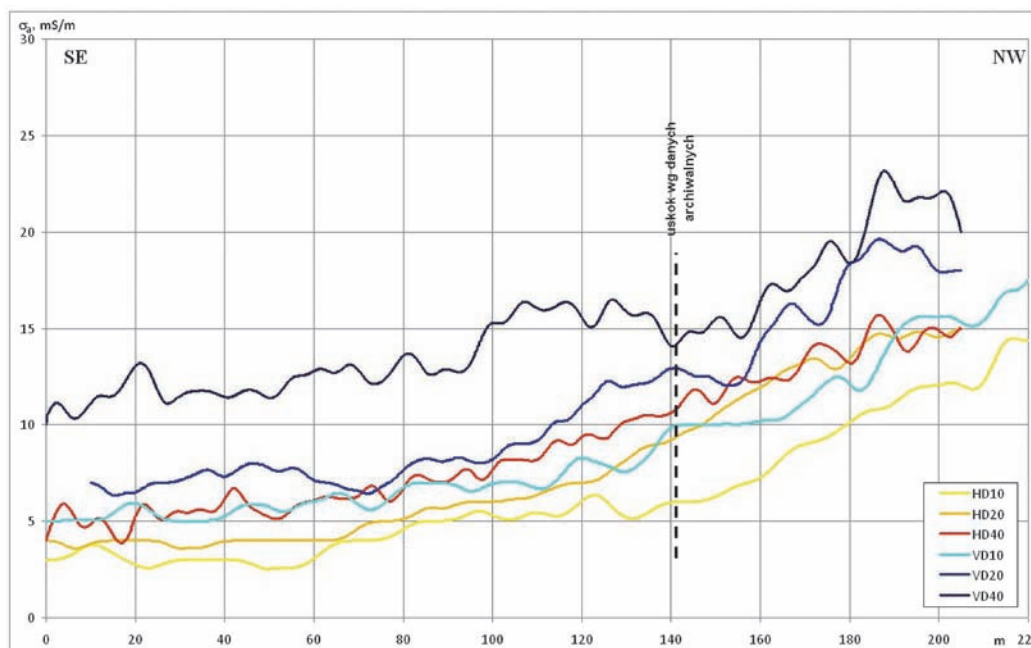
W wyniku pomiarów na każdym z uskoków uzyskano zbiory danych w postaci krzywych pozornej przewodności elektrycznej podłoża,  $\sigma$  dla każdej z zastosowanych konfiguracji anten, tj. HD10, HD20, HD40, VD10, VD20 i VD40.

Krzywe uzyskane z pomiarów w rejonie **uskoku III** w Rudzie Śląskiej, za wyjątkiem krzywej dla najgłębszego rozstawu VD40, mają bardzo podobny przebieg (rys. 2).

Generalnie można wydzielić na nich dwie strefy. W strefie pierwszej od 0 do ok. 70 mb profilu górotwór charakteryzuje się wartościami pozornej przewodności elektrycznej podłoża na stałym poziomie 4 – 5 mS/m. Natomiast od ok. 70 mb profilu do 220 mb rejestrowane wartości przewodności stopniowo wzrastają, osiągając na końcu profilu poziom ok. 15 mS/m. Stały wzrost przewodności w drugiej strefie świadczy o stopniowej zmianie parametrów elektrycznych górotworu. Najprawdopodobniej trend ten związany jest z faktem, iż od 0 do ok. 60 mb profilu na utworach karbonu zalega niewielka pokrywa osadów czwartorzędowych, a następnie utwory karbonu wychodzą na powierzchnię. Obserwowany zatem wzrost przewodności ośrodka najprawdopodobniej wynika ze zmian budowy penetrowanego podłoża bez zaznaczającej się strefy uskokowej III. Na krzywych zarejestrowanych dla pionowego ułożenia dipola anten (VD) nie można wyznaczyć powierzchni uskokowej w sposób, jaki przedstawiony jest w modelu McNeilla. Szczeliny uskokowej III są najprawdopodobniej zakolmatowane, a do tego materiał je wypełniający nie różni się własnościami elektrycznymi od otaczających go przeobrażonych w strefie uskokowej utworów. Na rysunku 3 wyróżnia się krzywa dla rozstawu VD40 o szacowanej głębokości penetracji do ok. 60 m, której wartości są blisko dwukrotnie wyższe niż dla pozostałych krzywych, co można tłumaczyć obecnością w głębszym podłożu bardziej zwiezłych skał lub ich lokalnym zawadnieniem.

Tablica 1. Charakterystyka podstawowych parametrów wybranych do badań stref uskokowych  
Table 1. Characteristics of basic parameters selected for fault zone studies

L.p.	Nazwa uskoku	Lokalizacja	Mięszczość utworów nadkładu, m	Zrzut uskoku m	Kąt upadu [°]
1	III	Ruda Śląska	0	20-30	65 – 83°
2	Środkowy	Katowice	2,5-5	45 – 50	63°
3	Arkona	Katowice	6	15 – 20	ok. 65°
4	Jakub	Katowice	14	40 – 80	ok. 67°
5	Radzionkowski	Piekary Śląskie	0	do 20	75°
6	Brzeziński	Brzeziny Śląskie	ok. 10-15	30 – 40	70°-85°



Rys. 2. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku III w Rudzie Śląskiej  
Fig. 2. Results of conductivity measurements in the area of III Fault in Ruda Śląska

Uzyskane w rejonie uskoku *III* wyniki badań konduktometrycznych nie pozwalają na określenie przypuszczalnych granic przeobrażenia skał w związku z obecnością uskoku *III* oraz lokalizacji powierzchni uskoku.

Pomiary konduktometryczne w rejonie **uskoku środkowego** (rys. 3) obejmowały utwory karbonu pod niewielką (2.5 – 5m) warstwą osadów czwartorzędowych. Uskok *środkowy* na mapach górniczych przedstawiany jest jako zespół 2 lub 3 płaszczyzn ścięcia skał karbońskich, których sumaryczny zrzut wynosi ok. 40 – 50 m. W obrazie danych przy prawidłowym wyprowadzeniu płaszczyzn uskoku na powierzchnię powinny się one zaznaczać w ok. 75 i 175 mb profilu (rys. 3).

W trakcie pomiaru na odcinku od 20 do 100 mb rejestrowano silne zaburzenie pola elektromagnetycznego. Przeprowadzone dodatkowo rozpoznanie terenu wykazało, iż prostopadłe do profilu (w ok. 45 – 55 mb profilu) przebiega nasyp (niewidoczny w miejscu pomiaru). Analiza map górniczych oraz aktualnej mapy powierzchni terenu nie wskazały na obecność w tym miejscu jakichkolwiek obiektów. Natomiast analiza archiwalnych map topograficznych z okresu przed 1900 r. i międzywojennego wykazała, iż w miejscu tym przebiegała linia kolejowa. Rejestrowane zaburzenie wywołane jest zatem najprawdopodobniej obecnością w nasypie elementów konstrukcyjnych linii kolejowej, wywołujących silne zaburzenie emitowanego pola elektromagnetycznego (szczególnie elementów metalowych). Obserwowane spadki wartości przewodności elektrycznej powodują, iż aparatura przestaje rejestrować. Wynika to z faktu, iż dla niskich wartości przewodności błąd zera składowej urojonej staje się znaczący i aparatura nie rejestruje dokładnie przewodności ośrodka o wysokim oporze [2]. Obecność powyższej anomalii powoduje niejednoznaczność interpretacji znacznej części krzywych i brak możliwości prawidłowego wyznaczenia strefy uskoku *środkowego*. Poza obszarem wpływu ww. obiektu, krzywe dla poziomego ułożenia dipola (HD) nie wykazują dużej zmienności i oscylują na wszystkich rozstawach wokół wartości 17 – 20 mS/m. Na żadnej z krzywych przy pionowym ułożeniu dipola anten

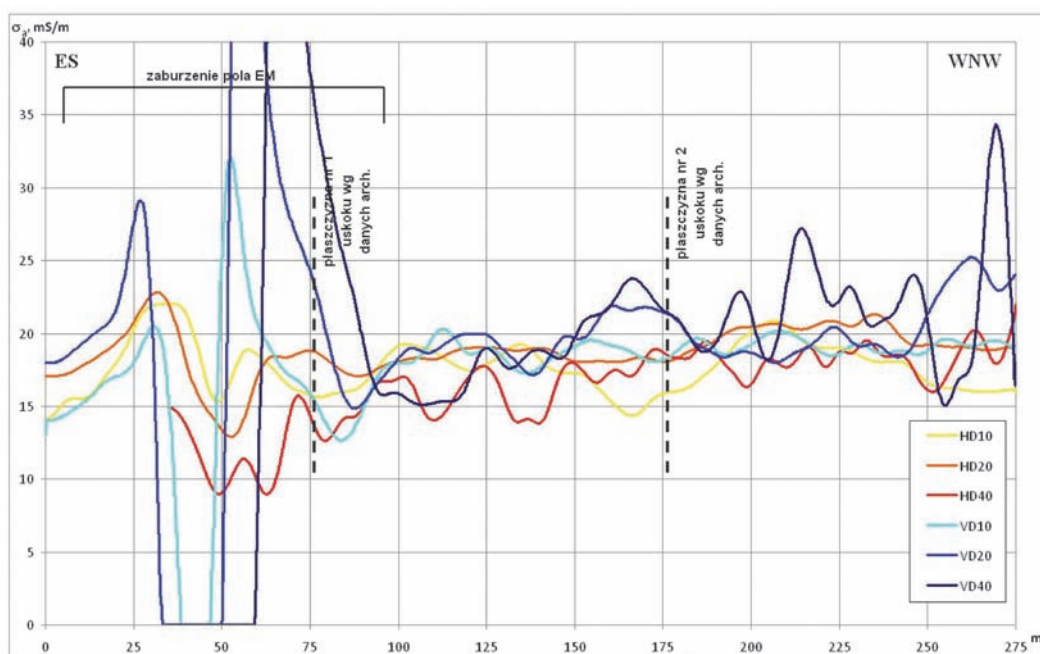
(VD) nie zaznacza się strefa o charakterze wskazującym na obecność stromozapadającej struktury o obniżonej lub podwyższonej względem otoczenia przewodności elektrycznej (zgodnie z modelem McNeilla). Na krzywych VD20 i VD40 od ok. 140 metra do końca profilu obserwuje się niewielkie wzrosty i spadki rejestrowanych wartości przewodności elektrycznej. Zmiany te mogą świadczyć albo o silnym, blokowym spękaniu głębszego podłoża w tym rejonie albo o błędzie pomiarowym związanym z niedotrzymaniem właściwej symetrii układu pomiarowego.

Uzyskane w rejonie uskoku *środkowego* wyniki badań są zaburzone i nie pozwalają na wydzielenie w ich obrazie strefy uskoku. Poza opisanym obiektem, może być to efektem silnej defragmentacji skał karbońskich wskutek dokonanej eksploatacji, na co mogą wskazywać zaobserwowane w drugiej części profilu wahania wartości przewodności rejestrowanych dla głębszych rozstawów (VD20 i VD40).

Badania strefy **uskoku arkona** (rys. 4) zostały wykonane w bardzo podobnych warunkach geologiczno-górniczych jak przy uskoku *środkowym*, przy czym większa jest miąższość utworów czwartorzędowych ponad utworami karbonu (minimum 6 m). Na wszystkich zarejestrowanych krzywych od 0 do ok. 60 mb zaznacza się wpływ znajdującego się na początku profilu słupa sieci niskiego napięcia zasilającego położony nieco dalej na południe budynek mieszkalny. W tym obszarze krzywe nie nadają się do interpretacji (rys. 4).

Poza obszarem zaburzenia krzywe otrzymane z pomiaru przy poziomej orientacji dipola anten (HD) nie pozwalają na jednoznaczne wyznaczenie strefy, którą można by identyfikować z uskokiem *arkona*.

Zgodnie z materiałami archiwalnymi profil zlokalizowany jest w ten sposób, iż jego początek to skrzydło zrzucone uskoku, a koniec skrzydło zawieszone. Na wszystkich krzywych w interpretowalnym zakresie, a więc od ok. 60 mb do końca profilu wartości przewodności pozornej oscylują wokół 18 – 22 mS/m. Obserwowane na krzywych HD10, HD20 i VD10 wzrosty przewodności ok. 120 mb profilu należy identyfikować jako zaburzenie związane z trudnością zachowania właściwej symetrii układu w czasie wykonywania pomiaru wywołanej



Rys. 3. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku środkowego w Katowicach  
Fig. 3 Results of conductivity measurements in the area of Środkowy Fault in Katowice

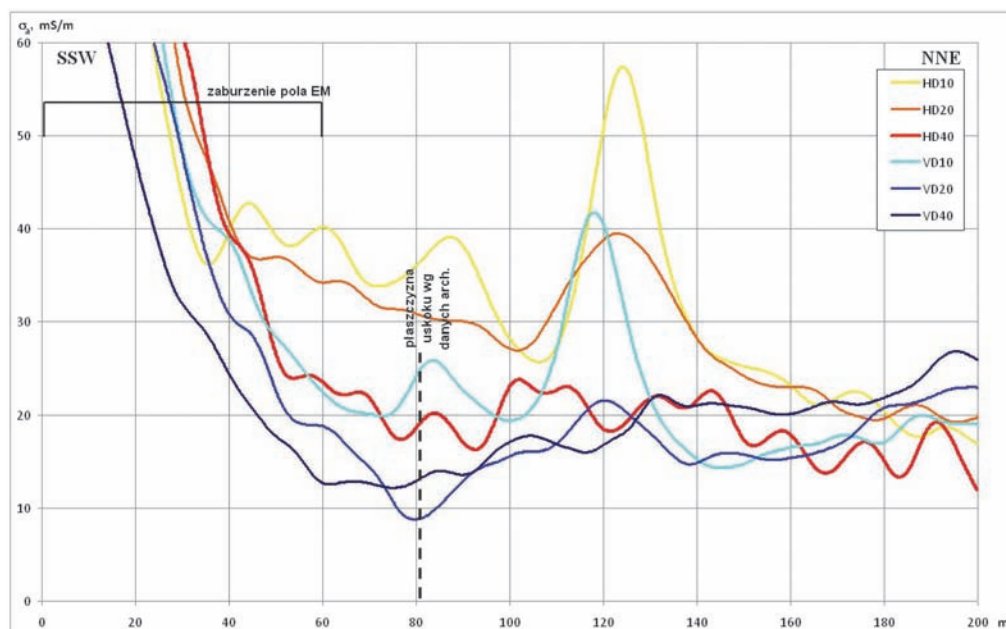


Fig. 4. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku arkona w Katowicach

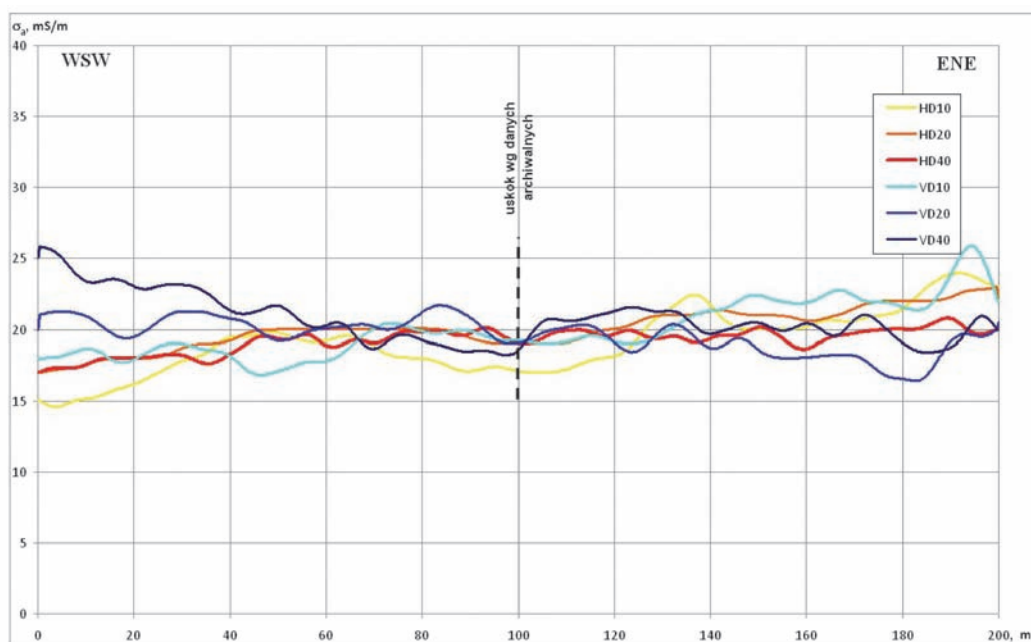
Fig. 4. Results of conductivity measurements in the area of Arkona Fault in Katowice

łukiem drogi, na której wykonywano pomiar. Wpływ ten udało się zniwelować przy pomiarze dla pozostałych ustawień układu pomiarowego. Uzyskane wyniki świadczą zatem o tym, iż w obrębie strefy uskoku nie zachodzi zmiana parametrów elektrycznych utworów w niej występujących.

Uzyskane w rejonie uskoku *arkona* wyniki badań nie pozwalają na określenie granic przeobrażenia skał w związku z obecnością uskoku.

Ostatnim badanym uskoku w obrębie utworów karbonu jest **uskok jakub**. W miejscu wykonania pomiaru ponad karbonem zalega warstwa ok. 14 – 15 m utworów czwartorzędowych. Znaczna miąższość utworów nadkładu powoduje, że strefa uskoku powinna zaznaczać się jedynie

dla trzech ustawień aparatury konduktometrycznej, zapewniających penetrację falami elektromagnetycznymi głębiej niż 15 m p.p.t., tj. VD20 (do ok. 30 m), HD40 (do ok. 30 m) i VD40 (do ok. 60 m). Nie potwierdza się to w uzyskanych krzywych (rys. 5), które na całej długości profilu mają dość równy przebieg na poziomie około 20 mS/m. Jedynie na krzywych HD10 i VD40 obserwuje się pewne zmiany. Na krzywej HD10 (żółta linia) zaznacza się łagodne obniżenie rejestrowanych wartości w rejonie archiwalnej lokalizacji uskoku. Obniżenie to z uwagi na niski zasięg głębokości penetracji (do ok. 7.5 m) można wiązać z lokalną zmianą w budowie utworów czwartorzędowych lub na przykład mniejszym ich zawodnieniem.



Rys. 5. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku jakub w Katowicach

Fig. 5. Results of conductivity measurements in the area of Jakub Fault in Katowice

Natomiast na krzywej z najgłębszego rozstawu VD40 (ciemnoniebieska linia) można zauważyć, iż następuje stopniowe obniżanie się przewodności od ok. 25 mS/m na początku profilu do 17 mS/m, ok. 100 mb, następnie na odcinku od 100 do 105 mb następuje szybki wzrost przewodności pozornej do poziomu ok. 20–21 mS/m i dalej utrzymywanie się takiego poziomu do końca profilu. Niemniej trudno taką charakterystykę korelować z obecnością uskoku w odniesieniu do wyjściowego modelu McNeilla.

Uzyskane wyniki nie pozwoliły na wyznaczenie strefy uskoku *jakub*. Na krzywych nie rejestruje się zmian przewodności elektrycznej mogących mieć związek z badaną strefą. Może to wynikać z faktu, że kontrasty elektryczne pomiędzy skałami karbońskimi w skrzydle wiszącym, zrzuconym oraz strefie uskoku są za małe lub są niewidoczne wskutek silnej defragmentacji skał karbońskich od dokonanej eksploatacji. Prawidłowe wyznaczenie strefy uskoku *jakub* metodami opierającymi się na badaniu własności elektrycznych skał może być bardzo problematyczne.

Kolejnym badanym uskokiem jest **uskok radzionkowski** w Piekarach Śląskich, który w zakresie penetracji fal elektromagnetycznych przebiega w utworach triasowych. W miejscu poprowadzenia profilu nie obserwuje się udziału utworów czwartorzędowych lub mają one znikomą miąższość i wypełniają jedynie lokalne wymycia erozyjne. Zgodnie z danymi archiwalnymi uskoki *radzionkowski* zrzuca utwory triasu o ok. 20 m na wschód w miejscu poprowadzonej linii przerywanej. Układ taki nie odzwierciedla się w uzyskanych danych (rys. 6).

Na krzywych dla poziomego ułożenia dipola anten (HD) nie można wydzielić strefy, którą można by zidentyfikować ze strefą uskoku *radzionkowskiego*. Krzywe głębszych rozstawów, tj. HD20 i HD40 mają regularny przebieg na poziomie analogicznie ok. 7 i 9 mS/m. Na krzywej dla naj płytszego rozstawu od ok. 25 mb do 60 mb profilu obserwuje się strefę podwyższonej przewodności pozornej, którą nie sposób zidentyfikować ze strefą uskoku, a jedynie może świadczyć o lokalnej, niewielkiej zmianie w podłożu,

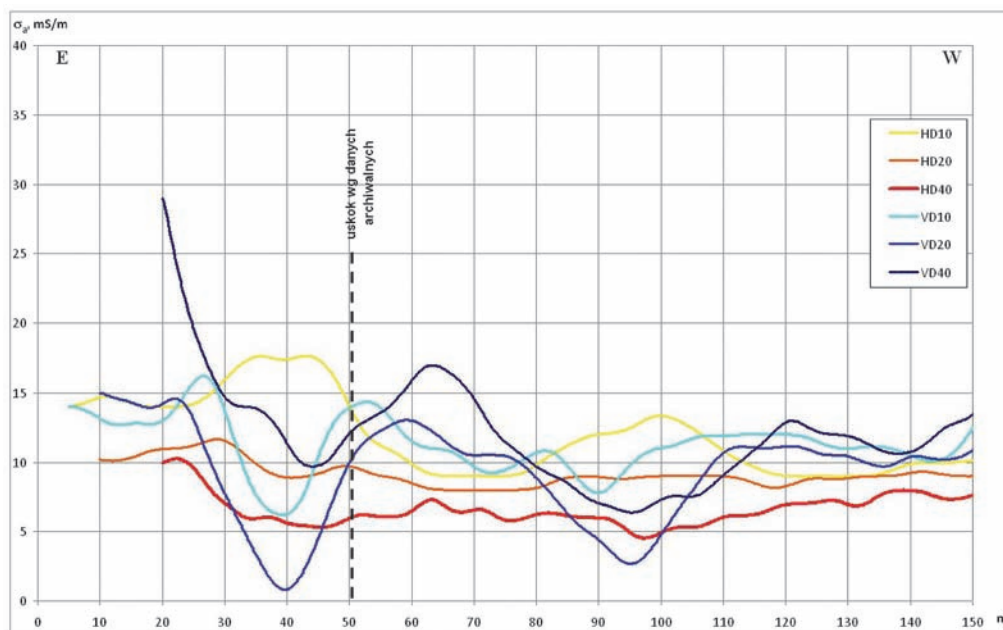
np. o obecności soczewki utworów czwartorzędowych na utworach triasowych.

Na krzywych uzyskanych z pomiarów przy pionowym ułożeniu dipola (VD) zaznaczają się dwie strefy obniżenia poziomu pozornej przewodności elektrycznej podłoża od ok. 20 do 50 mb profilu i od 80 do ok. 120 mb. Miejsca te z uwagi na charakter zbliżony do modelu McNeilla można by zidentyfikować z obecnością w podłożu stromo zapadających struktur. Najprawdopodobniej mamy tu do czynienia z obecnością pionowych lub prawie pionowych szczelin związanych z blokowym spękaniem triasowych dolomitów wskutek głębszej eksploatacji węglowej. Na podstawie położenia punktów maksymalnych amplitud tych anomalii można określić kierunek zapadania tych struktur jako zachodni (przeciwny do kierunku zapadania uskoku *radzionkowskiego*). Podobne szczeliny obserwowane były w wykopach na etapie budowy autostrady A1. Na krzywej dla VD40 w jej początkowym odcinku od 0 do ok. 25 mb zaznacza się spadek wartości przewodności pozornej od ok. 29 mS/m do ok. 15 mS/m. Spadek ten należy traktować jako zakłócenie od znajdującego się za wschodnim końcem profilu, metalowym ogrodzeniem terenu węzła „Piekary”.

Uzyskane w rejonie uskoku *radzionkowskiego* wyniki badań nie pozwalają na określenie przypuszczalnych granic strefy przeobrażenia skał w związku z obecnością uskoku, natomiast wskazują, iż utwory triasowe (dolomity) nie zachowują ciągłości warstw i charakteryzują się blokowym spękanem wskutek głębokiej eksploatacji węglowej.

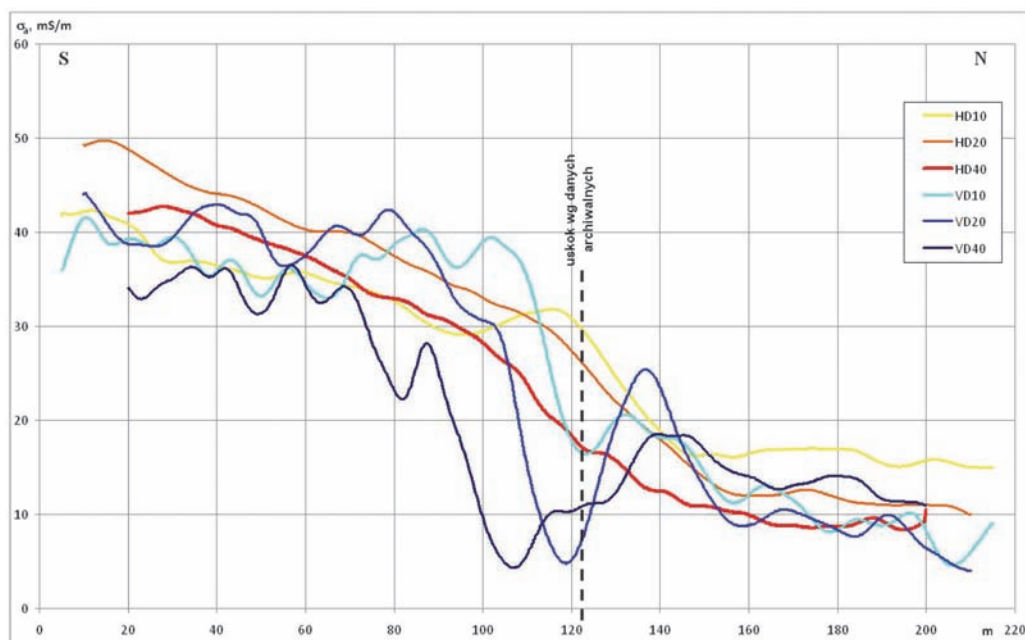
Najciekawszych wyników dostarczyły pomiary konduktometryczne przeprowadzone w rejonie uskoku *brzezińskiego*, przebiegającego w utworach triasu pokrytych 10–12-metrową warstwą utworów czwartorzędowych. Szczegółowa analiza uzyskanych w tej lokalizacji wyników jest przedmiotem odrębnej publikacji [7].

Uzyskane krzywe pomiarowe pozwalają na precyzyjne określenie strefy uskoku *brzezińskiego* oraz głównej płaszczyny uskoku (rys. 7).



Rys. 6. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku radzionkowskiego w Piekarach Śląskich

Fig. 6. Results of conductivity measurements in the area of Radzionkowski Fault in Piekary Śląskie



Rys. 7. Wyniki pomiarów konduktometrycznych w rejonie uskoku brzezińskiego w Brzezinach Śląskich

Fig. 7. Results of conductivity measurements in the area of Brzeziński Fault in Brzeziny Śląskie

Krzywe uzyskane z pomiarów przy poziomym ustawieniu dipola anten pozwalają na wydzielenie strefy uskoku. Strefa uskoku *brzezińskiego* zaznacza się na krzywych dla poziomego dipola anten (HD) jako obszar zmiany przewodności elektrycznej od ok. 75 do ok. 160 mb profilu, gdzie z poziomu ok. 40 – 50 mS/m obserwowanego w skrzydle zrzucanym maleje do poziomu ok. 10 – 17 mS/m (zależnie od rozstawu), charakteryzującego utwory w skrzydle wiszącym. Dokładniejszych danych do zobrazenia strefy uskoku *brzezińskiego* dostarczają pomiary przeprowadzone przy pionowym ułożeniu dipola. Podobnie jak przy poziomym ułożeniu dipola anten (HD) na krzywych uzyskanych przy pionowym dipolu anten (VD) utwory w skrzydle zrzucanym, charakteryzują się wyższą przewodnością niż w skrzydle wiszącym. W obrębie wyznaczonej wcześniej prawdopodobnej strefy uskoku na każdej krzywej obserwowane są spadki wartości przewodności, podobnie jak to ma miejsce w modelu McNeilla. Jediną różnicą względem modelu jest fakt, iż rejestrowane wartości przewodności elektrycznej charakteryzujące skrzydło zrzucane i wiszące są inne. Na krzywej dla VD10 punkt maksimum amplitudy anomalii, który można wiązać z obecnością wąskiej, stromej struktury, pokrywa się z przeniesioną z map archiwalnych lokalizacją płaszczyzny uskoku. Na kolejnych krzywych minimum przesuwa się w kierunku południowym – w stronę skrzydła zrzucanego – zgodnie z kierunkiem zapadania płaszczyzny uskoku podanym na archiwalnych mapach kopalnianych.

Uzyskane w rejonie uskoku *brzezińskiego* wyniki badań pozwalają na określenie przybliżonych granic przeobrażenia skał w związku z obecnością uskoku. Dodatkowo, możliwe jest wyznaczenie za pomocą wyników uzyskanych na krzywych VD, miejsc prawdopodobnego położenia stromej struktury w obrębie podłoża. Obserwowane przesunięcia minimów anomalii na kolejnych rozstawach pozwala na określenie kierunku zapadania tej struktury oraz jej nachylenia.

## 5. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych prac wskazują, że na obraz strefy uskoku w zbiorach danych konduktometrycznych duży wpływ ma przeobrażenie struktury warstw geologicznych wpływami eksploatacji górniczej.

Pomimo wybrania poligonów zapewniających optymalne środowisko do przeprowadzenia badań metodą konduktometryczną (która z uwagi na charakterystykę emitowanego pola elektromagnetycznego pozwala na precyzyjne lokalizowanie stromo zapadających struktur), uzyskane w trakcie prac wyniki okazały się satysfakcjonujące w zaledwie jednym przypadku. Duży wpływ na uzyskane wyniki ma rodzaj badanego podłoża. Dużo więcej informacji uzyskano z prac przeprowadzonych na strefach uskokuwowych przebiegających w utworach triasowych (dolomity). W rejonie uskoku *brzezińskiego* możliwe było określenie szerokości strefy przeobrażenia skał w jego rejonie oraz możliwe wydaje się określenie, na podstawie punktów maksymalnych amplitud anomalii zarejestrowanych na krzywych uzyskanych przy pionowym ułożeniu dipola anten (VD), przebiegu głównej płaszczyzny uskoku. Uzyskane w rejonie uskoku *radzionkowskiego* wyniki badań nie pozwalają na określenie przypuszczalnych granic strefy przeobrażenia skał w związku z obecnością uskoku, natomiast wskazują iż utwory triasowe (dolomity) nie zachowują ciągłości warstw i charakteryzują się blokowym spękanem wskutek głębokiej eksploatacji węglowej.

Prace przeprowadzone w ośrodku geologicznym zbudowanym z utworów karbońskich o różnej miąższości czwartorzędowego nadkładu, nie pozwoliły na rozwiązanie postawionego zadania. Przyczyn takiego stanu rzeczy można upatrywać w małych kontrastach elektrycznych w obrębie utworów karbońskich oraz ich silnego przeobrażenia wskutek dokonanej eksploatacji górniczej.

**Literatura**

1. *Jaroszewski W.*: Tektonika uskoków i fałdów. Wyd. 2, Wydawnictwa Geologiczne Warszawa 1980
  2. *McNeill J.D.*: Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers 1980, Technical Note TN-6, Geonics Limited, Mississauga, Ontario.
  3. *McNeill J.D.*: The Application of Electromagnetic Techniques to Environmental Geophysics Surveys, w: Ground Conductivity Meters for Environmental Site Evaluation, Geonics Limited, Mississauga, Ontario 1997.
  4. *Mussett A.E., Khan M.A.*: Looking into the earth 2000, Cambridge University Press, s. 210÷232.
  5. *Parasnis D.S.*: Principles of Applied Geophysics 1986, Chapman and Hall, London, New York, s. 182÷249.
  6. *Reynolds J.M.*: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics 1997, John Wiley & Sons, Chichester, s. 555÷680.
  7. *Siwek S.*: Zastosowanie metody konduktometrycznej do rozpoznania strefy uskoku brzezińskiego w zlikwidowanym obszarze górnym Rozalia 2014, „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 1, s. 31÷37.
  8. *Sharma P.V.*: Environmental and Engineering Geophysics 1997, Cambridge University Press, s. 265÷296.
- 
-

# Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego

## LOFRES project - low frequencies passive seismicity by use of seismic noise



Dr hab. inż., prof. nadzw.  
Zenon Pilecki \*)



Dr inż., prof. nadzw.  
Zbigniew Isakow \*\*)

**Treść:** W artykule omówiono założenia metodyczne systemu LOFRES do pomiaru metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. System ten służy do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. Badania są wykonywane za pomocą dwóch metod: sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej. W artykule przedstawiono ich podstawy metodyczne oraz algorytmy przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. Przedstawiono również przykłady wyników badań. W podsumowaniu wskazano na zalety i ograniczenia sejsmiki pasywnej. Podkreślono większe znaczenie metody interferometrii sejsmicznej w rozwiązywaniu zagadnień w geoinżynierii.

**Abstract:** This paper presents the methodological assumptions of the system LOFRES adapted for the low frequency passive seismicity. This system is used to study the structure and properties of subsurface layers of geological medium by seismic noise. The system uses two methods: microseismic sounding and seismic interferometry. The paper describes the methodological basis and the algorithms of processing and interpretation of seismic data. It also presents examples of research results. The summary points to the advantages and limitations of the passive seismicity. Greater importance of seismic interferometry methods in solving problems of geoenvironment was highlighted.

### Słowa kluczowe:

system LOFRES, niskoczęstotliwościowa sejsmika pasywna, mikrosondowanie sejsmiczne, interferometria sejsmiczna, szum sejsmiczny regionalny, szum sejsmiczny lokalny, rozdzielczość, zasięg głębokościowy

### Key words:

LOFRES system, low frequency passive seismicity, microseismic sounding, seismic interferometry, regional seismic noise, local seismic noise, resolution, depth penetration

## 1. Wprowadzenie

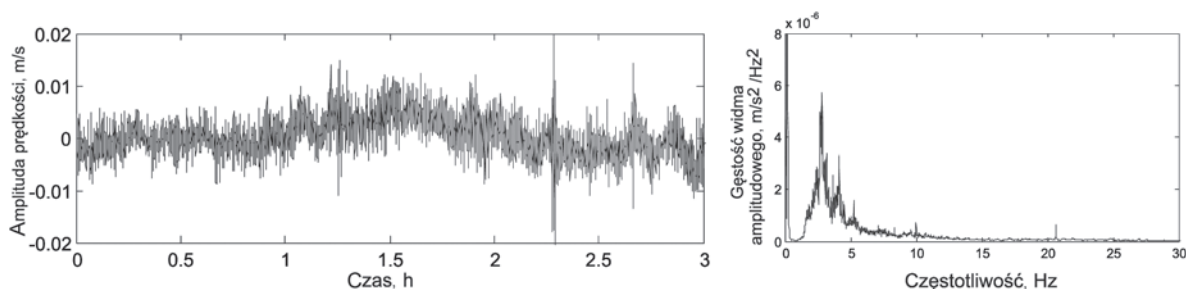
Celem projektu LOFRES było opracowanie nowatorskiego systemu pomiarowego niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS (ang. *low frequency seismic*) do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego.

Sejsmika LFS bazuje głównie na analizie dyfuzyjnego pola sejsmicznego, tzw. szumu sejsmicznego jako rezultatu wielokrotnego rozpraszania fali sejsmicznej. Szum sejsmiczny może być: regionalny nazywany globalnym lub lokalny, nazywany kulturowym [16]. Szumy o charakterze regionalnym są wywołane na ogół przez procesy naturalne, np.

trzęsienia Ziemi, działalność wulkaniczną, falowanie mórz i oceanów, oddziaływanie prądów morskich na kontynenty lub oddziaływanie gwałtownych przepływów mas powietrznych. Szumy lokalne są wywołane drganiami od przejeżdżających pojazdów, pracą maszyn, urządzeń i człowieka lub wstrząsami indukowanymi działalnością górniczą lub inną (rys. 1). Częstotliwość analizowanych sygnałów sejsmicznych wynosi na ogół od 0,1 do 3 Hz w przypadku szumu regionalnego, a szumu lokalnego nawet do 30 Hz [5]. Maksymalny zasięg głębokościowy rozpoznania związany z częstotliwością analizowanej powierzchniowej fali sejsmicznej może wynosić od kilkudziesięciu metrów do kilku tysięcy metrów [6].

System LOFRES, ze względu na funkcje pomiarowe, jest przystosowany do badań dwoma metodami: sondowaniem mikrosejsmicznym MS (ang. *microseismic sounding*) i interferometrią sejsmiczną IS (ang. *seismic interferometry*). Obie

\*) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, \*\*) Instytut Technik Innowacyjnych EMAG,



Rys. 1. Przykład szumu sejsmicznego z jego widmem amplitudowym zarejestrowanego na terenie górniczym  
 Fig. 1. An example of regional seismic noise with its amplitude spectrum registered on the mining area

metody rozwinęły się w ostatnich latach wraz z postępem technologicznym w zakresie produkcji szerokopasmowych czujników oraz wzrostem mocy obliczeniowej komputerów. Zarejestrowany szum sejsmiczny jest wykorzystywany do wydzielenia fal powierzchniowych. Wynikiem przetwarzania i interpretacji są obrazy zmian różnych parametrów sejsmicznych. W przypadku MS jest to obraz zmian amplitud widma z głębokością, a w przypadku IS – obraz zmian prędkości fali poprzecznej z głębokością. Są to parametry, które mogą być pomocne w ocenie jakości górotworu.

W ostatnich latach pojawiło się wiele prac związanych z zastosowaniem sejsmiki pasywnej LFS. Należy zauważyć silny rozwój przede wszystkim metody IS. Najczęściej jest ona wykorzystywana do analizy regionalnych szumów sejsmicznych związanych z trzęsieniami ziemi. Na podstawie obliczonych krzywych dyspersji fal powierzchniowych wyznacza się przekroje głębokościowe prędkości fali poprzecznej w skorupie ziemskiej, np. [11, 19]. Pojawiają się prace związane z inżynierskim wykorzystaniem sejsmiki LFS w badaniach osuwisk [13]. Szersze omówienie zagadnień związanych z rozwojem metody interferometrii sejsmicznej można znaleźć w pracy [4].

System LOFRES został opracowany przez konsorcjum Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG, Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz Centrum Transferu Technologii EMAG. Szerszy opis systemu można znaleźć w pracy [9].

W artykule omówiono podstawy metodyczne dwóch metod sejsmiki LFS: sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej oraz przedstawiono założenia metodyczne systemu LOFRES. W podsumowaniu podkreślono zalety i ograniczenia sejsmiki LFS.

## 2. Podstawy metodyczne sondowania mikrosejsmicznego

W metodzie MS parametry fali powierzchniowej, estymowane z zapisów szumu sejsmicznego, są związane linowymi zależnościami z budową i właściwościami ośrodka. Częstotliwość, dla której następuje zmiana amplitudy, związana jest z głębokością następującą zależnością

$$H = K \cdot \frac{V_R}{f}$$

gdzie:

- $H$  – głębokość, m,
- $K$  – współczynnik głębokości (od 0,35 do 0,5),
- $V_R$  – prędkość fali Rayleigha, m/s,
- $f$  – częstotliwość, Hz.

Badania prowadzone przez Gorbatikova i innych [6, 7, 8] wykazały związek amplitudy widma składowej pionowej fali Rayleigha z niejednorodną budową ośrodka geologicznego.

Fala Rayleigha, przechodząc przez strefę o słabszych parametrach sprężystych, w porównaniu do otaczającego ośrodka, zwiększa amplitudę. W ośrodkach bardziej sztywnych amplituda się zmniejsza.

Badania metodą MS są realizowane z wykorzystaniem co najmniej dwóch stanowisk pomiarowych. Jedno stanowisko referencyjne, nazywane również bazą, jest stałe i nie zmienia swojego położenia w czasie pomiarów. Pozostałe są ruchome i mogą być przemieszczane do różnych punktów pomiarowych. Rejestracja w każdym punkcie jest prowadzona przez okres co najmniej jednej godziny w celu osiągnięcia stacjonarności zapisu. Do przetwarzania wykorzystuje się głównie składową pionową szumu sejsmicznego, natomiast rejestracje z pozostałych składowych mogą posłużyć w lepszym rozznaniu charakteru pola falowego i jego stacjonarności. Na rysunku 2 przedstawiono podstawowe etapy przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie sondowania mikrosejsmicznego. Szersze omówienie tego zagadnienia można znaleźć w pracach [6, 7].

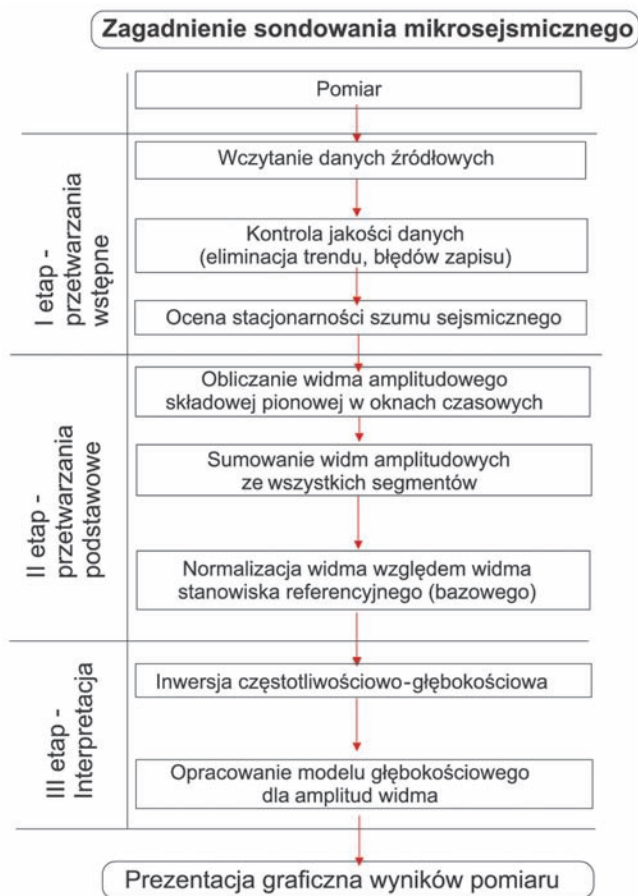
Metoda MS znalazła zastosowanie przy rozpoznaniu wglębnej budowy geologicznej [2], monitoringu procesów wulkanicznych [20], badania anizotropii ośrodków [10], lub monitoringu sekwestracji CO<sub>2</sub> [1]. Przykład uzyskanych wyników w badaniach jakości górotworu pokazano na rysunku 3. Badania przeprowadzono na terenie górniczym nad filarem w utworach karbońskich, wytworzonym w wyniku obustronnej, wielopokładowej eksploatacji [17]. Dla porównania przeprowadzono symulację numeryczną stanu naprężenia i deformacji w rejonie wytworzonego filara.

## 3. Podstawy metodyczne interferometrii sejsmicznej

Metoda IS polega na odwzorowaniu odpowiedzi impulsowej ośrodka tzw. funkcji Greena, w obszarze między dwoma czujnikami, za pomocą korelacji wzajemnej lub dekonwulcji sygnałów sejsmicznych zarejestrowanych na tych czujnikach. Metoda jest oparta na założeniach sformułowanych przez Claerbouta [3], a opisana teoretycznie w pracach [12, 21]. Pierwsze eksperymenty polegające na obliczeniu funkcji Greena poprzez korelację wzajemną dyfuzyjnego, ultradźwiękowego pola falowego zapisanego na czujnikach piezoelektrycznych zostały przeprowadzone przez Weavera i Lobkisa [12, 22]. W sejsmologii pierwsze prace [2, 18] dotyczące odtworzenia funkcji Greena między parą sejsmometrów przeprowadzono dla korelacji wzajemnej fali koda. Zastosowanie metody IS w górnictwie przedstawiono w pracach [14, 17].

Metodyka IS nie wymaga spełnienia stacjonarności sejsmicznego pola falowego, dlatego nie jest konieczne zakładanie bazy referencyjnej jak w metodzie MS. Jest jednak konieczna zabudowa wszystkich linii profilowych od początku pomiaru, co wymusza posiadanie większej liczby czujników.





Rys. 2. Schemat przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie sondowania mikrosejsmicznego przyjęty w systemie LOFRES [na podstawie 17]

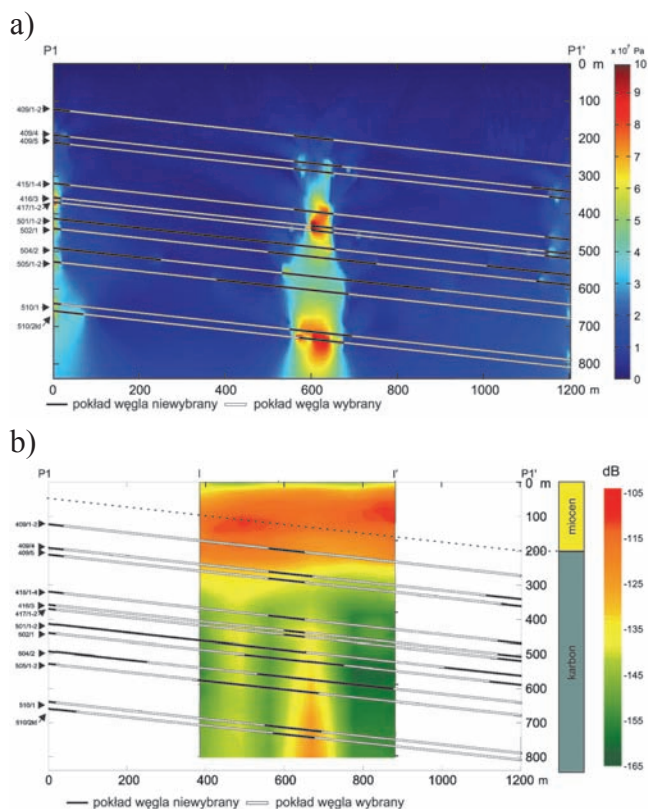
Fig. 2. Scheme of processing and interpretation of seismic data by microseismic sounding applied in LOFRES system [on the basis of 17]

W metodzie IS wykorzystuje się fale powierzchniowe, które niosą informację o budowie i właściwościach ośrodka geologicznego, opisane w postaci krzywych dyspersji. Można wykorzystać składową pionową fali Rayleigha i/lub składową poziomą fali Love'a. Fale powierzchniowe wydzielane są z zarejestrowanego szumu sejsmicznego za pomocą operacji matematycznych przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych pokazanych na rysunku 4. Natomiast na rysunku 5 pokazano przykład wyników otrzymanych tą metodą w porównaniu do wyników profilowania sejsmicznego w otworze.

W metodzie IS rejestracja jest prowadzona w sposób ciągły z krokiem próbkowania dobranym dla konkretnego zadania. W celu uzyskania większej rozdzielczości obrazu sejsmicznego, krok próbkowania jest mniejszy. Długość rejestracji zależy od charakterystyki pola falowego badanego rejonu, a zwłaszcza dominujących częstotliwości i kierunków propagacji oraz celu badań związanych z głębokością rozpoznania i rozdzielczością końcowego obrazu sejsmicznego. Generalnie im dłuższy jest pomiar tym dokładniejsza interpretacja. Z pracy [15] wynika, że po jednodniowym pomiarze szumu sejsmicznego możliwa jest korzystna estymacja fal powierzchniowych.

**4. Założenia systemu LOFRES**

System LOFRES jest przeznaczony do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka



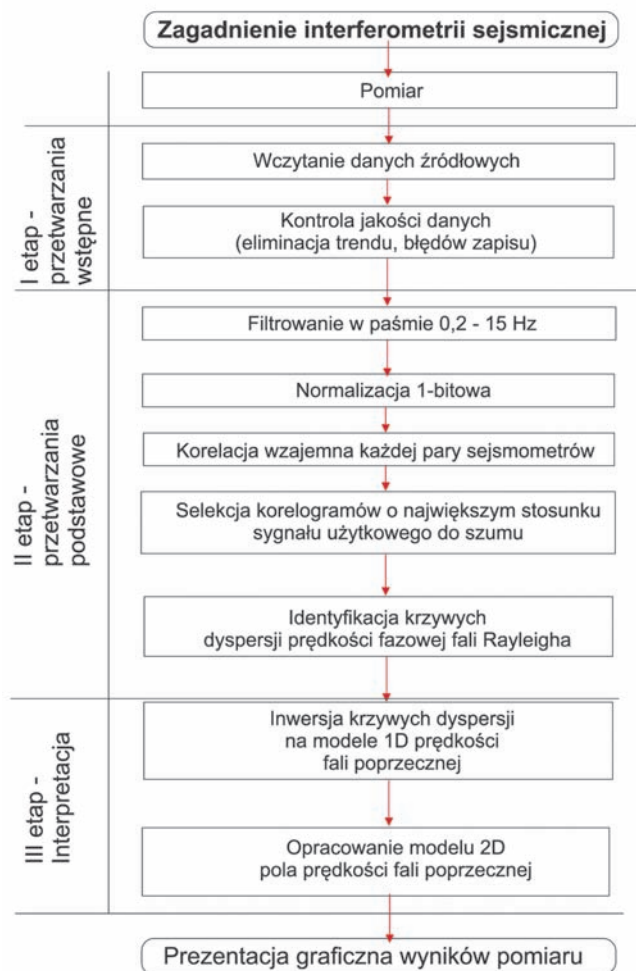
Rys. 3. Przykład wyników badań metodą sondowania mikrosejsmicznego na terenie górniczym: numeryczny model pola naprężenia pionowego w rejonie filara –a); obraz sejsmiczny zmian amplitudy widma składowej pionowej fali Rayleigha –b) dla identycznego przekroju [17]

Fig. 3. Example of microseismic sounding results measured on the mining area: numerical model of vertical stress field in the region of the pillar (upper); and seismic section of spectrum amplitude changes of vertical component of Rayleigh wave (lower) for the same cross-section [17]

geologicznego za pomocą sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej na podstawie rejestracji szumu sejsmicznego. System ten umożliwia w sposób automatyczny prowadzenie ciągłych pomiarów drgań w warunkach terenowych z odpowiednią dynamiką w zakresie niskich częstotliwości. W zależności od celu badań system pozwala na wykonywanie pomiarów w różnych konfiguracjach. Należy podkreślić, że istotnym powodem zainteresowania metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej jest nieskomplikowany pomiar, a zwłaszcza brak potrzeby stosowania aktywnego źródła fal sejsmicznych.

System LOFRES składa się z części aparaturowej i programowej służącej do przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. System LOFRES jest złożony z odpowiednio skonfigurowanych modułów pomiarowych i współpracującego z nimi centrum gromadzenia danych, przetwarzania i zobrazowania wyników.

System ten posiada mobilne, autonomiczne stacje pomiarowe wyposażone w jedno lub trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki i stacjonarne stacje referencyjne wyposażone w trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki. Stacje pomiarowe i referencyjne są wyposażone w zasilanie akumulatorowe lub bateryjne oraz odbiornik GPS do precyzyjnej synchronizacji podstawy czasu i określania położenia czujników podczas dokonywania pomiarów.



Rys. 4. Schemat przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie interferometrii sejsmicznej przyjęty w systemie LOFRES [na podstawie 17]

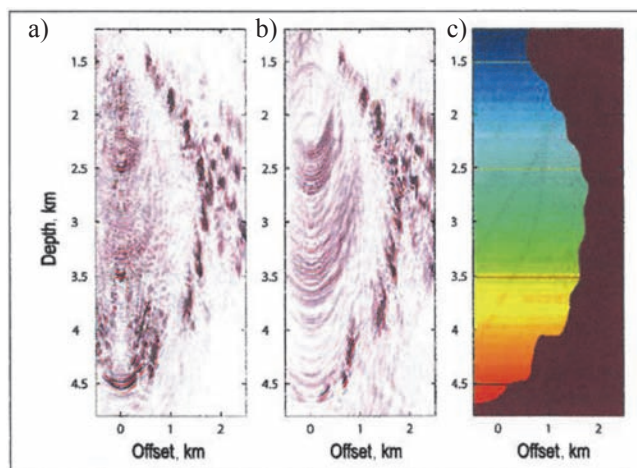
Fig. 4. Scheme of processing and interpretation of seismic data by seismic interferometry applied in LOFRES system [on the basis of 17]

System jest wyposażony w nośniki pamięci o dużej pojemności do gromadzenia rejestrowanych danych. Dostępna jest również wersja z radiową transmisją danych do centrum przetwarzania i interpretacji.

Rysunek 6 przedstawia przykład rozmieszczenia czujników na obszarze pomiarowym. Odległość między czujnikami i profilami pomiarowymi  $dl$  i  $dx$  jest uwarunkowana rozdzielczością poziomą i głębokością rozpoznania ośrodka. W trakcie pomiaru mobilne stacje pomiarowe mogą być cyklicznie przemieszczane w różne węzły siatki pomiarowej, co umożliwi badanie większego obszaru w sposób bardziej efektywny. W przypadku zastosowań, w których konieczne będzie ciągłe śledzenie w czasie rzeczywistym zmian, np. w górnictwie – kontrola zmian stanu naprężenia i deformacji w górotworze, system pomiarowy może być zabudowany w terenie na stałe z większą liczbą stacji pomiarowych.

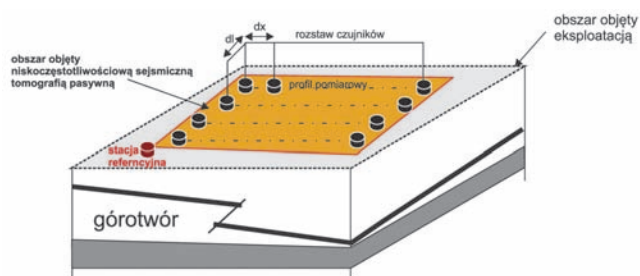
Oprogramowanie systemu LOFRES składa się z kilku głównych bloków strukturalnych, pozwalających na realizację następujących funkcji:

- AKWIZYCJA - rejestracja i archiwizacja danych pomiarowych.
- PRZETWARZANIE WSTĘPNE - poprawianie jakości



Rys. 5. Przykład wyników badań metodą interferometrii sejsmicznej: obraz granicy wysadu solnego opracowany na podstawie profilowania sejsmicznego w otworze –a); obraz granicy wysadu solnego na podstawie pomiarów metodą interferometrii sejsmicznej z czujnikami na powierzchni terenu –b); model prędkościowy –c) [23]

Fig. 5. Example of seismic interferometry results: final migrated image from VSP traces (left); image from back-propagated VSP traces (middle); velocity model (right) [23]



Rys. 6. Przykład schematu pomiarowego systemu LOFRES [17]

Fig. 6. Exemplary measurement scheme of LOFRES system [17]

danych pomiarowych (usuwanie trendów w zapisach, usuwanie wartości średnich itp.), analiza widmowa zarejestrowanych zapisów, analiza polaryzacyjna i obliczanie korelogramów,

- PRZETWARZANIE WŁAŚCIWE - wyznaczanie funkcji Greena dla fali powierzchniowej, opracowanie modeli krzywych dyspersji dla prawdopodobnego pola prędkości w ośrodku geologicznym,
- INTERPRETACJA - rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego dla opisu badanego ośrodka geologicznego za pomocą parametrów sejsmicznych,
- EDYCJA WYNIKÓW - graficzne przedstawianie wyników obliczeń.

Testowe pomiary wykonane prototypem aparatury dostarczyły interesujących wyników [17]. Szerszy opis techniczny systemu można znaleźć w pracy [9].

## 5. Podsumowanie

W projekcie LOFRES podjęto prace badawczo-rozwojowe i konstrukcyjne związane z opracowaniem prototypu

systemu LOFRES oraz oprogramowania dla przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych. Pierwsze prace badawcze zostały ukierunkowane na analizę struktury zniszczenia w górotworze na terenach górniczych. System umożliwia prowadzenie rozpoznania w rejonach nienadających się do stosowania aktywnej sejsmiki z powodu różnego rodzaju zakłóceń, lub ze względu na zagrożenia górnicze. W wyniku podziemnej eksploatacji górniczej górotwór często ulega zniszczeniu, aż do powierzchni terenu. Proces zniszczenia, ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną, rozwija się w górotworze nierównomiernie. Sprzyja to powstawaniu stref koncentracji naprężenia i deformacji i może być źródłem silnych wstrząsów górotworu. Lokalizacja stref osłabienia w górotworze oraz ich monitorowanie w czasie wydaje się być interesujące dzięki zastosowaniu metody LFS. Zagadnienia te mogą mieć wymierny efekt w poprawie bezpieczeństwa prowadzenia prac górniczych oraz ochrony infrastruktury znajdującej się na terenach górniczych.

Istotną zaletą zastosowanej metody LFS jest nieskomplikowany pomiar, a zwłaszcza brak potrzeby użycia aktywnego źródła fal sejsmicznych. Na obecnym etapie rozwoju metody badań istotnym wyzwaniem jest poprawa rozdzielczości sejsmicznych obrazów wynikowych. W przypadku metody interferometrii sejsmicznej w schemacie bazującym na krzywej dyspersji, wiąże się to z uszczegółowieniem ich wielomodalności. W przypadku sondowania mikrosejsmicznego o rozdzielczości obrazu sejsmicznego decyduje częstotliwość fali powierzchniowej.

Metoda niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej, bazującej na pomiarze szumu sejsmicznego, posiada duże możliwości badawcze, lecz należy wziąć pod uwagę, że jest na początku drogi rozwoju i osiągnięcie istotnej przydatności utylitarnej wymaga jeszcze znaczącego wysiłku badawczego.

**Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

## Literatura

1. *Boullenger B.*: Finite Difference Feasibility Modelling of Time-lapse Seismic Noise Interferometry for CO2 monitoring. TU Delft, Master Thesis, 2012.
2. *Campillo M., Paul A.*: Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 2003, 299(5606), 547-549.
3. *Claerbout, J. F.*: Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, 1968, 33(2), s. 264-269.
4. *Czarny R.*: Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszycie).
5. *Dangel S.*: Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 128 (1-3), s. 135-158.
6. *Gorbatikov A. V., Kalinina A. V., Volkov V. A. i in.*: Results of Analysis of Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain, *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161, s. 1561-1578.
7. *Gorbatikov A. V., Stepanova M.*: Statistical characteristics and stationarity properties of low-frequency seismic signals, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2008, Vol. 44, No. 1, pp. 50-59.
8. *Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A.*: Simulation of the Rayleigh Waves in the Proximity of the Scattering Velocity Heterogeneities. Exploring the Capabilities of the Microseismic Sounding Method, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2011, Vol. 47, No. 4, s. 354-369.
9. *Isakow Z., Pilecki Z., Sierodzki P.*: Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. „Przegląd Górniczy” 2014, 7 (w tym zeszycie).
10. *Lin F.C., Ritzwoller M.H., Yang Y., Moschetti M.P., Fouch M.J.*: Complex and variable crust and uppermost mantle seismic anisotropy in the western US. *Nature Geosci.*, 2011, 4, s. 55-61.
11. *Lin, F. C., Li, D., Clayton, R. W., Hollis, D.*: High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array. *Geophysics*, 2013, 78(4), Q45-Q56.
12. *Lobkis, O. I., Weaver R.L.*: On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 110, s. 3011-3017, doi: 10.1121/1.1417528.
13. *Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., Jongmans, D., Michoud, C., Jaboyedoff, M.*: Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003-2012)*, 2012, 117(F1).
14. *Marcak H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.*: Możliwości wykorzystania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszycie).
15. *Nicolson H., Curtis A., Baptie B., Galetti E.*: Seismic interferometry and ambient noise tomography in the British Isles. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2012, 123, s. 74-86.
16. *Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz., Pszonka J.*: Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszycie).
17. *Pilecki Z.* (kier. zadania): Raport z realizacji prac badawczych w projekcie LOFRES. IGSMiE PAN, Kraków 2014, (praca niepublikowana).
18. *Sneider R., Gret A., Huub D., Scales J.*: Coda wave interferometry for estimatic nonlinear behavior in seismic velocity. *Science* 2004, vol. 295, s. 2253-2255.
19. *Sneider R., Wapenaar J.*: Imaging with ambient noise. *Physics Today*, 2010, s. 45-49.
20. *Ueno T., Saito T., Shiomi K., Enescu B., Hirose H., Obara K.*: Fractional seismic velocity change related to magma intrusions during earthquake swarms in the eastern Izu peninsula, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, B12305, doi:10.1029/2012JB009580.
21. *Wapenaar, K., Fokkema, J.*: Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, 2006, 71(4), SI33-SI46.
22. *Weaver, R.L., Lobkis O.I.*: Ultrasonics without a Source: Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies. *Physical Review Letters*, 2001, 87, 134301.
23. *Willis M.E., Lu R., Campman X., Toksoz M.N., Zhang Y., de Hoop M. V.*: A novel application of time – reversed acoustics: salt-dome flank imaging using walkaway VSP surveys. *Geophysics*, 2006, Vol. 71, no. 2, A7-A11.

# Możliwości wykorzystania interferometrii sejsmicznej w górnictwie

## The possibility of using seismic interferometry in mining industry



*Prof. dr hab. inż. Henryk Marcak<sup>\*)</sup>*



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki  
prof. IGSMiE PAN<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Zbigniew Isakow  
prof. nadzw. Instytutu EMAG<sup>\*\*)</sup>*



*Mgr inż. Rafał Czarny<sup>\*)</sup>*

**Treść:** Metoda interferometrii sejsmicznej znalazła zastosowanie w zagadnieniach rozpoznawania budowy geologicznej głębokiego podłoża i w sejsmice poszukiwawczej do odwzorowania budowy ośrodka. Istnieje również możliwość wykorzystania tej metody dla potrzeb górniczych. W części wstępnej przedstawiono podstawy matematyczne i fizyczne metody interferometrii sejsmicznej. Następnie omówiono możliwości wykorzystania tej metody w rozwiązywaniu problemów geologiczno-górnich. Scharakteryzowano rodzaje zjawisk sejsmicznych, występujących na terenach górniczych, możliwych do wykorzystania w interferometrii sejsmicznej. Omówiono przykłady sytuacji geologiczno-górnich, w których metoda interferometrii sejsmicznej może dostarczyć wartościowej informacji.

**Abstract:** Seismic interferometry method has been used to identify the deep geological structure of the ground and seismic exploration for mapping the structure medium. It is also possible to use this method for mining purposes. In the introductory part we present the mathematical foundations and physical methods of seismic interferometry. It then discusses the possibility of using this method in solving geological-mining tasks. Seismic phenomena occurring in mining areas and suitable for application in seismic interferometry have been described. Examples of geological and mining situation in which seismic interferometry method can provide valuable information have been presented.

### **Słowa kluczowe:**

*niskoczęstotliwościowa sejsmika pasywna, interferometria sejsmiczna, szum sejsmiczny regionalny, szum sejsmiczny lokalny, górnictwo, wstrząsy górotworu, funkcja Greena*

### **Key words:**

*low frequency passive seismics, seismic interferometry, regional seismic noise, local seismic noise, mining industry, rock mass tremor, Green's function*

<sup>\*)</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, <sup>\*\*)</sup> Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

## 1. Wprowadzenie

Metody sejsmiczne znalazły szerokie zastosowanie w geofizyce górniczej. Są one wykorzystywane do rozpoznania budowy i właściwości górotworu w rejonie eksploatacji górniczej. Najczęściej badania sejsmiczne są projektowane w wersji aktywnej, w której fale są sztucznie wzbudzone. Jest również stosowana inna wersja tej metody, w której do rozpoznania pola prędkości fal sejsmicznych wykorzystuje się różne fale, na przykład powstałe w wyniku zaistnienia wstrząsów indukowanych przez prace górnicze. Taka wersja wykorzystania metod sejsmicznych nazywana jest sejsmiką pasywną.

Ostatnio w ramach sejsmiki pasywnej rozwinęła się metoda tzw. interferometrii sejsmicznej [2, 9, 23, 24]. W tej metodzie można odtworzyć funkcję Greena reprezentującą właściwości fal powierzchniowych, przechodzących lub odbitych z odpowiednio wybranych zapisów szumu sejsmicznego [3, 6, 7, 9, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 22]. Istnieją różne rodzaje szumu, który wykorzystuje się do tego celu [16]. Jednym z nich jest naturalny szum sejsmiczny związany z falowaniem morskim, zmianami atmosferycznymi i mikrosejsmami. Innym rodzajem szumu jest część kodowa zapisów drgań sejsmicznych wywołanych trzęsieniami Ziemi. Wreszcie może być rejestrowany szum antropogeniczny taki jak szum od przejeżdżających pojazdów lub szum od pracujących urządzeń budowlanych i przemysłowych. Jak pokazano w literaturze, każdy z tych rodzajów szumu może być wykorzystany do rozpoznania budowy i właściwości ośrodka geologicznego w rejonie, w którym prowadzi się rejestrację.

W pracy przedstawiono wyniki analizy szumów wytwarzanych w wyniku prowadzenia działalności górniczej, które mogą być wykorzystane do prowadzenia badań metodami interferometrii sejsmicznej dla rozwiązywania różnych zagadnień w górnictwie. W części wstępnej omówiono podstawy matematyczne i fizyczne metody interferometrii sejsmicznej. Następnie przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania metod interferometrii sejsmicznej w rozwiązywaniu problemów geologiczno-górnich. Scharakteryzowano zjawiska sejsmiczne występujące na terenach górniczych, przydatne w przetwarzaniu i interpretacji metodą interferometrii sejsmicznej. Omówiono przykłady sytuacji geologiczno-górnich, w których metoda interferometrii sejsmicznej może dostarczyć wartościowej informacji.

## 2. Funkcja Greena

Rozchodzenie się fal sprężystych jest opisane przez równanie różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu typu hiperbolicznego

$$\nabla^2 f = 1/c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

gdzie:

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \text{ jest operatorem Laplace'a,}$$

$c$  – prędkość propagacji fali.

Jeżeli założymy a priori, że rozwiązanie ma postać

$$f = \Theta(x_1, x_2, x_3) \exp(-i\omega t), \quad (2.2)$$

gdzie:  $\omega$  – częstość fali,  $t$  – czas, to równanie (2.1) zostanie zamienione na równanie Hamiltona

$$\nabla^2 \Theta + k^2 \Theta = 0, \quad (2.3)$$

gdzie:  $k = \frac{\omega}{c}$ .

Od strony matematycznej rejestrowana fala sejsmiczna jest rozwiązaniem równania falowego. Bardzo często rozważa się takie rozwiązanie przy założeniu, że źródłem fali jest impuls powstały w momencie  $t_0$  o skończonej energii. Wówczas, jeżeli źródło fali jest umieszczone w punkcie  $\vec{r}_A(x_A, y_A, z_A)$  a rozwiązanie jest obliczone w punkcie  $\vec{r}(x, y, z)$  to ma ono postać funkcji Greena  $G(\vec{r}_A, \vec{r}, t)$ . Oczywiście kształt funkcji Greena zależy od właściwości ośrodka (ośrodek akustyczny, w którym rozchodzą się tylko fale kompresyjne, ośrodek skalny z dwoma rodzajami fal objętościowych, ośrodek dyspersyjny, w którym rozchodzą się fale powierzchniowe, itp.). Istnieją pewne właściwości funkcji Greena, niezależne od rodzaju ośrodka, w którym rozchodzi się fala sejsmiczna (oznaczymy ją jako  $G$ ) i takie, które są związane z konkretnym rodzajem ośrodka, np. funkcję Greena dla fal rozchodzących się w ośrodku, skalnym (oznaczymy ją jako  $G_{BK}$ ).

Dla fal sejsmicznych, w których wielkością fizyczną, rozchodzącą się w postaci fali jest przemieszczenie  $\vec{u}(u, v, w)$ , można wprowadzić potencjały skalarny  $\varphi$  i wektorowy  $\Psi$

$$\vec{u} = \text{grad}(\varphi) + \text{rot}(\vec{\Psi}). \quad (2.4)$$

Wówczas otrzymamy dwa równania falowe opisujące propagację fal podłużnych i poprzecznych

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi + k_\alpha^2 \varphi &= 0, \\ \nabla^2 \Psi_i + k_\beta^2 \Psi_i &= 0, \quad i = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdzie:

$k_\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_\alpha^2} = \frac{\omega \rho}{\lambda + 2\mu}$  jest liczbą falową dla fali podłużnej,

a  $k_\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_\beta^2} = \frac{\omega \rho}{\mu}$  jest liczbą falową dla fali poprzecznej,  $\lambda$  i  $\mu$

to stałe Lamego (współczynniki sprężystości).

Rozważmy równanie falowe w postaci

$$\nabla^2 G(\vec{r}, t, \vec{r}_0, t_0) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} G(\vec{r}, t, \vec{r}_0, t_0) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \delta(t - t_0). \quad (2.6)$$

Rozwiązanie tego równania nazwiemy funkcją Greena. Po transformacji Fouriera zastosowanej do tego równania otrzymamy

$$\nabla^2 \hat{G}(\vec{r}, \vec{r}_0, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} G(\vec{r}, \vec{r}_0, \omega) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \exp(-i\omega t_0). \quad (2.7)$$

Rozwiązaniem tego równania jest wyrażenie

$$\hat{G}(\vec{r}, \vec{r}_0, \omega) = -\frac{\exp(-ik(\vec{r} - \vec{r}_0))}{4\pi(\vec{r} - \vec{r}_0)} \exp(-i\omega t_0), \quad (2.8)$$

gdzie:

$\vec{r} - \vec{r}_0$  jest miarą odległości pomiędzy położeniem źródła  $\vec{r}_0$  fali a położeniem punktu, w którym obliczamy rozwiązanie  $\vec{r}$ .

Odwrotna transformacja Fouriera prowadzi do rozwiązania równania (2.7) w dziedzinie czasu:

$$\begin{aligned} G(\vec{r}, t, \vec{r}_0, t_0) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-ik(\vec{r} - \vec{r}_0))}{4\pi(\vec{r} - \vec{r}_0)} \exp(-i\omega t_0) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi(\vec{r} - \vec{r}_0)} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-i\frac{\omega}{c}(\vec{r} - \vec{r}_0)\right) \exp(-i\omega t_0) d\omega = -\delta(t - t_0 + \frac{r - r_0}{c}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

U podstaw równań falowych leżą własności fizyczne ośrodka, w którym te fale się rozchodzą. Jeżeli w ośrodku nie ma deformacji postaci (gaz lub ciecz) to fale sejsmiczne, która się w tym ośrodku rozchodzi nazywamy falą akustyczną. Ruch falowy jest wówczas zmianą ciśnienia ośrodka, podstawą fizyczną tych równań są równania Eulera

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla p &= \vec{F}, \\ k_k \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \vec{V} &= q, \end{aligned} \quad (2.10)$$

gdzie:

- $p$  – ciśnienie,
- $\rho$  – gęstość,
- $\vec{V}$  – prędkość ruchu cząstek,
- $\vec{F}$  – siły zewnętrzne,
- $k_k$  – współczynnik ściśliwości,
- $q$  – rozkład źródeł.

Rozwiązanie w postaci funkcji Greena ma w tym przypadku postać

$$\begin{aligned} \hat{p}_A(\vec{r}, \omega) &= \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega), \\ \hat{p}_B(\vec{r}, \omega) &= \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Biorąc pod uwagę równanie ruchu (2.11) dla sił zewnętrznych równych zero otrzymamy

$$\begin{aligned} \vec{V}_{i,A}(\vec{r}, \omega) &= -(j\omega\rho(\vec{r}))^{-1} \nabla \hat{G}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega), \\ \vec{V}_{i,B}(\vec{r}, \omega) &= -(j\omega\rho(\vec{r}))^{-1} \nabla \hat{G}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega), \end{aligned} \quad (2.12)$$

gdzie

$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right)$  operator różniczkowy.

W dziedzinie widmowej te równania Eulera (2.10) mają postać

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} + i\omega k_k \hat{p} &= \hat{F}_i, \\ \frac{\partial \hat{p}_i}{\partial t} + i\omega \rho \vec{v}_i &= \hat{q}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Jeżeli ośrodek ma sztywność (ciała stałe), to jak to pokazano w równaniu (2.5) wówczas powstają dwie fale które nazwiemy sprężysto-dynamicznymi. Podstawą fizyczną tych równań wynikającą z równowagi sił są zależności:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} &= \vec{F}, \\ -S_{ijkl} \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) &= h_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (2.14)$$

gdzie:

- $\tau_{ij}$  – tensor naprężeń,
- $S_{ijkl}$  – macierz sprężystości,
- $h_{ij}$  – tensor zewnętrznych deformacji.

Te równania w dziedzinie częstotliwości mają postać

$$i\omega \rho \vec{v}_i - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \hat{F}_i \quad (2.15)$$

W tej sytuacji rozwiązania będą dotyczyły czterech równań skalarnych. Jednego dla fali akustycznej i trzech dla fali poprzecznych spolaryzowanych w trzech prostopadłych kierunkach. Rozwiązanie w postaci funkcji Greena jest związane w dziedzinie częstotliwości z następującym zapisem

$$\begin{aligned} V_{i,A}(\vec{r}, \omega) &= \vec{G}_{k,p}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega), \\ V_{i,B}(\vec{r}, \omega) &= \vec{G}_{k,q}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega), \\ \hat{t}_{i,j,A}(\vec{r}, \omega) &= \frac{S_{ijkl}}{i\omega} \frac{\partial}{\partial x_l} \vec{G}_{k,p}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega), \\ \hat{t}_{i,j,B}(\vec{r}, \omega) &= \frac{S_{ijkl}}{i\omega} \frac{\partial}{\partial x_l} \vec{G}_{k,q}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega), \end{aligned} \quad (2.16)$$

gdzie:

- $S_{ijkl}$  – macierz sztywności odwrotna do macierzy sprężystości,

$\vec{G}_{k,p}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega)$  - jest odpowiedzią sejsmiczną na wymuszenie w punkcie  $r_B$ , jeżeli prędkość drgań jest równa  $v$ , a działające siły równe  $F$ .  $\vec{G}_{k,p}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega)$  jest odpowiedzią dla źródła umieszczonego w punkcie  $X_A$  ( $q$  i  $p$  są parametrami wskazującymi na położenie źródła odpowiednio w punktach  $X_A$  i  $X_B$ ). Parametr  $k=0$  odpowiada fali kompresyjnej (podłużnej), a  $k=1, 2, 3$  odpowiada polaryzacji odpowiednio w kierunkach  $x, y, z$ .

Wreszcie dla fal powierzchniowych funkcje Greena mają bardziej skomplikowany charakter:

$$\begin{aligned} G^{Love}(\vec{r}, \vec{r}') &= \sum_v p^{vLove}(z, \varphi) \frac{\exp(i(k_v X + \frac{\pi}{4}))}{\sqrt{\frac{\pi}{2} k_v X}} p^{vLove \times}(z, \varphi), \\ G^{Rayleigh}(\vec{r}, \vec{r}') &= \sum_v p^{vRayleigh}(z, \varphi) \frac{\exp(i(k_v X + \frac{\pi}{4}))}{\sqrt{\frac{\pi}{2} k_v X}} p^{vRayleigh \times}(z, \varphi), \end{aligned} \quad (2.17)$$

gdzie:

funkcje  $p^{vLove}$  i  $p^{vRayleigh}$  są macierzowymi funkcjami, zależnymi od warunków granicznych na powierzchni zmian właściwości geologicznych i od kierunku polaryzacji rejestrowanej fali  $\varphi$  oraz głębokości  $z$ . Symbol  $\times$  oznacza funkcję sprzężoną hermitowsko. Wskaźnik  $v$  oznacza numer mody a  $k_v$  liczbę falową dla  $v$  tej mody,  $X$  jest odległością poziomą [15].

Bardziej złożony charakter fal sprężysto-dynamicznych i powierzchniowych jest jedynie związany z warunkami fizycznymi, które trzeba uwzględnić przy ich opisie, a nie z ich właściwościami matematycznymi, dlatego w dalszych rozważaniach ogólnych funkcję Greena oznaczmy przez  $G$ , a w przypadku praktycznego zastosowania wzorów wrócimy do oznaczeń dla fali sprężysto-dynamicznych, z którymi mamy do czynienia w praktyce pomiarowej.

### 3. Teoria wzajemności

Teoria wzajemności była rozwijana od wielu lat, a jej istotne elementy można znaleźć w takich publikacjach jak [4, 17, 20, 21, 22, 23, 24]. Przedstawimy tutaj główny tok myślenia wyekstrahowany z tych publikacji, na którym oparta jest metoda interferometrii sejsmicznej.

Właściwości pola falowego leżące u podstaw metody interferometrii sejsmicznej rozważa się, zakładając istnienie dwóch punktów  $X_A$  i  $X'$  otoczonych spójnym brzegiem  $\partial D$ . Teoria wzajemności jest wynikiem bardziej podstawowego twierdzenia Ostrogradzkiego-Gaussa, które jest sposobem zamiany całkowania przestrzennego na całkowanie powierzchniowe.

Dla wektora  $\partial D$  określonego i ciągłego w obszarze  $D$  to twierdzenie ma postać

$$\int_D \nabla \vec{Q} dV = \oint \vec{Q} \cdot \vec{n} dS, \quad (3.1)$$

gdzie:

całkowanie po prawej stronie jest obliczane na powierzchni  $\partial D$ , która oddziela obszar  $D$  od reszty objętości,  $n$  – wektor jednostkowy skierowany normalnie do powierzchni  $\partial D$ .

W przypadku teorii wzajemności rozpatrujemy dwa punkty  $X_A$  i  $X_B$  i rozważamy dwa widma funkcji Greena  $G(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega)$  i  $G(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega)$  w dalszych rozważaniach  $\vec{G}_A$  i  $\vec{G}_B$ , których źródła są w punktach  $\vec{r}_A$  i  $\vec{r}_B$ .

Zbudujemy wektor  $\vec{Q}$  w postaci

$$\vec{Q} = \vec{G}_A \left( \frac{1}{\rho_B} \nabla \vec{G}_B \right) - \vec{G}_B \left( \frac{1}{\rho_A} \nabla \vec{G}_A \right), \quad (3.2)$$

$$\nabla \vec{Q} = \nabla \hat{G}_A \left( \frac{1}{\rho_B} \nabla \hat{G}_B \right) + \hat{G}_A \nabla \left( \frac{1}{\rho_B} \nabla \hat{G}_B \right) - \nabla \hat{G}_B \left( \frac{1}{\rho_A} \nabla \hat{G}_A \right) + \hat{G}_B \nabla \left( \frac{1}{\rho_A} \nabla \hat{G}_A \right). \quad (3.3)$$

Biorąc pod uwagę równanie (2.7) dla  $t_0=0$

$$\nabla \vec{Q} = i\omega \hat{G}_B \delta(\vec{r} - \vec{r}_A) - i\omega \hat{G}_A \delta(\vec{r} - \vec{r}_B) + \omega^2 (k_A - k_B) \hat{G}_A \hat{G}_B + \left( \frac{1}{\rho_B} - \frac{1}{\rho_A} \right) \nabla \hat{G}_B \nabla \hat{G}_A = i\omega \left( \hat{G}_B \delta(\vec{r} - \vec{r}_A) - \hat{G}_A \delta(\vec{r} - \vec{r}_B) \right). \quad (3.4)$$

Zakładając, że  $k_A = k_B$  i  $\rho_A = \rho_B$  otrzymamy wzór końcowy w postaci

$$\hat{G}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) - \hat{G}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, \omega) = \oint_{\partial D} \frac{1}{i\omega \rho} (\hat{G}_A \nabla \hat{G}_B - \hat{G}_B \nabla \hat{G}_A) \vec{n} dS. \quad (3.5)$$

Wzór (3.5) jest tzw. konwolucyjną formą teorii wzajemności. Inną bardziej użyteczną formą jest forma autokorelacyjna. Wówczas do wzoru (3.1) wprowadzamy wyrażenie

$$\vec{Q} = \hat{G}_A^* \left( \frac{1}{\rho_B} \nabla \hat{G}_B \right) - \hat{G}_B^* \left( \frac{1}{\rho_A} \nabla \hat{G}_A \right), \quad (3.6)$$

gdzie:

$\hat{G}_A^*$  jest funkcją sprzężoną z funkcją  $\hat{G}_A$ .

Analogicznie do wzorów (3.3) i (3.4) można napisać wzór, który jest podstawowym w teorii sejsmiki pasywnej

$$\hat{G}^*(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) + \hat{G}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, \omega) = \oint_{\partial D} \frac{1}{i\omega \rho} (\hat{G}_A^* \nabla \hat{G}_B - \hat{G}_B \nabla \hat{G}_A^*) \vec{n} dS, \quad (3.7)$$

gdzie:

$\hat{G}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, \omega)$  jest widmem funkcji Greena, a  $\hat{G}^*(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega)$  jest funkcją sprzężoną do tej funkcji.

Operator  $\nabla$  jest operatorem gradientu, a  $\vec{n}$  kierunkiem normalnym do brzegu  $\partial D$ .

Przyjmując następujące założenia

$$\nabla \hat{G}_A \cdot \vec{n} = -ik |\cos(\alpha)| \hat{G}_A, \quad (3.8)$$

$$\nabla \hat{G}_A^* \cdot \vec{n} = -ik |\cos(\alpha)| \hat{G}_A^*,$$

równanie odpowiedniości akustycznej przyjmie postać

$$\hat{G}^*(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) + \hat{G}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, \omega) = \oint_{\partial D} \frac{2}{c\rho} \hat{G}^*(\vec{r}_A, \vec{r}, \omega) \hat{G}(\vec{r}_B, \vec{r}, \omega) |\cos(\alpha)| dS. \quad (3.9)$$

Przy dużej odległości pomiędzy obszarem granicznym  $\partial D$  i punktami A i B przyjmuje się, że  $\cos(\alpha)=1$ . W przypadku fal powstałych w ośrodku sprężysto-dynamicznym, czyli ośrodku skalnym równanie to można uogólnić w postaci [21]:

$$\hat{G}_{q,p}^{v,F*}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) + \hat{G}_{q,p}^{v,F}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) = - \oint_{\partial D} \frac{2}{c\rho} \left( \hat{G}_{q,p}^{v,F*}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) \hat{G}_{q,p}^{v,F}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) \right) dS. \quad (3.10)$$

Jeżeli prawdziwe obserwacje prędkości drgań sejsmicznych  $\hat{V}_{p,K}^{ob}(\vec{r}_A, \vec{r}, \omega)$  można powiązać z funkcjami Greena za pomocą zależności

$$\begin{aligned} \hat{V}_{p,K}^{ob}(\vec{r}_A, \vec{r}, \omega) &= \hat{G}_{p,K}^{v,F}(\vec{r}_A, \vec{r}, \omega) S_K(\vec{r}, \omega), \\ \hat{V}_{q,B}^{ob}(\vec{r}_B, \vec{r}, \omega) &= \hat{G}_{q,K}^{v,F}(\vec{r}_A, \vec{r}, \omega) S_K(\vec{r}, \omega), \end{aligned} \quad (3.11)$$

gdzie:

$D(\vec{r}, \omega) = S_K^*(\vec{r}, \omega) S_K(\vec{r}, \omega)$  jest widmem mocy funkcji źródłowej sygnału sejsmicznego, to dla rzeczywistych danych równanie (3.10) ma postać

$$\begin{aligned} \left\{ \hat{G}_{q,p}^{v,F*}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, \omega) + \hat{G}_{p,q}^{v,F}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, \omega) \right\} D(\vec{r}, \omega) &\approx \\ &\approx \frac{2}{c\rho} \oint_{\partial D} \left( \hat{V}_{p,K}^{ob*}(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega) \hat{V}_{q,B}^{ob}(\vec{r}, \vec{r}_B, \omega) \right) dS. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Prawa strona tego równania jest równa rzeczywistej funkcji Greena, a więc

$$\hat{G}_{p,q}^{v,F}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, t) * D(t) = \frac{2}{c\rho} \oint_{\partial D} \left( \hat{V}_{p,K}^{ob*}(\vec{r}, \vec{r}_A, t) * \hat{V}_{q,B}^{ob}(\vec{r}, \vec{r}_B, -t) \right) dS. \quad (3.13)$$

W przypadku jednowymiarowym, jeżeli rozpatrujemy ruch falowy wzdłuż promienia sejsmicznego, to równanie redukuje się do proporcjonalności

$$\hat{V}_{p,K}^{ob*}(\vec{r}, \vec{r}_A, t) \approx \hat{G}_{p,K}^{v,F}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, t) * \hat{G}_{p,q}^{v,F}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, t). \quad (3.14)$$

Natomiast w przypadku dwuwymiarowym do proporcjonalności

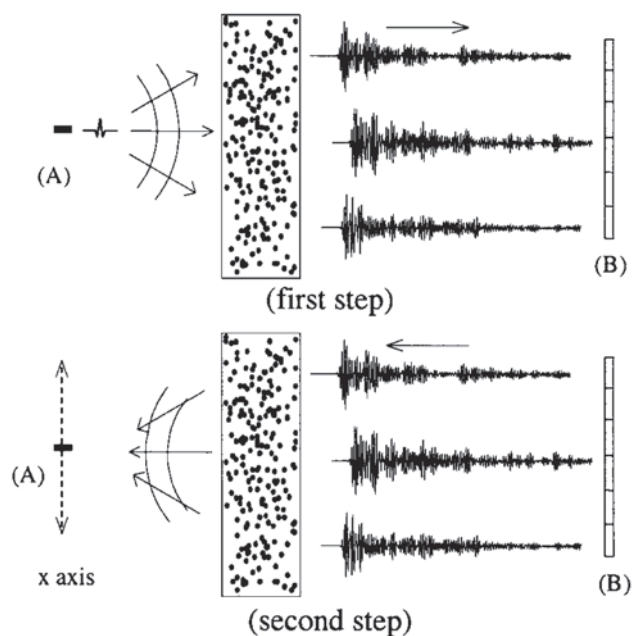
$$\hat{V}_{p,K}^{ob*}(\vec{r}, \vec{r}_A, t) \approx \oint_{\partial D} \left( \hat{G}_{p,K}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_A, t) * \hat{G}_{p,q}^{v,F}(\vec{r}, \vec{r}_B, t) \right) dS \quad (3.15)$$

Biorąc pod uwagę to, że spłot z prawej strony równania jest równoważny funkcji autokorelacji otrzymamy wzór, który ma duże znaczenie praktyczne

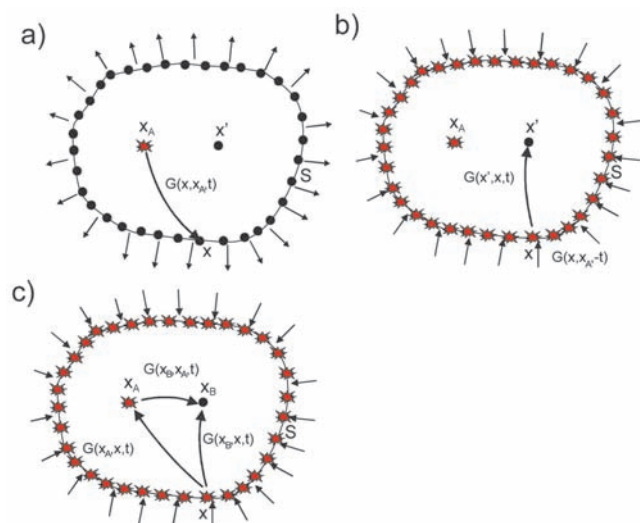
$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \hat{G}_{p,K}^{v,F}(\vec{r}_A, \vec{r}_B, t') + \hat{G}_{p,K}^{v,F}(\vec{r}_B, \vec{r}_A, -t') \right\} S(t-t') &\approx \\ &\approx \frac{2}{c\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \hat{V}_{p,K}^{ob}(\vec{r}_A, t') \hat{V}_{q,B}^{ob}(\vec{r}_B, t+t') \right) dt. \end{aligned} \quad (3.16)$$

#### 4. Podstawy fizyczne interferometrii sejsmicznej

Podstawy fizyczne metod rozpoznania budowy geologicznej w oparciu o zasady „akustyki odwrotnej czasowo” wyjaśnia eksperyment laboratoryjny przeprowadzony w ośrodku rozpraszającym [5, 7]. Emitowano krótki impuls akustyczny ze źródła A i zarejestrowano sygnał w kilku czujnikach w odbiornikach umieszczonych w B. Następnie z czujników w B wyemitowano takie same sygnały jak zarejestrowane z uwzględnieniem opóźnień czasowych, realizując je w czasie ujemnym jak to pokazano na rysunku 1, i w punkcie A zanotowano sygnał bardzo zbliżony do wcześniej wysłanego. To doświadczenie jest potwierdzeniem dosyć oczywistej właściwości ruchu falowego polegającej na identyczności sygnału jaki zarejestrujemy w punkcie B, jeżeli źródło jest umieszczone w punkcie A do sygnału zarejestrowanego w punkcie A, jeżeli identyczne źródło jest umieszczone w punkcie B.



Rys 1. Eksperyment badawczy w ośrodku dyspersyjnym [5]  
Fig. 1. Research experiment in the dispersive medium [5]



Rys. 2. Interpretacja różnych postaci funkcji Greena [21]  
Fig. 2. Interpretation of various forms of Green's functions [21]

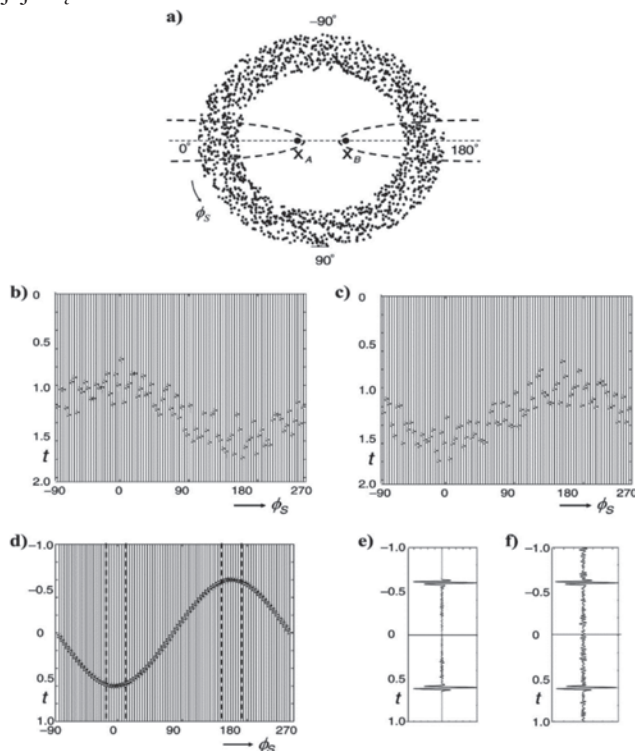
Interpretację wzorów interferencyjnych przeprowadzimy w oparciu o rysunek 2. Mamy dwa rodzaje pól sejsmicznych. Jedną przyczynową, która jest wynikiem rozchodzenia się fal ze źródeł położonych na powierzchni  $\partial D$ , będących w rzeczywistości źródłami fal sejsmicznych. Drugą anty-przyczynową, rozchodzenia się fali sejsmicznej z punktu źródłowego do punktów leżących na powierzchni  $\partial D$ , które odzwierciedla funkcja Greena z ujemnym czasem. Realizacją funkcji anty-przyczynowej jest wysyłanie z punktu  $x_A$  impulsu, który dotrze do wszystkich punktów na granicy  $\partial D$  (rys. 2a).

W wyniku takiego wirtualnego źródła, czyli działania anty-przyczynowej części wzoru, ze wszystkich źródeł rozłożonych na powierzchni zostanie wysłany odwrotny impuls sejsmiczny, między innymi do punktów  $x_A$  i  $x_B$ . Zgodnie ze wzorem 3.10 autokorelacja tych zapisów jest proporcjonalna do funkcji Greena dla fal przechodzących między tymi punktami. Rejestracja aktywnego źródła w punkcie  $x_A$  w czasie rzeczywistym w punkcie  $x_B$  jest więc równoważna rejestracji uzyskanej z sumy autokorelacji dla rejestracji pochodzących ze źródeł rozłożonych na brzegu obszaru.

Możemy więc uważać, że we wszystkich punktach na brzegu zostaje wysłany impuls będący odbiciem fali wysłanej z punktu  $x_A$  w czasie  $-t$ , który w czasie  $t$  dochodzi do punktu  $x'$  (rys. 2b). Mamy więc taką sytuację, jak gdyby z punktu  $x_A$  rozchodził się sygnał, który jest rejestrowany w punkcie  $x'$  za pomocą luster rozłożonych na brzegu obszaru (rys. 2c). Źródła rzeczywiste  $x$  można zastąpić równoważnym źródłem urojonym w punkcie  $x_A$ , które jest odbierane w punkcie  $x'$ . Możemy również punkty rozpraszania na brzegu obszaru traktować jako źródła fali, jeżeli rzeczywiste źródło jest w punkcie  $x_A$ . Takie punkty będziemy nazywali źródłami pozornymi.

Istnieją bardzo istotne właściwości wyników obliczania korelacji wzajemnej szumu sejsmicznego opartego o pomiary szumu, prowadzone w dwóch punktach w przypadku rozkładu źródeł szumu rozłożonych w przestrzeni dwuwymiarowej. Te właściwości najłatwiej zobaczyć na przykładzie [16] symulacji pokazanych na rysunku 3. Położenia źródeł sejsmicznych pokazano na rysunku 3a. Falę sejsmiczną w postaci szumu zarejestrowano w punktach  $x_A$  i  $x_B$ . Wyniki takiej rejestracji w punkcie  $x_A$  przedstawiono w układzie czas - kąt  $\phi_S$  na rysunku 3b, a rejestracje w punkcie  $x_B$  przedstawiono na rysunku 3c. Na rysunku 3d pokazano wyniki obliczenia korelacji wzajemnej z zapisów przedstawionych na rysunkach 3b i 3c. Liniami

przerwanymi zaznaczono te części echogramu, które są efektem istnienia źródeł w tzw. strefie Fresnela. Sumowanie funkcji korelacji wzajemnej uzyskanych ze źródeł ze strefy Fresnela daje efekt przedstawiony na rysunku 3e, który okazał się identyczny z wynikami korelacji wzajemnej uzyskanych ze wszystkich danych pomiarowych (rys. 3f), na podstawie wszystkich danych przedstawionych na rysunku 3a. Wnioski wynikające z omawianego przykładu można uogólnić w oparciu o teorię fazy stacjonarnej [16] na wszystkie układy pomiarowe. Wynika z tego uogólnienia, że układy punktów pomiarowych mają właściwości zbliżone do właściwości anten, tzn. reagują na źródła położone w wybranych obszarach przestrzeni, a nie reagują na źródła położone w innych jej częściach.



Rys. 3. Wpływ stref Fresnela na wyniki obliczeń korelacji wzajemnej: a– położenie źródeł sejsmicznych b– rejestracja sygnałów sejsmicznych w punkcie  $x_A$ , c– rejestracja sygnałów sejsmicznych w punkcie  $x_B$ , d– korelogram e– wyniki obliczenia funkcji Greena z korelogramu obliczonego z rejestracji sygnałów pochodzących od źródeł położonych w strefie Fresnela, f– wyniki obliczenia funkcji Greena z całego korelogramu [16]

Fig. 3. Influence of the Fresnel zones on the cross-correlation calculation results a– location of seismic sources b– registration of seismic signals at the point  $x_A$  c– registration of seismic signals at the point  $x_B$  d– correlogram e– results of the calculation of the Green's function from correlogram for signals from sources in the Fresnel zone f– the results of the calculation of the Green's function of the whole correlogram [16]

## 5. Podstawy metodyczne zastosowania interferometrii sejsmicznej w zagadnieniach geologiczno-górnicych

Do odtwarzania funkcji Greena wykorzystuje się zarówno rejestrację wstrząsów sejsmicznych, jak również szumu sejsmicznego. Najczęściej wykorzystuje się końcową część zapisu fal wytwarzanych przez trzęsienia ziemi zwaną falami koda.



W ośrodku geologicznym rozchodzi się wiele fal o różnych właściwościach. Najważniejsze są fale objętościowe: dylatacyjna fala podłużna typu P i skłębna fala poprzeczna typu S. Wzdłuż powierzchni ziemi rozchodzą się fale powierzchniowe typu Rayleigha i Love'a. Ten typ fal interferencyjnych zanika szybko z głębokością i charakteryzuje się właściwościami dyspersyjnymi, tzn. krzywą dyspersji, czyli zależnością prędkości fazowej od częstotliwości fali. Struktura fal powierzchniowych jest więc uwarunkowana rozkładem prędkości fal podłużnych i poprzecznych w badanym ośrodku. Z funkcji Greena fal powierzchniowych otrzymanej metodami interferometrii sejsmicznej można skonstruować krzywą dyspersji i, porównując ją do krzywej modelowej, odtworzyć pole prędkości w ośrodku sejsmicznym. Jest to najczęstszy sposób wykorzystywania rezultatów przetwarzania zapisów sejsmicznych metodą interferometrii sejsmicznej do uzyskania informacji o budowie geologicznej badanego rejonu. Istnieje bardzo obszerna literatura dotycząca tego zagadnienia, np. [12, 18, 17].

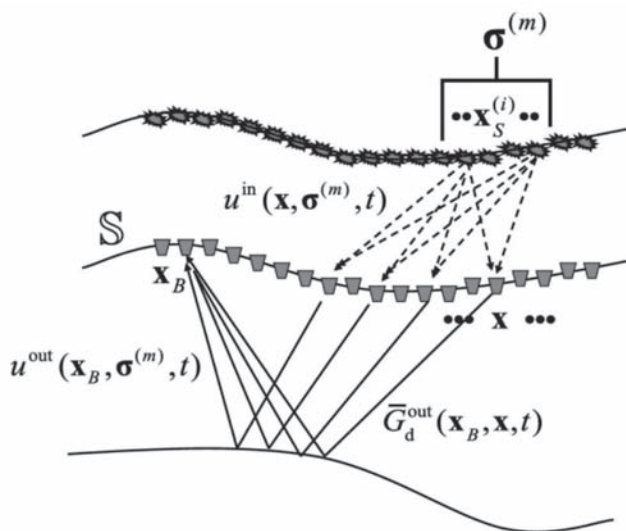
Rzadziej pokazywane są zastosowania tej metody do rozwiązywania szczególnych problemów, takich jak lokalizacja epicentrów wstrząsów, czy metoda lokalizacji zasypanych górników [8].

Innym częstym sposobem wykorzystania metody interferometrii sejsmicznej jest wykorzystanie tzw. źródeł pozornych, wyznaczonych z zapisów szumu do znajdowania reflektorów sejsmicznych [24]. Fale są rozpraszane w wyniku przejścia drgań sejsmicznych przez niejednorodny ośrodek. Każdy punkt rozpraszania może być traktowany jako źródło fali rozproszonej, które zgodnie z opisanym mechanizmem może zostać zastąpione przez źródło w punkcie  $x_a$ . Na rysunku 4 przedstawiono sposób konstruowania źródeł urojonych dla badania właściwości ośrodka. Punkty rozpraszania rozłożone w przestrzeni z rozkładem statystycznym  $\sigma$  pozwalają odtwarzać funkcje Greena pomiędzy punktami  $x$  a źródłem urojonym  $x_B$ . Możemy takie źródła wykorzystać do badania fali przechodzącej i odbitej [18].

## 6. Rodzaje zjawisk sejsmicznych na terenie górniczym możliwych do wykorzystania w interferometrii sejsmicznej

### 6.1. Szumy sejsmiczne na powierzchni terenu górniczego

Jednym z rodzajów informacji pomiarowej, jakie są wykorzystywane w interferometrii sejsmicznej, są szumy



Rys. 4. Konstrukcja źródeł urojonych w badaniach sejsmicznych [22]

Fig. 4. Construction of an imaginary source of seismic studies [22]

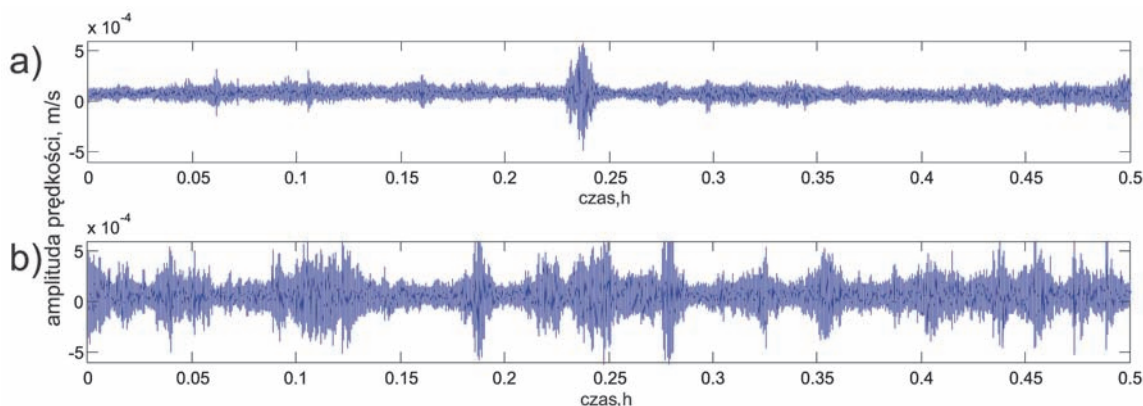
sejsmiczne. Na terenie górniczym jednej z kopalń węgla kamiennego wybrano dwa punkty pomiarowe na powierzchni odległe od siebie o 2,8 km. Prowadzono wielodniowe rejestracje szumu sejsmicznego za pomocą szerokopasmowych czujników Guralp-6TD. Na rysunku 5a pokazano przykład rejestracji w sobotę, w warunkach zatrzymanej eksploatacji, a na rysunku 5b przykład rejestracji w dniu powszednim z prowadzoną eksploatacją.

Nie ulega wątpliwości, że na strukturę zapisu szumu sejsmicznego ma wpływ eksploatacja górnicza. Źródła drgań szumu sejsmicznego są rozłożone w górotworze.

Na rysunku 6 pokazano funkcje Greena uzyskane z interpretacji zapisów szumowych w różnych dniach. Zbieżność krzywych otrzymanych w poszczególnych dniach wskazuje na to, że rejestracje szumu można wykorzystać do odtworzenia budowy i właściwości górotworu w rejonie eksploatacji.

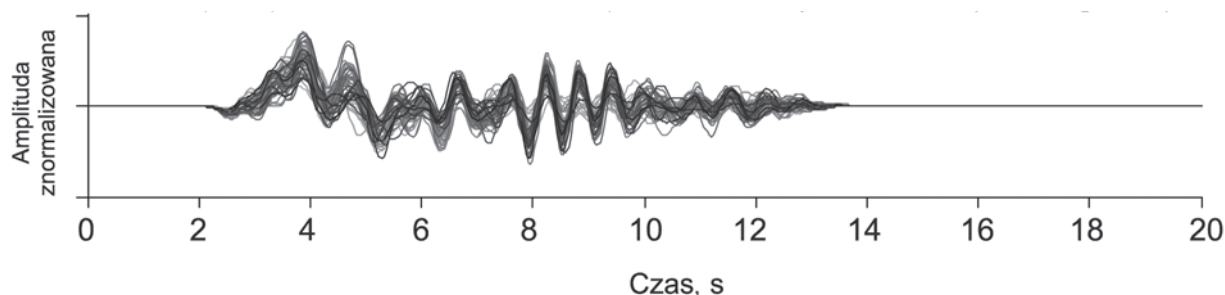
### 6.2. Wstrząsy sejsmiczne w górotworze

Eksploatacji górniczej towarzyszą efekty sejsmiczne, które są rezultatem pękania skał i ich wzajemnego przemieszczania. Te efekty mają różny charakter i zasadniczo różnią



Rys 5. Rejestracja szumu sejsmicznego – a) w sobotę w warunkach zatrzymanej eksploatacji pokładów węgla oraz – b) w piątek w warunkach prowadzonej eksploatacji pokładów węgla

Fig. 5. Registration of seismic noise – a) on Saturday under the break of coal mining conditions and registration of seismic noise – b) on Friday under the coal mining conditions



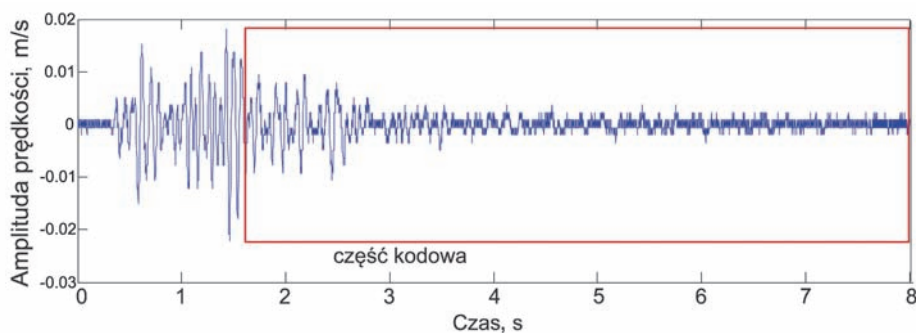
Rys. 6. Funkcja Greena obliczona z szumu sejsmicznego zarejestrowanego na terenie górniczym w różnych dniach w warunkach prowadzonej eksploatacji

Fig. 6. Green function calculated from the seismic noise recorded in the mining terrain in different days under the conditions of mining activity

się między sobą przede wszystkim w zależności od energii uwalnianej w wyniku kruchego odkształcania skał. Jeżeli energia źródła sejsmicznego jest duża, rzędu  $10^2$ - $10^{10}$ J, to źródła fal sejsmicznych nazywamy wstrząsami górniczymi. Jeżeli energia w tych źródłach jest mniejsza, to nazywamy je źródłami sejsmoakustycznymi.

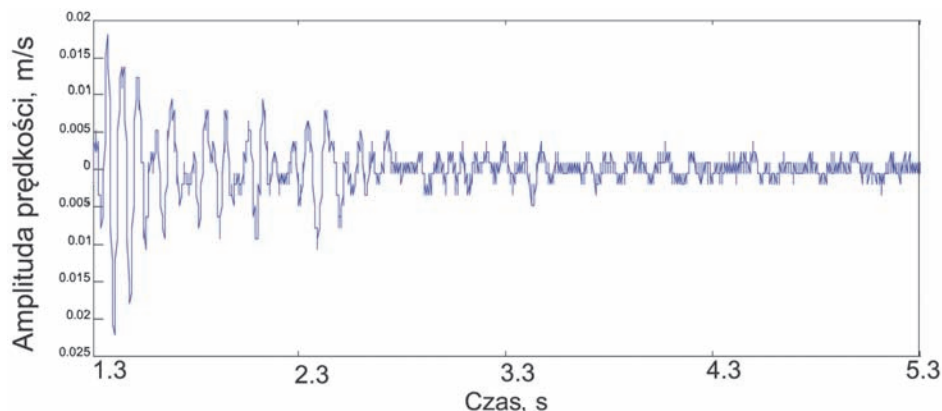
Drgania jakie rozchodzą się wzdłuż powierzchni ziemi na większe odległości są wynikiem powstania silnych wstrząsów o energii powyżej  $10^3$ J, i takie wstrząsy mogą wytwarzać fale powierzchniowe, które mogą być przetwarzane metodami interferometrii sejsmicznej. Prześledźmy strukturę wstrząsu na przykładzie rejestracji z dnia 30 marca 2011 roku, zapisanego na stacji sejsmometrycznej kopalni Jas-Mos w odległości kilku kilometrów od epicentrum wstrząsu (rys. 7). Wstrząs powstał w kopalni Rydułtowy i miał energię  $8,8 \cdot 10^7$ J.

Ten zapis ma swoją unikalną strukturę, z której może wynikać, że intensywność działania źródła miała swoje etapy kończące się drganiem o największej energii, tzw. efektem zerowym źródła [11]. Tę część zapisu, która powstała po efekcie zerowym (rys. 8) możemy uważać za zapis fali koda, czyli fali rozprzosej na niejednorodnościach. Na rysunku 9 pokazano widmo amplitudowe całego zapisu wstrząsu sejsmicznego oraz tylko fali koda. Można zauważyć wyraźne przesunięcie widma obydwu zapisów, przy czym widmo zapisu kodo-wego ma dwa maksima – jedno przy częstotliwości około 2 Hz, a drugie 4 Hz. Przeprowadzono badania dyspersyjności końcowej części zapisu sejsmicznego za pomocą filtrów wąskopasmowych. Uzyskano zależność energii sygnału od częstotliwości i prędkości fali poprzecznej przedstawioną na rysunku 10. Otrzymaliśmy zarys dwóch krzywych dyspersyjnych, które są wynikiem wyraźnego wzmocnienia fal powierzchniowych dla częstotliwości 2 i 4 Hz.



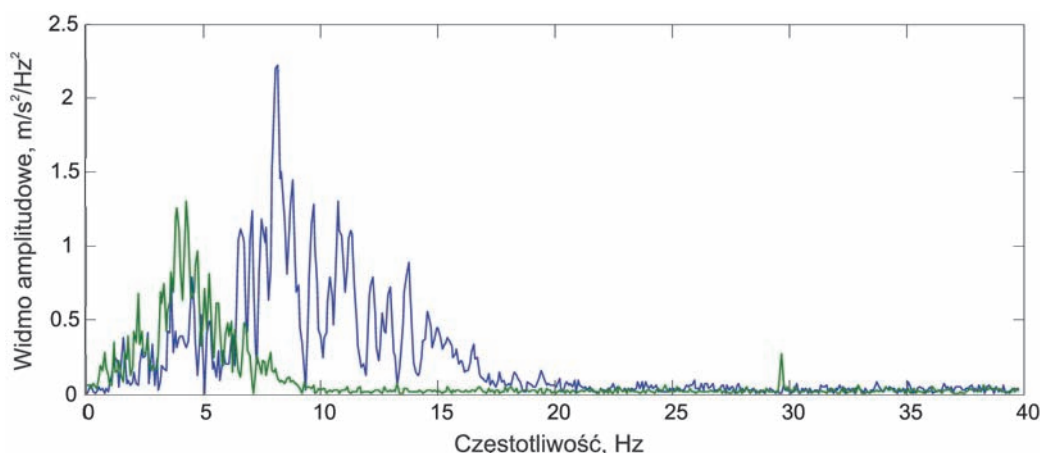
Rys. 7. Rejestracja wstrząsu z KWK Rydułtowy przez Stację Geofizyczną KWK Jas-Mos

Fig. 7. Registration of tremor from Rydułtowy coal mine by geophysical station at Jas-Mos coal mine



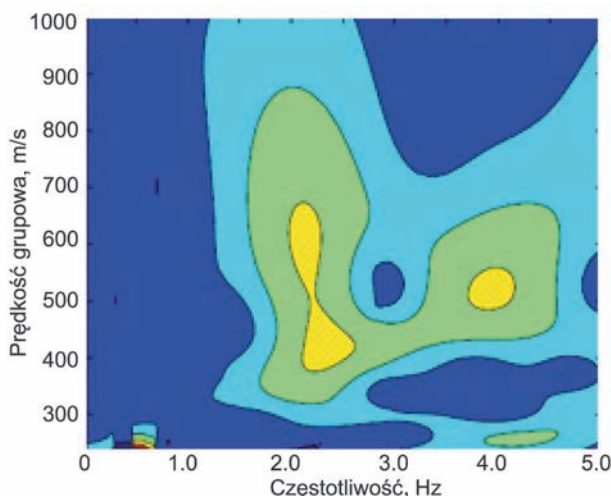
Rys. 8. Fale koda w rejestracji wstrząsu sejsmicznego z KWK Rydułtowy-Anna

Fig. 8. Coda waves in the seismic registration of tremor from Rydułtowy-Anna coal mine



Rys 9. Widma amplitudowe z zapisów pełnego (niebieska linia) i fali koda (zielona linia) rejestracji wstrząsu z kopalni Rydułtowy-Anna

Fig. 9. Amplitude spectra of the full registration (blue line) and wave coda (green line) of the tremor from Rydułtowy-Anna mine



Rys. 10. Krzywa dyspersji dla fali koda w rejestracji silnego wstrząsu z KWK Rydułtowy-Anna. Wielkość energii rośnie od koloru niebieskiego do żółtego

Fig. 10. Dispersion curve for coda wave in the registration of a strong tremor from Rydułtowy-Anna coal mine. The energy increases from blue to yellow

Przedstawiony przykład wskazuje na to, że podobnie jak to ma miejsce w przypadku zapisów trzęsień ziemi, zapisy wstrząsów pochodzenia górniczego mogą być wykorzystane do rozpoznania pola prędkości sejsmicznej w górotworze i zmian tych prędkości wywołanych pracami górniczymi. Oczywiście drgania jakie rozchodzą się wzdłuż powierzchni ziemi są wynikiem powstania silnych wstrząsów o energii powyżej  $10^3$ J, i takie wstrząsy mogą wytwarzać fale powierzchniowe, które można rozpoznawać metodami interferometrii sejsmicznej. Warunkiem niezbędnym jest jednak rejestracja tych zapisów w systemie pozwalającym na wyznaczanie różnicy czasów przyścia sygnałów na różne czujniki.

### 6.3. Szumy kulturowe w rejonie prac górniczych

W swoich badaniach sejsmicznych Draganov i inni [6] pokazali, że z korelacji wzajemnej można otrzymać koherentne elementy, które są równoznaczne sygnałom zarejestrowanym

w standardowych profilowaniach refleksyjnych. W rejonie ścian eksploatacyjnych występuje szum sejsmiczny wywołany pracą kombajnu, przenośników taśmowych, pękaniem skał pod wpływem nadmiernych naprężeń. Jest to środowisko przydatne do konstrukcji urojonych źródeł sejsmicznych, które można wykorzystać do rozpoznania budowy i właściwości górotworu.

### 7. Zastosowanie interferometrii sejsmicznej w problematyce górniczej

Jak już zaznaczono, w rezultacie przetwarzania zapisów szumowych względnie kody zapisów sejsmicznych można odtwarzać różne rodzaje funkcji Greena. Najczęściej odtwarzamy funkcję Greena dla pionowej składowej zapisu szumowego (trzeba zauważyć, że składowa pionowa jest związana jedynie z falą Rayleigha, podczas gdy składowe poziome są wynikiem rozchodzenia się fal Rayleigha i Love’a).

Odtworzenie funkcji Greena dla fali powierzchniowej Rayleigha pozwala na obliczenie krzywych dyspersji tej fali. Programami minimalizacyjnymi możemy odtworzyć pole prędkości fali sejsmicznej w górotworze. W rezultacie otrzymujemy:

- obraz budowy geologicznej ośrodka, a w wielu zagadnieniach górniczych odtworzenie budowy geologicznej górotworu jest ważnym zadaniem badawczym,
- znajomość prędkości fali sejsmicznej podłużnej, jak i poprzecznej, co umożliwia obliczenie parametrów sejsmicznych

$$\begin{aligned} \lambda &= \rho(V_p^2 - 2V_s^2), \\ \mu &= \rho 2V_s^2, \\ E &= \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \mu, \\ \nu &= \frac{E - 2\mu}{2\mu}, \end{aligned}$$

gdzie:

$\lambda, \mu$  - stałe Lamé’go,  $V_p$  i  $V_s$  prędkości fali podłużnej i poprzecznej,  $E$  i  $\nu$  to moduł Younga i współczynnik Poissona,  $\rho$  - gęstość.

Możemy z tych zapisów estymować współczynniki sprężystości i badać ich zmiany w czasie.

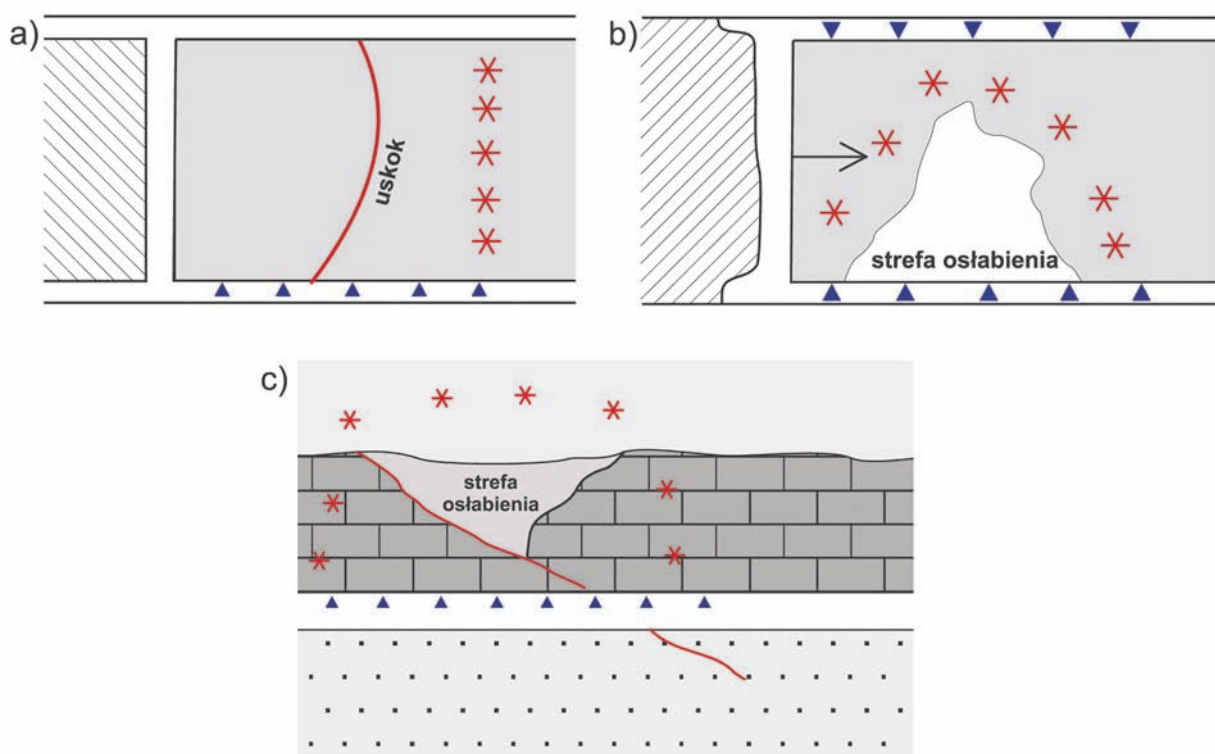
- okresowe badania umożliwiające śledzenie zmian pola prędkości związane z rozwojem sejsmiczności w górotworze.

Metody interferometrii oparte na estymacji źródeł pozornych są ciągle doskonalone i ich efektywność do rozwiązywania zagadnień górniczych powinna być zbadana. Jeżeli okaże się skuteczną, to może być bardzo pomocna w tych sytuacjach, które stanowią problem w badaniach metodami tradycyjnymi. Na rysunku 11a pokazano trudną sytuację sejsmiczną, która powstaje, gdy uskok, którego położenie badamy, jest w przybliżeniu prostopadły do wyrobiska, z którego ma być prowadzone rozpoznanie. Funkcja Greena dla fal odbitych pomiędzy źródłami pozornymi daje możliwość lokalizacji uskoku. Innym przykładem wykorzystania metod interferometrii sejsmicznej jest badanie stref osłabienia przed frontem ściany eksploatacyjnej, jak to pokazano na rysunku 11b. W wyniku rozmieszczenia źródeł pozornych wokół strefy osłabienia można ją lokalizować dokładnie. Na rysunku 11c przedstawiono sytuację, gdzie w stropie eksploатовanego złoza występuje strefa osłabienia, którą za pomocą źródeł pozornych można precyzyjnie lokalizować. Inny istotny problem jest związany z rozpoznaniem stref osłabienia za obudową szybu. Na rysunku 12 przedstawiono taką sytuację w rzucie pionowym i poziomym. Jeżeli udałoby się przeprowadzić właściwe pomiary szumu sejsmicznego obudowy szybowej do badania funkcji Greena dla źródeł pozornych, to strefę osłabienia można również zidentyfikować.

## 8. Podsumowanie

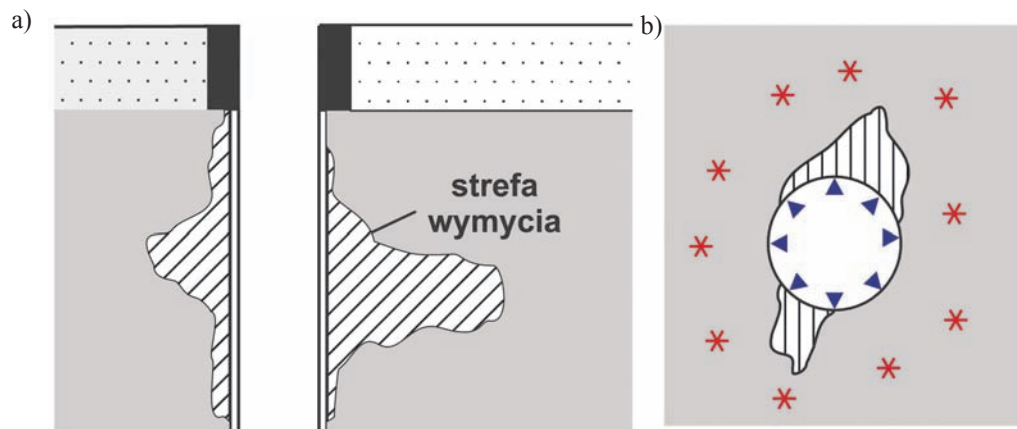
Metoda interferometrii sejsmicznej okazała się skuteczna w zagadnieniach rozpoznawania budowy geologicznej głębokiego podłoża i w sejsmice poszukiwawczej do odwzorowania budowy ośrodka. Istnieje również możliwość wykorzystania tej metody w zagadnieniach górniczych. Do tego celu mogą być wykorzystane co najmniej trzy rodzaje zjawisk sejsmicznych: szum sejsmiczny na powierzchni terenu górniczego, fale koda w rejestracjach wstrząsów pochodzenia górniczego oraz szumy kulturowe powstałe w wyniku pracy maszyn i urządzeń górniczych. Metoda interferometrii sejsmicznej posiada duże możliwości badawcze, które pozwalają na prowadzenie rozpoznania sejsmicznego poprzez analizę zjawisk, które dotychczas nie były szerzej wykorzystywane dla potrzeb górniczych (fale powierzchniowe), jak również w miejscach bardzo ważnych z punktu widzenia praktyki górniczej, takich jak wyrobiska górnicze, które nie nadają się, aby w nich stosować aktywne metody sejsmiczne z powodu zakłóceń różnego rodzaju oraz zagrożeń górniczych.

Należy jednocześnie zaznaczyć, że metoda interferometrii sejsmicznej, jak dotychczas, jest na początku drogi rozwoju, o czym świadczą ostatnie publikacje, a jej szersze wykorzystanie do celów utylitarnych wymaga jeszcze znaczącego wysiłku badawczego.



Rys. 11. Lokalizacja uskoku metodą interferometrii sejsmicznej – a) lokalizacja strefy osłabienia przed frontem ściany eksploatacyjnej – b) lokalizacja strefy osłabienia w stropie eksploатовanego złoza – c) (▼ położenie czujników rejestrujących szum sejsmiczny, \* sejsmiczne źródła pozornie)

Fig. 11. Location of fault by seismic interferometry – a) location of the weak zone in front of the longwall – b) location of the weak zone in the roof of the mining deposits – c) (▼ position of sensors recording seismic noise, \* seismic apparent sources)



Rys. 12. Lokalizacja stref osłabienia za obudową szybową – a) w rzucie pionowym – b) i poziomym (z prawej), (▼ położenie czujników rejestrujących szum sejsmiczny, \* sejsmiczne źródła pozorne)

Fig. 12. Location of weak zone near shaft casing – a) in vertical and – b) horizontal section, (▼ position of sensors recording seismic noise, \* seismic apparent sources)

**Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

## Literatura

1. Barmin M.P., Levshin A.L., Yang Y., Ritzwoller M.H.: Epicentral location based on Rayleigh wave Empirical Green's Functions from ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 2011, 184(2), 869-884.
2. Claerbout J.F.: Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, 1968, 33(2), 264-269.
3. Czarny R.: Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
4. De Hoop A. T.: An elastodynamic reciprocity theorem for linear, viscoelastic media. *Applied Scientific Research*, 1966, 16(1), 39-45.
5. Derode A., Roux P., Fink M.: Robust acoustic time reversal with high-order multiple scattering. *Physical Review Letters*, 1995, 75(23), 4206.
6. Draganov D., Wapenaar K., Mulder W., Singer J., & Verdel A.: Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(4).
7. Fink M.: Time-reversal acoustics in complex environments. *Geophysics*, 2006, 71(4), SI151-SI164.
8. Hanafy S. M., Cao W., McCarte, K., Schuster G. T.: Using super-stacking and super-resolution properties of time-reversal mirrors to locate trapped miners. *The Leading Edge*, 2009, 28(3), 302-307.
9. Lobkis O. I., Weaver R. L.: On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 110(6), 3011-3017.
10. McNamara D. E., Buland R. P.: Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the seismological society of America*, 2004, 94(4), 1517-1527.
11. Marcak H.: Parameters of a ground motion model induced by mining exploitation. *Archives of Mining Sciences*, 2008, 53, 335-348.
12. Paul A., Campillo M., Margerin L., Larose E., Derode A.: Empirical synthesis of time-asymmetrical Green functions from the correlation of coda waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 2005, 110(B8).
13. Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz., Pszonka J.: Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
14. Pilecki Z., Isakow Z., Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
15. Snieder R.: The theory of coda wave interferometry. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(2-3), 455-473.
16. Snieder R.: Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 2004, 69(4), 046610.
17. Snieder R., Grêt A., Douma H., Scales J.: Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. *Science*, 2002, 295(5563), 2253-2255.
18. Shapiro N. M., Campillo M.: Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(7).
19. Snieder R., Wapenaar K.: Imaging with ambient noise. *Physics Today*, 2010, 63(9), 44-49.
20. Wapenaar K., Slob E., Snieder R.: Unified Green's function retrieval by cross correlation. *Physical Review Letters*, 2006, 97(23), 234301.
21. Wapenaar K., Fokkema J., Snieder, R.: Retrieving the Green's function in an open system by cross correlation: A comparison of approaches (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118(5), 2783-2786.
22. Wapenaar K., Fokkema J.: Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, 2006, 71(4), SI33-SI46.
23. Wapenaar K., Draganov D., Snieder, R., Campman X., Verdel A.: Tutorial on seismic interferometry: Part 1—Basic principles and applications. *Geophysics*, 2010, 75(5), 75A195-75A209.
24. Wapenaar K., Slob E., Snieder R., Curtis A.: Tutorial on seismic interferometry: Part 2—Underlying theory and new advances. *Geophysics*, 2010, 75(5), 75A211-75A227.
25. Wapenaar K., van der Neut J., Thorbecke J.: On the relation between seismic interferometry and the simultaneous-source method. *Geophysical Prospecting*, 2012, 60(4), 802-823.



## Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej

### Review of seismic interferometry applications

Mgr inż. Rafał Czarny\*)

**Treść:** Artykuł w sposób przeglądowy przedstawia szerokie możliwości zastosowania interferometrii sejsmicznej. Metoda jest stosunkowo nowa, mając na uwadze pierwsze eksperymenty wykonane w 2001 roku, i aktualnie znajduje się w fazie dynamicznego rozwoju. W pracy omówiono jej zastosowanie w wielu zagadnieniach związanych z odwzorowaniem budowy wnętrza Ziemi oraz warstw przypowierzchniowych, a także zagadnień geoinżynierskich z np. monitorowania czynnych osuwisk. Przedstawione przykłady badań zostały opublikowane w uznanych czasopismach naukowych.

**Abstract:** The aim of this paper is to review the wide range of seismic interferometry applications. Despite the fact that only 10 years have passed since the first application was implemented in seismology, seismic interferometry is currently used in many issues beginning with analysis of the Earth's deep interior and ending with the time-laps velocity changes at active landslides. The presented research results were published in leading scientific journals.

#### Słowa kluczowe:

interferometria sejsmiczna, funkcja Greena, fale powierzchniowe, fala Rayleigha, fale koda

#### Key words:

seismic interferometry, Green's function, surface waves, Rayleigh wave, coda waves

## 1. Wprowadzenie

Interferometria sejsmiczna IS (ang. *seismic interferometry*) jest nową, dynamicznie rozwijającą się metodą polegającą na odwzorowaniu odpowiedzi impulsowej ośrodka (funkcji Greena) pomiędzy parą czujników za pomocą operacji korelacji wzajemnej lub dekonwolucji zarejestrowanych sygnałów sejsmicznych na tych czujnikach. Metoda bazuje zarówno na źródłach aktywnych, jak i pasywnych, z włączeniem szumu sejsmicznego.

Metoda jest oparta na założeniach J. Claerbouta sformułowanych w 1968 r. [6], a zweryfikowanych na przykładzie badań heliosejsmologicznych [21] oraz laboratoryjnych [8, 30]. Metoda została opisana teoretycznie przez Wapenaar i Fokkema w 2006 r. [28].

Aktualnie IS oferuje bardzo szerokie możliwości zastosowania, od obrazowania wgłębnych struktur skorupy ziemskiej, monitorowania zmian w nich zachodzących, do zastosowań geoinżynierskich. Ze względu na rodzaj źródła stosowanego w badaniach metodą IS w literaturze występują pojęcia takie jak: tomografia szumem sejsmicznym (ang. *ambient noise tomography*), lub interferometria fal koda (ang. *coda wave interferometry*).

W artykule przedstawiono przegląd dotychczasowych ważniejszych przykładów zastosowania metody interferometrii sejsmicznej.

## 2. Przykłady odwzorowania sejsmicznego struktury warstw głęboko położonych oraz warstw przypowierzchniowych Ziemi

IS znalazła po raz pierwszy zastosowanie przy odwzorowaniu głębokich struktur litosfery. W 2003 roku Campillo i Paul [5] przedstawili wyniki korelacji wzajemnej (ang. *cross-correlation*) fali kodowej (ang. *coda wave*), która powstaje z rozproszenia pola falowego w niejednorodnym ośrodku. Dla tej samej pary sejsmometrów (rys. 1, sejsmometry PLIG i YAIG) dokonali korelacji wzajemnej zarejestrowanych wstrząsów, a następnie uśrednili wyniki. Uzyskane w ten sposób sejsmogramy dla sejsmometrów PLIG i YAIG były zbliżone do teoretycznej funkcji Greena fal powierzchniowych typu Rayleigha (rys. 1a i 1b, składowa Z/Z) i Love'a (rys. 1A i 1B, składowa Z/R). W 2005 r. przeprowadzono podobne badania [24] z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego, składającego się głównie z mikrosejsmy (ang. *microseism*) [15], generowanego w pobliżu zachodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych. W efekcie korelacji wzajemnej 30-dniowej rejestracji szumu sejsmicznego otrzymano funkcje Greena fali Rayleigha dla różnych okresów (rys. 2b i 2c, PHL - MLAC). Wyniki były zbliżone do zarejestrowanej na stacji PHL fali Rayleigha pochodzącej od wstrząsu z epicentrum w punkcie 1 (w pobliżu stacji MLAC) (rys. 2b i 2c, *event 1* - PHL). Wykorzystując dostępną sieć sejsmometrów *USArray* wyznaczono rozkład prędkości grupowej fali Rayleigha dla wybrzeża Kalifornii (rys. 2d).

Dotychczas opublikowano wiele prac naukowo-badawczych dotyczących uszczegółowienia budowy zarówno

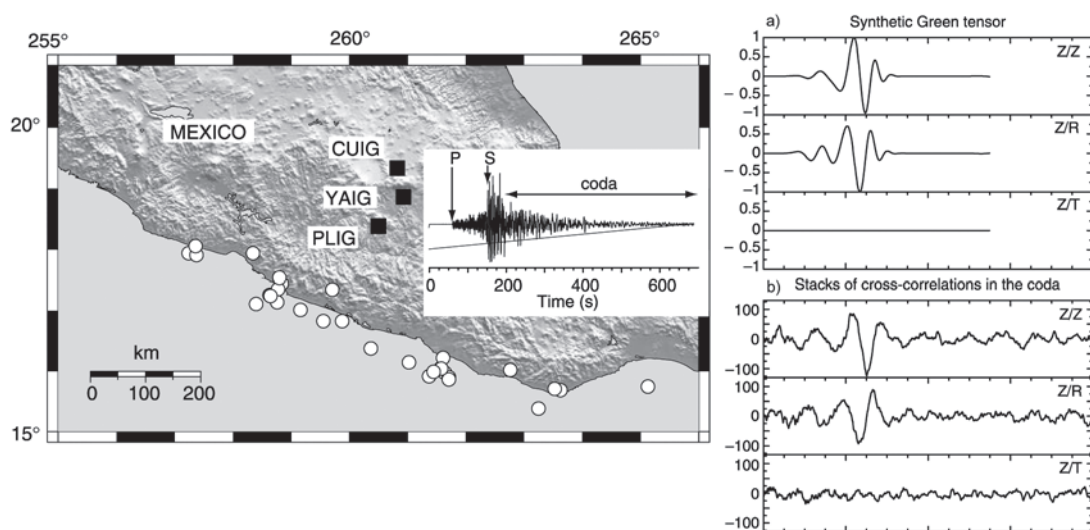
\*) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Zakład Geoinżynierii i Inżynierii Środowiska, Kraków

lokalnej [9, 10, 13, 18, 22, 25, 26, 30, 31, 32], jak i globalnej [19, 23, 27]. Jednym z ciekawszych przykładów jest opublikowana w 2014 r. praca Schaeffera i Lebedeva [23] prezentująca obecnie najdokładniejszy opis pola prędkości fali poprzecznej dla całego globu, uzyskanej z prędkości grupowej fali Rayleigha dla różnych głębokości. Rysunek 3d przedstawia przykład pola prędkości grupowych fali Rayleigha na głębokości 56 km.

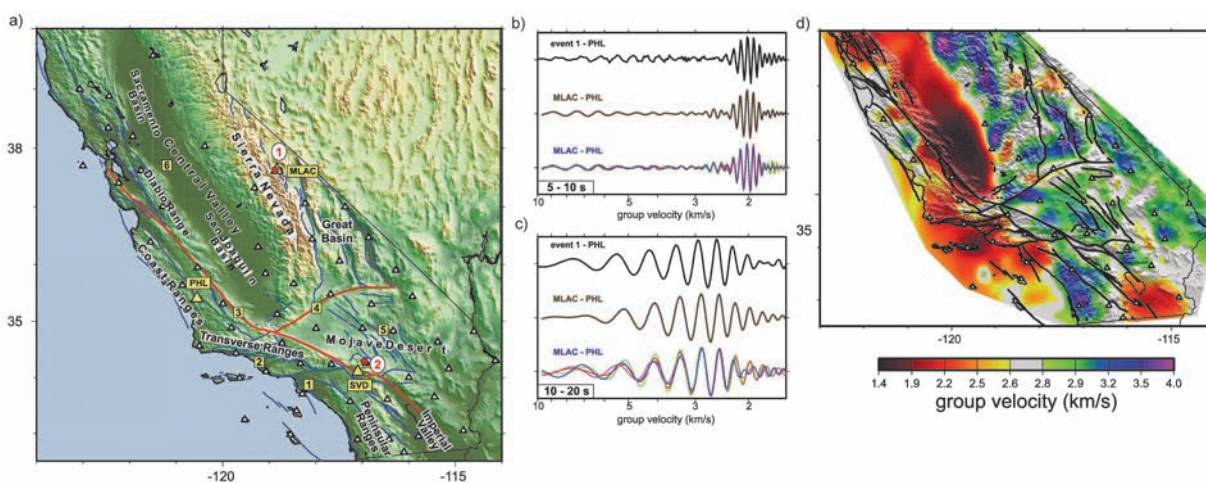
Odtworzenie funkcji Greena fal powierzchniowych Rayleigha typu P+SV oraz Love'a typu SH za pomocą IS umożliwiło również analizę anizotropii ośrodka. Za przykład mogą posłużyć rezultaty badań opublikowane w 2010 r., dotyczące rozkładu anizotropii w zachodniej części Stanów Zjednoczonych [12]. Rysunek 4 prezentuje zmienność azymu-

tu oraz amplitudy (długość czerwonych słupków) anizotropii dla prędkości fazowej fali Rayleigha o różnych okresach.

W ostatnich latach podjęto również próbę odwzorowania funkcji Greena fal objętościowych z szumu sejsmicznego metodą IS [1]. Ze względu na o wiele większy współczynnik tłumienia fal objętościowych w porównaniu do fal powierzchniowych, nie udało się odwzorować wszystkich fal dla każdego możliwego promienia propagacji (rys. 5b), jakie można wyróżnić dla danych modelowych (rys. 5c). Pomimo tych ograniczeń, zaletą badań jest odtworzenie fal objętościowych przechodzących przez wnętrze Ziemi w dowolnym układzie geometrycznym źródło – odbiornik. Takie podejście uszczegółowiło dotychczasowe badania wykonywane za pomocą źródeł telesejsmicznych.

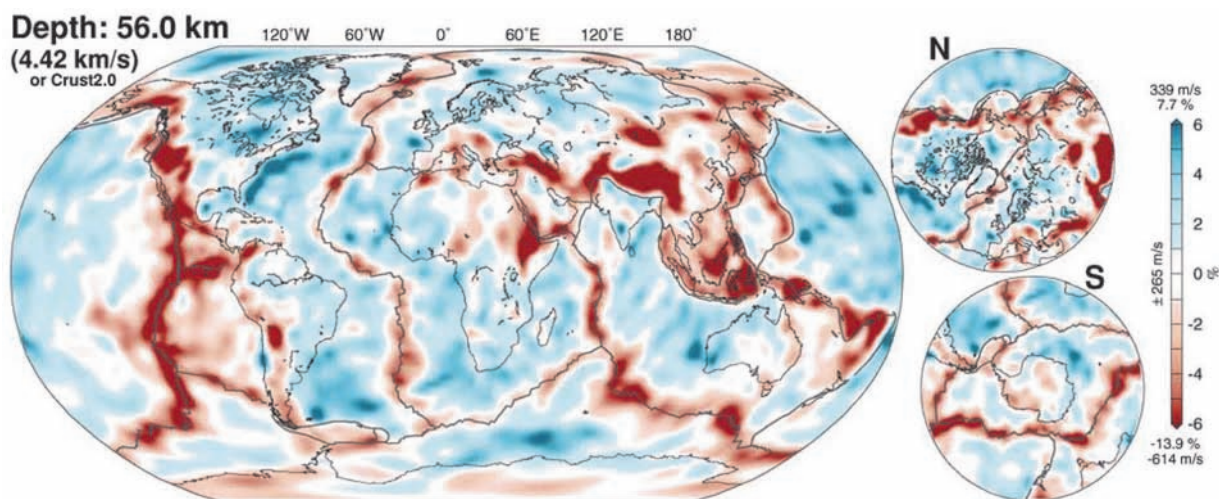


Rys. 1. Lokalizacja stanowisk sejsmometrycznych (czarne kwadraty) oraz wynik korelacji wzajemnej dla stanowiska PLIG i YAIG dla różnych składowych (a) wraz z ich teoretyczną funkcją Greena (b) [5]  
 Fig. 1. Location map of the seismometers (black rectangles) and comparison between the cross-correlation traces at stations PLIG and YAIG (A) and theoretical Green's functions (B) [5]

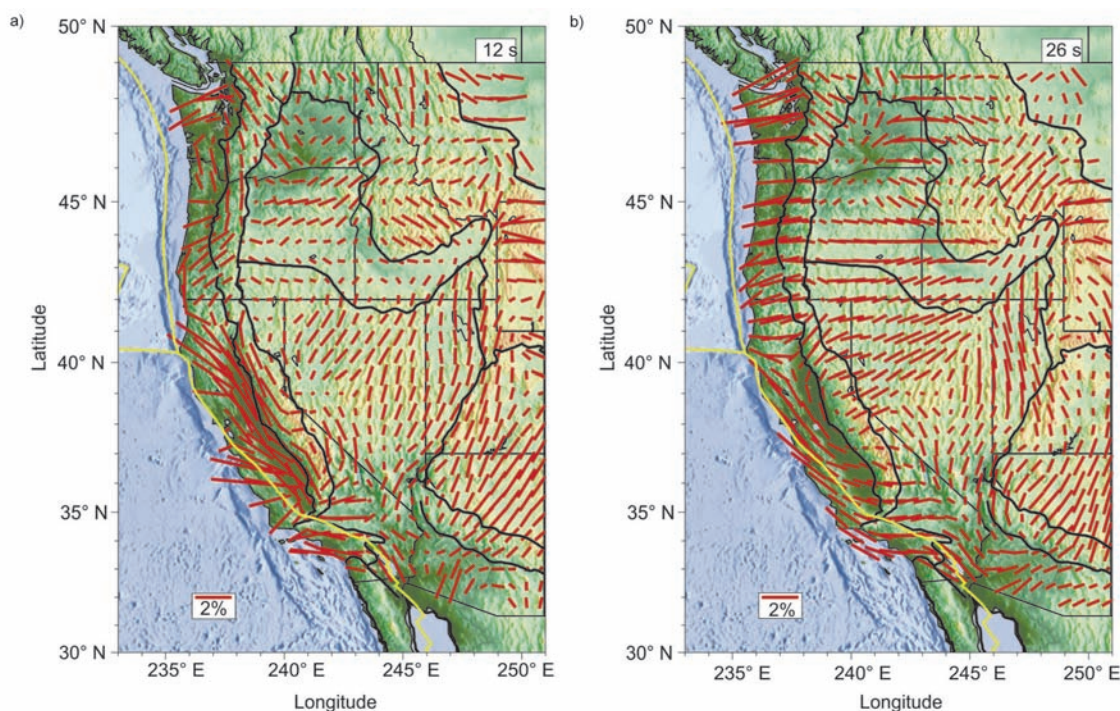


Rys. 2. Lokalizacja obszaru badań (a) oraz funkcje Greena fali powierzchniowej Rayleigha dla okresu od 5 do 10 s (b) i od 10 do 20 s (c), wyznaczone z wstrząsu (punkt 1, mapa lokalizacyjna) oraz z 30 dni zapisu szumu sejsmicznego między stacjami MLAC i PHL. Mapa zmian prędkości grupowej fali Rayleigha dla okresu fali wynoszącej 7,5 s (d) [24]

Fig. 2. Location map (A) and Rayleigh wave Green's functions for two periods (5-10s (B) and 10-20 s (C)) gained from earthquake (point 1, location map) and from ambient noise between MLAC and PHL stations. Group velocity map for Rayleigh wave for period equal to 7,5 s (d) [24]



Rys. 3. Zmienność prędkości grupowej fali Rayleigha na głębokości 56 km [23]  
 Fig. 3. Perturbation of Rayleigh wave group velocity map at 56 km depth [23]



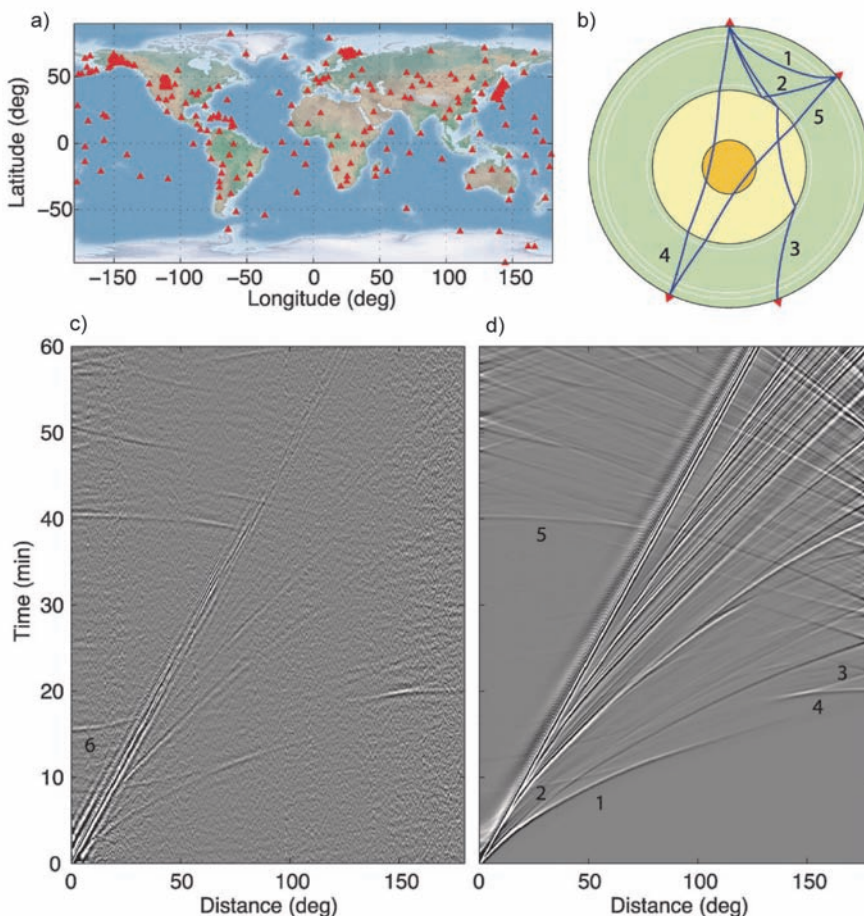
Rys. 4. Rozkład anizotropii w zachodniej części Stanów Zjednoczonych dla prędkości fazowej fali Rayleigha o okresie (a) 12 s oraz (b) 26 s [12]  
 Fig. 4. Maps of (a) 12 s and (b) 26 s period Rayleigh wave phase velocity azimuthal anisotropy in the western part of the United States [12]

Metoda IS znalazła również zastosowanie przy rozpoznaniu utworów przypowierzchniowych [2, 20]. Do najbardziej znanych przykładów należą badania przeprowadzone w Kalifornii z udziałem ponad 5000 geofonów oddalonych od siebie o około 100 m [11]. W wyniku przetwarzania i interpretacji 2-tygodniowej rejestracji szumu sejsmicznego, uzyskano trójwymiarowy model pola prędkości fal poprzecznych do głębokości około 1000 m. Rysunek 6b przedstawia pole prędkości poprzecznej na głębokości 650 m. Wyniki potwierdziły wcześniej rozpoznaną budowę geologiczną tego rejonu.

Z praktycznego punktu widzenia o wiele bardziej interesujące wydają się próby zastosowania metody IS do celów poszukiwania złóż węglowodorów. Niestety duże problemy

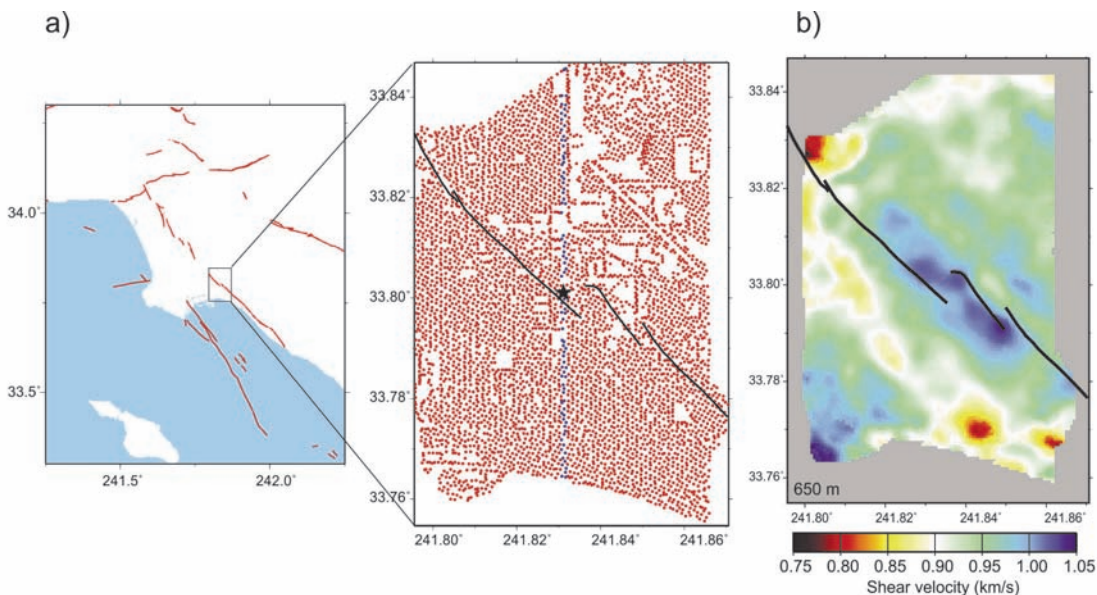
w dokładnym odwzorowaniu funkcji Greena fal objętościowych z szumu sejsmicznego, w którym dominują fale dyspersyjne, nie pozwalają jak na razie efektywnie konkurować z powszechnie stosowaną metodą sejsmiki poszukiwawczej. Niemniej jednak prowadzone są intensywne badania teoretyczne nad rozwiązaniem tego problemu, jak np. obrazowanie Marchenki (ang. *Marchenko imaging*) [29]. Do nielicznych przykładów zastosowania IS do rozpoznania ośrodka za pomocą refleksyjnych fal objętościowych należą badania wykonane w Libii w 2013 r. [7]. Autorzy przedstawili porównanie sekcji sejsmicznej uzyskanej z 11-godzinnej zapisu szumu sejsmicznego, zinterpretowanego zgodnie z metodą IS (rys. 7a i 7c) z wynikami badań z wykorzystaniem źródeł aktywnych





Rys. 5. Lokalizacja wykorzystanych stacji sejsmicznych – a; promienie wybranych fal objętościowych – b, rezultat korelacji wzajemnej różnych par sejsmometrów rozmieszczonych na powierzchni Ziemi – c, wraz z sejsmogramem syntetycznym dla modelu PREM – d [1]

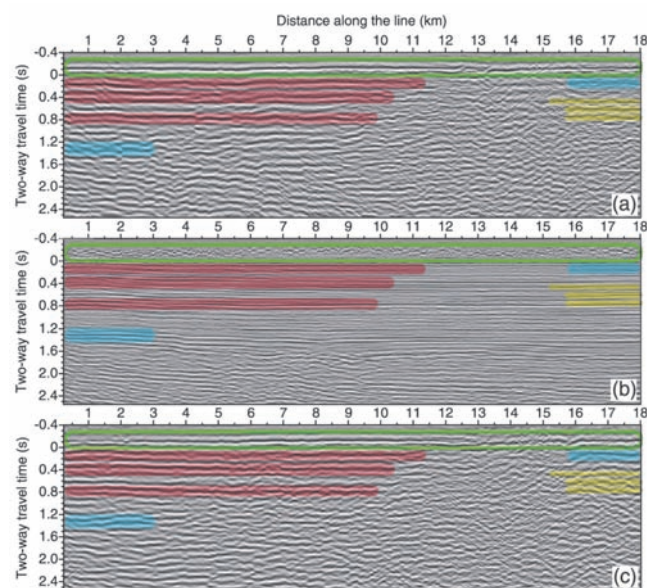
Fig. 5. Location of the seismic stations – a, ray paths of the selected body-waves – b, results of seismic noise cross-correlation – c, and synthetic seismograms for PREM model – d, [1]



Rys. 6. Rozmieszczenie czujników (a) oraz przykład pola prędkości poprzecznej na głębokości 650m na obszarze Long Beach w Kalifornii (b) [11]

Fig. 6. Location of geophones (a) and example of time-slice at 650m depth for shear wave velocity (b) [11]

(rys. 7b). Pomimo gorszej rozdzielczości metody IS, udało się zidentyfikować główne granice refleksyjne (rys. 7a i 6c, linie zielone i czerwone), jak również granice o mniejszej impedancji akustycznej (rys. 7, linie niebieskie i żółte) po zastosowaniu identyfikacji refleksów na etapie przetwarzania wstępnego (rys. 7c).



Rys. 7. Przykład sekcji sejsmicznych dla identycznej geometrii pomiaru z wykorzystaniem – a) IS i szumu sejsmicznego, – b) tradycyjnej sejsmiki refleksyjnej oraz – c) IS i szumu sejsmicznego z dodatkowym etapem przetwarzania polegającym na identyfikacji fal odbitych [7]

Fig. 7. Seismic cross-sections gained from – a) seismic noise and seismic interferometry, – b) from active sources and – c) from event-driven seismic interferometry [7]

### 3. Monitorowanie zmian deformacji ośrodka w czasie

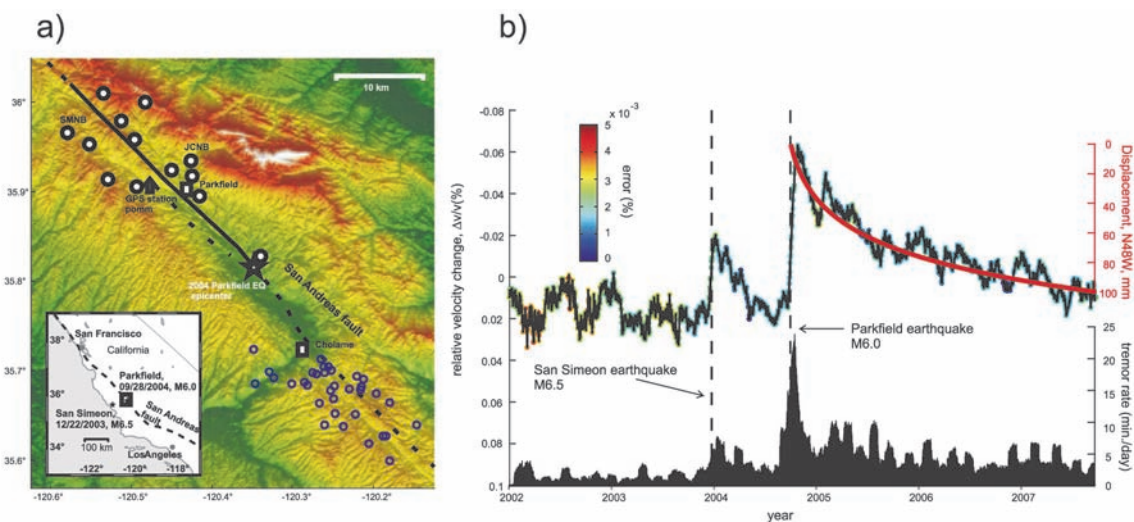
Niewątpliwie dużą zaletą IS jest używanie jako źródła szumu sejsmicznego, który rozprzestrzenia się w każdym miejscu na Ziemi. W odróżnieniu od dotychczas stosowanych metod, bazujących na źródłach pasywnych związanych z sejsmicznością antropogeniczną lub naturalną oraz źródłach aktywnych, IS stwarza możliwość ciągłej analizy ośrodka w czasie i przestrzeni.

W roku 2008 opublikowano rezultaty badań nad zmianami prędkości zachodzącymi w tzw. falach koda (ang. *coda waves*), otrzymanych z szumu sejsmicznego zgodnie z metodą IS, w okresie 8 lat na obszarze charakteryzującym się dużą aktywnością sejsmiczną, jakim jest niewątpliwie rejon uskoku św. Andrzeja w Kalifornii [3]. Zaobserwowano wzrost względnej prędkości fal koda przed wystąpieniem wstrząsu w Parkfield, o magnitudzie 6,0 oraz spadek prędkości po wystąpieniu zjawiska (rys. 8b).

Równocześnie z opisanymi badaniami [3] prowadzony był podobny eksperyment na obszarze wulkanu Piton de la Fournaise, który jest jednym z najbardziej aktywnych na świecie [4]. Autorzy badań zauważyli wyraźny wzrost względnego czasu propagacji fali koda pomiędzy sejsmometrami na około 30 dni przed wystąpieniem erupcji (rys. 9a). Duża liczba stanowisk sejsmometrycznych pozwoliła również na przestrzenną lokalizację względnych zmian tych prędkości (rys. 9b) pokrywającą się z miejscem późniejszej erupcji.

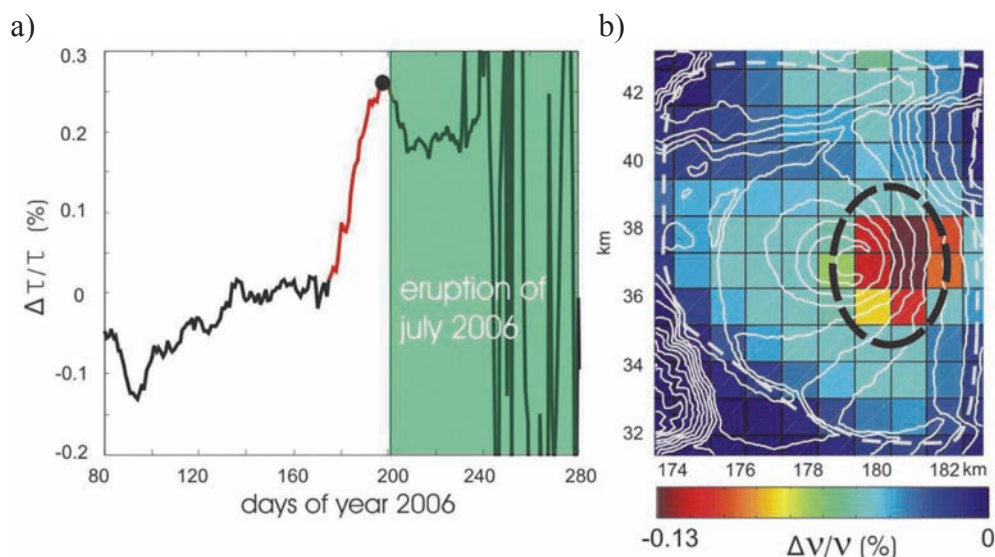
Na uwagę zasługują również badania wpływu znanego wstrząsu Thokou w Japonii z 11 marca 2011 r. o magnitudzie 8,9, na zmiany prędkości fali poprzecznej i anizotropii warstw przypowierzchniowych przed i po zdarzeniu [16]. Na rysunku 10 widoczny jest wyraźny spadek prędkości rzędu -10 % na obszarze znajdującym się najbliższym epicentrum wstrząsu.

W literaturze można również znaleźć zastosowania IS do oceny wpływu wstrząsów na prędkość fal sprężystych rozchodzących się w budynku, które można wiązać bezpośrednio ze stopniem jego zniszczenia. W pracy [17] autorzy analizowali wpływ wstrząsów na 8-piętrowy budynek w Fukushimie (rys. 11b), porównując wyniki pomiarów prędkości obli-



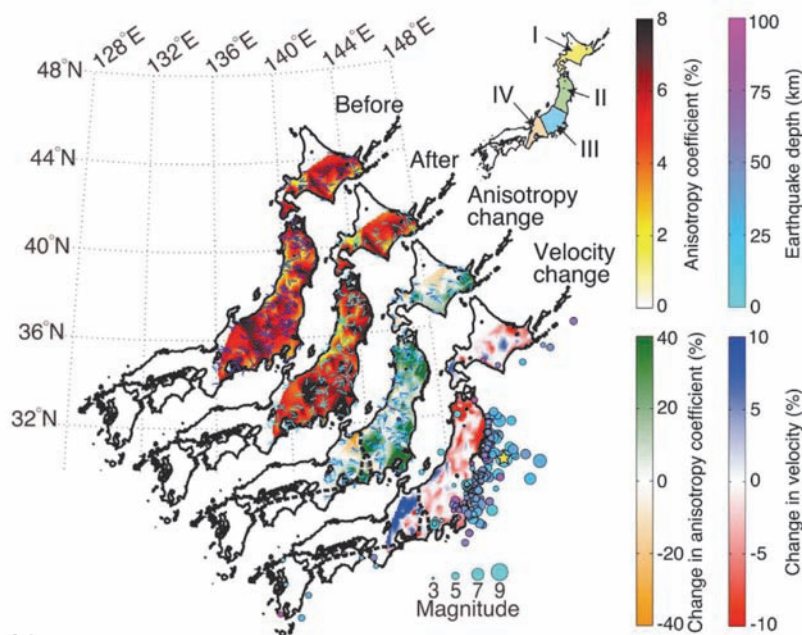
Rys. 8. Lokalizacja obszaru badań (a) oraz relatywne zmiany prędkości fali coda wraz z rozkładem sejsmiczności w okresie od 2002 do 2008 (b) [3]

Fig. 8. Location of the research area (a) and relative velocity changes according to natural seismicity from 2002 to 2008 (b) [3]



Rys. 9. Relatywne zmiany czasu propagacji fal koda na obszarze wulkanu Piton de la Fournaise (a) oraz lokalizacja relatywnych zmian prędkości w przestrzeni na dzień przed erupcją (b) [4]

Fig. 9. Relative time changes of coda wave propagation on Piton de la Fournaise before the eruption on July 2006 (a) and velocity perturbation one day before the beginning of eruption in space (b) [4]



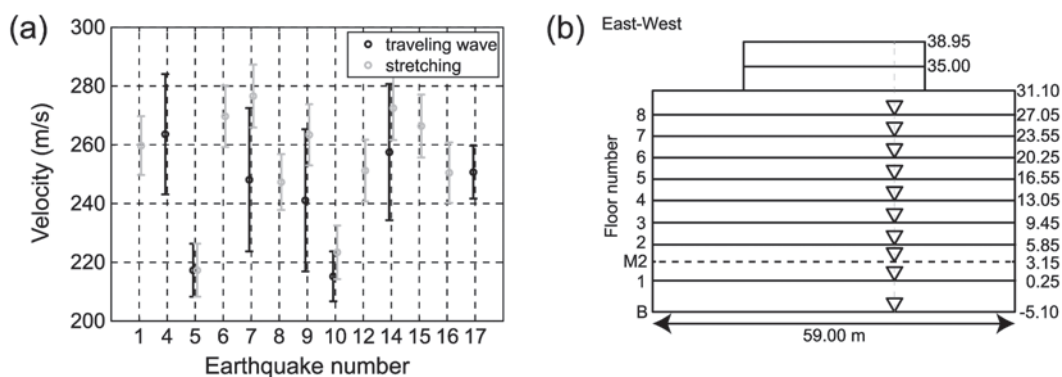
Rys. 10. Pole prędkości fal poprzecznych oraz anizotropii na obszarze Japonii przed i po wstrząsie Tohoku [16]

Fig. 10. Changes in shear-wave velocity and anisotropy coefficient before and after the Tohoku-Oki earthquake [16]

czonych bezpośrednio z wstrząsów (rys. 11, słupki czarne) z prędkością obliczoną z szumu sejsmicznego metodą IS po wstrząsie (rys. 11, słupki szare). Obliczone prędkości różniły się. Według autorów na prędkość mierzoną bezpośrednio z wstrząsu wpływa również posadowienie budynku, natomiast prędkość wyznaczona za pomocą IS dotyczy tylko budynku.

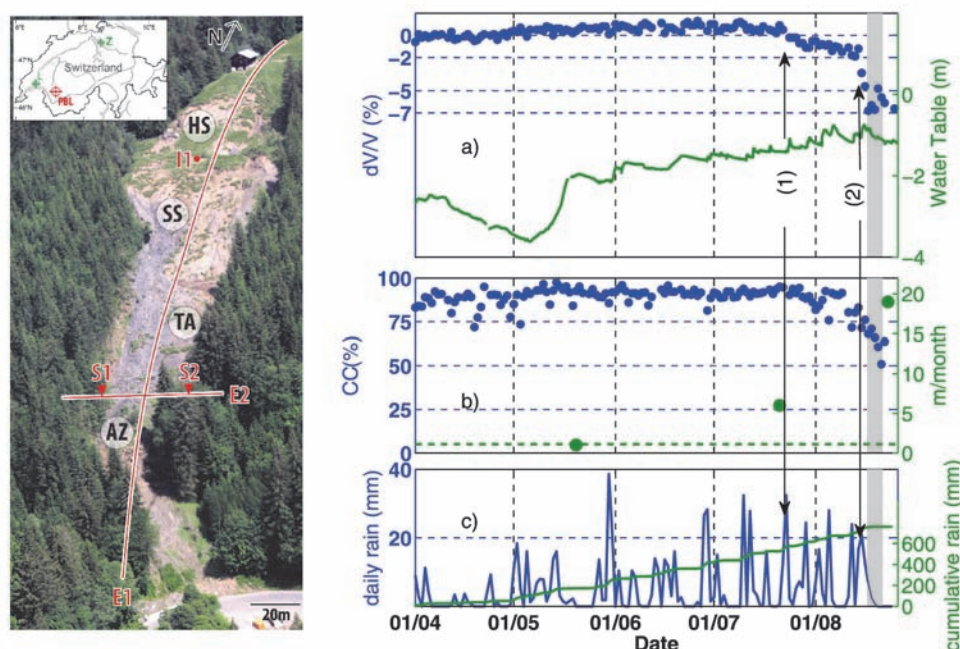
Metoda IS znalazła również zastosowanie do oceny ryzyka wystąpienia osuwiska. Pierwsze badania względnych zmian prędkości fal poprzecznych uzyskanych metodą IS

z wykorzystaniem szumu sejsmicznego na obszarze czynnego osuwiska zostały opublikowane w 2012 r. [14]. Eksperyment przeprowadzono na alpejskim zboczu w Szwajcarii, w miejscu wystąpienia przypuszczalnego osuwiska. Wykorzystano w tym celu rejestrację ciągłą na dwóch stanowiskach S1 i S2 (rys. 12). Widoczny efekt powolnego spadku prędkości fali poprzecznej od końca miesiąca sierpnia do dużego obniżenia prędkości rzędu -7% (rys. 12a, niebieskie kropki) na dzień przed osunięciem, pokazuje duże możliwości IS w predykcji wystąpienia osuwiska.



Rys. 11. Rozkład prędkości fal sprężystych dla 17 wstrząsów (a) zarejestrowanych czujnikami rozmieszczonymi na różnych kondygnacjach budynku (b) (Fukushima, Japonia) [17]

Fig. 11. Velocities estimated directly from earthquake (black bars) by seismic interferometry (gray bars) (a) on different levels of the building (b) [17]

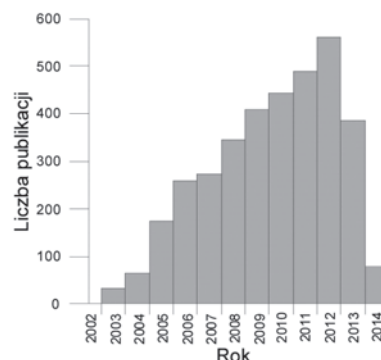


Rys. 12. Lokalizacja rejonu badań oraz – a) relatywne zmiany prędkości fali poprzecznej ( $dV/V$ ), – b) na terenie osuwiska Pont Bourquin (Szwajcaria) w zestawieniu z poziomem wód gruntowych oraz – c) wielkością dobowych opadów atmosferycznych [14]

Fig. 12. Location of research area and (a) relative shear-wave velocity changes with comparison of water table and (c) daily rain level [14]

#### 4. Podsumowanie

Metoda interferometrii sejsmicznej ma niewątpliwą podstawową zaletę wynikającą z możliwości wykorzystania różnego rodzaju źródeł pasywnych. Jest to metoda, aktualnie dynamicznie rozwijana, stąd często uzyskiwane wyniki badań nie mogą być efektywnie porównywane z wynikami pozyskanymi uznanymi metodami sejsmicznymi. Jednak przedstawione przykłady zastosowania metody interferometrii sejsmicznej świadczą o dużych jej możliwościach. Liczba publikowanych artykułów z roku na rok wzrasta (rys. 13), dlatego można spodziewać się kolejnych, nowych interesujących rozwiązań metodycznych i o istotnym znaczeniu utylitarnym.



Rys. 13. Liczba publikowanych artykułów dotyczących zastosowania interferometrii sejsmicznej w latach 2002-2014

Fig. 13. Seismic interferometry publication statistics in the period of 2002-2014

**Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES, uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.**

## Literatura

1. Boué P., Poli P., Campillo M., Pedersen H., Briand X., Roux P.: Teleseismic correlations of ambient seismic noise for deep global imaging of the Earth. *Geophysical Journal International*, 2013, 194(2), 844-848.
2. Behm M., & Snieder R.: Love waves from local traffic noise interferometry. *The Leading Edge*, 2013, 32(6), 628-632.
3. Brenguier F., Campillo M., Hadziioannou C., Shapiro N. M., Nadeau R. M., Larose E.: Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations. *Science*, 2008, 321(5895), 1478-1481.
4. Brenguier F., Shapiro N.M., Campillo M., Ferrazzini V., Duputel Z., Coutant O., Nercessian A.: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience*, 2008, 1(2), 126-130.
5. Campillo M., Paul A.: Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 2003, 299(5606), 547-549.
6. Claerbout J. F.: Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, 1968, 33(2), 264-269.
7. Draganov D., Campman X., Thorbecke J., Verdel A., Wapenaar K.: Seismic exploration-scale velocities and structure from ambient seismic noise (> 1 Hz). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(8), 4345-4360.
8. Fink M., Cassereau D., Derode A., Prada C., Roux P., Tanter M., Wu F.: Time-reversed acoustics. *Reports on progress in Physics*, 2000, 63(12), 1933.
9. Gudmundsson Ó., Khan A., Voss P.: Rayleigh-wave group-velocity of the Icelandic crust from correlation of ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L14314.
10. Li H., Bernardi F., Michélini A.: Love wave tomography in Italy from seismic ambient noise, *Earthquake Science*, 2010a, 23, 487-495.
11. Lin F. C., Li D., Clayton R. W., Hollis D.: High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array. *Geophysics*, 2013, 78(4), Q45-Q56.
12. Lin F. C., Ritzwoller M. H., Yang Y., Moschetti M. P., Fouch M. J.: Complex and variable crustal and uppermost mantle seismic anisotropy in the western United States. *Nature Geoscience*, 2011, 4(1), 55-61.
13. Lin F.C., Ritzwoller M. H., Townend J., Bannister S., Savage M. K.: Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand, *Geophysical Journal International*, 2007, 170, 649-666.
14. Mainsant G., Larose E., Brönnimann C., Jongmans D., Michoud C., & Jaboyedoff M.: Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003-2012), 2012, 117(F1).
15. McNamara D. E., Buland R.P.: Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94, 4, 1517-1527.
16. Nakata N., Snieder R.: Time-lapse change in anisotropy in Japan's near surface after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(11).
17. Nakata N., Snieder R., Kuroda S., Ito S., Aizawa T., Kunimi T.: Monitoring a Building Using Deconvolution Interferometry. I: Earthquake-Data Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(3), 1662-1678.
18. Nicolson H., Curtis A., Baptie B., Galetti E.: Seismic interferometry and ambient noise tomography in the British Isles. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2012, 123, 74-86.
19. Nishida K., Montagner J.P., Kawakatsu H.: Global surface wave tomography using seismic hum. *Science*, 2009, 326(5949), 112-112.
20. Nunziata C., De Nisco G., Panza G.F.: S-waves profiles from noise cross correlation at small scale. *Engineering Geology*, 2009, 105(3), 161-170.
21. Rickett J., Claerbout J.: Acoustic daylight imaging via spectral factorization: Helioseismology and reservoir monitoring. *The leading edge*, 1999, 18(8), 957-960.
22. Saygin E., Kennett B. L.N.: Ambient seismic noise tomography of Australian continent, *Tectonophysics*, 2010, 481, 116-125.
23. Schaeffer A.J., Lebedev S.: Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone. *Geophysical Journal International*, 194(1), 2013, 417-449.
24. Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.: High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 2005, 307(5715), 1615-1618.
25. Stehly L., Fry B., Campillo M., Shapiro N.M., Guilbert J., Boschi L., Giardini D.: Tomography of the Alpine region from observations of seismic ambient noise. *Geophysical Journal International*, 2009, 178, 338-350.
26. Villaseñor A., Yang Y., Ritzwoller M.H., Gallart J.: Ambient noise surface wave tomography of the Iberian Peninsula: Implications for shallow seismic structure, *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L11304.
27. Visser, K., Trampert J., & Kennett B.L.N.: Global anisotropic phase velocity maps for higher mode Love and Rayleigh waves. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(3), 1016-1032.
28. Wapenaar K., Fokkema J.: Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, 2006, 71(4), SI33-SI46.
29. Wapenaar K., Thorbecke J., Van der Neut J., Brogini F., Slob E., Snieder R.: Marchenko imaging. *Geophysics*, 2014, Vol. 79 (3), WA39-WA57
30. Weaver R.L., Lobkis O.I.: Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies. *Physical Review Letters*, 2001, 87(13), 134301.
31. Yang Y., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Shapiro N.M.: Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe, *Geophysical Journal International*, 2007, 168, 259-274.
32. Zheng S., Sun X., Song X., Yang Y., Ritzwoller M.H.: Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9, Q05020.
33. Zheng Y., Yang Y., Ritzwoller M.H., Zheng X., Xiong X., Li Z.: Crustal structure of the northeastern Tibetan plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography. *Earthq. Science*, 2010, 23, 465-476.

# Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej

## Modern system LOFRES for low frequencies passive seismics



*Dr inż. Zbigniew Isakow,  
prof. nadzw. Instytutu EMAG\**



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki,  
prof. IGSMiE PAN\*\*)*



*Mgr inż. Przemysław Sierodzki\*\*\*)*

**Treść:** W artykule przedstawiono system LOFRES przeznaczony do badań metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej przy powierzchniowych warstwach geologicznych z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. Scharakteryzowano systemy pomiarowe stosowane w polskich kopalniach przydatne do pomiarów sejsmiki pasywnej. Opisano budowę i działanie systemu LOFRES. Przedstawiono parametry techniczne i testy zastosowanych sejsmometrów. Podkreślono pozytywne wyniki testów modelowego systemu. Omówiono przewidywane sposoby wykorzystania systemu.

**Abstract:** This paper presents an innovative LOFRES system, designed for research of subsurface geological strata, using the method of low frequency passive seismics based on seismic noise registration. Measurement systems used in Polish mines useful for passive seismic measurements have been characterized. The construction and operation of the LOFRES system have been also described. Specification and tests of the applied seismometers were presented. Positive results of the tests of a model system were highlighted. Potential applications of the system were discussed.

### Słowa kluczowe:

*system LOFRES, niskoczęstotliwościowa sejsmika pasywna, mikrosondowanie sejsmiczne, interferometria sejsmiczna, szum sejsmiczny, sejsmometr*

### Key words:

*LOFRES system, low frequency passive seismics, microseismic sounding, seismic interferometry, seismic noise, seismometer*

## 1. Wprowadzenie

Aktualnie w kraju brak jest systemu umożliwiającego prowadzenie badań metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS (ang. *Low Frequency Seismics*). W świecie zagadnienie to jest stosunkowo nowe i rozwiązywane jest wycinkowo przez różne zespoły badawcze [1, 7, 8].

Rozwój metod LFS byłby niemożliwy gdyby nie nowoczesne technologie wykorzystywane w produkcji szerokopasmowych czujników oraz wzrost mocy obliczeniowej komputerów poprzez stosowanie obliczeń równoległych. W metodzie LFS wykorzystuje się wielogodzinne zapisy danych, co wymusza tworzenie nowych aplikacji, zarówno do rejestracji, przetwarzania, jak i interpretacji danych. Należy zauważyć wzrost

zainteresowania jednostek naukowych na świecie metodą LFS oraz oferowanie pierwszych usług badawczych [1]. Rozwija się również rynek autorskiego oprogramowania.

Przedstawiony w pracy system LOFRES jest nowatorskim systemem pomiarowym niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego. System ten, ze względu na funkcje pomiarowe, jest przystosowany do badań dwoma metodami LFS: sondowaniem mikroesejsmicznym MS (ang. *microseismic sounding*) i interferometrią sejsmiczną IS (ang. *seismic interferometry*) [8].

System można wykorzystać do rozpoznania budowy ośrodka geologicznego, a zwłaszcza stopnia jego zniszczenia. Wiedza taka jest często niezbędna dla posadowienia różnego rodzaju obiektów budowlanych wielkopowierzchniowych, a także tuneli, lotnisk, szlaków komunikacyjnych, obwałowań, obiektów i zbiorników hydrotechnicznych czy osiedli mieszkaniowych. Na terenach czynnej i dokonanej eksploatacji górniczej system może wspomagać ocenę zagrożenia

\* ) Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, \*\* ) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, \*\*\* ) Zakład Badawczo-Naukowy, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG

powierzchni skutkami deformacji ciągłych i nieciągłych oraz umożliwi wybór optymalnej i skutecznej metody ich rewitalizacji. System wykorzystany może być również do rozpoznania stopnia naruszenia górotworu w rejonach zagrożonych sejsmicznością indukowaną, a zwłaszcza wystąpieniem bardzo silnych wstrząsów tektonicznych o charakterze regionalnym, oddziaływujących destrukcyjnie na powierzchnię terenu. System może być również przydatny do monitorowania stopnia wyeksploatowania różnego rodzaju złóż, np. ropy naftowej, gazu, soli kamiennej, siarki metodą podziemnego wytopienia itp.

System LOFRES został zrealizowany w ramach projektu badań stosowanych PBS2 dofinansowanego przez NCBiR w konsorcjum Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG, Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk oraz Centrum Transferu Technologii EMAG zainteresowane komercjalizacją.

## 2. Systemy sejsmiki pasywnej w polskich kopalniach

Stosowane w polskim górnictwie w kopalniach węgla kamiennego systemy sejsmiczne, takie jak AMAX, ARAMIS M/E zostały opracowane w Głównym Instytucie Górnictwa oraz Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG. Systemy te umożliwiają lokalizację zjawisk sejsmicznych oraz wyznaczenie parametrów ognisk wstrząsów. Znajomość parametrów sejsmicznych oraz geometrii sieci pomiarowej umożliwia stosowanie różnych algorytmów prędkościowej i tłumieniowej tomografii pasywnej. W algorytmach tomografii wykorzystuje się naturalne zjawiska sejsmiczne wywoływane eksploatacją górnictwem. Oprogramowanie systemów w GIG [4] oraz w EMAG [2] realizowane są w trybie off-line. System opracowany w ITI EMAG ma oprogramowanie do tomografii pasywnej metodą inwersji probabilistycznej udostępnione w ramach licencji przez W. Dębskiego z Instytutu Geofizyki PAN [2] i włączone do oprogramowania HESTIA [3, 5, 9]. Wiarygodność uzyskiwanych wyników w dużym stopniu uzależniona jest od liczby wstrząsów i ich przestrzennego rozkładu.

W zakładach górniczych rud miedzi KGHM Polska Miedź stosowane jest również oprogramowanie do tomografii pasywnej z Instytutu Geofizyki PAN i współpracujące z systemem LITOS (udzielona licencja).

Systemy i ich oprogramowanie stosowane w górnictwie umożliwiają tworzenie map izolinii prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej w górotworze. W przypadku synchronicznej w czasie rejestracji silniejszych zjawisk na dole kopalni i na powierzchni, co zapewniają systemy ARAMIS M/E i ARP 2000 P/E [5] możliwa jest również tomografia pasywna w górotworze od poziomu wyrobiska do powierzchni.

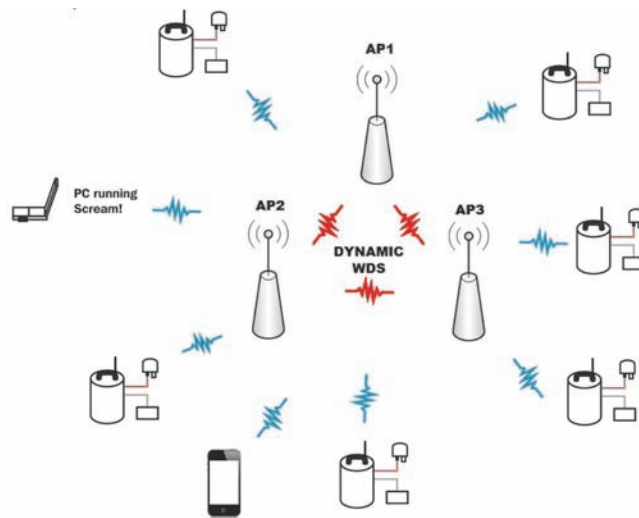
## 3. Opis systemu LOFRES

### 3.1. Budowa systemu

Opracowywany w ramach projektu niskoczęstotliwościowy system pomiarowy LOFRES cechuje się rozproszoną strukturą przedstawioną na rysunku 1. System składa się z zestawu mobilnych, autonomicznych, trójskładowych stacji pomiarowych drgań, rozmieszczanych w różnych miejscach na powierzchni terenu, w węzłach linii lub siatki pomiarowej. Rejestrują one synchronicznie w czasie prędkości trzech składowych drgań gruntu za pomocą wchodzących w ich skład niskoczęstotliwościowych sejsmometrów. Dane zapisywane są w wewnętrznej, nieulotnej pamięci czujników o dużej

pojemności, rzędu kilkunastu GB. Synchronizację czasu zapewnia dołączony do każdego czujnika odbiornik GPS. Każdy czujnik pomiarowy wyposażony jest w system transmisji bezprzewodowej w standardzie Wi-Fi oraz zewnętrzny akumulator zasilający z możliwością jego doładowania lub zamiany. Dodatkowo z odbiornika GPS w każdym czujniku dostępne są dane o jego współrzędnych X, Y i Z z dokładnością  $\pm 3\text{m}$ , wystarczającą do lokalizacji w algorytmach przetwarzających. Znajomość położenia czujnika ułatwia również jego identyfikację podczas przebudowy systemu. Dla umożliwienia niezawodnej pracy czujników systemu w rozległym terenie przewidziano zastosowanie autonomicznych punktów dostępowych API z własnym zasilaniem, pracujących w trybie WDS (ang. *Wireless Distribution System*) zwiększających zasięg transmisji Wi-Fi i niezależających go od ukształtowania i zabudowy terenu. Każdy z czujników systemu LOFRES pracować może w trybie rejestracji ciągłej i jednocześnie wykrywania i rejestracji większych zjawisk sejsmicznych zgodnie z zadanym kryterium. Odpowiednie oprogramowanie komunikacyjne w mobilnym serwerze rejestrującym system umożliwia konfigurację czujników, podgląd zarejestrowanych zjawisk oraz parametrów charakteryzujących pracę czujnika, np. odchylenie czujnika od poziomu, temperaturę oraz jakość synchronizacji czasu. Nowoczesne czujniki posiadają wewnętrzny kalibrowany wzбудnik umożliwiający dokonywanie okresowo autokalibracji wszystkich składowych pomiarowych.

Możliwy jest również podgląd wybranych parametrów czujnika na ekranie mobilnego PDA z wykorzystaniem bezprzewodowej sieci pomiarowej, co jest szczególnie przydatne podczas instalacji, przebudowy i nadzoru systemu.



Rys. 1. Rozproszona struktura systemu LOFRES

Fig. 1. Dissipated structure of LOFRES system

System posiada bezprzewodową transmisję danych oraz możliwość zdalnego podglądu konfiguracji i rejestrowanych danych.

### 3.2. Czujniki drgań

System LOFRES posiada trójskładowe czujniki - sejsmometry firmy Güralp CMG-6TD i opcjonalnie CMG-6T, zastosowane głównie ze względu na oferowany w wersji CMG-6TD wbudowany rejestrator rozwiązujący kompleksowo zagadnienie rejestracji, archiwizacji i przekazywania danych przy stosunkowo małym poborze mocy. Sejsmometry

**Tabela 1. Porównanie danych technicznych sejsmometrów CMG-6TD i CMG-6T firmy GÜRALP**  
**Table 1. Comparison of technical data of GÜRALP seismometers CMG-6TD and CMG-6T**

Parametr	CMG-6TD	CMG-6T
Pasma częstotliwości	30s – 100Hz	30s – 100Hz
Czułość	2 x 1200 Vs/m	2 x 1200 Vs/m
Wyjście	±10 V (20 V peak-to-peak)	±10 V (20 V peak-to-peak)
Odporność międzykanałowa	> 60dB	> 65dB
Liniowość	> 95dB	> 90dB
Poziom szumu	-147 dB (rel. 1m2s-4Hz-1)	-172 dB (rel. 1m2s-4Hz-1)
Format danych	GCF przez RS232, Firewire, Ethernet lub Wi-Fi	n.d
Próbkowanie	1000 – 1 próbki/s	1000 – 1 próbki/s
Rozdzielczość dla 1 próbki/s	21 bitów	n.d
Pamięć wewnętrzna	16 GB Flash	n.d
Pobór mocy	65mA/12V	38mA/12V
Napięcie zasilania	10 – 36V DC	10 – 36V DC
Temperatura pracy	-40 to +65°C	-40 to +75°C
Wymiary	Ø154mm x 207mm	Ø154mm x 207mm
Obudowa	Anodyzowane aluminium	Anodyzowane aluminium
Masa	2.7 kg (system <4.1kg)	2.49 kg

posiadają zintegrowany przetwornik AC, układ rejestrujący oraz synchronizację czasu GPS. Są przystosowane do montażu na powierzchni i w gruncie. Dodatkowo posiadają system łączności Wi-Fi pozwalający na bezprzewodowy podgląd pracy urządzeń oraz pobieranie danych do serwera [6]. Oprogramowanie czujnika Scream! pozwala na jego samodzielną pracę lub zdalnie sterowaną przez różne interfejsy. Dla zwiększenia liczby czujników można zastosować opcjonalnie tańsze trójskładowe czujniki CMG-6T firmy Güralp pozabawione wewnętrznego rejestratora. Dostępne w nich wyjścia analogowe umożliwiają ich podłączenie do odpowiednio zmodyfikowanego standardowego systemu sejsmicznego ARAMIS M/E, wyposażonego w przewodową transmisję cyfrową trzech składowych po jednej linii teletechnicznej. Dane techniczne trójskładowych sejsmometrów CMG-6TD i CMG-6T przedstawiono w tabeli 1 [6]. Na rys. 2 i 3 przedstawiono czujnik CMG-6TD z osprzętem.

Znormalizowane charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe sejsmometru CMG-6TD dla dolnego zakresu rejestrowanych częstotliwości zamieszczono na rysunku 4. Są to dokumenty kalibracyjne (niekatalogowe – uzyskane z autokalibracji) potwierdzające ich parametry.



**Rys. 2. Czujnik CMG-6TD firmy Güralp [6]**  
**Rys. 2. Güralp sensor CMG-6TD [6]**



**Rys. 3. Zestaw transportowy dla czujników CMG-6TD firmy Güralp [6]**

**Rys. 3. Transport set for Güralp sensors CMG-6TD [6]**

### 3.3. Funkcje systemu

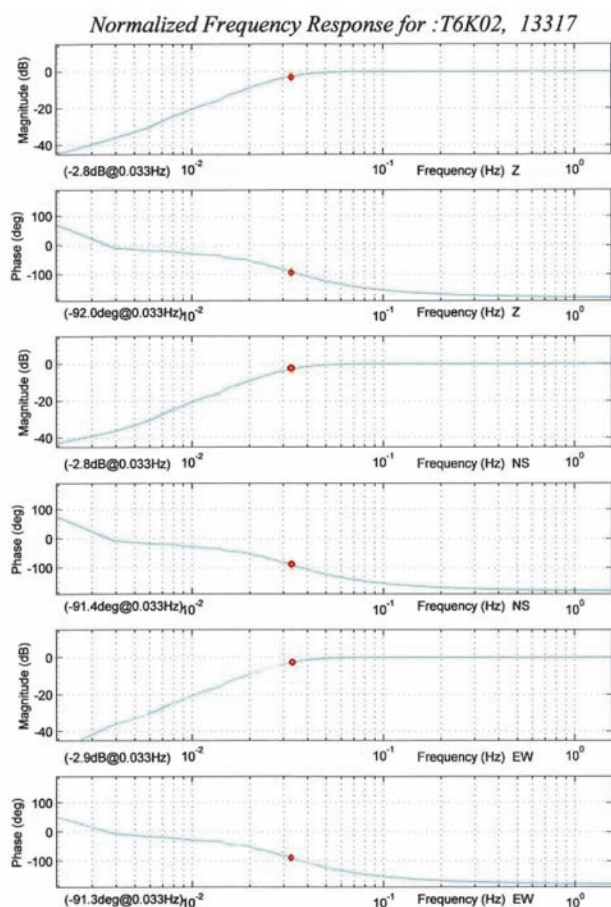
W pracy systemu LOFRES, jak w większości systemów sejsmicznych, wyróżnić można 3 zasadnicze procesy: rejestracji (akwizycji), przetwarzania i interpretacji danych.

Z akwizycją danych związana jest geometria pomiaru. Rysunek 5 przedstawia przykład rozmieszczenia czujników na obszarze pomiarowym. Odległość między czujnikami i profilami pomiarowymi dl i dx jest uwarunkowana rozdzielczością poziomą i głębokością rozpoznania ośrodka.

System LOFRES standardowo będzie wyposażony w 12 czujników, w tym 11 trójskładowych czujników pomiarowych i 1 czujnik referencyjny.

Oprogramowanie systemu umożliwi dokonywanie pomiarów z wykorzystaniem metod sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej, dla potrzeb których opracowano odpowiednie algorytmy i oprogramowanie [8]. W metodzie sondowania sejsmicznego badania prowadzone są na kilku stanowiskach pomiarowych (minimum 3). Do interpretacji





Rys. 4. Przykład znormalizowanych charakterystyk amplitudo-częstotliwościowych sejsmometru CMG-6TD dla dolnego zakresu rejestrowanych częstotliwości  
 Fig. 4. Example of normalized amplitude-frequency characteristics of the sensor CMG 6TD for the lower range of frequencies

służy głównie składowa pionowa szumu sejsmicznego, natomiast rejestracje z pozostałych składowych mogą posłużyć do lepszego rozeznania charakteru pola falowego i jego stacjonarności. Zapis odbywa się w każdym punkcie przez okres

co najmniej 1 godziny, tak aby uzyskać jego stacjonarność. Czujniki podczas pomiaru mogą być przemieszczane z punktu na punkt, z wyjątkiem bazy referencyjnej.

W metodzie interferometrii sejsmicznej zapis odbywa się w sposób ciągły z krokiem próbkowania dobranym dla konkretnego zadania. Im płytsze rozpoznanie tym krok próbkowania mniejszy. Zapis może być prowadzony z wykorzystaniem składowej pionowej fali powierzchniowej typu Rayleigha i/ lub poziomej fali Love'a. Długość zapisu uzależniona jest od: charakterystyki pola falowego badanego rejonu (dominującej częstotliwości, kierunku propagacji), rodzaju zadania (monitoring zmian, lokalizacja stref osłabienia, rozpoznanie budowy ośrodka itp.).

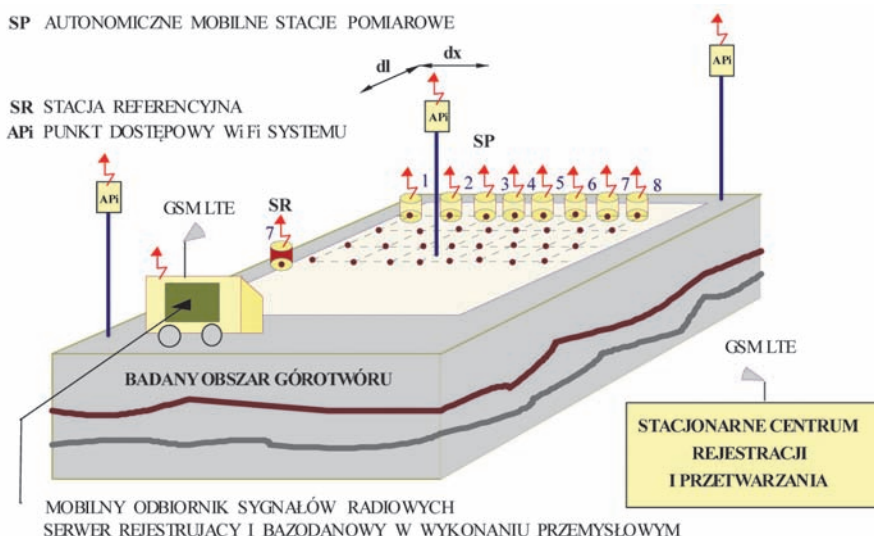
3.4. Oprogramowanie systemu

Oprogramowanie systemu sejsmicznego LOFRES składa się z kilku głównych bloków strukturalnych, pozwalających na realizację następujących funkcji:

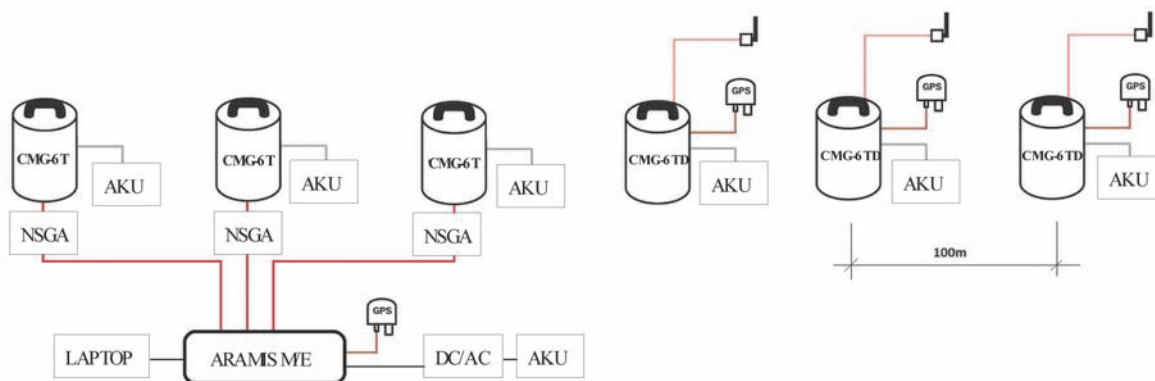
- akwizycja - rejestracja i archiwizacja danych pomiarowych,
- przetwarzanie wstępne - poprawianie jakości danych pomiarowych (usuwanie trendów w zapisach, usuwanie wartości średnich itp.), analiza widmowa zarejestrowanych zapisów, analiza polaryzacyjna i obliczanie korelogramów,
- przetwarzanie właściwe - wyznaczanie funkcji Greena dla fali powierzchniowej, budowanie modeli krzywych dyspersji dla prawdopodobnych rozkładów prędkości w ośrodku geologicznym,
- interpretacja - rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego w określaniu rozkładów parametrów geofizycznych w badanym ośrodku geologicznym,
- edycja wyników - graficzne przedstawianie wyników obliczeń.

3.5. Testy systemu

Testowano model systemu LOFRES za pomocą 3 autonomicznych trójskładowych czujników CMG-6TD z wyjściem cyfrowym oraz zmodyfikowanego do rejestracji ciągłej systemu ARAMIS M/E, do którego podłączono 3 trójskładowe czujniki CMG-6T z wyjściem analogowym. Schemat blokowy modelowej wersji systemu LOFRES przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Przykład schematu pomiarowego systemu LOFRES  
 Fig. 5. Example of the measuring scheme of LOFRES system



Rys. 6. Schemat blokowy modelowej wersji systemu LOFRES wyposażonego w 3 trójskładowe czujniki CMG-6T i 3 trójskładowe czujniki CMG-6TD

Fig. 6. Block diagram of the model version of LOFRES system equipped with 3 three-component sensors CMG-6T and 3 three-component sensors CMG-6TD

Do akwizycji danych w modelu wykorzystano: 3 czujniki CMG-6TD z zapisem w lokalnej pamięci Flash (16 Gb) oraz system sejsmiczny ARAMIS M/E, do którego nadajników NSGA podłączono 3 czujniki CMG-6T. Rejestrowane dane w systemie ARAMIS M/E zapisywane były w pamięci mobilnego serwera (laptopa). Czujniki firmy Guralp wymagały zasilania akumulatorowego AKU, zaś system ARAMIS M/E zasilania z przetwornicy DC/AC i akumulatora.

Testy modelu systemu na poligonie potwierdziły możliwość prowadzenia rejestracji w sposób przewodowy, radiowy i zapisu bezpośredniego. Synchronizację rejestracji uzyskano za pomocą odbiorników GPS.

#### 4. Podsumowanie

System LOFRES jest przeznaczony do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego dwoma metodami sejsmiki pasywnej: sondowaniem mikrosejsmicznym i interferometrią sejsmiczną na podstawie rejestracji szumu sejsmicznego. System ten umożliwia w sposób automatyczny prowadzenie ciągłych pomiarów drgań w warunkach terenowych z odpowiednią dynamiką w zakresie niskich częstotliwości. W zależności od celu badań system pozwala na wykonywanie pomiarów w różnych konfiguracjach. System LOFRES składa się z części aparaturowej i programowej służącej do przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. Jest on złożony z odpowiednio skonfigurowanych modułów pomiarowych i współpracującego z nimi centrum przetwarzania, interpretacji i zobrazowania wyników. System ten posiada mobilne autonomiczne stacje pomiarowe wyposażone w jedno lub trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki i stacjonarne stacje referencyjne wyposażone w trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki. Stacje pomiarowe i referencyjne są wyposażone w zasilanie akumulatorowe oraz odbiornik GPS do precyzyjnej synchronizacji podstawy czasu i określania położenia czujników podczas dokonywania pomiarów.

Wstępne testy wykazały przydatność opracowanego i wykonanego modelu systemu LOFRES do realizacji badań poligonowych. Dotychczasowe rezultaty badań systemem

LOFRES są zachęcające, szczególnie w zakresie metody interferometrii sejsmicznej, która okazała się skuteczna [8] i może być wykorzystywana w sejsmologii do rozpoznawania budowy geologicznej głębokiego podłoża i w sejsmice poszukiwawczej do odtwarzania struktur geologicznych. Istnieje również możliwość wykorzystania tej metody do potrzeb górniczych.

*Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

#### Literatura

1. Czarny R.: Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
2. Dębski W.: Tomografia sejsmiczna w górnictwie. „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 7, (w tym zeszytcie).
3. Isakow Z.: Safecomine intrinsically safe system for monitoring of hazards in mines related to disturbance of the strata and environment equilibrium. Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines (Chun'an Tang ed.), Rinton Press, New York/New Jersey, (2009), s.1045 – 1056.
4. Lurka A.: Wybrane teoretyczne i praktyczne zagadnienia tomografii pasywnej w górnictwie podziemnym. Prace naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, 2009, Nr 879.
5. Isakow Z.: Systemy i urządzenia do monitorowania zagrożeń sejsmicznych w kopalniach i otaczającym środowisku, w: Innowacje dla gospodarki, Wyd. Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2010, s. 162-187.
6. <http://www.guralp.com/>.
7. Marcak H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.: Możliwości wykorzystania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
8. Pilecki Z., Isakow Z., Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
9. Sikora M., Mazik P.: W kierunku większych możliwości oceny zagrożenia sejsmicznego – systemy Hestia i Hestia Mapa. „Mechanizacja i Automatyza Górnictwa” 2009, nr 3.



## Analiza modelowa efektów mikrograwimetrycznych zarejestrowanych nad zlikwidowanymi szymbami górnicyymi

### Model analysis of microgravimetric effects registered at the closed mine shaft

Dr inż. Łukasz Kortas\*)

**Treść:** Artykuł jest kontynuacją i rozwinięciem badań autora prowadzonych w latach 2008-2012. Publikacja zawiera interpretację anomalii grawimetrycznych w rejonie zlikwidowanych szymbów górnicyymi z wykorzystaniem modelowania i analizy odwrotnej. Do przeprowadzenia badań wybrano zlikwidowany szymb „Wschodni” i „Władysław”. Analiza zarejestrowanych pomiarami anomalii polegała na przeprowadzeniu badań modelowych w sposób zmierzający do znalezienia jak najlepszych dopasowań wymodelowanego efektu grawitacyjnego do wyników pomiarów. Dopasowanie dla szymbu „Wschodniego” okazało się mniej zadowalające, głównie z uwagi na nietrafny wybór poligonu pomiarowego. Wyniki modelowania dla szymbu „Władysław” były bliskie danym z pomiarów. Wskazuje to na przydatność przedstawionej w artykule metody dla interpretacji danych grawimetrycznych. W końcowej części pracy podaje się wynikające z niej zalecenia praktyczne przy poszukiwaniu pustki poszybowej metodą grawimetryczną.

**Abstract:** This paper is a continuation and development of the author's tests conducted in 2008-2012 (Kortas, 2008, 2012). It includes an interpretation of gravimetric anomalies in the area of the closed mine shafts with modeling and reverse analysis. The closed "Wschodni" shaft and "Władysław" shaft were used in the research. The analysis of the registered anomalies used model research in order to find the best possible matches of the modeled gravity effect to the measurements' results. Matching in case of "Wschodni" shaft was less satisfactory, mainly because of the incorrect selection of traverse. The results of modeling in the case of "Władysław" shaft were close to the measuring data. It indicates the usability of the presented method in the interpretation of gravimetric data. The last part of this paper presents the resulting recommendations during exploration of the post-shaft void by use of gravimetric method.

#### Słowa kluczowe:

szymb, grawimetria, pomiary, modelowanie grawimetryczne

#### Key words:

shafts, gravimetry, measurements, gravimetric modeling

## 1. Wprowadzenie

Metoda grawimetryczna z uwagi na wysoką czułość na kontrast gęstościowy w górotworze jest jedną z najskuteczniejszych metod geofizycznych wykrywania pustek pogórnicyymi. Wyniki prowadzonych przez różne zespoły badań są omawiane i cytowane w licznych publikacjach i podręcznikach akademickich [3, 4, 5, 6, 2, 7]. Rezultaty niektórych badań grawimetrycznych i mikrograwimetrycznych prowadzonych w Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG, w tym badań autora, przedstawione zostały w specjalistycznych periodykach naukowych [1, 10, 8, 9].

Praktyczne zastosowania metody grawimetrycznej do lokalizacji płytko zalegających pustek pogórnicyymi były przedmiotem prac przeprowadzonych w latach 2001 – 2013 przez Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG. Obejmuje to w szczególności określenie zmian regionalnego pola grawitacji w obszarze GZW pod wpływem podziemnej eksploatacji

złóż, warunków bezpieczeństwa w rejonie projektowanej autostrady A1, określenie możliwości wystąpienia nieciągłych deformacji powierzchni oraz efektywności podsadzania pustek i górotworu dla oceny przydatności terenów do zabudowy. Innym wykorzystaniem tej metody była identyfikacja dawnych wyrobisk kopalni węgla brunatnego w Gostycynie na Kujawach [10].

Metoda mikrograwimetryczna daje szczególnie dobre wyniki przy lokalizowaniu pod powierzchnią terenu obiektów pogórnicyymi niewypełnionych medium podsadzkowym i znajdujących się na niewielkich (do 50 m) głębokościach, takich jak: chodniki, sztolnie, upadowe, komory itp. Na rewitalizowanych terenach pogórnicyymi szczególnie istotna staje się poprawna lokalizacja i rozpoznanie stanu zlikwidowanych szymbów, szybków, nadsiewłomów i innych wyrobisk pionowych, które miały połączenie z powierzchnią. Lokalizacja starych, na ogół płytko położonych wyrobisk stwarza problemy w ich poprawnym usytuowaniu na współczesnych mapach i w konsekwencji w ich odszukaniu w terenie. Stare wyrobiska i zroby są nie zawsze nanoszone na współczesne mapy, sporządzane często w innych układach współrzędnych. Dlatego

\*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

ustalenie położenia szybów na tej drodze nie jest wiarygodne i wymaga niezależnego sprawdzenia.

Z uwagi na fakt współzależności wielu czynników w zmierzonym efekcie grawitacyjnym, interpretacja wyników pomiarów grawimetrycznych wykonanych na terenach o nieznanym dokładnej lokalizacji wyrobisk pionowych jest na ogół trudna i pozwala zwykle jedynie na przybliżone określenie miejsca występowania, rzadziej - stanu wyrobiska. Wyniki pomiarów w takich warunkach są w pewnym stopniu zadowalające tylko dla jakościowego powiązania zagrożeń powierzchni, wywołanych obecnością ewentualnej pustki w szybie z zamierzeniem dalszego użytkowania terenu. Jednakże, jak pokazują rezultaty poprzednich prac autora [8, 9], możliwe jest uzyskanie pewnego uściślenia lokalizacji obiektu wywołującego anomalie poprzez powiązanie efektu grawimetrycznego z parametrami geometrycznymi i fizycznym, obiektu zaburzającego i jego otoczenia. Nie znając parametrów ciała zaburzającego, uzyskać to można w trybie analizy odwrotnej z wykorzystaniem modelowania.

W poprzednich pracach autor [9] podał założenia teoretyczne takiej metody postępowania. Ustalone zostały również pewne zależności funkcyjne pomiędzy mierzonym na powierzchni efektem grawitacyjnym a parametrami ciała zaburzającego. Celem bieżących badań prowadzonych przez autora jest weryfikacja możliwości prowadzenia owej analizy odwrotnej w toku badań modelowych, poprzez porównanie krzywych zmian anomalii grawimetrycznych z wynikami pomiarów w terenie. W tej pracy uwagę skupiono na zastosowaniu tej metody do identyfikacji położenia i szybów górniczych. Podjęte zadanie skierowane było na określenie metody postępowania przy mikrogravimetrycznej lokalizacji szybów, a nie rozwiązanie techniczne pracy poszukiwawczej i dostarczenie parametrów konkretnego wyrobiska.

Ze względu na dostępne w GIG dokumentacje, do realizacji celu pracy wybrano teren szybu „Wschodni” ZGH Orzeł Biały w Bytomiu, a także wokół szybu „Władysław” zlikwidowanej KWK „Jadwiga” w Zabrze. Obserwacje mikrogravimetryczne na wymienionych poligonach wykonane zostały przez autora za pomocą grawimetru CG-5 Autograv produkcji kanadyjskiej firmy Scintrex, będącego na wyposażeniu Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG.

Obliczenia modelowe przeprowadzono metodą numeryczną wykorzystującą twierdzenie Gaussa-Ostrogradzkiego o strumieniu pola wektorowego, która jest szczegółowo opisana w pracy [9]. W prezentowanych przykładach wykorzystano program komputerowy ModGrav o specjalnie dostosowanym algorytmie obliczeń do modelowania szybów wg opisanej metody.

## 2. Metodyka prowadzenia badań

### 2.1. Sposób wykonania pomiarów

Grawimetr CG-5 Autograv to zautomatyzowany instrument, oparty na mikroprocesorze. Odczyty w przyrządzie w sposób ciągły uzyskuje się z uśrednienia serii pomiarów w jednosekundowych próbkach. Wyniki, bezpośrednio w jednostkach mGal, prezentowane są na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym. Dane pomiarowe zapisywane są w pamięci stałej przyrządu. W celu dalszego przetwarzania przesyłane są na komputer PC. Instrument ten charakteryzuje się bardzo małym, a zarazem liniowym dryftem. Zainstalowane w grawimetrze CG-5 oprogramowanie umożliwia wyliczenie i uwzględnienie w trakcie wykonywania odczytów poprawki na pływy ziemskie (luni-solarnej). Przyrząd ten umożliwia

pomiary z dokładnością i powtarzalnością wyników do  $\pm 0,001$  mGal.

Pomiary na poszczególnych stanowiskach przeprowadzono metodą punktów pośrednich. Obserwacje przebiegały wg schematu: 100,1,2,3,...,n, 100 gdzie: 100 - punkt bazowy a 1,2,3,...,n - punkty rozproszone. W oparciu o punkt bazowy na stanowiskach szczegółowych wykonano obserwacje wypełniające. Dowiązania ciągów pozwoliły wyeliminować krótkookresowe dryfty zera instrumentu. Średnio i długookresowe zmiany miejsca zera grawimetru, spowodowane głównie składową pionową siłą lunisolarnych, eliminowane były w czasie pomiarów. Zainstalowane w grawimetrze CG-5 oprogramowanie umożliwiało wyliczenie, zgodnie z algorytmem Longmana, i uwzględnienie w trakcie wykonywania odczytów poprawek na pływy ziemskie. Poprawki te mogą osiągać wartość  $\pm 0,04$  mGal/h, a w ciągu dnia mogą zmieniać się nawet o  $\pm 0,3$  mGal.

Zgodnie z przyjętą metodyką pomiary na jednym punkcie wykonywano do momentu powtórzenia się identycznego odczytu z dokładnością do 0,005 mGal. Takie postępowanie zapewnia wysoką jakość i dokładność wykonania pomiarów mikrogravimetrycznych. Po zarejestrowaniu danych w terenie i zgraniu ich na komputer stacjonarny dokonano wyłonienia właściwych wartości z pomiarów po jednej dla każdego z punktów. Odrzucono pomiary błędne i słabszej jakości, kierując się głównie odchyleniem standardowym pojedynczego pomiaru uśrednionego z serii około 22 sekundowych odczytów. Ten etap pracy dotyczący pomiarów w grawimetrii jest najbardziej żmudną częścią zadania i równocześnie wymagającym dużego zaangażowania interpretatora. Proces ten bardzo trudno zautomatyzować z uwagi na wartość czynników branych pod uwagę w trakcie akceptacji lub odrzucenia wyniku.

W wykonanych badaniach nie było konieczności wykonania pomiarów potrzebnych do obliczenia poprawek topograficznych siły ciężkości ze względu na generalnie płaską powierzchnię badanego terenu. W celu zredukowania mierzonych wartości do poziomu fizycznego Ziemi w trakcie prac dokonywano pomiaru wysokości statywu, na którym ustawiany był przyrząd pomiarowy.

W celu określenia dokładności pomiarów na 10% punktów pomiarowych stanowiskach obserwacje grawimetryczne wykonano dwukrotnie. Na podstawie wartości uzyskanych z pomiarów powtórzonych obliczony został średni błąd pojedynczego pomiaru, który wyniósł  $\pm 0,004$  mGal na obu poligonach badań. Stosunkowo niska wartość błędu wskazuje na wysoką precyzję zastosowanego instrumentu i potwierdza bardzo wysoką dokładność przeprowadzonych pomiarów.

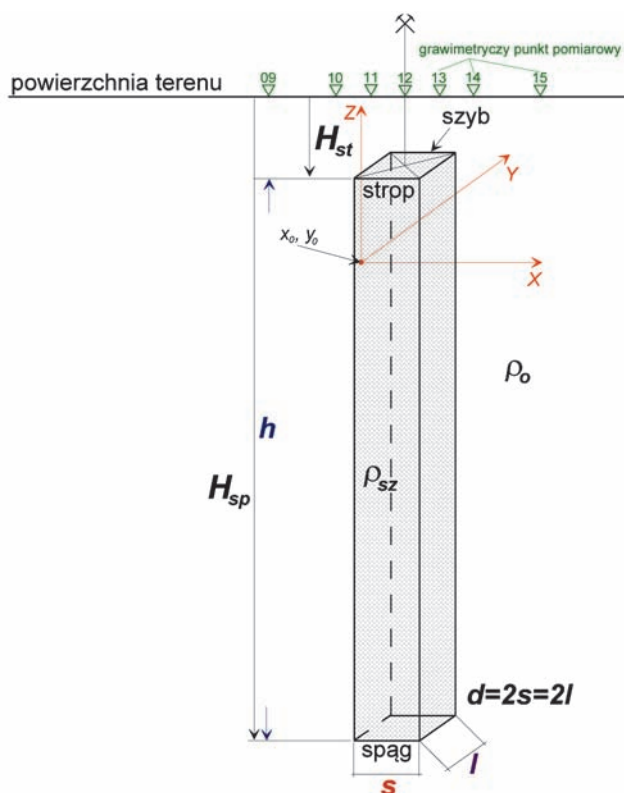
W ramach prac obliczeniowych wyliczone zostały względne wartości siły ciężkości dla wszystkich wypełniających punktów pomiarowych. Obliczenia wykonano w oparciu o przyjętą w punkcie podstawowym (bazowym) lokalną wartość siły ciężkości. Następnie do otrzymanych danych terenowych zaaplikowano odpowiednie poprawki i obliczono wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera.

Należy dodać, że uzyskiwane przez wielu badaczy rozkłady siły ciężkości nad poszukiwanymi szybami lub w ich sąsiedztwie chociaż są rozkładami typowymi, to wyłonienie użytecznych anomalii nie jest wcale oczywiste. Ich cechą charakterystyczną jest występowanie wielkoobszarowych zaburzeń, również od ciał o wyższej gęstości niż otoczenie. Dodatkowo uzyskany rozkład anomalii grawimetrycznych ujawnia swe maksima w przedziale wartości bliskim zakresowi błędów pomiarowych, na które metoda jest wyjątkowo czuła. Obrazuje to złożoność i trudność interpretacji wyników badań mikrogravimetrycznych, a przede wszystkim jej jednoznaczność.

## 2.2. Metoda analizy wyników

Na potrzeby tej pracy odpowiednio przetworzono program *ModGrav*, wykorzystany uprzednio (2008-2012) do obliczania efektu grawitacyjnego generowanego przez model pustki o zmiennych cechach fizycznych i geometrycznych. Zasadnicze formuły i przetworzenia algorytmu programu przedstawiono w [9]. Przygotowanie zadań do serii modeli obejmowało wprowadzenie danych wejściowych, określenie geometrii prostopadłościennego wyrobiska szybowego, jego położenia i uproszczonych warunków fizycznych w modelu szybu i jego otoczeniu. Parametry i zmienne wykorzystane w modelowaniu przedstawiono na rys. 1. W tej pracy szyb odwzorowywano prostopadłościannem, o bokach  $s$ ,  $l$ ,  $h$ . Zdefiniowanie innych parametrów, jak np. wymiary siatki obliczeniowej i in., wykonanie obliczeń i zapis serii wyników był analogiczny jak w pracy [9]. Wynikiem obliczeń programu *ModGrav* są następujące deskryptory anomalii grawitacyjnej: rozkład anomalii  $A(x,y)$  oraz największa wartość efektu grawitacyjnego  $A_{ext}$  (w mGal).

W ramach zadań przygotowawczych w warunkach odpowiednich do dalszych analiz potwierdzono, że istotne znaczenie dla rozkładów  $A(x,y)$  oraz  $A_{ext}$  ma głębokość spągu szybu, ale otrzymana zależność  $A_{ext}$  od  $H_{sp}$  ma charakter krzywej z asymptotą, bo głębokości większe od około 50 m nieznacznie wpływają na zmianę wartości anomalii. Istotniejszy wpływ ma położenie stropu  $H_{st}$  szybu. Wpływ średnicy  $d$  szybu na wartość anomalii rośnie z wymiarem średnicy i jest funkcją potęgową. Jest też liniowo wprost proporcjonalny do różnicy gęstości  $\Delta\rho$  wypełnienia szybu i jego otoczenia. Wpływ murowanej czy betonowej obudowy szybowej ma charakter anomalii o znaku dodatnim, a wynik oddziaływania wypełnionego szybu z obudową jest superpozycją wpływów tych dwóch ośrodków.



Rys. 1. Parametry i zmienne wykorzystywane w modelowaniu programem *ModGrav*

Fig. 1. Parameters and variables used in modeling in the *Mod-Grav* program

## 3. Wyniki pomiarów grawimetrycznych

W tym rozdziale dla wybranych dwóch poligonów szybu „Wschodniego” i szybu „Władysław” przedstawiono odrębnie: opis dostępnych danych o badanych szybach, ich warunki geologiczno-górnice oraz sposób przeprowadzenia pomiarów grawimetrycznych. Po przetworzeniu danych terenowych przez wprowadzenie poprawek i redukcji przedstawiono także analizę map anomalii grawimetrycznych w redukcji Bouguera.

### 3.1. Szyb „Wschodni”

Jako poligon główny do badań wybrano „Szyb Wschodni” (w przeszłości ‘Gerhard’) o niepotwierdzonym położeniu, należący w przeszłości do ZGH „Orzeł Biały” (obecnie ZG „Piekary”). Szyb ten zlokalizowany jest ok. 1,5 km na północny wschód od centrum miasta Bytomia i ok. 2 km na południe od centrum Piekar Śląskich, w obrębie ogródków działkowych przy ul. Kamińskiej po wschodniej stronie DK 911.

Szyb leży na terenach dawnej eksploatacji rud cynku i ołowiu oraz żelaza (żelaziak brunatny), położonych na północ od miasta Chorzów. Eksploatację wspomnianych surowców prowadzono tam w okresie od połowy XIX do końca XX wieku w ławie górnej i dolnej na głębokościach około 55-80 i 70-90 m. Szyb leży w granicach czynnego obszaru górniczego „Rozbark III” i „Piekary Śl. II”, gdzie obecnie eksploatację prowadzi ZG „Piekary”, należący do Kompanii Węglowej S.A.

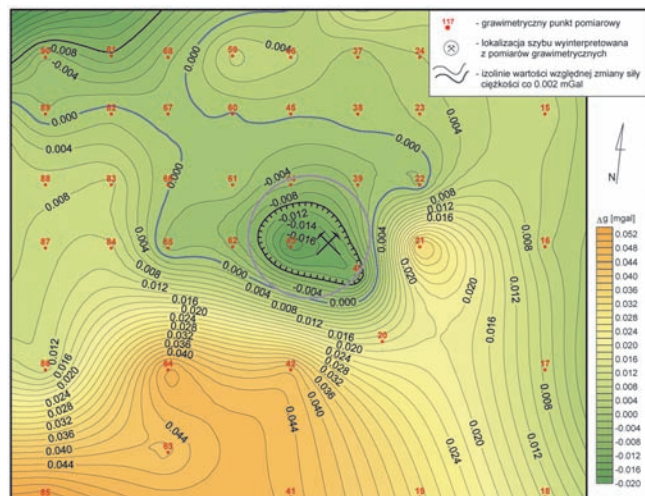
Porównanie różnych map obszaru poligonu badań obrazujących zasięg robót górniczych (rejony eksploatacji, chodniki eksploatacyjne, transportowe i wentylacyjne) w złożu rudnym wskazuje, że obszar eksploatacji jest dobrze udokumentowany. Położenie tych samych wyrobisk na różnych mapach pokrywa się z niewielkim błędem rzędu 5 m. Zdecydowanie gorzej jest z udokumentowaniem wyrobisk pionowych (szyby, szybiki). Szyb „Wschodni” uwidocznił się na wszystkich mapach górnictwa rudnego prowadzonego do 1910 roku. Jego zasięg to w przybliżeniu ława górna. Na starszych mapach nosi on nazwę „Gerhard”. Na jednej z archiwalnych map zamieszczono przy nim napis „zlikwidowany”. Brak jednak danych odnośnie sposobu likwidacji i roku jej wykonania. Na kolejnej mapie pochodzącej z ZGH „Orzeł Biały” przy szybie widnieje opis: „Szyb Wschodni gł. 107,6 m zasypany w 09.1983 decyzją OUG w Sosnowcu”. Na innej mapie pojawia się dodatkowo notatka: „Szyb zasypany na długości 25,8 m od dna rzupia”. Zapisy te zawierają fragmentaryczną, ale niemal jedyną informację o parametrach szybu.

W końcu kwietnia 2012 r. na ww. poligonie wykonano prace przygotowawcze i pomiary geodezyjne, a w maju pomiary grawimetryczne. Pomiary wykonywano bezpośrednio nad szybem i w jego bliskim sąsiedztwie. Punkty pomiarowe wyznaczono w regularnej szczegółowej siatce 5x5 m, z zagęszczeniem do 2.5x2.5 m w najbliższej okolicy spodziewanego usytuowania szybu. Zaprojektowana siatka pomiarowa obejmowała łącznie 137 punktów ponumerowanych od 1 – 137 oraz punkt bazowy 100.

Po wykonaniu pomiarów terenowych i wstępnym przetworzeniu otrzymanych danych zaaplikowano odpowiednie poprawki do danych pomiarowych. W efekcie otrzymano względne wartości siły ciężkości w tzw. redukcji Bouguera. Do przedstawiania tutaj wybrano fragment otrzymanej mapy anomalii w redukcji Bouguera będący wycinkiem całej mapy z jej centralno-południowej części (rys. 2).

W obrazie anomalii w redukcji Bouguera uzyskanym na poligonie badawczym dominuje anomalia ujemna zlokalizowana wokół punktu 43, nieco na południe od środka siatki pomiarowej. Inne mniejsze anomalie na mapie o amplitudzie nieprzekraczającej +/- 0,020 mGal wywołane są

przypuszczalnie zmianami gęstości utworów w najbardziej przy powierzchni warstwie. Przyczynami tego mogą być dzikie wysypiska śmieci w rejonie ogródków działkowych, składowiska odpadów, skały pływnej, licznych skarp oraz przeprowadzona częściowo na przedmiotowej działce rekultywacja terenu pogórniczego. Dodatnie anomalie w południowej części terenu związane są z obecnością w tym miejscu skarpy, a izolinie zmian siły ciężkości naśladują tu rzeźbę terenu.



Rys. 2. Mapa anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera – szyb „Wschodni”

Fig. 2. Map of anomalies of the gravity force in Bouguer reduction – “Wschodni” shaft

Obszar omawianej anomalii grawimetrycznej ma powierzchnię kilkunastu metrów kwadratowych, a średnica izolinii obniżonych wartości siły ciężkości wynosi około 5 m. Amplituda zaburzenia osiąga wartość około  $-0,040$  względem otoczenia, a wartość najmniejsza w centrum anomalii przekracza  $-0,020$  mGal. Zarejestrowana anomalia, dane archiwalne oraz informacje od właścicieli działek pozwalają na domniemanie, iż to zaburzenie wywołane jest obecnością w podłożu szybu „Wschodni”. W tym rejonie ława występuje na głębokości 74,0 m, natomiast ława dolna na głębokości 87,0 m.

Maksymalna (niewielka) wartość anomalii oraz informacje z map górniczych (notatka: „Szyb Wschodni gł. 107,6 m zasypany w 09.1983 decyzją OUG w Sosnowcu”) wskazują na to, że szyb „Wschodni” został w dużej części zlikwidowany i nie stanowi zagrożenia dla powierzchni. Zarejestrowana anomalia świadczy najprawdopodobniej o częściowym rozluźnieniu materiału wypełniającego szyb (spadek gęstości) na stosunkowo niewielkiej głębokości (do 20 m). Zasypany szyb działa tu jako swojego rodzaju dren, więc dodatkowym czynnikiem powodującym w sąsiedztwie rozluźnienie jest migrująca w jego stronę woda.

Otrzymane wyniki spełniają jedynie częściowe założenia postawione w pracy odnośnie poligonu badawczego. Stwierdzono obecność rozluźnienia warstw budujących podłoże w odległości ok. 11 m od spodziewanej lokalizacji szybu. Biorąc pod uwagę niedokładność map i danych archiwalnych w odniesieniu do inwentaryzacji wyrobisk pionowych błąd wyznaczenia położenia szybu metodą mikrogravimetryczną można uznać za niewielki. Niestety, zarówno otoczenie, jaki i nieregularność i niewielka wartość amplitudy zaburzenia, jakie szyb wywołuje, będą znacznie utrudniały proces dopasowania odpowiednich parametrów ciała zaburzającego do otrzymanego rozkładu anomalii rzeczywistych na drodze modelowania.

### 3.2. Szyb „Władysław”

Z archiwalnych materiałów wynika, że szyb został wykonany w 1871 roku przez Augusta Borsiga - właściciela kopalni Hedwigswunsch (Jadwiga). Początkowo szyb miał obudowę drewnianą i zmienny przekrój w profilu głębokościowym. W okresie późniejszym najprawdopodobniej obudowa szybu została wzmocniona. Rura szybowa przecina strefę uskoku i z tego powodu charakteryzowała ją duże zawodnienie. Ostatecznie szyb uzyskał średnicę 5 metrów i został zgłębniony do poziomu 618,86 m. Pełnił funkcję wdechową.

Przed likwidacją szybu całkowity dopływ naturalny wody wynosił 1110 l/min. W zdecydowanej części pochodził on ze starych wyrobisk poziomych udostępniających pokłady węgla 501, 503, 505 i 510. Dopływu wód zza obudowy szacowano na 23 l/m. Pochodziły one głównie z odcinka, w którym rura szybowa przechodzi przez utwory czwartorzędowe. W bezpośrednim otoczeniu szybu eksploatacji węgla nie prowadzono.

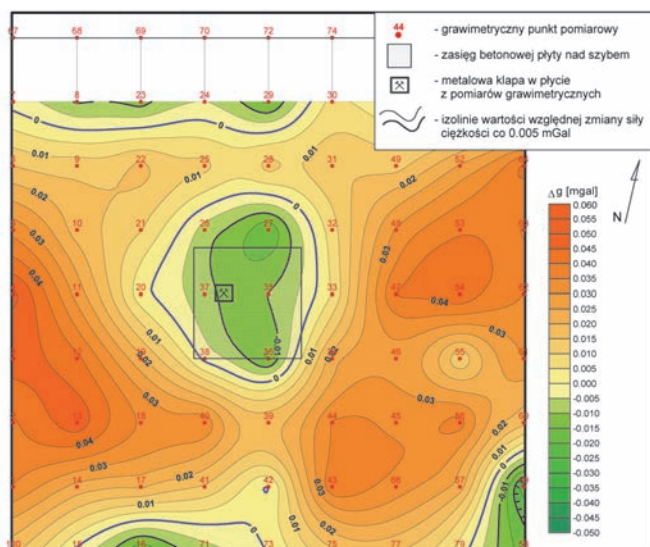
W przekroju geologicznym rury szybowej zalegają grunty nasypowe oraz utwory czwartorzędowe, triasu i karbonu. Miąższość nasypów wynosi 5 m. Poniżej występuje seria piaszczystych utworów czwartorzędowych z 2-metrowej grubości wkładką glin w spągu. Miąższość utworów czwartorzędowych to ok. 50 m. Pod nimi do głębokości 74,5 m zalegają utwory triasu wykształcone w postaci piaskowców z wkładkami ilów. Głębiej w przekroju szybu zalega seria utworów karbonu, należąca pod względem stratygraficznym do warstw siódolowych. W jest stropie stwierdzono obecność warstwy łupków ilastych o grubości ok. 10 m. Głębiej w przekroju dominują piaskowce. Najpłycej zalegającym pokładem węgla w rejonie szybu jest pokład 501, którego spąg stwierdzono na głębokości ok. 110 metrów.

W dokumentacji techniczno-ekonomicznej powiązań wodnych w szybie „Władysław” i na powierzchni pola „Biskupice” (PPHU Posta, Zabrze, grudzień 1995) przedstawiono koncepcję likwidacji szybu przez zasypanie go materiałem inertnym (kamień popłuczkowy – piaskowiec lub tłuczeń o średnicy 40-80 mm) z pozyskaniem dopływającej wody przez zastosowanie pompy z napływem na poziomie 380 przy szybie „Staszic” i pompowaniem szymbem „Staszic” do Zakładu Przerobczego (tzw. wariant 5). Koncepcja ta uzyskała korzystną opinię Zespołu ds. zagrożeń wodnych KWK „Pstrowski” w dniu 30 listopada 1995 roku (protokół nr 11a/95), co pozwala założyć, iż została ona zrealizowana. Szyb nadal więc pełni funkcję drenażową dla wód podziemnych.

W rejonie szybu punkty pomiarowe wyznaczone zostały w regularnej szczegółowej siatce pomiarowej 5x5 m, z zachowaniem stałego kroku pomiarowego wynoszącego 5 m. Zaprojektowana siatka pomiarowa obejmowała łącznie 81 punktów ponumerowanych od 1 do 80 oraz punkt bazowy - 100.

Wynikiem wykonanych pomiarów oraz prac obliczeniowych jest mapa anomalii grawimetrycznych w redukcji Bouguera przedstawiona na rys. 3. Obrazuje ona rozkład pola siły ciężkości w obszarze objętym pomiarami.

W przedstawionym odwzorowaniu wartości siły ciężkości zmieniają się od  $-0,05$  do  $0,05$  mGala. Rejon szybu zaznacza się jako obszar, w którym wartości siły ciężkości są obniżone. Obszar ten ma kształt zbliżony do elipsy, której dłuższa oś rozciąga się na kierunku północ-południe. Osie elipsy mają długości 8 i 10 m. W centrum anomalii wartość siły ciężkości jest obniżona o ok.  $0,03 - 0,06$  mGala względem otoczenia. Efekt ten należy wiązać z obecnością szybu oraz ponad 200-letnim drenażem wód poziomu czwartorzędowego. Najprawdopodobniej w jego wyniku nastąpiło lokalne wymycie drobniejszych frakcji z warstw piaszczystych w rejonie



Rys. 3. Mapa anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera – szyb „Władysław”  
 Fig. 3. Map of anomalies of the gravity force in Bouguer reduction – “Władysław” shaft

rury szybowej. Powoduje to, że w określonej pomiarach grawimetrycznymi strefie, przypowierzchniowe partie gruntów czwartorzędowych charakteryzują się mniejszą gęstością objętościową aniżeli grunty zalegające w dalszej odległości od szybu. Rozkład pola siły ciężkości nie wskazuje wprost na możliwość istnienia płytko zalegających pustek, które stwarzałyby zagrożenie powierzchni terenu przyszybowego deformacjami.

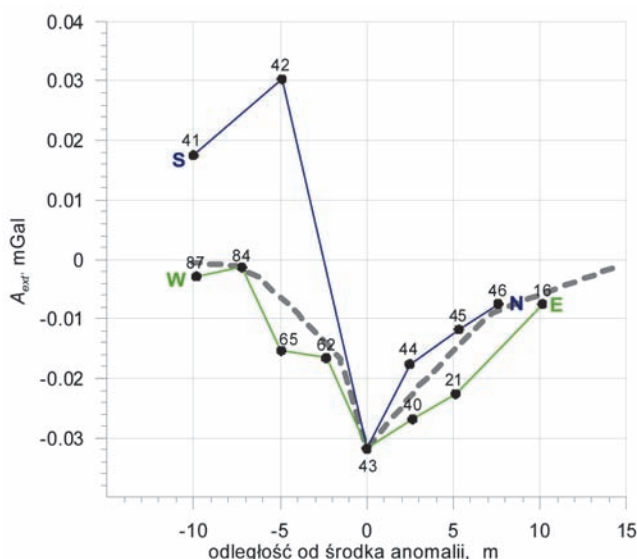
**4. Interpretacja anomalii grawimetrycznych w rejonie zlikwidowanych szybów poprzez modelowanie z zastosowaniem analizy odwrotnej**

**4.1. Szyb „Wschodni”**

Wyniki pomiarów grawimetrycznych, oprócz powierzchniowych rozkładów anomalii w redukcji Bouguera pokazanych na rys. 2 i 3 przedstawić można na profilach, wykorzystanych tu do analizy odwrotnej. Kierunki linii profilowych wynikały z rozmieszczenia punktów pomiarowych w przyjętym lokalnym układzie współrzędnych XY, w którym współrzędne w środku układu były równe 0. Środek układu pokrywał się z punktem pomiarowym 43, gdzie wartość anomalii była maksymalna. Linia X (W-E) przechodziła przez punkty 87-84-65-62-43-40-21-16, a linia Y (S-N) przez punkty 41-42-43-44-45-46.

Na rys. 4 wniesiono wartość względną siły ciężkości w punktach pomiarowych oznaczonych symbolem i podanym numerze zgodnym z nr. na mapie. Punkty połączone łamaną linią zieloną dla kierunku X oraz linią niebieską dla kierunku Y. Szarą linią przerywaną wniesiono również wstępnie oczekiwany rozkład anomalii uśredniony dla obu kierunków, jaki poszukiwano w toku modelowania.

Cykl modelowań skierowany był na dopasowanie  $A_{ext}$  nad środkiem szybu oraz punktu, który sytuuje się w pobliżu jego krawędzi, czyli nad brzegiem szybu o wartości  $1/2 A_{ext}$ . Przy doborze parametrów używanych w modelowaniu kierowano się wynikami z serii badań wstępnych wspomnianych w omówieniu metody modelowania. Podstawowa trudność wynikała z wyboru wymiarów szybu (średnica), położenia stropu i spą-



Rys. 4. Zmiany względnej wartości siły ciężkości na profilach wzdłuż osi X (zielony) i Y (niebieski) dla Szybu „Wschodni”  
 Fig. 4. Changes of the relative value of gravity force of the profiles along X (green) and Y (blue) axes for “Wschodni” shaft

gu szybu oraz doboru odpowiedniej różnicy gęstości pomiędzy wypełnieniem szybu a jego otoczeniem. W wyniku tych prac potwierdziło się, że przyjęcie spągu na głębokościach przekraczających 50 m nie zmieniało praktycznie wartość anomalii w jej ekstremum, a przyrost wartości siły ciężkości w strefie brzegowej anomalii był pomijalny. Stwierdzono również, że istotne znaczenie na przyrost  $A_{ext}$  ma malejąca głębokość posadowienia stropu szybu. Uźmiennianie średnicy szybu znacząco wpływało na położenie punktu odpowiadającego  $1/2 A_{ext}$ . Poszerzanie wymiarów szybu pozwalało zbliżać się do wyniku pomiarów terenowych. Powodowało to jednak niezgodne z realiami technicznymi wymiary szybu. Efekt ten – dokumentowany pomiarami grawimetrycznymi mógł być wynikiem rozluźnień poza granicami szybu, co do których nie dysponowano żadnymi danymi. Stosunkowo łatwym elementem modelowania było określenie wpływu różnicy gęstości, która jak wiadomo jest wprost proporcjonalna do wartości mierzonej względnej wartości siły ciężkości.

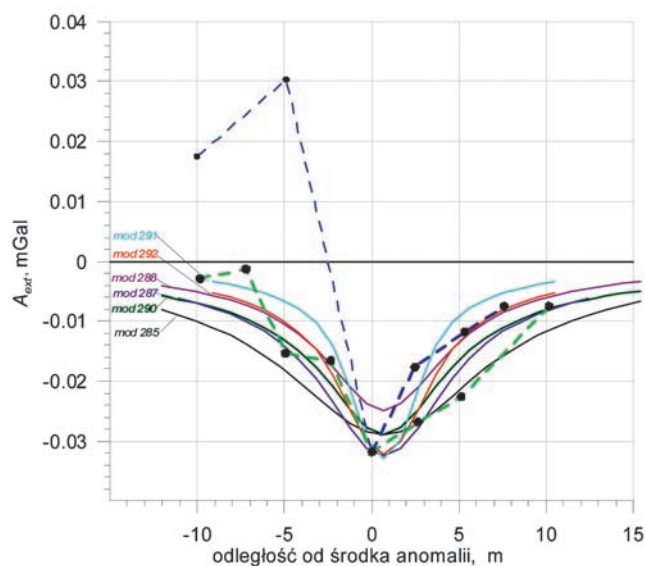
Reasumując, w modelowaniu jednak nie uzyskano wystarczająco jednoznacznego dopasowania modelu do wyników pomiarów. Na rys. 5 przedstawiono przykładowy zestaw wymodelowanych krzywych. Wstępne parametry szybów przyjęte w tych symulacjach podane są w tabeli 1.

**Tabela 1. Parametry przykładowych symulacji wykonanych dla szybu „Wschodniego”**

**Table 1. Parameters of the exemplary simulations conducted for “Wschodni” shaft**

Nr	$\rho_{sz}$ kg·m <sup>-3</sup>	$\rho_o$ kg·m <sup>-3</sup>	d, m	H <sub>st</sub> , m	H <sub>sp</sub> , m
292	300	2600	3,5	2	40
290	10	2600	3,7	3	100
288	10	2600	3,5	3	40
285	10	2600	5	5	40

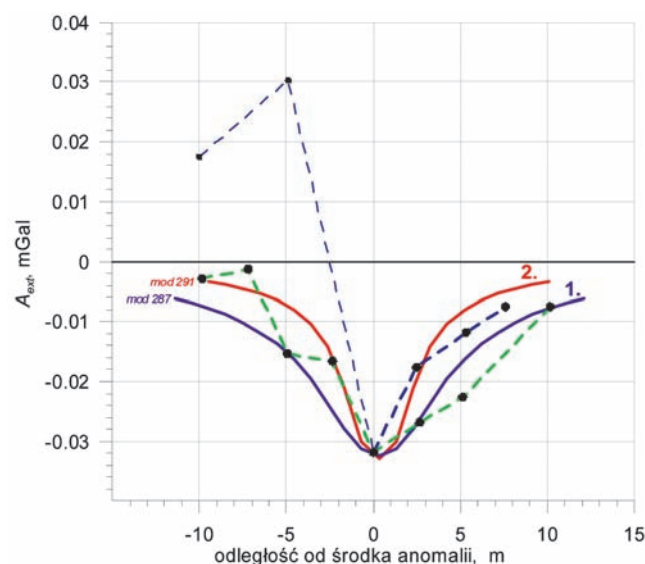
Porównanie odchyłek rozkładów modelowych  $A_{ext}$  od wyników pomiarów i parametrów modelu z możliwym stanem szybu i jego otoczenia doprowadziło do wyłonienia dwóch krzywych, które nie odchyłały się od wartości pomierzonych o więcej niż  $\pm 0,004$  mGal, a zadane parametry mogły



Rys. 5. Zestawienie przykładowych krzywych otrzymanych w toku modelowania z profilami pomiarowymi – Szyb „Wschodni”

Fig. 5. Summary of the exemplary curves obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Wschodni” shaft

charakteryzować warunki zlikwidowanego szybu. Rozkłady te pokazano na rys. 6, a przyjęte parametry modelowe zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Zestawienie najlepszych dopasowań otrzymanych w modelowaniu z profilami pomiarowymi – Szyb „Wschodni”

Fig. 6. Summary of the best matches obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Wschodni” shaft

Wykres wynikowy (1) w prawej części nie pokrywa się z łamanymi uzyskanymi z pomiarów, co wskazuje na to, że szyb może mieć większy wymiar w kierunku łamanej dla orientacji W-E (zielony). Zwiększenie rozmiaru dotyczy może zarówno samego szybu, jak i strefy rozluźnień w jego sąsiedztwie. Podobna sytuacja ma miejsce dla łamanej S-N (niebieski) po lewej stronie wykresu. Tu wyniki pomiarów powodują znaczne zawężenie w przebiegu łamanej.

Obecność punktów z profilu S-N po lewej stronie wykresu o wartościach znacznie wyższych niż dla tych na profilu W-E może wskazywać na oddziaływanie dodatkowych mas (np. infrastruktury podziemnej), zaburzających pole siły ciężkości w tym miejscu. Wtedy dopasowanie krzywych modelowych po tej stronie wykresu nie jest zbieżne z łamaną S-N (niebieską), ale raczej z W-E (zieloną), co znacznie utrudnia optymalny dobór krzywej modelowej.

Tablica 2. Parametry przyjęte w modelowaniu szybu „Wschodni” o najlepszym dopasowaniu

Table 2. Parameters of the best matching assumed in modeling of the “Wschodni” shaft

Nr	$\rho_{sz}$ kg·m <sup>-3</sup>	$\rho_o$ kg·m <sup>-3</sup>	d, m	H <sub>st</sub> , m	H <sub>sp</sub> , m
287	10	2600	4,0	3,0	40
291	1110	2600	3,5	1,0	40

Patrząc na dane w tabeli 2 widoczne jest, że zasadnicze znaczenie w modelowaniu miało przyjęcie wysokości górnego posadowienia szybu, uzgodnienie różnicy gęstości pomiędzy szybem a otoczeniem oraz dopasowanie średnicy szybu. Najlepszą zgodność dla tych krzywych uzyskano dla średnicy  $d_1=4,0$  m i  $d_2=3,5$  m. Znaczna różnica gęstości może wskazywać na fakt, że szyb albo jest nie w pełni zlikwidowany albo zasypany jest materiałem o gęstości znacznie zaniżonej względem otoczenia. Takie stwierdzenie wymagałoby jednak powtórzenia pomiarów z odpowiednim usytuowaniem i zagęszczeniem siatki pomiarowej.

Główną korzyścią z przeprowadzonych modelowań jest zdobyte doświadczenie w poszukiwaniu (wyznaczaniu) zbliżonego do pomiarów wyniku modelowania z wykorzystaniem danych z kwerendy warunków geologiczno-górnicznych. Wynikające stąd wnioski przedstawione zostaną w końcowej części opracowania.

## 4.2. Szyb „Władysław”

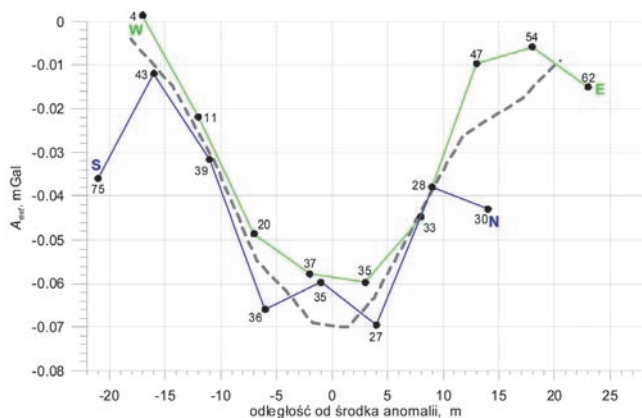
Ze względu na niepewność lokalizacji szybu „Wschodniego”, sposobu pomiaru i trudności w interpretacji wyników na tym poligonie badań, zdecydowano się na przeprowadzenie dodatkowej próby modelowania z wykorzystaniem wyników pomiarów przedstawionych w punkcie 3.1 na szybie „Władysław”. Dane o lokalizacji szybu uzyskano na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych. Opis sposobu wykonania pomiarów był analogiczny do szybu „Wschodniego” (punkt 4.1). Rejon szybu położony jest w terenie niewykazującym znacznych deniwelacji terenu.

Opis procesu analizy odwrotnej dla tego przypadku był podobny do opisanego w punkcie 4.1 dla szybu „Wschodniego” i nie będzie tu przytaczany. Ograniczono się tylko do pokazania rozkładu anomalii uśrednionego na podstawie wyników pomiarów na kierunkach X i Y oraz końcowego wyniku analizy. Na rys. 7 przedstawione są zmiany względnej wartości siły ciężkości wzdłuż profili pomiarowych na kierunkach X i Y. Linia zieloną zaznaczono profil o kierunku W-E (wzdłuż osi X), a niebieską S-N, wzdłuż osi Y. Środek układu pokrywał się z punktem pomiarowym 35, gdzie wartość anomalii dla jednego z kierunków była maksymalna. Linia X przechodziła przez punkty 4-11-20-37-35-33-47-54-62, a linia Y przez punkty 75-43-39-36-35-27-28-30. Szarą linią przerywaną zaznaczono wstępnie oczekiwany rozkład anomalii.

Wyniki pomiarów ujawniają znaczną amplitudę anomalii (znaczna wartość ekstremum anomalii) zarejestrowaną nad szybem „Władysław”. W pobliżu ekstremum pojawia się charakterystyczne wypłaszczenie krzywej profilowej (kierunek



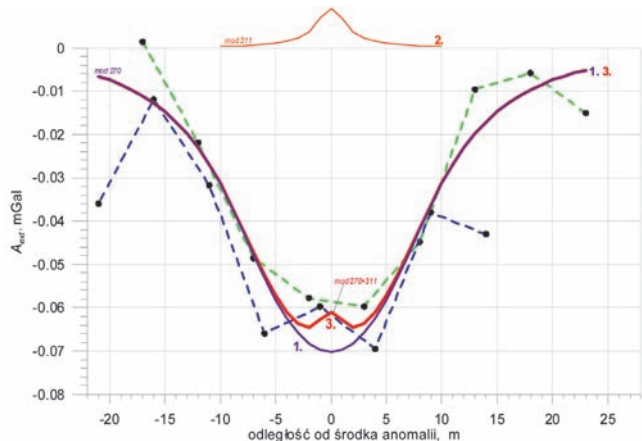
zielony). W tym miejscu dla prostopadłego kierunku pojawia się nawet lokalny wzrost wartości siły ciężkości. W okolicach centrum wartości siły ciężkości i kształt krzywych jest zbliżony. Tak wyznaczona krzywa ma regularny kształt (linia szara przerywana), podobny do profili uzyskanych w trybie badań modelowych z zachowaniem symetrii osiowej. Ułatwiło to znacznie poszukiwanie odpowiedniego dopasowania. Krzywą, która w toku modelowania uzyskała najlepsze dopasowanie do wyników pomiarów na obu kierunkach przedstawiono na rys. 8 i oznaczono nr. 1. Jednakże w pobliżu punktu ekstremum anomalii modelowa krzywa (1) uzyskuje znacznie większą amplitudę (brak wypłaszczenia). Z tego względu dodatkowo poszukiwano krzywej o anomalii dodatniej (2), której superpozycja z krzywą (1) doprowadziłaby do lepszej zgodności krzywej modelowej z wynikami pomiarów. Uzyskany rezultat ilustruje rozkład  $A_{ext}$  na krzywej (3).



Rys. 7. Zmiany względnej wartości siły ciężkości na profilach wzdłuż osi X (zielony) i Y (niebieski) dla Szybu „Władysław”

Fig. 7. Changes in the relative value of gravity force on the profiles along X (green) and Y (blue) axes for “Władysław” shaft

Wynik modelowania (3) wskazywać może na występowanie wokół szybu strefy rozluźnień, która w znaczącym zakresie poszerza obszar objęty anomalią. W szybie występuje wypełnienie (reprezentowane przez krzywą 2) o gęstości bliskiej  $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Można stwierdzić, że prawdopodobnie od czasu podsadzenia szybu nastąpiło rozmycie wypełnienia w jego górnym, przypowierzchniowym odcinku.



Rys. 8. Zestawienie najlepszych dopasowań otrzymanych w modelowaniu z profilami pomiarowymi – Szyb „Władysław”

Fig. 8. Summary of the best matches obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Władysław” shaft

Modelowany przebieg krzywej  $A_{ext}$  może być w dużej mierze zakłócony występowaniem dodatnich wartości siły ciężkości, co może wskazywać na występowanie masywnej podziemnej infrastruktury nieznanego pochodzenia. Uwzględnienie tego w modelu grawimetrycznym zmieniłoby obraz efektu od szybu. Dodać należy także, że wskazuje na to wysoka wartość dodatnia  $A_{ext}$  określona na podstawie uzyskanej z pomiarów wartości ekstremalnej i w otoczeniu szybu o promieniu 10-15m. W takich przypadkach siatka pomiarowa powinna być zagęszczona do odcinków od 1-2,5 m. Parametry modelowania zestawiono w tabeli 3.

Tablica 3. Parametry szypów w symulacjach dla szybu „Władysław”

Table 3. Parameters of shafts in simulations conducted for “Władysław” shaft

Nr	$\rho_{sz}$ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho_o$ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	d, m	$H_{st}$ , m	$H_{sp}$ , m
1. 270	660	2200	14	5	14
2. 311	3000	2200	2	1	14
271	870	2200	16	5	14
272	1100	2200	18	5	14
275	10	3000	8	5	14
265	1200	2210	20	5	14

### 5. Podsumowanie i zalecania

Praca stanowiła próbę zastosowania metod numerycznego modelowania z wykorzystaniem analizy odwrotnej dla identyfikacji warunków w obrębie zlikwidowanych szypów. Pomiar i badania własne dotyczyły szybu „Wschodniego” położonego na terenie eksploatacji rudnej Kopalni ZGH „Orzeł Biały”. Dodatkowo opracowane zostały także wyniki pomiarów dla szybu „Władysław” na terenie koksowni „Jadwiga” w Zabrze.

Sporządzone mapy rozkładu względnych wartości siły ciężkości wskazywały na występowanie anomalii w pobliżu miejsca usytuowania szybu określonego na podstawie dokumentacyjnych materiałów archiwalnych. Dane pomiarowe zostały odpowiednio przetworzone z uwzględnieniem poprawek stosowanych w grawimetrii. Przetworzenie to polegało na wyłonieniu anomalii z danych pomiarowych z uwzględnieniem redukcji Bouguera i sprowadzeniu wyników do „układu anomalii”, tj. do warunków symetrii osiowej 2D, w postaci odpowiednich profili. Z poprawionych danych wykorzystano dwa charakterystyczne, wzajemnie prostopadłe profile, przechodzące przez środek anomalii, które zostały wykorzystane do poszukiwania parametrów krzywych pozyskiwanych na drodze modelowania.

Metoda analizy poprzez modelowanie polegała na uzmiennieniu parametrów modelowego szybu, takich jak: gęstość w szybie i w jego otoczeniu, średnica szybu, położenie stropu i spągu szybu i badaniu wpływu ich zmiany na wartość największą anomalii ( $A_{ext}$ ) oraz na jej rozkłady ( $A_{ext}(x)$  i  $A_{ext}(y)$ ) przy oddalaniu się od osi szybu. Modelowanie dostosowane do uśrednionego profilu przeprowadzono zmodyfikowanym dla szypów programem *Modgrav*.

Jako wyniku modelowania poszukiwano najlepszego dopasowania krzywej modelowej do łamanej uśredniającej wyniki pomiarów terenowych (punkt 4). W tym celu wykonano wiele symulacji efektu grawitacyjnego, które potwierdziły w warunkach szybu „Wschodniego” i „Władysław” rezultaty badań modelowych:

- wprost proporcjonalność  $A_{ext}$ ,  $A_{ext}(x)$  i  $A_{ext}(y)$  do różnicy gęstości,
- zależność  $A_{ext}$  w przybliżeniu od założonego kwadratu średnicy szybu,

- słabą zależność  $A_{ext}$  od głębokości szybu przekraczających 50 m,
- silną zależność  $A_{ext}$  od położenia stropu szybu,
- występowanie  $\frac{1}{2} A_{ext}$  w pobliżu krawędzi szybu.

Wyniki dopasowań oraz związane z nimi parametry przedstawiono na rys. 4-6 dla szybu „Wschodniego” i 7-8 dla szybu „Władysław” oraz odpowiednio w tabelach 1-3.

Analiza danych pomiarowych i parametrów modeli wskazuje na niejednoznaczność wyniku, co przejawia się tym, że różne wartości wymiarów szybu i gęstości wypełnienia prowadzą do uzyskania podobnych wartości  $A_{ext}$  i podobnego rozkładu anomalii (zbliżony kształt krzywych). Niejednoznaczność ta wynika z jednej strony z dokładności pomiaru, ale także z niewielkiej amplitudy anomalii siły ciężkości. Zdaniem autora niejednoznaczność tę w wielu przypadkach można by wyeliminować, modyfikując sposób wykonywania pomiarów i uściślając dane techniczne o szybie. Dotyczy to informacji o wymiarach szybu, obudowie i sposobie likwidacji oraz warunkach hydrogeologicznych.

Poszerzenie zasad modelowania polegało na próbie zastosowania zasady superpozycji wpływów obszarów w obrębie badanej anomalii, np. od wypełnionego szybu, które charakteryzują się zróżnicowanymi gęstościami i różną lokalizacją. Przykładem tego było takie postępowanie dla interpretacji efektu grawimetrycznego w rejonie szybu „Władysław”, gdzie wystąpiło charakterystyczne wypłaszczenie krzywych w pobliżu centrum anomalii. Wyniki ilustruje rys. 8, wskazując na możliwości superpozycji wymodelowanych efektów grawimetrycznych, pochodzących od różnych struktur czy różnych części szybu (różne wypełnienie, obudowa i zróżnicowane otoczenie).

Rezultaty modelowania, które miały pełnić rolę wzorcowych (główny poligon), nie pokrywają się w zadowalający sposób z wynikami pomiarów. W świetle przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że powodem tego był nietrafny wybór poligonu badań. Znacznie skuteczniejsze dla wypracowania metody modelowania efektu grawitacyjnego nad szybami byłoby przeprowadzenie pomiarów grawimetrycznych na obiekcie usytuowanym w słabo zaburzonym podłożu. Szyb taki ze względów metodycznych powinien być pustką, a jego położenie powinno być ściśle określone. Znane powinny być także wymiary, grubość i rodzaj obudowy oraz zapewniona jej szczelność (brak przepływów). Na takim obiekcie rozmieszczenie punktów pomiarowych powinno być takie, aby w pobliżu środka szybu (w obrębie jego średnicy) zagęszczenie punktów było największe i powinno maleć wraz z odległością od środka szybu na zewnątrz jego średnicy. Dla prawidłowego przeprowadzenia testowania metody potrzebne jest duże zagęszczenie punktów nad pustką – ze względu na największą zmienność wartości anomalii w tym przedziale.

Po spełnieniu sformułowanego postulatu wyniki wzorcowego testowania metody mogłyby być dopiero zastosowane do znacznie trudniejszego zadania, jakim jest wykorzystanie wypracowanej metody do określania lokalizacji zlikwidowanych szybów i ich parametrów geometrycznych oraz ich wypełnienia. Poprawa efektywności identyfikacji wyrobisk pionowych metodą grawimetryczną, zdaniem autora, wymaga przeprowadzenia takich wzorcowych badań w przyszłości.

Biorąc pod uwagę wyniki tej pracy, sformułować można następujące zalecenia praktyczne dla sposobu poszukiwania pustki poszybowej.

### Zalecenia

Podstawowym zaleceniem jest stosowanie analizy wstępnej dla właściwego doboru długości kroku siatki pomiarowej poprzez:

- zebranie kompletu danych archiwalnych o badanym szybie, takich jak: średnica, obudowa, sposób likwidacji, wypełnienie, infrastruktura i dokładna lokalizacja,
- skonstruowanie modelu wpływów szybu na powierzchnię w wariancie „szyb podsadzony” (anomalii dodatnia) i „szyb niezlikwidowany” (anomalii ujemna). Jeżeli  $\frac{1}{2} A_{ext} > 2 |\mu|$  (średniego błędu pomiarów wraz z błędami poprawek), czyli  $A_{ext} > 4|\mu|$  (np. dla  $\mu = \pm 0,004$  mGal), możliwe jest wykrycie przy  $s_0$  anomalii  $A_{ext} = -4|\mu| = -0,016$  mGal ( $s_0$  to szerokość krzywej dzwonowej po odległości od osi szybu dla  $\frac{1}{2} A_{ext}$ ),
- jeżeli celem badań jest tylko zlokalizowanie szybu, wystarczające jest wykrycie anomalii o znaku dodatnim lub ujemnym w zależności od stanu szybu;  $\text{krok} = s_0$ ,
- jeżeli spodziewana anomalii ma mniejszą amplitudę lub celem badań jest ocena stanu szybu i jego parametrów, krok siatki badawczej należy zmniejszać tak, że:  $s_0 \rightarrow s_1 = s_0/2$  itd. (zagęszczanie siatki),
- po trafieniu na anomalię pomiary należy uzupełnić, aby otrzymać pewniejsze krzywe,
- w szczególnych przypadkach wskazane może okazać się wykonanie powtórnych pomiarów podstawowych i zagęszczających w celu eliminacji ewentualnych błędów pomiarowych.

Równie istotne jest dokładne wytyczenie miejsca usytuowania szybu w terenie w przypadku dostępności danych archiwalnych i geodezyjnych, również poprzez zastosowanie lokalizatorów GPS wysokiej dokładności oraz określenie wielkości błędu takiego wytyczenia (metoda geodezyjna, błędy map archiwalnych).

Zaleceniem wynikającym z rezultatów tej pracy jest sugestia przeprowadzenia wstępnej interpretacji pomiarów grawimetrycznych prowadzonych nad szybem już w trakcie ich wykonywania. Realizacja tego postulatu wymaga stosowania programów bieżącej analizy danych, które mogą zostać opracowane przez dalsze wykorzystanie informatyki wspomagającej interpretację pomiarów grawimetrycznych.

Wytyczne te są dodatkowym – istotnym rezultatem pracy, a ich stosowanie może prowadzić do uzyskania korzystniejszych efektów w trakcie prowadzenia analizy odwrotnej.

*Wyniki badań prezentowane w tej publikacji są rezultatem prac badawczych realizowanych przez autora w ramach działalności statutowej GIG (symbol: 11120322-124) w latach 2012-2013.*

### Literatura

1. Balicki A., Kortas Ł., Kotyrba A.: Zmiany regionalnego pola siły ciężkości w północnej części GZW w latach 2002-2003, „Przeгляд Geologiczny” 2005, vol. 53, nr 4, s. 299-305.
2. Dubiński J., Pilecki Z.: Badania geofizyczne w kopalniach, Wydawnictwo IGSM PAN, Kraków 2001, s. 377-404.
3. Fajkiewicz Z.: Zarys geofizyki stosowanej, cz. 2, praca zbiorowa, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, Katowice 1972.
4. Fajkiewicz Z.: Grawimetria poszukiawcza, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1973.
5. Fajkiewicz Z.: Mikrograwimetria górnicza, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
6. Fajkiewicz Z.: Grawimetria stosowana, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
7. Fajkiewicz Z., Ostrowski C.: „Mikrograwimetria – metoda służąca do wykrywania deformacji nieciągłych terenów górniczych „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” 2010, nr 4, s. 10-16.
8. Kortas Ł.: Badania modelowe efektu grawitacyjnego generowanego

- przez wysady solne, w: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych, red. G. Kortas, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008, s. 85-98, 236.
9. *Kortas L.*: Modelowanie efektu grawitacyjnego generowanego przez pustki poeksploatacyjne o zmiennych parametrach, „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 6, s. 9-20.
10. *Kotyba A., Kortas L., Frolik A., Siwek S.*: Zagrożenia zapadliskowe na terenach dawnych podziemnych kopalń węgla brunatnego w rejonie Pily-Młyna (województwo kujawsko-pomorskie), „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 7, s. 58-66.
- 
- 

***Zwiększajmy prenumeratę  
najstarszego – czołowego miesięcznika  
Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!***

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!

# Problemy analizy pokopalnianego obiektu zabytkowego na wpływ wstrząsów górniczych na przykładzie wieży widokowej

## Problems of analysis of the post-mine monumental building on the impact of tremors on the basis of observation tower



Dr inż. Zbigniew Lipski<sup>\*)</sup>



Dr inż. Dawid Mrozek<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule zaprezentowano wybrane problemy związane z dostosowaniem obiektu zabytkowego do nowych obciążeń, niewystępujących wcześniej. Analizie poddano murowaną wieżę widokową z uwzględnieniem różnych obciążeń, w tym dynamicznych, od wstrząsów indukowanych bieżącą eksploatacją złóż węgla. Obecny kształt jest wynikiem dwukrotnej zmiany przeznaczenia obiektu połączony z generalną przebudową. Zaprezentowano sposoby oceny bezpieczeństwa obiektu w warunkach oddziaływań dynamicznych i ograniczonego dostępu do informacji technicznych oraz konsekwencji wyboru różnych metod analizy obiektu.

**Abstract:** This paper presents issues concerning adjustments of the monumental building to the recently occurred loads. A brick lookout tower was analysed. Different loads, including dynamic vibration induced by tremors as the result of current exploitation of coal deposits. The current shape is the result of the twofold change of the destination of the object which is connected with the general reconstruction. Finally, the methods for safety assessment of the object in terms of dynamic interactions and limited access to technical information and consequences of a choice of different methods of analysis object, were presented.

### Słowa kluczowe:

obiekt zabytkowy, wieża murowana, wstrząsy górnicze

### Key words:

monumental building, brick tower, tremors

## 1. Wprowadzenie

Wiele obiektów przemysłowych, w tym kopalnianych, pochodzących z XIX lub początków XX wieku po zaprzestaniu w nich działalności produkcyjnej, decyzją administracji państwowej, przyjmują status obiektów zabytkowych. Swoim istnieniem mają zaświadczać o pracy i osiągnięciach technicznych minionych pokoleń. Współcześnie poszukuje się dla nich nowych użytkowników, czasem właścicieli, którzy pod nadzorem konserwatorskim mają przystosować je do nowej funkcjonalności. Są oni także zobowiązani do remontów i utrzymywania obiektów w dobrym stanie technicznym [4]. Muszą więc zagwarantować bezpieczeństwo użytkowania oraz niezmienną substancję konstrukcyjną, materiałową, a także wystroju architektonicznego i wyrazu estetycznego

obiektów. Obok znalezienia optymalnego sposobu użytkowania oraz źródeł finansowania nowych funkcji, trudnym etapem jest zaplanowanie remontu i przebudowy obiektów zabytkowych. Istotne utrudnienia to [1]:

- wymagania konserwatorskie, ograniczające ingerencję w materiałną substancję obiektów,
- brak dokumentacji technicznej, zwłaszcza materiałowej,
- brak możliwości przeprowadzenia badań laboratoryjnych materiałów konstrukcyjnych w celu dokładnego określenia ich parametrów mechanicznych, istotnych w procesie wymiarowania lub sprawdzania stanów granicznych obiektów z powodu zakazu znacznie większej ingerencji w konstrukcję w celu pozyskania próbek materiałowych.

Problemy te dotyczą, może nawet szczególnie, obiektów pokopalnianych, które ze względu na wielowiekowe tradycje górnicze, pieczołowicie kultywowane w rejonie GOP i ROW, są otaczane estymą skłaniającą do zachowania możliwie

<sup>\*)</sup> Politechnika Śląska, Gliwice

licznych obiektów kopalń już nieistniejących. W artykule skupiono się na wybranych problemach związanych z dostosowaniem obiektu zabytkowego do nowych obciążeń, niewystępujących wcześniej. Analizowano wpływ różnych obciążeń, w tym dynamicznych, od wstrząsów indukowanych bieżącą eksploatacją złóż węgla na murowaną wieżę widokową, zlokalizowaną w Rybniku - Niewiadomiu na terenie byłej kopalni węgla kamiennego „Ignacy”. Obecny kształt jest po dwukrotnej zmianie przeznaczenia obiektu, połączonej z generalną przebudową.

Pierwotnie trzon wieży był częścią komina przemysłowego wybudowanego w latach osiemdziesiątych XIX wieku, który miał wysokość ok. 75 m. Istnieje więc około 130 lat. Od 1952 roku trzon komina o wysokości tylko 35.3 m nad poziomem terenu stanowił konstrukcję wsporczą zbiornika wody pitnej wykorzystywanej na obszarze Rybnika i okolic o pojemności 300 m<sup>3</sup>. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku zaprzestano jego eksploatacji i po zmianie statusu obiektu na zabytek postindustrialny przebudowano go na wieżę widokową. Na jej przykładzie przedstawiono sposoby oceny bezpieczeństwa obiektu w warunkach oddziaływań dynamicznych i ograniczonego dostępu do informacji technicznych oraz konsekwencji wyboru różnych metod analizy dynamicznej.

## 2. Charakterystyka obiektu

Wieża widokowa ma murowaną konstrukcję nośną stanowiącą stożek ścięty o słabej zbieżności, osadzony na rotundzie stanowiącej kondygnację piwniczną. Nie jest znana konstrukcja fundamentu obiektu. Średnica zewnętrzna trzonu na poziomie gruntu wynosi 6.22 m i 5.92 m nad kondygnacją piwniczną. W koronie wieża ma średnicę 4.60 m. Grubość ścian wynosi od 0.77 do 1.16 m. Na poziomie 34.57 m znajduje się wieniec żelbetowy o wysokości 0.7 m. Stanowił on podstawę zbiornika wody, który miał część walcową o średnicy 8.0 m i wysokości 3.82 m. Część dolną stanowi stożek ścięty o wysokości 1.97 m i średnicy 4.6 m u dołu. Grubość blach konstrukcyjnych zbiornika wynosi od 6 do 11 mm. W górnej części zbiornika wodnego jest pomost widokowy oraz konstrukcja wsporcza dachu wieży. Na zewnątrz pomost i zbiornik osłonięto lekką ścianą na stalowej konstrukcji nośnej. Konstrukcję nośną dachu stanowi szkielet stalowy z pokryciem blachą miedzianą na deskowaniu. W wieży znajdują się schody wachlarzowe. W czasie remontu i przystosowania obiektu do celów turystycznych w trzonie wieży usunięto uszkodzone fragmenty muru, uzupełniono je ceglami o zbliżonym wyglądzie i wieku. Elewację oczyszczono, spoiny wypełniono masą renowacyjną i zaimpregnowano, tak więc obecny stan techniczny obiektu jest dobry.

## 3. Zakres obliczeń numerycznych

W artykule uwagę skupiono na następujących zagadnieniach dotyczących wieży widokowej:

- oszacowaniu kresu górnego nośności konstrukcji w warunkach braku danych o własnościach mechanicznych, a w szczególności wytrzymałości muru w pełnym jego przekroju,
- ocenie odporności na wpływ wstrząsów górniczych z uwzględnieniem wszystkich obciążeń działających na obiekt,
- konsekwencji prowadzenia wariantowej analizy dynamicznej dwiema metodami spektrum odpowiedzi (*RSA*) i historii obciążenia (*THA*), tj. dokonano porównania ich wiarygodności z punktu widzenia wspomnianej oceny odporności obiektu.

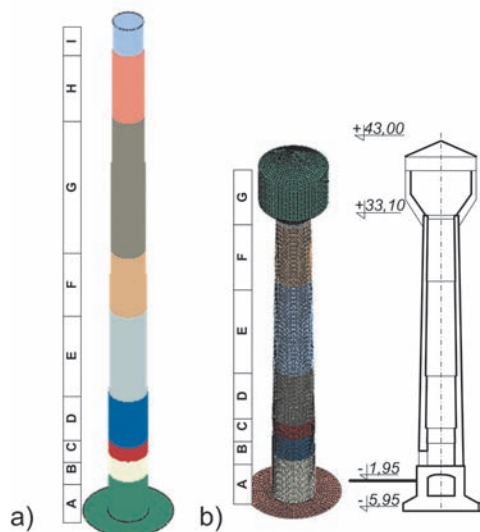
Z okresu remontu nie zachowano żadnych fragmentów materiału konstrukcyjnego wieży, które mogłyby stanowić podstawę laboratoryjnego określenia rzeczywistych parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych muru konstrukcji nośnej obiektu, a w szczególności materiału konstrukcyjnego wewnątrz muru. Obecnie wykonanie odkrywek lub odwiertów w trzonie wiązałoby się z uszkodzeniami obiektu, na co nie było przyzwolenia. Również stan techniczny fundamentu wieży, a zwłaszcza jego materiału konstrukcyjnego, nie był znany. Parametry wytrzymałościowe materiału konstrukcyjnego są jednak niezbędne, ponieważ determinują odporność obiektu na wszystkie obciążenia i wpływy, jakim będzie on poddany. W związku z tym przyjęto niekonwencjonalny sposób analizy nośności, a więc i odporności wieży. Dostępne informacje pozwalają wiarygodnie odtworzyć gabaryty i konstrukcję pierwotnego komina i wieży wodnej ze zbiornikiem na wodę pitną. Można także z wysokim prawdopodobieństwem określić wartości obciążeń działających w czasie eksploatacji tych dwóch obiektów. Uwzględniając obciążenia od ciężaru własnego, użytkowe i parcie wiatru tych konstrukcji obliczono ekstremalny stan naprężeń statycznych przez nie wywołanych. Na podstawie wyteżenia konstrukcji nośnej obu obiektów oszacowano obecną wytrzymałość muru trzonu wieży na ściskanie i zginanie. Uwzględniono przy tym upływ czasu od przebudowy komina i wieży wodnej. Podkreślenia wymaga fakt, że oszacowano przede wszystkim wytrzymałość muru na rozciąganie przy zginaniu, która stanowi niewrażliwy parametr w analizie oddziaływań wieży od wstrząsów górniczych, ponieważ zazwyczaj jej wartość decyduje o odporności dynamicznej (zarysowanie [2]) konstrukcji murowych.

Oszacowanie odporności dynamicznej wieży widokowej na wpływ wstrząsów górniczych przeprowadzono dwiema metodami. Pierwsza z nich, tj. metoda spektrum odpowiedzi (*RSA*), polega na oszacowaniu maksymalnych sił dynamicznych działających na masę obiektu z wykorzystaniem tzw. transformacji własnej odpowiedzi dynamicznej obiektu i jej rozkładzie na składowe względem postaci modalnych. Ma charakter inżynierski, przybliżony, bo obciążenia dynamiczne od wstrząsów górniczych są w niej charakteryzowane przez maksymalną wartość przyspieszenia, z którym wstrząs oddziałuje na obiekt i spektrum odpowiedzi zawierające najważniejsze informacje o dynamicznych własnościach obciążenia. Druga z nich, czyli metoda historii obciążenia (*THA*) polega na bezpośrednim numerycznym całkowaniu różniczkowych równań ruchu obiektu. W tym procesie całkowania wykorzystuje się powszechnie sposób Newmarka, który zapewnia obliczeniom stabilność, zbieżność i dokładność na zadanym poziomie. Jako obciążenia wykorzystuje się przebiegi w czasie rzeczywistych przyspieszeń powierzchni ziemi generowane przez wstrząsy górnicze i zarejestrowane w stacjach pomiarowych. Sygnały te wiernie charakteryzują własności dynamiczne obciążeń generowanych przez wstrząsy górnicze. Wynikami obliczeń mogą być pola chwilowych, ekstremalnych, dynamicznych lub całkowitych składowych tensora naprężeń w obiekcie. Metoda *THA* ma charakter naukowy, dokładny.

## 4. Model obiektu i jego obciążenia

Analizowanym obiektem jest zasadniczo wieża widokowa, a komin i wieża wodna stanowią obiekty odniesienia. W związku z tym modele numeryczne tych trzech obiektów są z sobą związane (rys. 1). W tabelicy 1 zestawiono wymiary wieży widokowej z podziałem na segmenty oraz masami dodatkowymi skorygowane w trakcie oględzin. Masy te (drugorzędne) wynikają z istnienia pomostu widokowego,

konstrukcji nośnej dachu z pokryciem i rozmieszczone są w górnej części głowicy wieży. W trzonie wieży pomiędzy poziomami  $\pm 0.00$  m a  $+33.32$  m uwzględniono masy elementów klatki schodowej o intensywności  $413$  kg/mb, które równomiernie rozłożono wzdłuż wysokości.



Opracowanie własne.  
Own elaboration

Rys. 1. Widok i numeryczne modele z podziałem na segmenty: a) komina, b) wieży widokowej (wodnej)

Fig. 1. View and numerical models with section division for: a) chimney, b) observation tower (water)

W modelach wszystkich obiektów uwzględniono uwarstwione podłoże gruntowe o modułach odkształcenia pierwotnego w granicach  $25 - 80$  MPa [3]. Poniżej podano najważniejsze informacje o obciążeniach działających na

modele obiektów, które przyjęto wg stosownych norm, nie cytując szczegółów obliczeń ich wartości. W obliczeniach dynamicznych wieży widokowej uwzględniono: ciężar zbiornika na wodę w rzeczywistym rozkładzie przestrzennym, ciężar pomostu widokowego rozłożono wzdłuż górnej krawędzi zbiornika o intensywności  $2.05$  kN/mb, ciężary konstrukcji nośnej i pokrycia dachu o intensywność  $0.41$  kN/m<sup>2</sup>, które rozłożono równomiernie na jego powierzchni, ciężary konstrukcji nośnej i pokrycia ścian osłonowych rozłożono równomiernie na powierzchni ścian bocznych zbiornika na wodę o intensywności  $0.98$  kN/m<sup>2</sup>. Przyjęto charakterystyczne obciążenie użytkowe pomostu widokowego  $3.0$  kN/m<sup>2</sup>.

Obciążenie wiatrem obliczono w sposób przewidziany przez PN-EN. Wartości sił działających na segmenty trzonu zestawiono w tabelicy 2.

Obecnie wieża widokowa wychylona jest o  $0.251$  m na poziomie  $31.8$  m n.p.t. w kierunku określonym azymutem ok.  $330^\circ$ . Obliczono obciążenie obiektu momentami skupionymi na poszczególnych poziomach (segmentach) w wyniku mimośrodowego działania ciężaru względem osi obiektu. Uwzględniono także prognozowane wychylenie wieży wywołane podziemną eksploatacją górnictwem  $T_{\text{prog}} = 2.7$  mm/m. Przyjęto niekorzystny przypadek, w którym wektory obu wychyleń wieży sumują się. Obciążenie zestawiono w tabelicy 2. Pozostałe wartości parametrów prognozowanych wpływów górnictwowych oddziałujących na analizowany obiekt nie przekroczyły kategorii pierwszej, w związku z tym pominięto je.

Wartość obciążenia dachu wieży śniegiem obliczono zgodnie z PN-EN dla II strefy i jego obliczeniowa wartość wynosi  $s_d = 0.864$  kN/m<sup>2</sup>.

Obciążenia różnego pochodzenia grupowano z zastosowaniem stosownych kombinacji obciążeń [5], tworząc sytuacje obliczeniowe uzasadnione zakresem analizy wieży widokowej i komina. W przypadku wieży widokowej przyjęto dwa zestawy obciążeń:

- kombinacja podstawowa uwzględniająca ciężar własny konstrukcji nośnej i elementów drugorzędnych, obecne wychylenie wieży, prognozowane wychylenie wieży, ob-

Tablica 1. Zestawienie geometrii wieży widokowej w zależności od analizowanego segmentu

Table 1. Summary of observation tower geometry depending on the analysed section

Oznaczenie segmentu [-]	A	B	C	D	E	F	Głowica		
Górne rzędne, m	$\pm 0.00$	$+3.00$	$+5.00$	$+11.90$	$+24.40$	$+33.10$	$+43.00$		
Średnia grubość, m	1.31	1.16	1.04	0.91	0.76	0.60	0.01		
Średnica wewnętrzna, m	3.58	3.58	3.82	3.78	3.68	3.50	8.00		
Zbieżność, cm/m	0.0	0.0	0.0	5.8	4.0	2.3	0.0		
Masa dodatkowa, kg/m	413						2924	2576	1148

Opracowanie własne.  
Own elaboration

Tablica 2. Zestawienie obciążenia wiatrem i od wychylenia obiektu w zależności od analizowanego segmentu

Table 2. Summary of wind and object deflection load depending on the analysed section

Oznaczenie segmentu	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Wysokość trzonu, m	5.95	3.00	2.00	6.90	12.50	8.70	20.00	10.00	10.00
Obciążenie wiatrem, kN/m <sup>2</sup>	0.071	0.158	0.205	0.330	0.501	0.596	0.715	0.760	0.800
Obciążenie od wychylenia, rzeczywiste, kNm	25.39	31.44	65.81	238.22	404.02	230.39	60.60	-	-
Obciążenie od wychylenia, prognoza, kNm	8.68	10.75	22.50	81.44	138.12	78.76	20.72	-	-

Opracowanie własne.  
Own elaboration

ciężenie od parcia wiatru i śniegu, obciążenie użytkowe pomostu widokowego wieży,

- kombinacja wyjątkowa, w której były obciążenia związane z wpływem wstrząsów górniczych oraz pozostałe obciążenia z wyjątkiem parcia wiatru.

W analizie komina przyjęto kombinację podstawową obciążeń, tj.: ciężar własny konstrukcji nośnej i elementów drugorzędnych oraz parcie wiatru. W odniesieniu do modelu wieży wodnej przyjęto kombinację podstawową obciążeń, w której uwzględniono ciężar własny konstrukcji nośnej i elementów drugorzędnych, ciężar wody w zbiorniku, obciążenia od wiatru i śniegu.

W obliczeniach dynamicznych metodą historii obciążenia (THA) wykorzystano akcelerogramy zarejestrowane za pomocą aparatury pomiarowej rozlokowanej w różnych rejonach Rydułtów, w tym w sąsiedztwie obiektów zabytkowej kopalni „Ignacy”, udostępnione przez KWK „Rydułtowy – Anna”. Spośród ok. 680 wstrząsów, które wystąpiły w latach 2006 – 2011 wytypowano kilka zdarzeń o najwyższych energiach sejsmicznych w granicach  $9 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$  J. Odpowiadały im obciążenia dynamiczne wieży w postaci poziomych, ortogonalnych składowych przyspieszeń drgań gruntu. Szczytowe wartości składowych przyspieszenia wynosiły maksymalnie 1.00 i 1.47  $m/s^2$ . Uzupełniono je kilkoma wstrząsami zarejestrowanymi w punkcie pomiarowym zainstalowanym w pobliżu wieży widokowej o szczytowych przyspieszeniach składowych poziomych nieprzekraczających 0.11 i 0.22  $mm/s^2$ .

5. Wyniki analizy numerycznej obiektu

Obliczenia oddziaływania wstrząsów górniczych na wieżę widokową wykonano z wykorzystaniem spektrum odpowiedzi zaczerpniętym z [4] i maksymalną wartością przyspieszenia poziomego  $a_{max} = 0.5 m/s^2$  oraz stosując rzeczywiste akcelerogramy po przeskalowaniu ich szczytowych wartości przyspieszenia składowej poziomej do wartości  $a_{max} = 0.8 m/s^2$ . Kolejne wartości częstotliwości drgań własnych wieży widokowej wynoszą 1.15; 5.35; 8.85; 15.0 i 25.5 Hz, którym odpowiadają typowe współnikowe postacie modalne.

Wyniki analiz numerycznych obu obiektów odniesienia oraz wieży widokowej w postaci ekstremalnych wartości naprężeń całkowitych zestawiono w tabelicy 3. Pokazano także przykładowe mapy normalnych naprężeń głównych zawierające ich wartości ekstremalne. Przyjęto, że znak (+) oznacza rozciąganie i (-) ściskanie.

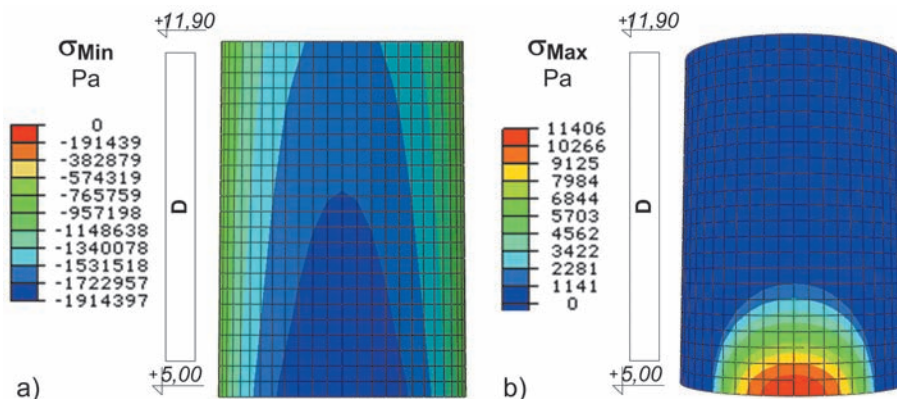
W kominie i wieży wodnej ekstremalne normalne pionowe lub poziome naprężenia główne, wywołane przez jednoczesne działanie obciążeń od ciężaru własnego i parcia/ssania wiatru, wystąpiły w segmencie D, tj. pomiędzy poziomami 5÷12 m. Przykładową mapę pokazano na rysunku 2.

W wieży widokowej ekstremalne normalne naprężenia główne o kierunkach pionowym i poziomym wywołane przez jednoczesne działanie obciążeń statycznych i dynamicznych, generowanych przez wstrząsy górnicze wystąpiły także w segmencie D. Stosowne mapy naprężeń obliczonych oboma zastosowanymi metodami pokazano na rysunku 3.

Tablica 3. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w analizowanych obiektach  
Table 3. Summary of extreme values of stresses in the analysed objects

l.p.	Obiekt	Obciążenia, kN	Naprężenia ekstremalne, kPa			
			pionowe		poziome	
1	Komin	ciężar wł. i wiatr	-1 914	+11	-24	+584
2	Wieża wodna	ciężar wł., pełny zbiornik, wiatr i śnieg	-1 058	brak	-12	+13
3	Wieża widokowa	obc. statyczne i użytkowe	-1 247	brak	-179	+11
4	Wieża widokowa	obc. statyczne i dynamiczne $a_{max} = 0,5 m/s^2$ (met. spektrum odpowiedzi)	-1 118	+70	-160	+18
5	Wieża widokowa	obc. statyczne i dynamiczne $a_{max} = 0,8 m/s^2$ (met. historii obciążenia)	-1 065	+72	-152	+5

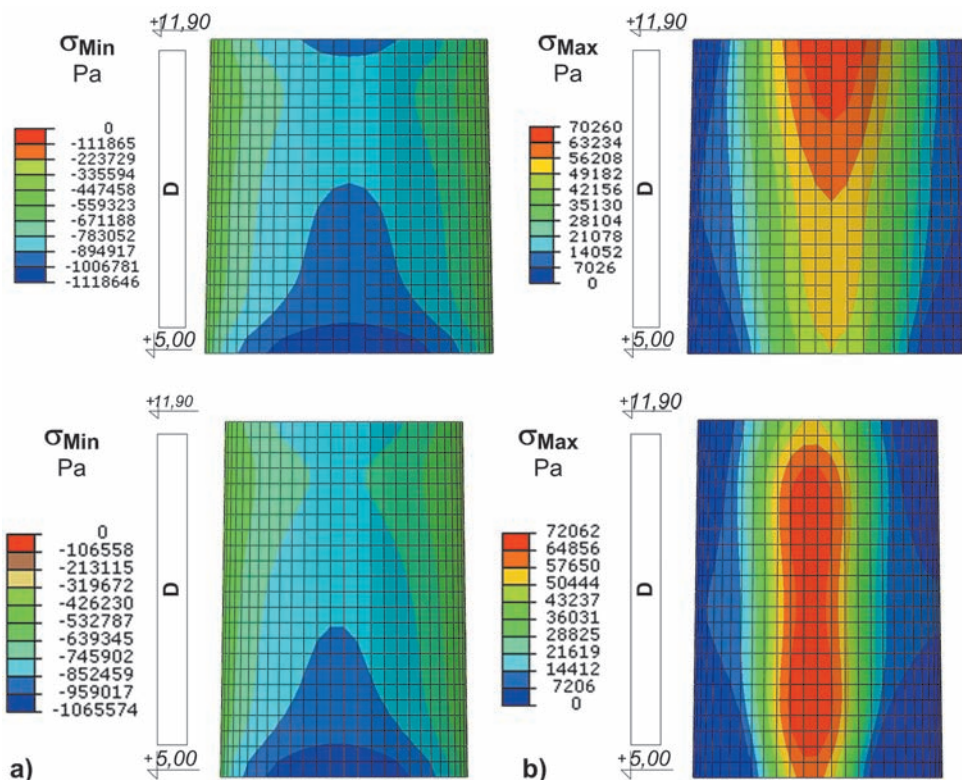
Opracowanie własne.  
Own elaboration



Opracowanie własne.  
Own elaboration

Rys. 2. Mapa normalnych pionowych naprężeń głównych w modelu komina o wartościach: a) minimalnych, b) maksymalnych

Fig. 2. Map of normal vertical principal stresses in the chimney model with values: a) minimal, b) maximal



Opracowanie własne.  
Own elaboration

Rys. 3. Mapy wartości pionowych naprężeń głównych w modelu wieży widokowej wywołane obciążeniem statycznym i oddziaływaniem od wstrząsów górniczych: wg metody spektrum odpowiedzi (góra), metodą historii obciążenia (dół), a) minimalnych, b) maksymalnych  
Fig. 3. Maps of vertical principal stresses in observation tower model caused by static load and impacts of mining tremors: according to response spectrum method (above) time history analysis (below), a) minimal, b) maximal

Na podstawie stanu naprężeń normalnych pionowych i poziomych wywołanych w kominie i wieży wodnej przez ich obciążenia, oszacowano wytrzymałości charakterystyczne muru trzonu wieży na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu prostopadle do spoin wspornych. Na tej podstawie dokonano oceny klasy zaprawy muru, ponieważ ona warunkuje wytrzymałość muru przy zginaniu przez spoiny, tj. w płaszczyźnie pionowej. Jest to bowiem parametr nieważniczy oceny odporności wieży widokowej na działanie wstrząsów górniczych. Po uwzględnieniu, że komin istniał ponad pięćdziesiąt lat temu i materiał konstrukcyjny ulegał przez ten czas stopniowej degradacji, zwłaszcza na powierzchni, i uwzględnieniu, że analiza dotyczy sytuacji wyjątkowej, oszacowano tę wytrzymałość muru. Jej obliczeniowa wartość ustalona została na co najmniej  $f_{xdl} = 77$  kPa.

Na podstawie danych z tabeli 3 stwierdzono, że w trzonie wieży widokowej maksymalne naprężenia normalne spełniają warunki stanu granicznego nośności, w odniesieniu do analizowanych kombinacji obciążeń statycznych i dynamicznych, tj. z uwzględnieniem oddziaływania wstrząsów górniczych. Oszacowano jej odporność na to oddziaływanie parasejsmiczne, wyrażone za pomocą maksymalnego przyspieszenia poziomego:

- na podstawie spektrum odpowiedzi  $a_{max} = 0.5$  m/s<sup>2</sup>,
- na podstawie rzeczywistych akceleroqramów  $a_{max} = 0.8$  m/s<sup>2</sup>.

## 5. Podsumowanie

Wyniki uzyskane w trakcie analiz numerycznych wieży widokowej i obiektów historycznie ją poprzedzających pozwalają na sformułowanie wniosków, także natury ogólniejszej.

Podkreślenia wymaga prosta z pozoru konstatacja, lecz o daleko idących konsekwencjach – w trakcie remontów zabytkowych obiektów powinny być przeprowadzone oceny parametrów mechanicznych, w tym szczególnie wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych. Najlepiej wykonać to laboratoryjnie na próbkach materiałów pobranych z obiektu. W uzasadnionych sytuacjach mogą być także zastosowane metody nieniszczące. Rzeczywiste wartości parametrów powinny być podstawą oceny bezpieczeństwa obiektu zabytkowego po zmianie jego pierwotnej – przemysłowej funkcji i co równie ważne, będą wykorzystane w razie kolejnych zmian, przebudów lub konieczności sprawdzenia nowo pojawiających się oddziaływań.

W sytuacji braku niezbędnych informacji konstrukcyjnych o obiekcie możliwe jest zwykle oszacowanie jego nośności, stateczności lub odporności z uwzględnieniem historii jego użytkowania, w której powinny się znaleźć ekstremalne sytuacje eksploatacyjne o możliwych do oszacowania obciążeniach. Po przeprowadzeniu analiz numerycznych ich wpływu na konstrukcję nośną obiektu możliwe staje się oszacowanie realnych wartości parametrów mechanicznych materiału konstrukcyjnego.



Stwierdzono także, że oszacowanie odporności obiektu na oddziaływanie wstrząsów górniczych zależy wyraźnie od zastosowanych danych wejściowych do analizy. Wykorzystanie standardowego spektrum odpowiedzi opracowanego dla rejonu, w którym zlokalizowano wieżę, zaniża ocenę, w porównaniu z analizą dynamiczną wykorzystującą zarejestrowane w naturze przebiegi przyspieszeń na powierzchni ziemi. Odporność ta wyrażona maksymalnym przyspieszeniem poziomym podłoża gruntowego wieży wynosi  $0.5 \text{ m/s}^2$  w pierwszym przypadku i  $0.8 \text{ m/s}^2$  w drugim.

Jak się wydaje, przyczyna tego stanu rzeczy tkwi w tym, że w metodzie historii obciążeń następuje wykorzystanie rezerw zawartych we wzajemnych relacjach widma własnego obiektu i ewoluujących własności widmowych obciążeń dynamicznych. Krótki czas trwania segmentów tych akcelerogramów, odpowiedzialnych za ekstremum odpowiedzi dynamicznej obiektu i wyraźna ewolucja ich widma amplitudowego powodują, że ta odpowiedź uzyskuje ograniczony poziom intensywności. Czynnikiem tych nie ujmuje w pełni metoda spektrum (RSA). Zalecić można więc przeprowadzanie oceny odporności obiektów zabytkowych na wstrząsy górnicze za pomocą metody historii odpowiedzi, pod warunkiem, że dostępne są akcelerogramy od wstrząsów górniczych zarejestrowane w rejonie lokalizacji obiektu.

*Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie*

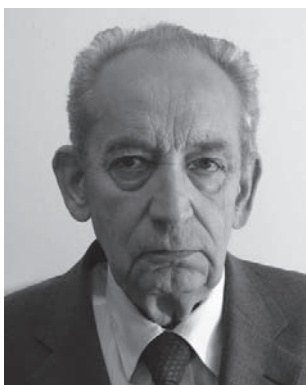
*przyznanych grantów obliczeniowych nr MNiSW/Sun6800/PŚląska/083/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/083/2007, a także MNiSW/Sun6800/PŚląska/084/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/084/2007.*

## Literatura

1. Cholewicki A., Kawulok M., Lipski Z., Szulc J.: Zasady ustalania obciążeń i sprawdzania stanów granicznych budynków lokalizowanych na terenach górniczych w nawiązaniu do Eurokodów. Seria „Projektowanie według Eurokodów”. Wyd. 1. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2012.
2. Czerwionka L., Tatara T.: Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW. „Czasopismo Techniczne” 2007, z. 2 – B, s. 11-18.
3. Fedorowicz J., Fedorowicz L.: Obroty fundamentów posadowionych na poziomo deformującym się podłożu górniczym. „Przegląd Górniczy” 1992, nr 8, s. 23-25.
4. Ostręga A.: Prawne uwarunkowania ochrony dziedzictwa górniczego w procesie likwidacji, rekultywacji i rewitalizacji. „Przegląd Górniczy” 2012, nr 12, s. 52-61.
5. Pietrzyk-Sokulska E.: Rewitalizacja terenów przemysłowych – problemy. „Przegląd Górniczy” 2012, nr 3, s. 38-44.
6. Tatara T., Pachla F.: Uszkodzenia w obiektach budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. „Przegląd Górniczy” 2012, nr 7, s. 1-10.

# Koncepcja kształtowania rozkładu potencjału aerodynamicznego w podziemnych kopalniach węgla kamiennego dla przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym i gazowym związanym ze zmianami ciśnienia atmosferycznego

## Concept of aerodynamic potential's distribution structuring in underground hard coal mines to counteract the fire and gas threats associated with changes of atmospheric pressure



*Dr inż. Piotr Markefka\**



*Mgr inż. Arnold Przystolik\**



*Mgr inż. Tadeusz Stefanowicz\**

**Treść:** W polskich kopalniach węgla kamiennego obserwuje się wzrost zagrożeń pożarowych i gazowych od zrobów wywołanych zmianami ciśnienia atmosferycznego, czyli zagrożeń związanych ze zjawiskiem tzw. oddychania zrobów. Jest to w głównej mierze konsekwencja lokalizacji robót górniczych przygotowawczych i eksploatacyjnych, prowadzonych z konieczności coraz częściej w sąsiedztwie dużych przestrzeni zrobowych. Stosowane dotychczas sposoby i środki dla przeciwdziałania niepożądanym skutkom zagrożeniowym tego zjawiska, nie są w pełni wystarczające i racjonalne. Wymusza to poszukiwanie i stosowanie bardziej efektywnych rozwiązań prewencyjnych w tym zakresie. W artykule przedstawiono wiele dodatkowych, praktycznych możliwości eliminowania lub łagodzenia wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na przestrzenie zrobowe, poprzez dokonywanie odpowiednich zmian w rozkładzie potencjału aerodynamicznego wokół danej przestrzeni. Takie racjonalne działania – koncepcja kształtowania rozkładu potencjału aerodynamicznego dla przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym i gazowym związanym z „oddychaniem zrobów” – zostały zrealizowane z pozytywnym skutkiem w kilku kopalniach KHW S.A. Wobec nasilania się zagrożeń aerologicznych związanych ze zmianami ciśnienia atmosferycznego, celowe wydaje się dążenie do szerszego stosowania tej koncepcji w polskich kopalniach węgla kamiennego.

**Abstract:** In the Polish hard coal mines one observes an increase of fire and gas hazards from post-mining cavities triggered by changes of atmospheric pressure. i.e. threats associated with phenomenon of so called cavities' respiration. To a large extent it is a consequence of location of mining preparation works and extraction works, in principal by necessity, more often, in the vicinity of large cavity spaces. The methods and means of counteracting undesirable dangerous effects of that phenomenon applied so far are not fully sufficient and rational. That impels seeking and applying more efficient preventive solutions in that respect. This paper presents a number of additional practical possibilities of either eliminating or mitigating the atmospheric pressure alterations' influence on cavity spaces by implementing appropriate modifications in aerodynamic potential distribution around the space given. Such rational actions - the concept of aerodynamic potential distribution's structuring to counteract the fire and gas threats associated with "cavities respiration" – have been successfully executed in several coal mines of KHW S.A. Having considered the intensification of aerologic dangers associated with changes of atmospheric pressure, the efforts to apply this concept in Polish hard coal mines seem reasonable.

### **Słowa kluczowe:**

*wentylacja główna, zmiany ciśnienia atmosferycznego, przeciwdziałanie zagrożeniom pożarowym i gazowym od zrobów*

### **Key words:**

*main ventilation, changes of atmospheric pressure, counteracting the fire and gas threats from the cavities*

\*) Ośrodek Badawczo-Usługowy Wentylacji przy KHW S.A. KWK „Wujek”, Katowice

## 1. Wprowadzenie

Można przypuszczać, że od zarania górnictwa podziemnego znany był niekorzystny wpływ zmian ciśnienia atmosferycznego, a zwłaszcza zniżek tego ciśnienia, na bezpieczeństwo pracy załóg dołowych. Ta też wiedza była powodem wymagań także polskich przepisów górniczych [1], [2], by na powierzchni kopalni w miejscu dostępnym dla załogi umieszczony był barograf [1], przy czym wymaganie to uściślono w [2], żądając, by na nadszybiu szybu zjazdowego instalowane było urządzenie sygnalizujące czerwonym światłem zniżkę ciśnienia barometrycznego. Ustalono ponadto, że w pomieszczeniach dyspozytora ruchu zakładu górniczego, kierownika działu wentylacji oraz kierownika kopalnianej stacji ratownictwa górniczego powinien znajdować się barograf.

W publikacjach, m.in. w [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] i [10] zwrócono uwagę nie tylko na zagrożenie załogi i ruchu związane z wypływem gazów zrobowych (w tym metanu lub gazów pożarowych) do czynnych wyrobisk górniczych podczas zniżek barycznych, lecz także na niebezpieczeństwo rozpoczęcia procesu samozagrzewania węgla oraz powstania lub reaktywacji pożaru w zrobach podczas dopływu powietrza do nich w czasie zwyżek ciśnienia barometrycznego. Zjawisko to jest niezwykle groźne, gdyż jego skutki niejednokrotnie objawiają się dopiero podczas kolejnej zniżki tego ciśnienia, kiedy to zastosowanie środków prewencji pożarów endogenicznych może być już niewystarczające. Dlatego też celowe jest dążenie do wyeliminowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na migrację gazów przez zroby lub płyty węglowe, łączące czynne wyrobiska z otamowanymi, na ogół większymi już obecnie przestrzeniami zrobowymi, w których sąsiedztwie są coraz częściej prowadzone roboty górnicze (przygotowawcze i eksploatacyjne).

W tym celu H. Bystron [5] opracował koncepcję utrzymania stałego ciśnienia w wyrobiskach górniczych. W ogólności koncepcja ta polega na stosowaniu wentylatora głównego o dużym zakresie regulacji (zabudowanego przy szybie wydechowym), współpracującego z tamą regulacyjną zainstalowaną w prądzie całkowitym powietrza świeżego. Założono, że opór aerodynamiczny tej tamy i spiętrzenie wentylatora głównego w zależności od zmian ciśnienia atmosferycznego powinny być tak regulowane, by ciśnienie powietrza kopalnianego nie ulegało zmianie. Możliwość realizacji tej koncepcji w skali laboratoryjnej wykazali H. Bystron i A. Raczyński [7]. Jednak zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych koncepcja H. Bystrona nie znalazła zastosowania dla sieci wentylacyjnych całych kopalń.

W praktyce polskich kopalń węgla kamiennego niejednokrotnie dążono także do wyeliminowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na zroby lub pola pożarowe, stosując tzw. komory wyrównawcze [8]. Przy znacznych jednak zmianach tego ciśnienia, ale również wobec istnienia zwykle skomplikowanych połączeń otamowanych przestrzeni z czynnymi wyrobiskami (w tym również połączeń szczelinowych), za pomocą komór wyrównawczych, na ogół nie można osiągnąć całkowitego wyeliminowania wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na tzw. oddychanie zrobów [9].

W latach dziewięćdziesiątych opracowano inną koncepcję sposobu eliminowania wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na zagrożenia aerologiczne w podziemnych kopalniach węgla, która bazuje na odpowiedniej regulacji wewnętrznego źródła gazu (azotu, dwutlenku węgla, metanu) lub wody [9]. Koncepcja ta została zrealizowana z pozytywnym skutkiem w wielu kopalniach, w tym m.in. w byłych kopalniach „Mysłowice”, „Wesoła”, „Śląsk” oraz w kopalniach „Pniówek” i „Budryk”. Zastosowanie tego sposobu choć zawsze możliwe, w niektórych przypadkach wymaga wykonania instalacji dla

doprowadzania gazu inertnego do przestrzeni otamowanej i może wówczas okazać się nieracjonalne technicznie i/lub ekonomicznie.

W publikacji przedstawiono sposób eliminowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na przestrzenie otamowane lub łagodzenia niekorzystnych skutków tych zmian, a to poprzez dokonywanie odpowiednich zmian rozkładu spadków potencjału aerodynamicznego wokół danej przestrzeni, wywołujących pożądane zmiany ciśnienia powietrza kopalnianego w określonej części sieci wentylacyjnej. Wskazano również na możliwości skutecznego wyeliminowania zagrożeń wentylacyjno-pożarowych wywołanych zmianami ciśnienia atmosferycznego, przez celowe zmiany oporu aerodynamicznego wybranych połączeń zrobowych z czynnymi wyrobiskami górniczymi. Podano także przykłady z kopalń, w których zastosowano opisaną tu koncepcję.

## 2. Opis oddziaływania zmian ciśnienia atmosferycznego na migrację gazów przez przestrzenie otamowane

Dla wyjaśnienia wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na migrację gazów przez przestrzenie otamowane zajmijmy się najpierw wyrobiskiem otamowanym jedną tamą izolacyjną. Zmiany tego ciśnienia wpływają na ciśnienie gazów wewnątrz otamowanej przestrzeni, przy czym po dostatecznie długim czasie trwania takiej zmiany, ciśnienia za tamą (wewnątrz tej przestrzeni) i na zewnątrz tamy izolacyjnej stają się równe.

Zmiany ciśnienia atmosferycznego nie następują skokowo, lecz są rozłożone w czasie. Szybkość zaś wyrównania się ciśnienia gazów wewnątrz przestrzeni otamowanej i na zewnątrz niej zależy od wielu czynników, w tym od dynamiki wymienionych zmian, szczelności tamy izolacyjnej i samego masywu skalnego w jej otoczeniu oraz od objętości tejże przestrzeni. Jeśli jednak założymy, że zmiana ciśnienia nastąpiła skokowo o  $\pm \Delta p_0$ , to można przyjąć, że wyrównanie się ciśnień w czasie  $\tau$  wewnątrz i na zewnątrz przestrzeni otamowanej (w wyrobisku), przebiega według krzywej wykładniczej

$$\Delta p(\tau) = \pm \Delta p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_1 \cdot V_1}\right) \quad (1)$$

Wykładnik potęgowy tej krzywej ma wartość ujemną, przy czym jego bezwzględna wartość wzrasta wraz z upływem czasu  $\tau$ , a maleje przy wzroście oporu  $R_1$  izolacji (otamowania) i objętości  $V_1$  przestrzeni izolowanej. Toteż przy większym oporze otamowania tej przestrzeni i jej objętości mniejsza jest szybkość wyrównania się ciśnień między czynnym oraz otamowanym wyrobiskiem.

Zmniejszenie szybkości wyrównania ciśnień wraz ze wzrostem objętości otamowanej przestrzeni nie oznacza jednak równoczesnego zmniejszenia objętości strumienia gazu wnikałego lub wypływającego z tej przestrzeni wskutek zmiany ciśnienia atmosferycznego. Wręcz przeciwnie, utrzymywanie przez dłuższy czas odpowiednio dużej różnicy między ciśnieniem zewnętrznym (w czynnym wyrobisku) i ciśnieniem wewnątrz otamowanej przestrzeni, powoduje przez ten dłuższy czas wypływ (lub dopływ) w przybliżeniu jednakowej, znacznej objętości gazu (powietrza)  $\dot{V}_{T1}$ . Staje się to oczywiste, jeśli wymienioną różnicę ciśnień  $\Delta p$  potraktujemy jak zdysypowaną energię  $l_f$  ( $\Delta p \approx l_f = R_{T1} \cdot \dot{V}_{T1}$  – co jest uzasadnione w przypadku tamy izolacyjnej). Nadmienić jednak należy, że w rozpatrywanym przypadku istotne spowolnienie wymiany gazu między przestrzenią otamowaną a wyrobiskiem można uzyskać przez odpowiednie zwiększenie oporu  $R_{T1}$ , tzn. szczelności tamy izolacyjnej i jej sąsiedztwa. W razie potrzeby ten sposób jest najczęściej realizowany w praktyce górniczej.

Sytuacja wyrobiska otamowanego jedną tylko tamą (tzw. ślepego wyrobiska) może być punktem wyjścia dla rozpatrywania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na migrację gazów przez przestrzeń otamowaną w ogólności. W ustalonym bowiem stanie sieci wentylacyjnej kierunek przepływu powietrza wyrobiskiem górniczym (boczną siecią) lub migracja gazów przez przestrzeń zamkniętą (zroby, pola pożarowe) lub szczeliny, zdeterminowane są rozkładem potencjału aerodynamicznego  $\Phi_v$  w tej sieci i we wspomnianych przestrzeniach. W przypadku, gdy w tym stanie w określonej (rozpatrywanej) bocznicie wentylacyjnej nie występuje ciąg naturalny, ani też nie jest w niej czynny wentylator, przepływ powietrza (lub gazów zrobowych) odbywa się od potencjału wyższego w kierunku potencjału niższego (od jego bezwzględnej wartości mniejszej do większej).

Przy rozpatrywaniu kierunku migracji gazów przez przestrzeń otamowaną (zroby, pola pożarowe lub inne), zwykle należy uwzględnić ciągi naturalne generowane wewnątrz i wokół tych przestrzeni. Zwłaszcza w odniesieniu do wymienionych przestrzeni określanie ciągu naturalnego stwarza istotne trudności, choć najczęściej jest możliwe w przybliżeniu. Dla uproszczenia opisu oddziaływania zmiany ciśnienia atmosferycznego na migracje gazów nie zajmujemy się ciągiem naturalnym, co jednak uczynimy w przykładach zastosowania koncepcji przeciwdziałania zagrożeniom związanymi ze zmianami ciśnienia atmosferycznego.

Jak powszechnie wiadomo, w prewencji pożarów endogenicznych dąży się do wyrównania potencjału aerodynamicznego wokół przestrzeni otamowanych. Natomiast w prewencji zagrożenia metanowego stosuje się sposoby rozproszczenia powietrza umożliwiające migrację (odsuvanie) metanu od ścian eksploatacyjnych w głąb zrobów i w kierunku dróg powietrza zużytego. W pierwszym z tych przypadków – podczas zwykłego ciśnienia atmosferycznego, powietrze kopalniane dopływa do zrobów przez wszystkie połączenia zrobów z czynnymi wyrobiskami górniczymi. Zaś podczas zniżki barometrycznej – gazy zrobowe wypływają ze zrobów do czynnych wyrobisk górniczych. Nawet intuicyjnie oczywiste jest, że więcej gazu migrować będzie przez połączenia (np. tamy, szczeliny) o mniejszym oporze, a mniej – przez połączenia cechujące się większym oporem aerodynamicznym  $R_f$ . W przypadku prowadzenia eksploatacji ścianowej zwykle opór „otwartych” zrobów od strony ściany jest znacznie mniejszy niż opór uszczelnienia zrobów tamami izolacyjnymi lub korkami podsadzowymi. Dlatego też na ogół większe ilości gazów przepływają przez zroby w strefie ścian, niż przez pozostałe kontakty zrobów z czynnymi wyrobiskami górniczymi. Stan ten może tworzyć istotne zagrożenie gazowe w środowisku ściany (podczas spadku ciśnienia atmosferycznego) lub zapoczątkować proces samozagrzewania się węgla oraz ewentualnie jego przejście do fazy samozapalenia i pożaru w zrobach w bliskim sąsiedztwie frontu ścianowego (przy wyższym ciśnieniu).

Przy braku wyrównania potencjałów aerodynamicznych wokół zrobów sytuacja jest inna. Wówczas bowiem zmniejszeniu ciśnienia atmosferycznego towarzyszy wzrost dysypacji energii  $I_f$ /spadku potencjału  $\delta\Phi_v$  (różnicy ciśnień  $\Delta p$ ) w wylotowych (wypływowych/wydechowych) tamach izolujących zroby oraz zmniejszenie się tej dysypacji w takich tamach dolotowych (dopływowych/wdechowych). W zależności od wielkości i intensywności zmian ciśnienia atmosferycznego, spadek potencjału aerodynamicznego w tamach wdechowych może zmniejszyć się do zera a, następnie zmienić swój kierunek. Wtedy też nie tylko przez tamy izolacyjne wydechowe, ale również przez tamy będące pierwotnie wdechowymi zaczynają się wydzielać gazy zrobowe. Wynika stąd, iż im

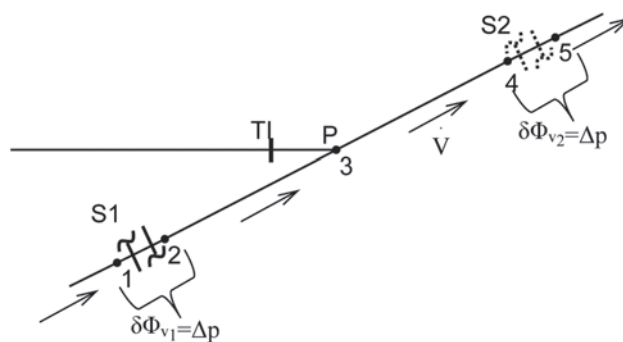
większa jest różnica potencjałów między przekrojami/węzłami przy tamach izolacyjnych wdechowych i wydechowych, tym dopiero większy spadek ciśnienia atmosferycznego spowoduje tendencję wypływu gazów zrobowych także i zza tam będących wdechowymi podczas ustabilizowanego ciśnienia atmosferycznego.

Również przy braku wyrównania potencjału aerodynamicznego, lecz podczas zwykłego ciśnienia atmosferycznego, powietrze kopalniane będzie miało tendencję dopływu do zrobów przez wszystkie połączenia zrobów z czynnymi wyrobiskami górniczymi. W tamach izolacyjnych dolotowych następuje wtedy wzrost spadku potencjału, a w tamach wylotowych jego zmniejszenie się (do wartości zerowych, a następnie ujemnych przy przekroczeniu odpowiednio dużej zmiany ciśnienia atmosferycznego).

### 3. Możliwości przeciwdziałania zagrożeniom wentylacyjno-pożarowym i gazowym powodowanym zmianami ciśnienia atmosferycznego przez odpowiednie kształtowanie rozkładu spadków potencjału aerodynamicznego

#### 3.1. Wyrobisko ślepe otamowane tamą izolacyjną

Analogicznie, omawianie przeciwdziałania zagrożeniom wentylacyjno-pożarowym związanym ze zmianami ciśnienia atmosferycznego rozpoczynamy od wyrobiska ślepego, otamowanego tamą izolacyjną. Dostępne środowisko przed taką tamą, oczywiście musi być przewietrzane. Obok tamy mogą przepływać różne ilości powietrza, różne także mogą być sposoby zapewnienia i regulacji tej ilości. Gdy tama izolacyjna usytuowana jest obok grupowego prądu powietrza, na ogół nie ma możliwości istotnego wpływu na rozkład spadków potencjału aerodynamicznego, a tym samym na wartość ciśnienia barometrycznego przy tamie izolacyjnej. Jeśli natomiast w bocznicie sieci wentylacyjnej, w której płynie powietrze, obok tamy izolacyjnej istnieją tamy regulacyjne lub rozdzielające, to zmieniając ich lokalizację, można wpłynąć na ciśnienie powietrza kopalniane obok tamy izolacyjnej (rys. 1).



Rys. 1 Szkic ilustrujący możliwość wpływania na ciśnienie powietrza kopalniane  $p$  w węzle 3 przy tamie izolacyjnej TI poprzez zmianę lokalizacji lub oporu  $R_f$  słuz S1 i S2  
Fig. 1. Sketch illustrating the possibility of influencing mine's air pressure  $p$  in junction 3 by the isolation barrier TI by changing location or resistance  $R_f$  of sluices S1 and S2

Załóżmy, że w stanie ustalonym zamknięta jest śluza wentylacyjna S1, w której zachodzi spadek potencjału aerodynamicznego  $d\Phi_v$ , równy co do wartości różnicy ciśnień

powietrza  $\delta\Phi_{v_1} = \Delta p = p_1 - p_2$ , przy czym w węźle 3 ciśnienie powietrza wynosi  $p$ . W tymże stanie ciśnienia przed i za tamą TI są sobie równe. Zmniejszenie ciśnienia atmosferycznego o  $\Delta p$  spowoduje zmniejszenie się ciśnienia powietrza w węźle 3 także o  $\Delta p$  [11]. Powstanie wówczas stan nierównowagi między ciśnieniem gazów wewnątrz otamowanej przestrzeni i powietrza w wyrobisku górniczym, powodujący wypływ gazów zza tamy TI. Dla przeciwdziałania wypływowi gazów i dążeniu do uzyskania ponownej równowagi można zamknąć śluzę wentylacyjną S2 i otworzyć śluzę S1. Działanie takie wywołuje zwiększenie się ciśnienia powietrza w węźle 3 o  $d\Phi_{v_2}$ . W przypadku potrzeby utrzymania pierwotnej ilości powietrza  $\dot{V}$  w wyrobisku górniczym, niezbędne jest spełnienie relacji

$$d\Phi_{v_2} \approx R_{fs2} \cdot \dot{V}^2 = d\Phi_{v_1} \approx R_{fs1} \cdot \dot{V}^2 = \Delta p \quad (2)$$

w której wielkości  $R_{fs1} = R_{fs2}$  są oporami aerodynamicznymi śluz S1 i S2.

Jeśli natomiast ilość powietrza  $\dot{V}$  zmniejszymy przez zwiększenie  $\delta\Phi_{v_2}$  do  $\delta\Phi_{v_2}'$  (poprzez zwiększenie oporu  $R_{fs2}$  śluzy S2), to uzyskamy  $\Delta p^2$  większe od  $\Delta p$ , a oddziaływanie śluz S2 w większym stopniu wpłynie na wzrost ciśnienia powietrza w węźle 3. Analogiczne rozumowanie dotyczy przypadku wzrostu ciśnienia atmosferycznego, któremu można przeciwdziałać przez otwarcie śluzy S2 i zamknięcie śluzy S1.

Zakres przeciwdziałania niekorzystnym wpływom zmian ciśnienia barometrycznego zależy od wartości tzw. dyspozycyjnego spadku potencjału aerodynamicznego  $\delta\Phi_v$ , jaki można osiągnąć w istniejących uwarunkowaniach w śluzach S1 i S2. W rzeczywistości kopalnianej spotykane wartości dyspozycyjnego spadku potencjału w grupowych prądach powietrza sięgają nawet do około  $1500 \text{ J/m}^3$  ( $150 \text{ mm}$  sł.  $\text{H}_2\text{O}$ ). Takimi śluzami można by zatem przeciwdziałać zmianom ciśnienia atmosferycznego wynoszącym do około  $1500 \text{ J/m}^3 = 15 \text{ hPa} \approx 11 \text{ mm}$  sł. Hg. Najczęściej jednak spotykane rezerwy  $\delta\Phi_v$  w tym zakresie nie są tak duże lub możliwości ich wykorzystania w istniejących uwarunkowaniach górniczo-ruchowych są ograniczone. W pracy [12] wykazano np., że w efekcie zastosowania równoczesnej regulacji (dławienia) przepływu powietrza śluzami na wlocie i wylocie rejonu pokł. 510 w polu S/poz. 900m w KWK „Murcki-Staszic” Ruch „Staszic”, można by niwelować skutki zmian ciśnienia atmosferycznego w środowisku ściany 8b-S w zakresie do ok. 4-5 hPa.

Jeśli zmiany ciśnienia atmosferycznego wynoszą mniej niż stojąca do dyspozycji różnica ciśnień (spadek potencjału  $\delta\Phi_v$ ) w śluzach wentylacyjnych, pożądany efekt można uzyskać przez odpowiednią równoczesną regulację spadków potencjału aerodynamicznego w śluzach S1 i S2, poprzez zmianę ich oporu  $R_r$ .

Jak już nadmieniono na wstępie, migracji powietrza lub gazów przez pojedynczą tamę izolacyjną, oczywiście można przeciwdziałać, stosując tzw. komory wyrównawcze. Jeśli jednak ich działanie nie obejmuje wszystkich szczelin i spękań w maszywie skalnym w otoczeniu tamy, sposób ten, w odróżnieniu od wyżej opisanego będzie mniej skuteczny lub nieskuteczny.

### 3.2. Ściana eksploatacyjna w pokładzie nienaruszonym

Rozumowanie przeprowadzone dla wyrobiska ślepego słuszne jest także dla prostego, choć dość rzadko spotykanego obecnie w praktyce przypadku prowadzenia pierwszej ściany eksploatacyjnej w nienaruszonym pokładzie, tj. ściany niemającej żadnych połączeń (zrobowych, szczelinowych) z innymi rejonami wydobywczymi lub kompleksami zrobowymi poza własnymi zrobami. Wówczas jednak, podobnie

zresztą jak w większości rejonów eksploatacyjnych, będąca do dyspozycji różnica ciśnień w śluzach regulacyjnych jest zwykle znacznie (wielokrotnie) mniejsza od wspomnianych 15 hPa. Wtedy też zakres przeciwdziałania niekorzystnym zmianom ciśnienia atmosferycznego odpowiada tej mniejszej dyspozycyjnej różnicy ciśnień w śluzach. Sposób ten – ze względów oczywistych można stosować tylko wtedy, gdy w danym rejonie wydobywczym istnieje nadmiar powietrza uzasadniający stosowanie tam regulacyjnych. W takim przypadku również dla kolejnych ścian w określonym polu eksploatacyjnym, zwłaszcza przy ich przewietrzaniu na „U” po caliznie, często można przeciwdziałać niekorzystnym wpływom zmian ciśnienia atmosferycznego. Wtedy zaś, jak to jeszcze pokażemy na przykładzie, istotny jest odpowiedni dobór lokalizacji tam (śluz) regulacyjnych.

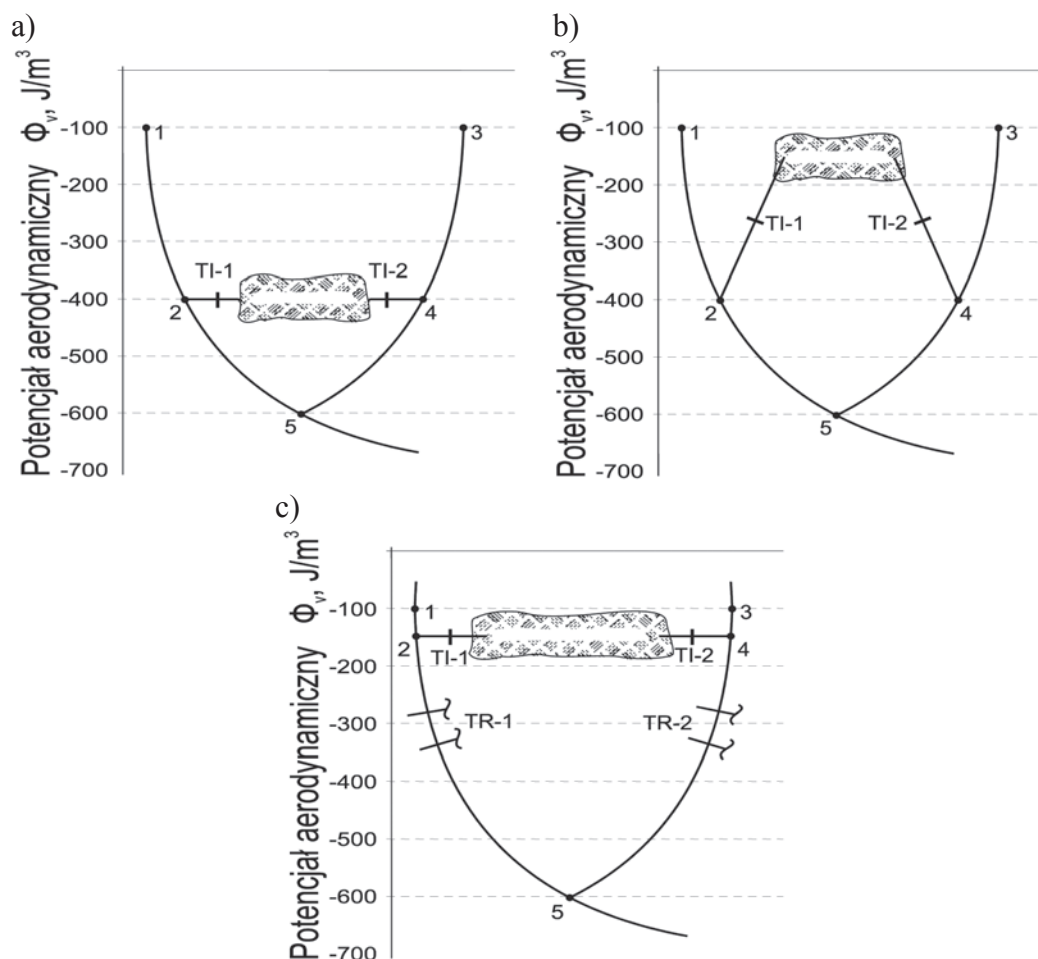
Namiastkę opisanego sposobu niejednokrotnie realizowano w praktyce górniczej dla przeciwdziałania wypływowi produktów samozagrzewania węgla w późnej fazie tego procesu. Przyjęło się wówczas pojęcie tzw. tam naporowych, przy czym ich stosowanie nie zostało związane ze zmianami ciśnienia atmosferycznego. Stosowanie takich tam na wylocie rejonu lub samego środowiska ściany, dawało oczywiście efekt zwyżki ciśnienia barometrycznego oddziaływującej na zroby ścianowe.

### 3.3. Przypadek przestrzeni otamowanych (obejmujących całe, niejednokrotnie rozległe kompleksy wyrobisko-zrobowe), wokół których wyrównany jest potencjał aerodynamiczny

Wskutek zmian ciśnienia atmosferycznego pojawiają się różnice ciśnień  $\Delta p$  w tamach izolujących tę przestrzeń, powodujące wypływ gazów zrobowych podczas zniżki ciśnienia atmosferycznego lub dopływ powietrza do zrobów podczas zwyżki tego ciśnienia, wynikające w ogólności z zależności (1). Wartości tych różnic zależą oczywiście m.in. od zmian ciśnienia atmosferycznego w czasie, czyli od szybkości tych zmian i czasu ich trwania, od szczelności (oporu aerodynamicznego) poszczególnych tam izolacyjnych i ich liczby oraz rozkładu oporów wewnątrz przestrzeni otamowanej. Wymienione różnice ciśnień  $\Delta p$  można wyznaczyć, np. za pomocą manometrów wodnych (U – rurek) podłączonych do rurek próbobiorczych w tamach izolacyjnych. Znając te różnice oraz dysponując danymi określającymi pole potencjału aerodynamicznego, w wielu przypadkach można dokonać zmiany tego pola, prowadzącej do zmniejszenia różnic ciśnień w tamach izolacyjnych lub też do całkowitej niwelacji tych różnic. Sposób postępowania wynika tu w ogólności z analizy rozkładu potencjału aerodynamicznego, analogicznej jak przy doborze środków prowadzących do wyrównania potencjału aerodynamicznego [13].

Wydaje się, że najprościej możliwość zniwelowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na przestrzeń otamowaną można przedstawić dla zrobów zlokalizowanych przekątnie w sieci wentylacyjnej. Na schemacie potencjalnym (rys. 2) pokazano, że przy ustabilizowanym ciśnieniu atmosferycznym zdysypowana energia (różnica ciśnień) w tamach izolacyjnych TI-1 i TI-2 wynosi zero.

Wskutek hipotetycznej naglej zniżki ciśnienia atmosferycznego, tamy TI-1 i TI-2 stały się tamami wydechowymi (rys. 2 b). Chcąc w tych tamach uzyskać spadki potencjału (zdysypowane energie, różnice ciśnień) równe zeru, należałoby w bocznicach 2-5 i 4-5 (rys. 2 b) zastosować tamy regulacyjne i wywołać w nich spadek potencjału w przybliżeniu równy spadkom potencjału zachodzącym w tamach izolacyjnych TI-1 i TI-2 (rys. 2 c).



Rys. 2 Schemat potencjalny – a) ustabilizowane ciśnienie atmosferyczne – b) przy niższym ciśnieniu atmosferycznym – c) przy niższym ciśnieniu atmosferycznym - stan po regulacji

Fig. 2. Scheme of potentials/stabilized atmospheric pressure

Fig. 2a Situation of atmospheric pressure's decrease

Fig. 2b Situation of atmospheric pressure's decrease – state after the regulation

Tamy regulacyjne TR-1 i TR-2 wpływają na ograniczenie ilości powietrza płynącego w bocznicach 1-2 i 3-4. Stąd też w nowym układzie spadki potencjału w tych bocznicach ulegną zmniejszeniu. Nowe zaś ilości powietrza mogą być niewystarczające dla osiągnięcia założonych celów przewietrzania. Dlatego też, jak również z uwagi na możliwe do uzyskania spadki potencjału aerodynamicznego w tamach TR-1 i TR-2, opisany sposób może być nie dość skuteczny dla wyeliminowania wpływu gazów zrobowych do wyrobisk górniczych. Niezależnie od tego, należy podkreślić, że proces wyrównywania się ciśnień między środowiskami przed i za tamą izolacyjną jest procesem zachodzącym w czasie. Dlatego też w zależności od szybkości wyrównywania się tych ciśnień, w praktyce może zachodzić potrzeba sukcesywnego zmniejszenia spadków potencjału aerodynamicznego w tamach TR-1 i TR-2 (w miarę ustępowania niżki barometrycznej).

Podkreślić należy, że przy konstrukcji rysunków 2a, 2b i 2c założono, iż wewnątrz zrobów nie występują znaczące dyssypacje energii lub ciągi naturalne (depresje naturalne). Dlatego też na rysunkach tych zrobki znajdują się na jednej płaszczyźnie równego potencjału. W rzeczywistości kopalnianej podane zjawiska dotyczące zrobów zwykle występują, a ich parametry są trudne do wyznaczenia. W każdym jednak przypadku, zerowanie się różnic ciśnień w tamach izolacyjnych świadczy o prawidłowości podjętych środków dla wyeliminowania niekorzystnych skutków zmian ciśnienia atmosferycznego na bezpieczeństwo załogi dołowej.

Tamy izolujące określoną przestrzeń nie mają jednakowych oporów aerodynamicznych. Jeśli jednak w tamach (jak na rys. 2b) zachodzą jednakowe różnice ciśnień, to przez tamy te muszą przepływać różne ilości gazów. Fakt ten można wykorzystać dla świadomej regulacji prędkości migracji gazów do jednej z tam poprzez odpowiednią zmianę jej oporu. Zagadnienie to objaśnimy później na jednym z przykładów z praktyki górniczej.

Nadmienić należy, że podobnie jak przy wyrównywaniu potencjału wokół zrobów lub pól pożarowych, dla zachowania właściwych parametrów powietrza kopalnianego wystarczające może być niepełne eliminowanie wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego.

Koncepcja opisanego sposobu eliminowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego może naturalnie zostać zastosowana także podczas wyżki ciśnienia atmosferycznego, dla uniemożliwienia lub co najmniej utrudnienia przenikania powietrza do przestrzeni otamowanych. W takiej, odwrotnej sytuacji niż to ilustrują 2b i 2c, trzeba podjąć działania dla zmniejszenia potencjału aerodynamicznego (a tym samym także ciśnienia) przy tzw. kontaktach wyrobisk czynnych z otamowanymi, tzn. w węzłach 2 i 4 przy tamach izolacyjnych TI-1 i TI-2. Wówczas, oczywiście tamy regulacyjne TR-1 i TR-2 należałoby zastosować w bocznicach 1-2 i 3-4.

Sposoby kształtowania rozkładu potencjału aerodynamicznego w odniesieniu do wyrównywania potencjału wokół pól pożarowych czy zrobów są znane z wielu publikacji,

w tym m.in. z [12], [13] i [14]. Sposoby te można oczywiście stosować także do odpowiedniego kształtowania pola potencjału celem niwelowania niekorzystnego oddziaływania zmian ciśnienia barometrycznego, a to także dla znacznie bardziej niż na rysunku 2 skomplikowanych sytuacji z jakimi spotykamy się w praktyce.

### 3.4. W rejonach eksploatacyjnych

Zwykle dąży się do niedopuszczenia do wypływu gazów zrobowych do przestrzeni roboczej ściany. Wówczas w wielu przypadkach nie ma możliwości zmian potencjału aerodynamicznego, a tym samym ciśnienia powietrza w tej przestrzeni. Można jednak na ogół zintensyfikować pożądaną tendencję kierunku migracji gazów przez zmniejszenie lub zwiększenie spadku potencjału aerodynamicznego między przestrzenią roboczą a wyrobiskami z powietrzem zużyтым. I tak, zwiększenie spadku potencjału aerodynamicznego utrudni wypływ gazów zrobowych do przestrzeni roboczej podczas zniżki ciśnienia barometrycznego, zaś zmniejszenie tego spadku (lub nawet odwrócenie jego kierunku) przeciwdziała dopływowi powietrza do zrobów z pola roboczego.

W pierwszym z tych przypadków wzrośnie spadek potencjału aerodynamicznego w tamach izolacyjnych wydechowych. W drugim natomiast spadek ten się zmniejsza, przy czym dla uzyskania pożądanego efektu może zajść potrzeba odwrócenia kierunku tendencji migracji gazów zrobowych. W kolejnym rozdziale podamy przykłady takiego postępowania.

### 3.5. Wewnątrz otamowanej przestrzeni

W czasie zniżki ciśnienia atmosferycznego powstają warunki jak podczas występowania wewnętrznego źródła masy, co ma miejsce, np. podczas podawania gazów inertnych do tej przestrzeni. Odpowiednie kształtowanie pola potencjału aerodynamicznego może utrudnić niepożądany wypływ gazu obojętnego (inertnego) lub też ograniczyć potrzebną intensywność jego stosowania, a to zarówno przy zniżce, jak i zwykle ciśnienia atmosferycznego. Możliwe często bywa także stworzenie rozkładów spadku potencjału aerodynamicznego, ułatwiających kierowanie gazu inertnego do miejsca samozagrzewania węgla lub ogniska pożaru. Dlatego też w każdym przypadku inertyzacji atmosfery w przestrzeni otamowanej, jak najbardziej celowe jest przeprowadzenie szczegółowej analizy pola potencjału aerodynamicznego, ujmującej m.in. wybór miejsca zadawania gazu inertnego oraz stworzenie warunków migracji tego gazu w pożądanym kierunku, przy równoczesnej minimalizacji strat tego gazu i w ogóle minimalizacji jego zużycia w procesie inertyzacyjnym. Zagadnienie to jest zatem szczególnie ważne dla kopalń, zarówno z uwagi na skuteczność zapobiegania pożarom endogenicznym, jak i z uwagi na koszt tegoż procesu, a przy tym obydwa te czynniki z oczywistych względów są ze sobą powiązane.

## 4. Przykłady kształtowania rozkładu spadków potencjału aerodynamicznego dla przeciwdziałania zagrożeniom wentylacyjno-pożarowym związanym ze zmianami ciśnienia atmosferycznego

### 4.1. W polu zachodnim byłej KWK „Wesoła”

W KWK „Mysłowice-Wesoła” (Ruch „Wesoła”) istniała ściana 912a w pokładzie 501 przewietrzana na „U” po całości węglowej (rys. 3). Charakterystyczny dla tej ściany był brak połączeń zrobowych z jakimkolwiek pokładem, w

tym z pokładem 501. Zrobi ściany 912a stanowiły zatem zbiornik, który można traktować analogicznie jak ślepe, nieotamowane wyrobisko. Powietrze świeże do ściany doprowadzane było chodnikiem IV, pochylnią III, chodnikiem VIII, pochylnią IV, chodnikiem Xd, pochylnią V, rozciną ściany 11 i przeciną ściany 12. Powietrze zużyte zaś odprowadzane było chodnikiem Xc do chodnika X zachodniego i dalej w kierunku szybu „Waław”. W chodniku IV istniał szeregowy układ tam regulacyjnych, które przejmowały znaczny spadek potencjału aerodynamicznego – około 130 mm sł. H<sub>2</sub>O = 12,7 hPa. Wewnątrz rejonu ściany (w rejonowych drogach powietrza świeżego i zużytego) nie stosowano tam regulacyjnych. Gdyby jednak, np. w chodniku X zachodnim istniał układ otwartych tam regulacyjnych gotowy do zamknięcia, to przez otwarcie tam regulacyjnych w chodniku IV i zamknięcie tam w chodniku X zachodnim (zachowując przy tym pierwotną ilość powietrza w rejonie), można by przeciwdziałać zmianom ciśnienia atmosferycznego o amplitudzie do ok. 12,7 hPa. Ewentualne zaś zmniejszenie ilości powietrza w rejonie ściany 912a przez zwiększenie wówczas oporu tam regulacyjnych w chodniku X zachodnim, umożliwiłyby przeciwdziałanie zmianom ciśnienia atmosferycznego przekraczającym wymienione 12,7 hPa (do około 14,2 hPa) – rys. 3.

Nadmienić warto, że pożądaný rozkład potencjału aerodynamicznego (przed otamowaniem rejonu ściany 912a tamami TP-1 i TP-2), można by także uzyskać tamami regulacyjnymi zlokalizowanymi w chodnikach Xd i Xc. Utrzymywanie tak dużych spadków potencjału w tamach regulacyjnych wewnątrz rejonu stwarza jednak określone trudności techniczne i na ogół ogranicza możliwości (zakres) przeciwdziałania niekorzystnemu wpływowi zmian ciśnienia barometrycznego.

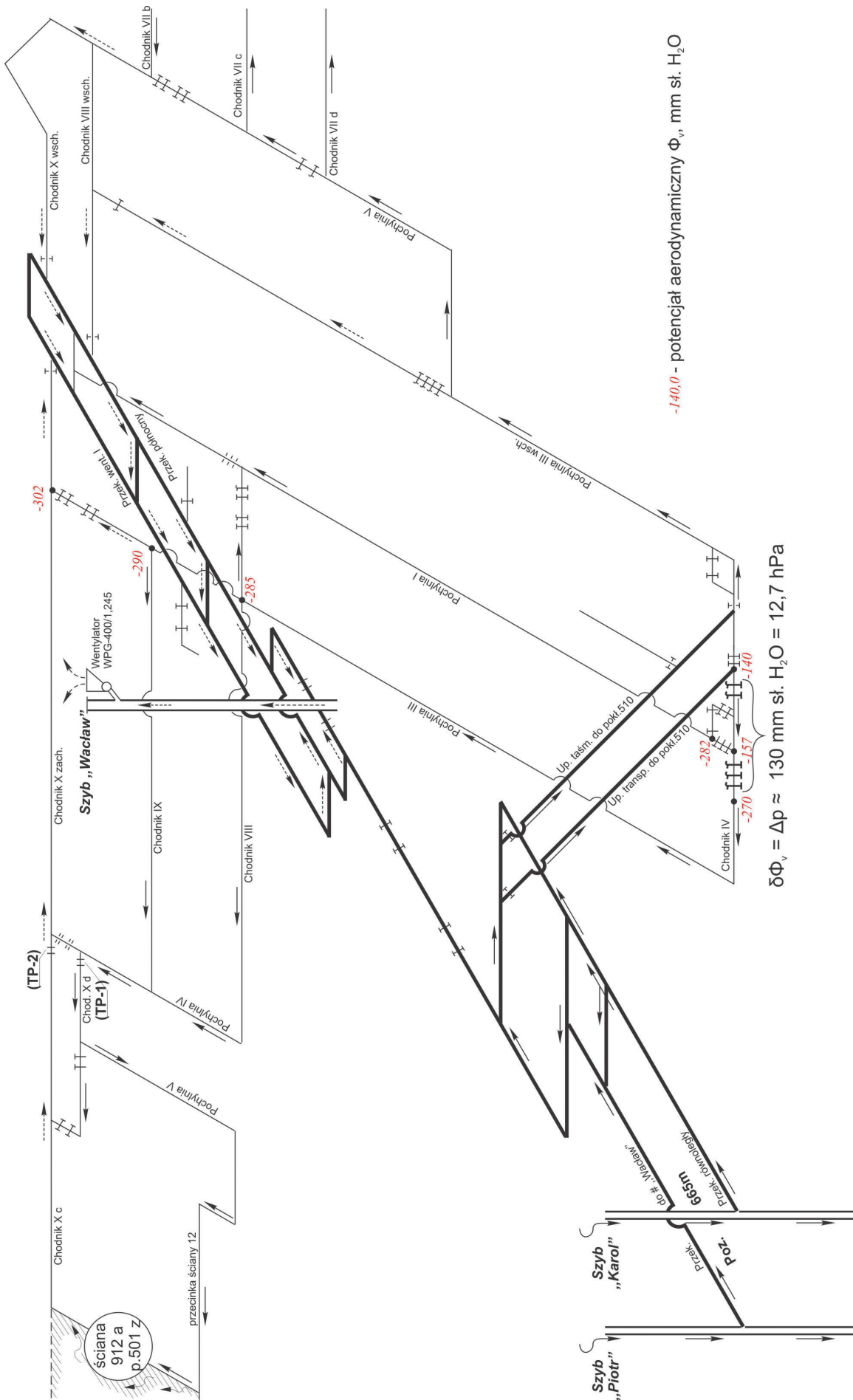
W opisanym przykładzie możliwości skutecznego niwelowania wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego wynikają ze stosowania tam regulacyjnych potrzebnych dla ograniczania ilości powietrza w rejonie ściany 912a, czyli z nadmiaru powietrza sprzyjającego często powstawaniu pożarów endogenicznych w zrobach.

### 4.2. W byłym ZG „Bytom” III

W byłym ZG „Bytom” III, obecnie KWK „Bobrek-Centrum”, wybierane były ściany 30 i 31 w pokładzie 510. Ich prowadzenie odbywało się w czterech fazach, przy czym każdorazowo dążono do stosowania rozprowadzenia powietrza typu „U” po całości. Dla uzyskania takiego sposobu przewietrzania w fazie III przewidziano najpierw równoległe przewietrzanie ścian. Jednak ze względów klimatycznych zmieniono ów sposób i realizowano szeregowo przewietrzanie ścian 30 i 31 z doświetaniem ściany 31. Umożliwiło to istotne zwiększenie intensywności przewietrzania obu ścian, przy zachowaniu systemu „U”, co ilustruje poniższy schemat (rys.4).

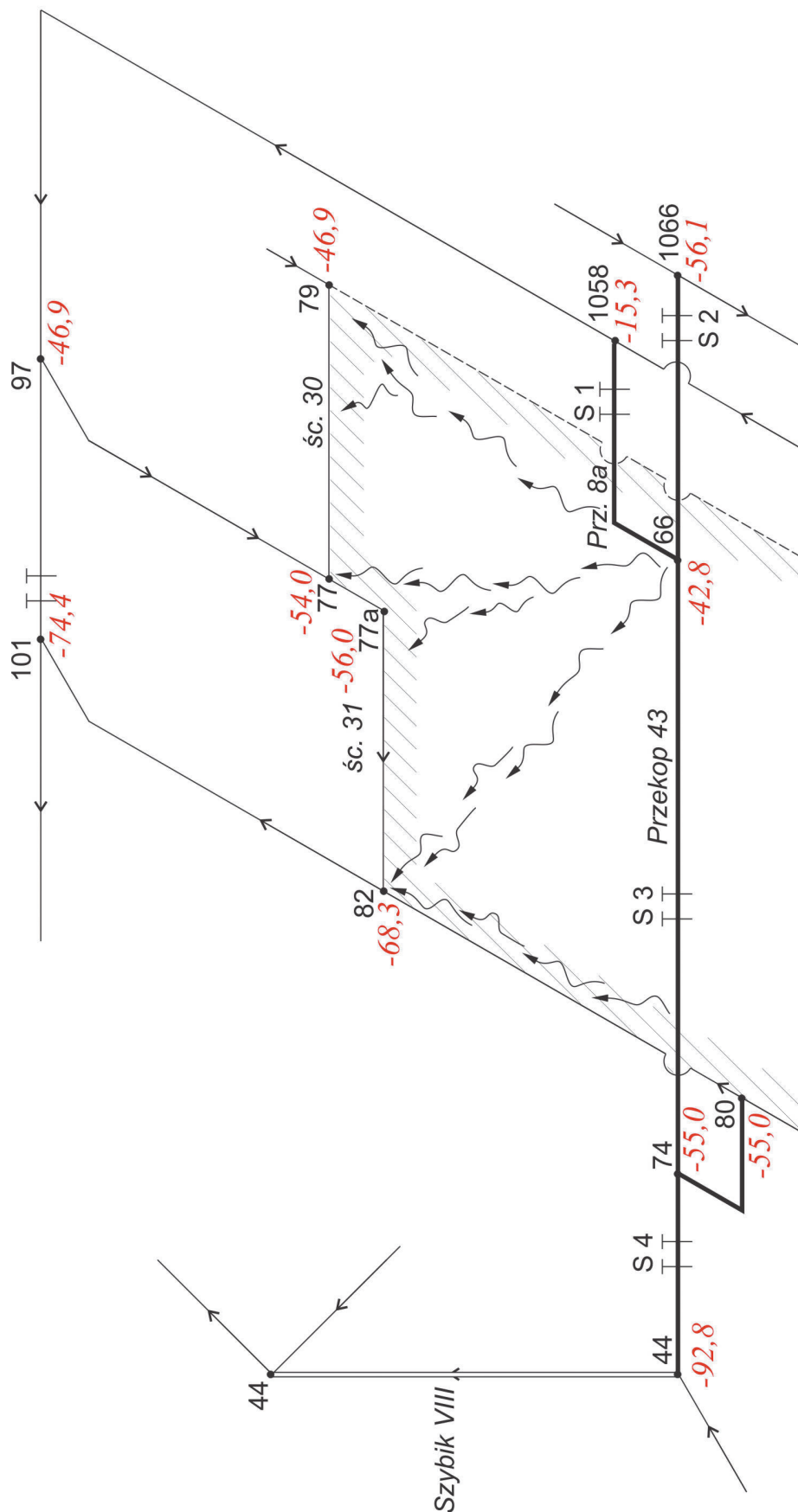
Około 22m poniżej spągu pokładu 510 pod parcelami ścian 30 i 31 znajdował się przekop 43 nadebrany eksploatacją dwóch warstw pokładu 509 i jednej pokładu 510. W rejonie tym bowiem prowadzono dalszą eksploatację, obejmującą drugą (przyspągową) warstwę pokładu 510 i dwie warstwy pokładu 509. Istniejące uwarunkowania górnicze i tapaniowe w rejonie doprowadziły do rozszczelnienia górotworu między przekopem 43 a pokładem 510, potwierdzonego m.in. wypływem wody ze stropu do tegoż przekopu. Istniała zatem również możliwość migracji gazów między środowiskami ścian 30 i 31 a przekopem 43.

W jednym ze stanów regulacji rozplywu powietrza w rejonie ścian 30 i 31 ustalili się w przybliżeniu rozkład potencjału aerodynamicznego ujęty na rysunku 4. W stanie tym istniała tendencja migracji gazów od przekopu 43 do przestrzeni ro-



Rys. 3. Schemat przestrzenny rejonu pokładu 501/B na poz. 665 m w byłej KWK „Wesola”  
 Fig. 3. Spatial scheme of the area of seam 501/B on the 665 m level in the former KWK “Wesola”





-56,1 - potencjał aerodynamiczny  $\Phi_v$ , mm st. H<sub>2</sub>O

Rys. 4. Schemat przestrzenny rejonu ścian 30 i 31 w pokładzie 510 w byłym ZG „Bytom III”  
 Fig. 4. Spatial scheme of the area of longwalls 30 and 31 in the 510 seam in the former ZG Bytom III

boczej ścian 30 i 31, wyrażająca się następującymi różnicami potencjału:

- parcela zrobowa ściany 30  
od 4,1 mm sł.  $H_2O$  między węzłami 66 i 79  
do 13,2 mm sł.  $H_2O$  między węzłami 66 i 77a,
- parcela zrobowa ściany 31  
od 13,2 mm sł.  $H_2O$  między węzłami 66-77a  
do 25,5 mm sł.  $H_2O$  między węzłami 66-82, przy  $\delta\Phi_{74-82} \approx 13,3$  mm sł.  $H_2O$ .

Tendencja ta utrudniała dopływ powietrza ze ścian do przyfrontowej przestrzeni zrobowej. W przypadku zatem hipotetycznego wzrostu ciśnienia powietrza o 40 Pa = 4,1 mm sł.  $H_2O$ , wzdłuż całego frontu ścian nadal praktycznie nie będzie istniało wnikanie powietrza ze ścian do zrobów. Natomiast przy dalszym wzroście ciśnienia atmosferycznego, począwszy od węzła 79 (wlot do ściany 30), zaczęłyby się migracja powietrza do zrobów. Po wzroście tego ciśnienia o 130 Pa  $\approx 13,2$  mm sł.  $H_2O$ , powietrze wnikałoby na całej długości ściany 30 do jej zrobów, z tendencją malejącą na drodze wzdłuż całego frontu wybierkowego 79-77-77a (rys. 4). Zaś po jego wzroście o ok. 250 Pa  $\approx 25,5$  mm sł.  $H_2O$ , przenikałoby ono do zrobów z tendencją malejącą na drodze od węzła 79 do 82.

Opisanemu zjawisku – występującemu w czasie zwyżek ciśnienia barometrycznego można było przeciwdziałać otwierając tamy śluzowe S1 i S3. Wtedy bowiem potencjał aerodynamiczny w przekopie 43, na odcinku między węzłami 66 i 74, wyniósłby ok. -15,3 mm sł.  $H_2O$ , a to przy różnicy potencjałów między tym przekopem a przestrzenią roboczą ścian 30 i 31 wynoszącej od ok. 31,6 mm sł.  $H_2O$  = 310 Pa do ok. 53,0 mm sł.  $H_2O$  = 520 Pa. W tym zatem przypadku można było zapobiegać wnikaniu powietrza do przystropowej części zrobów wzdłuż całej długości ścian 30 i 31, przy wzroście ciśnienia atmosferycznego o ok. 310 Pa (3,1 hPa). Opisane działanie jest celowe z uwagi na prewencję pożarów endogenicznych. W praktyce ruchowej często jednak dąży się do tego, by podczas zniżki ciśnienia atmosferycznego gazy zrobowe nie wypłynęły do przestrzeni roboczej. W rozpatrywanym przypadku takiemu wypływowi też można było przeciwdziałać, a to przez otwarcie tam śluzowych S3 i S4 (przy zamkniętych tamach S1 i S2). Zabieg taki powodował zmniejszenie potencjału aerodynamicznego w przekopie 43 w przybliżeniu do -92,8 mm sł.  $H_2O$  = 910 Pa i wywołanie spadku potencjału między frontem ścian 30 i 31 a przekopem 43 o pożądanym kierunku do przekopu 43 i to o znacznej wartości ok. 45,9 mm sł.  $H_2O$  = 450 Pa, między węzłem 79 i przekopem 43 oraz 24,5 mm sł.  $H_2O$  = 240 Pa, między węzłem 82 a tym przekopem. Wynika stąd, że przy spadku ciśnienia atmosferycznego nie większym niż 240 Pa, (2,4 hPa) w żadnym miejscu ścian 30 i 31 nie wypływałyby wtedy gazy zrobowe. Zaś przy większym spadku ciśnienia atmosferycznego zaczęłyby się pojawiać migracje gazów zrobowych, najpierw do sąsiedztwa węzła 82 oraz środowiska ściany 31, obejmując cały obszar obu ścian, przy spadku tego ciśnienia przekraczającym 450 Pa (4,5 hPa).

W przypadku ścian 30 i 31 można było przeciwdziałać niekorzystnemu wpływowi zmian ciśnienia atmosferycznego przy praktycznie niezmiennym rozkładzie potencjału aerodynamicznego w rejonie – środowisku tych ścian. Skuteczność omówionych działań zależała od możliwego do osiągnięcia zakresu zmian potencjału aerodynamicznego w przekopie 43. Zmiany te w opisaną sytuację są mniejsze od maksymalnie spotykanych zmian ciśnienia atmosferycznego. Niemniej jako celowe należy uznać zastosowanie podanych środków nawet przy zmianach ciśnienia atmosferycznego, uniemożliwiających w pełni wyeliminowanie niekorzystnych skutków tych zmian, gdyż wówczas ulegają osłabieniu niepożądane migracje gazów zrobowych w kierunku miejsc pracy załogi dołowej.

### 4.3. W partii „L” bylej KWK „Śląsk”

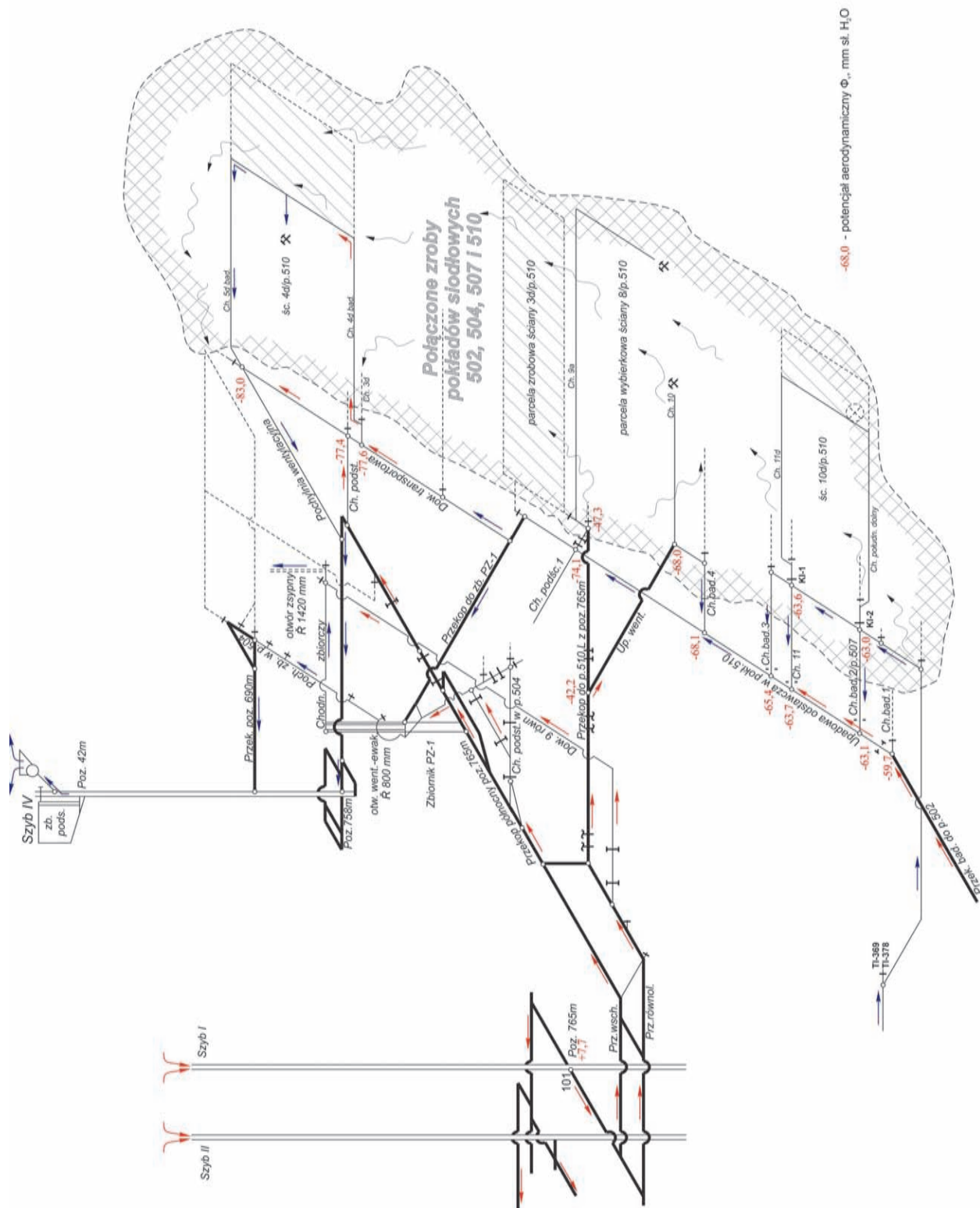
W (obecnie) Ruch „Śląsk” KWK „Wujek” w rejonie ściany 10d wybieranej na zawał w metanowym pokładzie na skrzyżowaniu chodnika południowego dolnego z tą ścianą powstał pożar [15], który w dniach od 21 do 26.07.2004 r. odizolowano tamami (korkami) przeciwwybuchowymi KI-1 i KI-2 (rys. 5). Odizolowanie to stanowił praktycznie szczelny korek wodny KI-1 wykonany w chodniku 11 oraz korek KI-2 usytuowany w chodniku badawczym 2 w pokładzie 507.

Górotwór w otoczeniu pokładu 510, a szczególnie w rejonie ściany 10d jest silnie spękany, przy czym zroby tego pokładu są połączone ze zrobami wcześniej wybranych na zawał kilku innych pokładów siodłowych. Istniejąca w partii „L” połączona przestrzeń wyrobiskowo-zrobowa jest ogromna. Jej oszacowana, tzw. wolna (czynna) objętość początkowa wynosi około 5 mln  $m^3$ , a wobec istnienia połączeń tej przestrzeni ze zrobami bylej KWK „Katowice-Kleofas”, ta czynna objętość może wynosić nawet 7÷8 mln  $m^3$ . Tak duża objętość kompleksu zrobowego już w czasie ruchu ściany 10d powodowała, że środowisko tej ściany było szczególnie narażone na wypływy gazów zrobowych w czasie spadku ciśnienia atmosferycznego, co wymagało okresowego zwiększenia ilości powietrza w ścianie. Stwierdzony wzrost intensywności tych wypływów był w znacznej mierze spowodowany przeprowadzonym, potrzebnym skądinąd bardzo, dobrym odizolowywaniem środowisk wcześniej wybieranych ścian w pokładach siodłowych partii „L” od czynnych wyrobisk. Istniejący stan był wielce niekorzystny, także z uwagi na zapobieganie pożarom endogenicznym w rejonie ściany 10d. Sprzyjał on bowiem podczas zwyżek ciśnienia barometrycznego głębokiemu wnikaniu powietrza (tlenu) do połączonej przestrzeni zrobowej, głównie od strony środowiska ściany 10d, będącej wówczas jedyną czynną ścianą w partii „L”.

Po odizolowaniu rejonu ściany 10d podjęto szeroko zakrojony zakres prac profilaktycznych związanych m.in. z wyrównaniem potencjałów aerodynamicznych, włączaniem dwutlenku węgla do przestrzeni wyrobiskowo-zrobowej i chłodzeniem gazów zrobowych.

Do czasu wznowienia przewietrzania ściany 10d (luty 2005 r.), zmianom ciśnienia barometrycznego towarzyszyły bardzo duże zmiany różnicy ciśnień powietrza obserwowane na izolacyjnym korku wdychowym KI-2 (od ok. + 40 mm sł.  $H_2O$  w czasie zniżek ciśnienia atmosferycznego do ok. - 60 mm sł.  $H_2O$  podczas zwyżek ciśnienia atmosferycznego). Toteż podczas określonych zwyżek tego ciśnienia dochodziło kilkakrotnie do znaczących wzrostów stężenia tlenu w środowisku miejsca pożaru (skrzyżowanie ściany 10d z chodnikiem podścianowym), dochodzących do około 14%. Oczywiście nie sprzyjało to procesowi gaszenia pożaru (stygnięcia ogniska pożarowego). Wobec tych niekorzystnych zjawisk, celem uniknięcia reaktywacji pożaru z lipca 2004 r., ponownie otamowano (zaizolowano) w kwietniu 2005 r. rejon ściany 10d „otwarty” w lutym 2005r. Po tej powtórnej izolacji ustalił się w partii „L” rozkład potencjału aerodynamicznego. Z rys.5 wynika, że wówczas w ogólności istniała dość duża tendencja migracji gazów ze środowiska otamowanej ściany 10d (oraz z drążonego chodnika 10 i przecinki ściany 8) ku górze w kierunku wyrobisk w rejonie czynnej wtedy ściany 4 ( $\delta\Phi_{\max} \approx 30$  mm sł.  $H_2O$ ), przy czym tendencja ta była niewątpliwie wzmacniana znaczącym ciągiem naturalnym, generowanym w połączonych zrobach pokładów 507, 509 i 510 partii „L”.

Począwszy od ponownego zaizolowania ściany 10d (06.04.2005 r.), na bieżąco mierzono ciśnienie atmosferyczne



Rys. 5. Schemat przestrzenny rejonu pokładu 510 w partii „L” KWK „Wujek” Ruch „Śląsk”  
 Fig. 5. Spatial scheme of seam 510 in the area of “L” KWK “Wujek” Ruch “Śląsk”

$p_0$  i różnice ciśnień  $\Delta p$  przejmowane przez korek KI-2 oraz wykonywano analizy gazów pobieranych ze środowiska ściany 10d. Istotne ich wyniki przedstawiono graficznie na rys. 6, uzyskując przebieg zmian  $p_0$  i  $\Delta p$  oraz kształtowanie się stężenia tlenu w środowisku ściany 10d w kwietniu i maju 2005 r.

Zgodnie z rys. 6, w kwietniu 2005 r. zmianom ciśnienia barometrycznego towarzyszyły bardzo duże zmiany różnicy ciśnień  $\Delta p$  przejmowanej przez korek izolacyjny KI-2, a amplituda tych zmian osiągała 200 mm sł.  $H_2O$ . Była ona zatem w przybliżeniu dwukrotnie większa niż w początkowym okresie po otamowaniu pożaru z dnia 20.07.2004 r. Znacznym wzrost tej wielkości był spowodowany zwiększeniem szczelności otamowania rejonu ściany 10d, jak i istotnym doszczelnieniem likwidowanego rejonu pokładu 510 w byłej kopalni „Katowice – Kleofas” (mającego połączenia zrobowe z partią „L” Ruchu „Śląsk”).

Bardzo duże różnice ciśnień  $\Delta p$  na korku KI-2, oczywiście skutkowały także większą intensywnością wnikania powietrza m.in. przez ten korek w kierunku ogniska pożaru, w środowisku ściany 10d, co potwierdza kształtowanie się stężenia tlenu w tym środowisku (rys. 6). Dla przeciwdziałania temu zjawisku, autorzy pracy proponowali już w czasie pierwotnego otamowania rejonu ściany 10d, by w wybranym przekroju wypływowym połączonych zrobów pokładów 507, 509 i 510 partii „L”, częściowo rozszczelnić te zroby. W takim stanie – zgodnie zresztą z jakościowym opisem (rozdz. 2) – znacząco większe ilości gazów migrować będą do lub z otamowanej przestrzeni przez przekrój o istotnie mniejszym oporze niż opór korka KI-2. Proponowany zabieg („upust”) utrudniałby lub wręcz uniemożliwiał dopływ powietrza (tlenu) do wymienionego ogniska pożaru. Częściowe lokalne rozszczelnienie zrobów (poprzez tzw. upust), praktycznie nie ma wpływu na zmianę rozkładu potencjału aerodynamicznego wokół przestrzeni otamowanej, powoduje jednak pożądaną zmianę tego rozkładu między przestrzenią otamowaną a wyrobiskami czynnymi (nieotamowanymi).

W warunkach partii „L” w czasie pierwotnego otamowania rejonu ściany 10d z różnych względów nie skorzystano z wymienionej propozycji. Natomiast prowadzone roboty przygotowawcze dla ściany 8 w warstwie przystropowej pokładu 510/L, na początku maja 2005 r. niejako samoczynnie spowodowały realizację tejże propozycji. Pożądany i oczekiwany efekt profilaktyczny, uzyskany w wyniku rozszczelnienia zrobów pokładu 510 w partii „L” tymi robotami był ewidentny, co pokazały bezpośrednio przebiegi zmian ciśnienia atmosferycznego i różnicy ciśnień na korku KI-2 oraz kształtowania się stężenia tlenu w pobliżu miejsca pożaru w miesiącach kwietniu i maju 2005 r. – rys. 6. Począwszy bowiem od maja 2005 r. amplituda zmian ciśnienia w tym korku wywoływana zmianami ciśnienia atmosferycznego nie przekracza 10 mm sł.  $H_2O$  (przed rozszczelnieniem zrobów nawet 200 mm sł.  $H_2O$ ). W efekcie, w środowisku z zagrzanym węglem praktycznie nie dochodzi już wtedy do wzrostów zawartości  $O_2$  powyżej 6% (rys. 6). Można zatem uznać, że od maja 2005 r. był zapewniony niezakłócony proces naturalnego stygnięcia miejsca pożaru endogenicznego z dnia 20.07.2004 r. zaistniałego w środowisku ściany 10d.

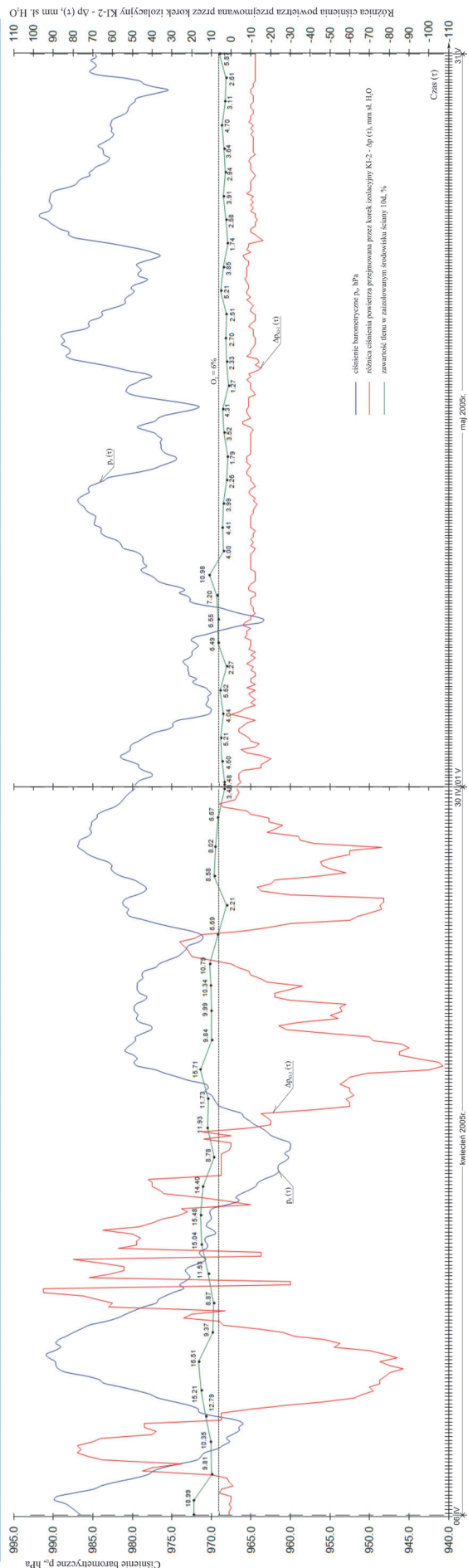
Dodać należy, iż idea proponowanego wcześniej sposobu zmniejszania możliwości przenikania powietrza (tlenu) do określonych stref zrobowych o dużym zagrożeniu pożarem endogenicznym, oparta na tzw. upuście, została efektywnie wykorzystana w późniejszym okresie do minimalizacji zagrożenia pożarem endogenicznym w środowisku likwidowanej ściany 9d w pokł.510/L [16].

## 5. Podsumowanie i uwagi dodatkowe

W pracy przedstawiono i oceniono stosowane dotychczas w podziemnym górnictwie węgla kamiennego sposoby eliminowania niepożądanego w kopalniach zjawiska nazywanego oddychaniem zrobów, wywoływanego zmianami ciśnienia atmosferycznego. Wskazano na celowość dążenia do wyeliminowania (ograniczenia) wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na to zjawisko, powodujące określone zagrożenia, zwłaszcza pożarowe i gazowe (metanowe) od zrobów. Celowość ta wynika z obserwowanej obecnie większej intensywności zjawiska „oddychania zrobów”, co jest skutkiem prowadzenia robót górniczych coraz częściej w sąsiedztwie dużych otamowanych przestrzeni zrobowych (całe kompleksy zrobowe obejmujące niejednokrotnie kilka wybranych wcześniej pokładów). Podano też przydatny dla praktyki opis oddziaływania zmian ciśnienia atmosferycznego na tendencje migracji gazów przez przestrzenie otamowane – wnikanie powietrza kopalnianego do otamowanych przestrzeni zrobowych podczas zwyzek oraz przenikanie gazów zrobowych z takich przestrzeni do środowiska czynnych wyrobisk górniczych pod wpływem zniżek ciśnienia atmosferycznego. Opis ten w niezbędnym zakresie powiązано jakościowo ze stanem pola potencjału aerodynamicznego, istniejącym w otoczeniu przestrzeni otamowanej. Z kolei przedstawiono praktyczne możliwości przeciwdziałania wymienionym zagrożeniom powodowanym zmianami ciśnienia atmosferycznego, oczywiście poprzez odpowiednie kształtowanie pola potencjału aerodynamicznego w określonych charakterystycznych rejonach robót, sąsiadujących z otamowanymi przestrzeniami zrobowymi, wyrobiskowymi lub całymi kompleksami wyrobiskowo-zrobowymi. Wskazano przy tym na konieczność odpowiedniego kształtowania rozkładu potencjału aerodynamicznego wokół określonych przestrzeni zrobowych, celem zapewnienia w nich szybkiej, skutecznej i racjonalnej ekonomicznie inertyzacji atmosfery dla prewencji zagrożenia pożarem endogenicznym.

Zaproponowana w pracy koncepcja – bazująca na odpowiednim kształtowaniu pola potencjału aerodynamicznego w określonych częściach kopalnianej sieci wentylacyjnej, dla przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym i gazowym (metanowym), wywoływanym zmianami ciśnienia powietrza atmosferycznego – została wdrożona w kilku kopalniach węgla, zwłaszcza Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. Przedstawiono charakterystyczne trzy przykłady zastosowania przedmiotowej koncepcji, przy czym wykorzystano ją także dla celów prewencji zagrożenia pożarowego i gazowego od zrobów w rejonie ściany 8b-S w pokł.510 w polu S KWK „Murcki-Staszic” Ruch „Staszic” i zagrożenia pożarem endogenicznym podczas likwidacji ściany 9d w pokł.510 w partii „L” KWK „Wujek” Ruch „Śląsk”.

Obecnie w kopalniach KHW S.A. coraz częściej zachodzi potrzeba prowadzenia robót przygotowawczych i eksploatacyjnych w sąsiedztwie rozległych otamowanych kompleksów wyrobiskowo-zrobowych obejmujących na ogół zwałowe pokł.510 (jego warstwy przystropowej) lub też połączone zroby kilku innych pokładów siodłowych. Należy sądzić, iż analogiczna sytuacja dotyczy także znacznej liczby pozostałych polskich kopalń węgla kamiennego. W związku z tym można się spodziewać, że nasilać się w nich będą zagrożenia aerologiczne od zrobów, powodowane zmianami ciśnienia atmosferycznego. Zważywszy na postępujący wzrost głębokości prowadzonych robót górniczych, dla rejonów tych robót winno być każdorazowo wyznaczane, aktualizowane i właściwie kształtowane pole potencjału aerodynamicznego, oczywiście z uwzględnieniem przestrzeni zrobowych istniejących w danym rejonie. Dla umożliwienia ujednoclenia,



Rys. 6. Zmiany w czasie  $\tau$  ciśnienia atmosferycznego  $p_0$  i różnicy ciśnienia  $\Delta p$  przyjmowanej przez korek izolacyjny K1-2 w Chodniku badawczym 2/pokl.507 związanym ze środowiskiem zaizolowanej ściany 10d w pokl.510 partii „L” KWK „Wujek” Ruch „Śląsk”  
 Fig. 6. Changes over time  $\tau$  of atmospheric pressure  $p_0$  and the difference of pressures  $\Delta p$  taken over by isolating blockage K1-2 in the Exploratory Drift 2/seam 507 associated with environment of isolated longwall 10d in 510 seam of the area „L” in KWK „Wujek” Ruch „Śląsk”

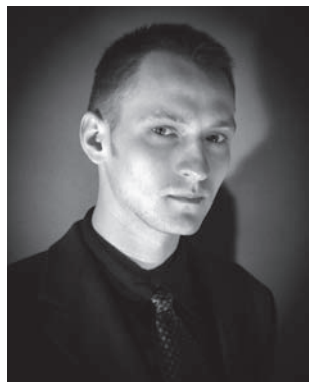
systemowego i racjonalnego działania w tym zakresie w aspekcie prewencji spodziewanych zagrożeń aerologicznych, wskazane jest opracowanie odpowiednich wytycznych (instrukcji). W wytycznych takich można by także przedstawić zasady przeprowadzania przybliżonej oceny ilościowej tzw. retencyjnego działania zrobów, mogącego powodować okresowo dodatkowe znaczące dopływy metanu ze zrobów do środowiska ścianowego, a to pod wpływem spadku ciśnienia atmosferycznego lub zmian potencjału aerodynamicznego w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Czynniki te bowiem nie są praktycznie uwzględniane w wykonywanych prognozach metanowości projektowanych wyrobisk, co może prowadzić do błędnych ocen pod kątem zgodności prognozy z późniejszym faktycznym wydzielaniem metanu.

Podany zakres zagadnień obejmujący w ogólności właściwe wyznaczenie i racjonalne kształtowanie w podziemnych kopalniach węgla rozkładu spadków potencjału aerodynamicznego w rejonach prowadzonych robót górniczych i innych (np. likwidacyjnych lub związanych ze spustem wody z zatopionych zrobów), zdaniem autorów, powinien zostać odpowiednio uwzględniony w nowelizowanych obecnie przepisach górniczych – Rozporządzeniu Ministra Gospodarki w sprawie prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.

Literatura

1. Budryk W.: Wentylacja kopalń, cz. 1, Przewietrzanie wyrobisk, PWT, Katowice 1951.
2. Budryk W.: Pożary i wybuchy w kopalniach, cz. 1. Pożary podziemne, Górnictwo, Tom XI, WGH, Katowice 1956.
3. Bystron H.: Methade de rendre une mine impedante des oscillations de la pression d' air, Konferencja Dyrektorów Kopalń Doświadczalnych, Verneuilen Halatte, październik 1958.
4. Bystron H.: Metody manometryczna i barometryczna pomiaru ciśnienia statycznego powietrza wentylacyjnego w wyrobiskach górniczych, „Przeгляд Górnicy” 2000, nr 12.
5. Bystron H., Raczynski A.: Próba opracowania urzędzenia do automatycznego usuwania zmian ciśnienia barometrycznego w polu pożarowym, prace GIG – KD Barbara 1954.
6. Francart W.J., Beiter D.A.: Barometric pressure influence in mine fire sealing, VI Międzynarodowy Kongres Wentylacji Kopalń, Pittsburgh, Maj 1997.
7. Fritzsche C.H.: Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus, t.I, wydanie X. Springer Verlag, Berlin/Gottingen/Heidelberg, 1961.
8. Kajdasz Z., Markefka P., Stefanowicz T.: Zagrożenia aerologiczne wywoławcze w kopalniach głębinyowych zmianami ciśnienia barometrycznego – sposób eliminowania, „Ratownictwo Górnicze” 2002, nr 2.
9. Markefka P., Musiol D., Skwarek H., Stefanowicz T., Sulkowski J.: Ocena działań podjętych przez Kopalnię w rejonie ściany 10d w pokładzie 510/partia L oraz zbadanie pod względem wentylacyjno-pożarowym możliwości dalszej, bezpiecznej eksploatacji pokładu 510 w partii L KWK „Wujek”, dokumentacja SITG, Oddz. Gliwicko-Zabrzeński, sierpień 2005.
10. Markefka P., Wojtyczka A.: Wentylacyjne sposoby likwidacji pól pożarowych w kopalniach węgla, SITG Zarząd Oddziału w Katowicach, materiały szkoleniowe, 1984.
11. Poradnik Górnika, t. 3, Dz.I: Przewietrzanie kopalń, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1974.
12. Przepisy technicznej eksploatacji kopalń węgla, Ministerstwo Górnictwa, Katowice 1951.
13. Przystolik A., Stefanowicz T. i inni: Analiza uwarunkowań wentylacyjno-górnicych w aspekcie prewencji zagrożeń wentylacyjno-

- pożarowego i metanowego w czasie eksploatacji pokładu 510 projektowaną ścianą 8b-S w polu S KWK „Murcki-Staszic” Ruch „Staszic”, ZG SITG, Katowice, sierpień 2011 .
14. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, Dz.U. Nr 139 poz.1169, czerwiec 2002 r.
  15. *Stefanowicz T.*: Schematy potencjalne rejonu pokładu 510 w partii „L” KWK „Wujek” Ruch „Śląsk” i wyniki ich analizy w aspekcie likwidacji ścian 8d i 9d w tym pokładzie, opracowanie Ośrodka Badawczo-Usługowego Wentylacji przy KHW S.A. KWK „Wujek” (OBUW), Katowice, sierpień 2011.
  16. *Strumiński A., Madeja-Strumińska B.*: Zagrożenie gazowo-termiczne związane z wymianą atmosfery zrobowej z czynnymi wyrobiskami górniczymi, XXXI Dni Techniki ROP’ 2005, XXII Seminarium, Zwalczenie Zagrożenia Ciepłego w Kopalniach – Teoria i Praktyka.
- 
-



## Techniczno-organizacyjne aspekty odmetanowania ściany eksploatacyjnej, wpływające na bezpieczeństwo jej ruchu

### Technical and organizational facets of degassing of the exploitation longwall which affect traffic safety

Mgr inż. Paweł Wróblewski<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule przedstawiono problematykę techniczno-organizacyjną w czasie prowadzenia odmetanowania eksploatacyjnego pokładów węgla przy zastosowaniu trzech sposobów odmetanowania dla ścian prowadzonych od pola w układzie przewietrzania na „U”. Omówiono aspekty techniczno-organizacyjne oraz bezpieczeństwa prowadzenia ruchu w kontekście czynników, takich jak: kolizyjność prac związanych z odmetanowaniem i prowadzeniem ściany eksploatacyjnej, efektywność odmetanowania oraz wpływ czynnika ludzkiego. Przedstawiono korzyści oraz problemy związane ze stosowaniem danej technologii odmetanowania. Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano, że prowadzenie ściany wraz z zastosowaną technologią odmetanowania powinno stanowić jednolity system organizacyjny, jak również wskazano metodę odmetanowania, która jest najkorzystniejsza.

**Abstract:** This paper presents the technical and organizational issue in conducting the process of degassing of the coal beds by use of three methods for longwalls driven from the field in weathering system “U”. It describes the technical and organizational facets and safety of traffic in terms of parameters such as collision of works connected with degassing and driving the exploitation wall, efficiency of degassing and the influence of human factor. Benefits and problems connected with the application of particular degassing technology were presented. The analysis performed shows that driving a wall along with the applied degassing technology should be a uniform organizational system as well as recommends a degassing method which is the most beneficial for the process.

#### Słowa kluczowe:

odmetanowanie, zagrożenie metanowe, bezpieczeństwo i organizacja pracy

#### Key words:

degassing, methane hazard, safety and organization of work

## 1. Wprowadzenie

Wiele procesów zachodzących w górnictwie węgla kamiennego w Polsce od końca XX wieku przyczyniło się do metanowości rejonów ścian eksploatacyjnych. Ilość wydzielonego metanu odniesiona do tony wydobytego węgla wzrosła od 5,5 m<sup>3</sup> w 1996 r. do 10,45 m<sup>3</sup> w 2012 r. – wzrost 89%[3]. Ponadto, wciąż postępujący proces zwiększania koncentracji wydobywania oraz konieczność sięgania do złóż węgla zalegających niżej, prowadzić będzie w najbliższym czasie do dalszych wzrostów wydzielania się metanu. Szacuje się, że roczna metanowość bezwzględna kopalń Kompani Węglowej S.A. 342 mln m<sup>3</sup> w 2011 r. wzrosła do 840 mln m<sup>3</sup> w 2017 r. [6]. Dalsze wzrosty ilości wydzielonego metanu, bez podwyższenia skuteczności stosowanego odmetanowania, wpłynęły niekorzystnie na bezpieczeństwo pracy zatrudnionej załogi oraz będzie rzutować negatywnie na środowisko, przyczyniając się do intensyfikacji efektu cieplarnianego.

Spadek gazoprzepuszczalności pokładów węgla wraz z głębokością ich zalegania, doprowadził w kopalniach GZW prawie do zaniechania prowadzenia odmetanowania wyprzedzającego, wymuszając jednocześnie konieczność stosowania odmetanowania na etapie eksploatacji pokładu [4]. Skutkiem

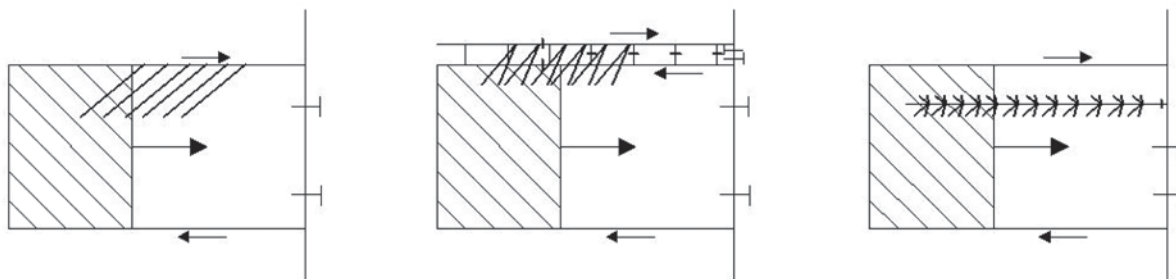
takiego stanu rzeczy jest konieczność współdzielenia miejsc wykonywanej pracy oraz środków transportu pomiędzy załogę ściany a załogę wykonującą prace związane z odmetanowaniem. To z kolei rodzi szereg problemów techniczno-organizacyjnych, które mają wpływ na bezpieczeństwo ruchu i postępowanie prowadzonej ściany.

W świetle przedstawionych faktów, szczególnego znaczenia nabiera odpowiedni dobór technologii odmetanowania, tak by dla danych warunkach górniczo-geologicznych, wentylacyjnych oraz organizacyjnych, zastosowany układ odmetanowania, zapewniał uzyskanie założonych wartości wydobywania dobowego, gwarantując jednocześnie bezpieczne i efektywne prowadzenie robót.

W artykule zostały omówione trzy sposoby odmetanowania eksploatacyjnego dla ścian prowadzonych od pola i przewietrzanych w układzie na „U” (rys. 1).

Efektywność odmetanowania ściany prowadzonej na „U” od pola (rys. 1a) szacuje się maksymalnie do 30%. W przypadku ścian prowadzonych z dwoma chodnikami wentylacyjnymi, efektywność może sięgać do 40%. Drenaż za pomocą chodnika drenażowego w pokładzie nadległym, zapewnia efektywność odmetanowania maksymalnie sięgającą 80%[1]. Poziom efektywności prowadzonego odmetanowania, może nawet przyjmować wartości mniejsze od wcześniej przedstawionych i w dużej mierze zależy od warunków górniczo-geologicznych oraz wentylacyjnych[1].

<sup>\*)</sup> Kompania Węglowa S.A. Oddział KWK „Sośnica - Makoszowy”



Rys 1. Sposoby odmetanowania ścian eksploatacyjnych

Fig. 1. Methods of degassing: a) longwall driven in "U" from the field – classic drainage b) longwall driven from the field with two air-headings so called short "Y" c) degassing by use of drainage heading

W artykule położono nacisk na omówienie wad i zalet stosowanych sposobów odmetanowania w ujęciu relacji techniczno-organizacyjnych, które zachodzą pomiędzy robotami prowadzonymi w celu ujęcia metanu a robotami prowadzonymi w ścianie. Analizie poddano czynniki takie jak: współdzielenie transportu, wzajemna organizacja prac, konieczność pracy załogi wiertniczej podczas ruchu ściany i w strefach szczególnego zagrożenia tąpnięciami, efektywność odmetanowania oraz wpływ czynnika ludzkiego.

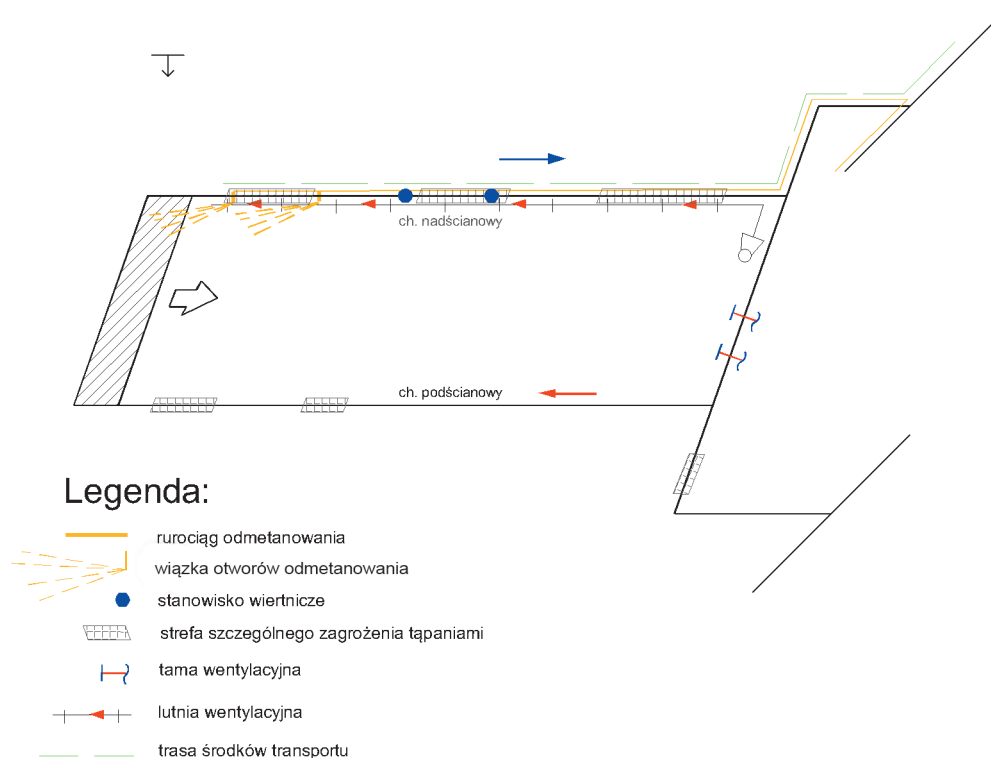
## 2. Porównanie stosowanych technologii odmetanowania w aspektach techniczno-organizacyjnym oraz bezpieczeństwa prowadzenia ściany eksploatacyjnej

### 2.1. Ściana prowadzona na „U” od pola - drenaż klasyczny

Stosowanie technologii odmetanowania z użyciem otworów drenażowych wymusza na osobach nadzorujących prace

poświęcenie szczególnej uwagi efektywnej organizacji robót. Na rys. 2 został przedstawiony przykładowy schemat organizacji robót w czasie biegu ściany, zawierający rozmieszczenie stref szczególnego zagrożenia tąpnięciami oraz przebieg trasy transportu.

Po odwierceniu wiązki otworów drenażowych następuje konieczność transportu wiertnicy oraz sprzętu pomocniczego i zabudowanie wiertnicy na nowym stanowisku. Rurociąg odmetanowania wraz z postępem frontu, musi być sukcesywnie skracany, a zdemontowane odcinki transportuje się z rejonu ściany. W sytuacji, gdy główny transport zaopatrzenia ściany odbywa się chodnikiem nadścianowym jak na rys. 2, dochodzi do wystąpienia współzależności pomiędzy transportami realizowanymi dla ściany a pracami związanymi z odmetanowaniem. Ograniczona pojemność środków transportowych oraz ich awaryjność, w sytuacji, w której następuje konieczność dostarczenia materiałów niezbędnych do ściany, w szczególnych wypadkach może prowadzić do marginalizacji transportów niezbędnych do prowadzenia odmetanowania.



Rys 2. Przykładowy schemat organizacji robót w rejonie ściany dla odmetanowania sposobem klasycznym dla ściany prowadzonej na „U” od pola

Fig. 2. Exemplary organizational scheme of works in the area of longwall for degassing by use of classical method for "U"-driven wall from the field



Przepisy[5] określają, że w zależności od rodzaju stosowanych środków transportowych, możliwość prowadzenia transportu i wykonywania odwiertów w jednym czasie może być ograniczona lub niemożliwa.

„§ 539. Roboty na drogach przewozowych mogą być wykonywane tylko po zabezpieczeniu i oznakowaniu miejsca pracy oraz uzyskaniu zgody dysponenta.

§ 543. Osoba dozoru ruchu odpowiedzialna za transport uzgadnia warunki planowanego transportu z osobami dozoru ruchu oddziałów, przez których rejony transport będzie prowadzony, lub z dysponentem ruchu przewozu lokomotywowego.

§ 550. 1. W wyrobiskach, w których jest prowadzony transport linowy, niedozwolone jest przebywanie ludzi.

2. Dopuszcza się przebywanie w wyrobiskach, o których mowa w ust. 1, ludzi niezwiązanych z transportem, jeżeli całkowicie wstrzymany jest ruch i zabezpieczono stację zgodnie z wymaganiami określonymi w § 549 ust. 2.”[5]

Mając na uwadze, że w praktyce, transporty do ścian prowadzone są bez przerw, powyższe aspekty stanowią poważne wyzwanie organizacyjne i powinny być uwzględniane już na etapie projektowania ściany, na przykład wyznaczając osobne zmiany transportowe i wiertnicze.

W zależności od gabarytów chodnika, problem może stanowić również usytuowanie wiertnicy, tak by nie kolidowała z prowadzonym transportem. Rozwiązaniem tego problemu jest prowadzenie odwiertów z przygotowanych wcześniej wnęk wiertniczych w ociosie chodnika. Jednakże, taki sposób wymaga poniesienia dodatkowych nakładów na etapie wykonawstwa robót przygotowawczych.

W przypadku wzrostu zagrożenia wstrząsami górotworu, w chodnikach wyznacza się strefy szczególnego zagrożenia tąpnięciami. Przepisy[5] wymuszają ograniczenie liczby znajdujących się w strefie osób oraz prowadzenie robót. W ekstremalnym przypadku, w którym maksymalna liczba znajdujących się w strefie osób będzie ograniczona do kilku, a równocześnie będą prowadzone w niej inne prace oraz zajdzie konieczność przejścia przez strefę załogi, ciągłość wykonywanych robót może zostać skutecznie ograniczona.

„4.1.11.2. Dla stref, o których mowa w pkt 4.1.11, powinny być ustalone dodatkowe środki zapobiegające tąpnięciom i ochrony załogi przed ich skutkami, z uwzględnieniem:

1) maksymalnego ograniczenia równoczesnego wykonywania różnych robót,

2) ograniczenia do niezbędnego minimum przebywania załogi w częściach wyrobisk objętych strefami, o których mowa w pkt 4.1.11, a w przypadkach koniecznych wprowadzenie zakazu ruchu załogi,

3) ograniczenia lokalizowania maszyn i urządzeń, wykonywania wnęk i komór oraz składowania materiałów,

4) stosowania obudowy o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych lub odpowiednie wzmocnienie obudowy istniejącej,

5) konieczności wprowadzania telewizji przemysłowej lub innych metod dla wyeliminowania stałych stanowisk pracy,

6) możliwości prowadzenia chodników wraz z postępowaniem ściany i utrzymywania ich w zrobach za frontem ściany.”[5]

Technologia wiercenia odwiertów wymaga zastosowania płuczki. Zastosowanie zamkniętego układu płuczki ogranicza możliwości wypływu wody do wyrobiska, jednakże w przypadku powstania nieszczelności, lub też w czasie rozkręcania żerdzi wiertniczych, istnieje możliwość ujścia wody, co z kolei zwiększa niebezpieczeństwo poruszania się załogi oraz prowadzenie transportu ręcznego. Jest to o tyle istotne, że większość otworów wierci się w sąsiedztwie skrzyżowania chodnika przyścianowego oraz rozcinki ścianowej, gdzie równocześnie prowadzone są prace związane z transportem materiałów do ściany, rabunkiem chodnika, utrzymaniem

przegrody wentylacyjnej wraz z pomocniczym sprzętem wentylacyjnym oraz zabudową strefy stojaków podporowych.

Problem stanowi nadzór nad prawidłowością wykonania otworów – może bowiem dochodzić do sytuacji, w których długość wykonanego otworu jest mniejsza niż założona w projekcie. Trudne warunki geologiczne, awarie sprzętu lub też zaniedbania, przy braku odpowiedniego nadzoru mogą prowadzić do fałszowania parametrów otworów drenażowych. Takie działania z kolei uniemożliwiają wyciągnięcie prawidłowych wniosków przez zespół, który na podstawie wyników ujęć metanu z otworów, dobiera długości oraz kąty nachylenia kolejnych otworów.

Istotną zaletą drenażu klasycznego jest możliwość korygowania parametrów otworów na bieżąco wraz z postępowaniem frontu eksploatacyjnego, gdyż ze względu na skomplikowaną budowę górotworu, brak jego odpowiedniego rozpoznania oraz niedoskonałości modeli obliczeniowych, na etapie prowadzenia odmetanowania mogą wystąpić rozbieżności w stosunku do założeń projektowych. Kolejną zaletą jest możliwość prowadzenia odmetanowania w miejscu, w którym będzie miało to realny wpływ na poziom zagrożenia metanowego - dzięki temu można ograniczyć ilość prowadzonych robót.

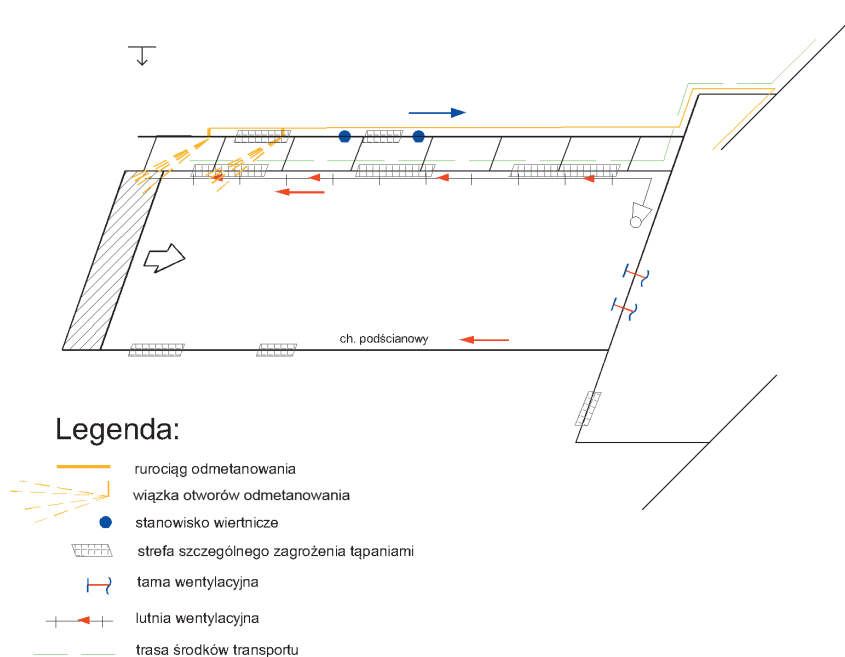
Podsumowując zalety: na podstawie prognozy metanowości określa się strefy, w których wymagane jest zastosowanie odmetanowania, tak aby wartości metanowości wentylacyjnej nie przekraczały wartości kryterialnych[2]. Klasyczna metoda otworów drenażowych umożliwia ujęcie metanu wyłącznie z tych stref, ograniczając ilość prac do minimum. Ewentualne rozbieżności z warunkami rzeczywistymi, można korygować w czasie biegu ściany.

## 2.2. Ściana prowadzona od pola z dwoma chodnikami wentylacyjnymi, tzw. krótkie „Y”

W porównaniu do drenażu klasycznego, przy stosowaniu krótkiego „Y” do prac koniecznych w celu wdrożenia odmetanowania należy dodać wykonanie: dodatkowego chodnika, przecinek między chodnikami nad ścianą, tam oddzielających w przecinkach, oraz przewidzieć utrzymanie i późniejszą likwidację chodników.

Zastosowanie podwójnego chodnika wentylacyjnego, jak na rys. 3, pozwala na podział realizowanych zadań – odmetanowanie oraz transporty materiałów dla ściany mogą być prowadzone w osobnych chodnikach. Efektem takiego rozwiązania jest możliwość jednoczesnego prowadzenia transportów dla ściany oraz prowadzenia robót wiertniczych dla odmetanowania. W tej metodzie nie występuje również trudność z zabudową wiertnicy na trasie transportu do ściany. W związku z przewietrzaniem prądem powietrza świeżego chodnika nadścianowego, do zalet można zaliczyć również mniejsze narażenie załogi ściany na wpływ czynników szkodliwych dla zdrowia, poprawę warunków klimatycznych, wzrost bezpieczeństwa metanowego w rejonie skrzyżowania rozcinki ścianowej i chodnika nadścianowego.

Tak jak w przypadku drenażu klasycznego, do trudności należy zaliczyć nadzór nad prawidłowością wykonania otworów, konieczność pracy w strefach szczególnego zagrożenia tąpnięciami oraz możliwość wypływu wody do chodnika. Jednakże w przypadku dwóch ostatnich wad, ze względu na podział zadań realizowanych w chodnikach oraz liczbę zatrudnionej załogi, mają one mniejsze znaczenie niż w przypadku drenażu klasycznego. Do dodatkowych trudności można zaliczyć również konieczność utrzymywania filarów między chodnikami, co stwarza zagrożenie pożarami szczelinowymi, a obecność dwóch chodników nadścianowych wymaga zwiększenia środków na roboty przygotowawcze oraz późniejsze utrzymanie i likwidację chodników.



**Rys 3. Przykładowy schemat organizacji robót w rejonie ściany dla odmetanowania ściany przewietrzanej na tzw. „krótkie Y” od pola**

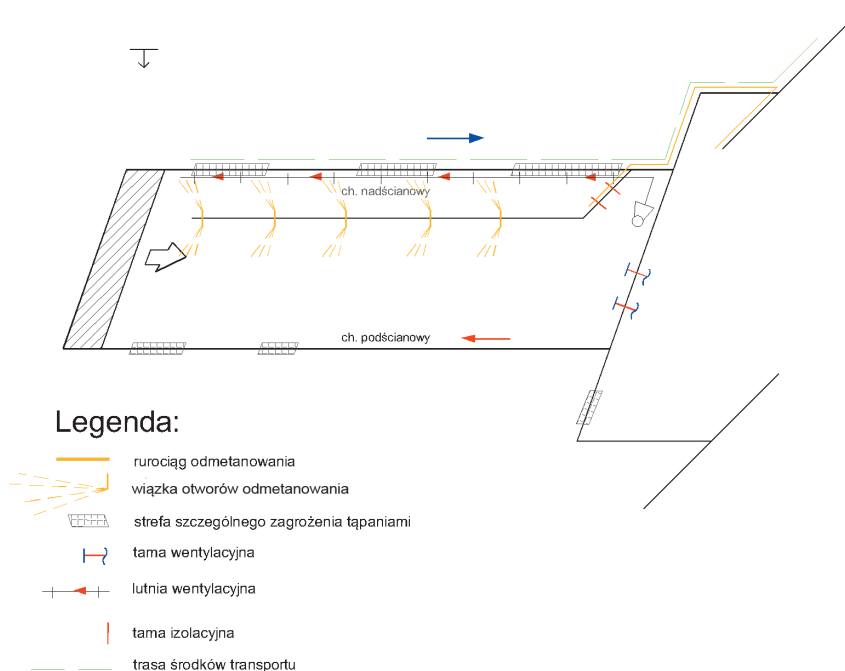
**Fig. 3. Exemplary organizational scheme of works in th area of longwall for degassing by use of “short Y” method in wall driven from the field**

### 2.3. Odmetanowanie za pomocą chodnika drenażowego

Technologia odmetanowania z zastosowaniem chodnika drenażowego jest najprostszą organizacyjnie metodą analizowaną w artykule (rys. 4). W związku z tym, że zatamowany wylot z chodnika znajduje się najczęściej w sąsiedztwie wylotu ze ściany, sieć rurociągów odmetanowania jest krótsza w stosunku do sieci koniecznych przy zastosowaniu otworów drenażowych. Nie ma również potrzeby likwidacji chodnika

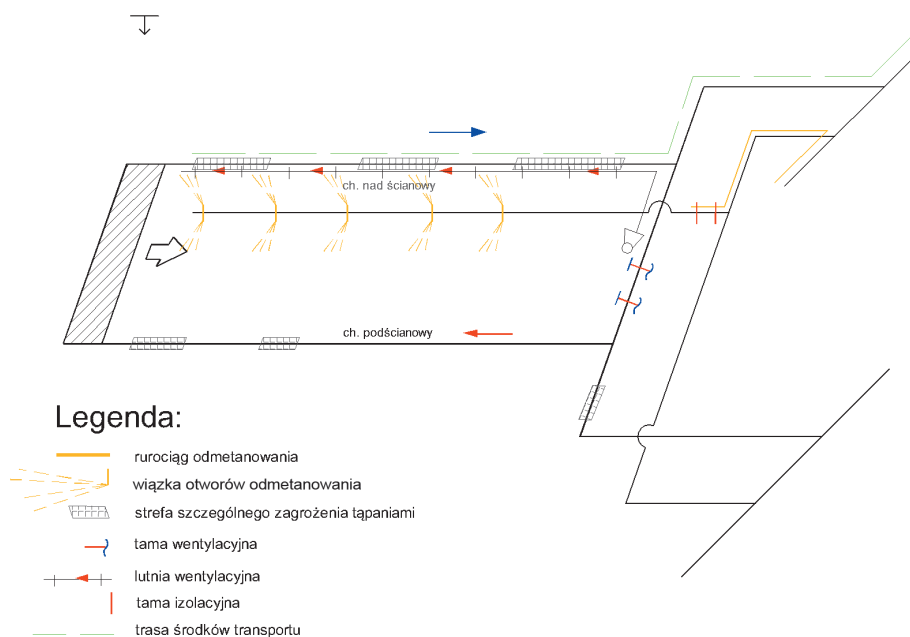
drenażowego wraz z postępem frontu ściany. W czasie ruchu ściany całość robót ogranicza się do jakościowej i ilościowej kontroli mieszaniny metanowo-powietrznej odprowadzanej z chodnika drenażowego.

Trudności związane z współdzieleniem się transportem są ograniczone do minimum. Problem może stanowić konieczność realizacji transportów na etapie prowadzenia robót przygotowawczych, dla których używa się wspólnych tras i środków transportu. Rozwiązaniem w tym wypadku może



**Rys 4. Przykładowy schemat organizacji robót w rejonie ściany dla odmetanowania chodnikiem drenażowym**

**Fig. 4. Exemplary organizational scheme of works in th area of longwall for degassing by use of drainage heading**



**Rys 5. Przykładowy schemat organizacji robót w rejonie ściany dla odmetanowania ściany z chodnikiem drenażowym prowadzonym z istniejącego wcześniej wyrobiska**  
**Fig. 5. Exemplary organizational scheme of works in th area of longwall for degassing a wall with drainage heading driven from the already existing excavation**

być sposób jak na rys. 5, w którym do drążenia chodnika zostało wykorzystane już wcześniej istniejące wyrobisko – w tym przypadku transport dla chodnika drenażowego realizowany jest innym wyrobiskiem oraz nie ma konieczności wykonywania drogiego wyrobiska kamiennego.

Istotną zaletą chodnika drenażowego jest to, że stanowi swego rodzaju rezerwar, który w przypadku wahań ciśnienia powietrza oraz zjawisk tektonicznych w górotworze gromadzi metan[4]. Tym samym, korzystnie wpływa na stabilność wydzielania się metanu do środowiska ściany, co w konsekwencji umożliwia łatwiejsze planowanie robót – nawet chwilowe przekroczenia dopuszczalnych wartości stężenia metanu na czujnikach manometrii powodują wyłączenie prądu w rejonie ściany, co skutkuje przerwaniem prowadzonych prac [5].

Po zatamowaniu chodnika drenażowego oraz rozpoczęciu eksploatacji pokładu, możliwości jego korekty są ograniczone. W przypadku popełnienia błędów projektowych lub wykonawczych, które doprowadziły do braku założonej efektywności, może wystąpić wzrost zagrożenia metanowego w rejonie ściany. Jednakże w takim wypadku, istnieje możliwość zastosowania dodatkowo odmetanowania klasycznego, już na etapie biegu ściany. W opinii autora artykułu, gdyby można było pominąć względy ekonomiczne, mając na uwadze efektywność odmetanowania, kierując się bezpieczeństwem pracy oraz organizacją robót, w pierwszej kolejności powinno się prowadzić chodnik drenażowy, a w razie jego nieskuteczności stosować metodę otworów drenażowych.

### 3. Podsumowanie

Właściwy dobór technologii odmetanowania powinien być poprzedzony szczegółową analizą warunków górniczo-geologicznych, wentylacyjnych oraz ekonomicznych. Efektywność odmetanowania powinna być dobierana, tak by zapewniać bezpieczne prowadzenie ściany dla założonych wielkości

wydobycia dobowego. Przy doborze sposobu odmetanowania dla ściany nie mniej istotne są czynniki związane z organizacją pracy. Systemy, które w mniejszym stopniu zmuszają do współdzielenia się środkami transportu oraz miejscami wykonywanej pracy będą bezpieczniejsze i mniej zawodne.

Pomimo faktu, że na etapie projektowym, ustalając wartość metanowości kryterialnej, zapewnia się bezpieczeństwo metanowe dla prowadzenia eksploatacji, ideałem byłoby dążenie do wprowadzania jak najprostszego organizacyjnie i efektywnego odmetanowania. Pomimo tego, że zachowanie wartości metanowości wentylacyjnej, nieprzekraczającej wartości kryterialnej, wraz z odpowiednim doborem pomocniczych urządzeń wentylacyjnych, gwarantuje bezpieczne prowadzenie eksploatacji, to istnieje możliwość wystąpienia sytuacji awaryjnych, np. wstrząsów, zawężenia przekrojów chodników przyścianowych, zniżki barometrycznej, awarii pomocniczego sprzętu wentylacyjnego. Wówczas, mogą zostać przekroczone dopuszczalne wartości stężeń metanu. W obecnych warunkach, w których prowadzi się tylko 2-3 ściany jednocześnie - każde zatrzymanie ściany rzutuje w dużo większym stopniu na ogólny wynik finansowy kopalni niż miało to miejsce w czasie prowadzenia wielu ścian o mniejszym wydobywaniu. Dlatego też, decydującą rolę może odegrać czynnik ludzki – wysokie normy, chęć wyróżnienia się na tle innych pracowników dzięki większej ilości wykonanej pracy oraz zła sytuacja ekonomiczna kopalni, może prowadzić do prób fałszowania wyników pomiarowych. W przypadku nieplanowanych postojów ściany, generowany jest wysoki poziom stresu u osób odpowiedzialnych za realizację założonych zadań, co z kolei może przyczynić się do łamania przepisów bezpieczeństwa pracy. Dlatego w opinii autora artykułu, działania powinny być skierowane na likwidację zagrożenia u źródła - w tym przypadku maksymalne usunięcie metanu z górotworu w rejonie ściany, zapewnienie łatwej organizacji pracy - tak by bezpieczeństwo w jak największym stopniu uniezależnić od czynnika ludzkiego.

Podsumowując:

- Ściana eksploatacyjna wraz z zastosowanym odmetanowaniem powinna być traktowana jako jeden system organizacyjny, który zapewnia uzyskanie założonych wartości wydobywania dobowego przy zachowaniu bezpieczeństwa jej prowadzenia.
- Metoda wiercenia otworów drenażowych cechuje się relatywnie niższą możliwością do uzyskania efektywności odmetanowania, w stosunku do metody drenażu chodnikiem nadległym oraz dużą złożonością organizacyjną w czasie biegu ściany. Zaletą metody jest możliwość korekty parametrów otworów drenażowych podczas biegu ściany.
- Do głównych problemów organizacyjnych, które mogą zaistnieć w czasie wiercenia otworów drenażowych należą: współdzielenie się środkami transportu przeznaczonych dla ściany i odmetanowania, praca obsługi wiertni na trasie transportu, przebywanie i praca w strefach szczególnego zagrożenia tąpnięciami (o ile występują), trudna kontrola prawidłowości wykonania otworów drenażowych.
- Metoda wykorzystująca chodnik drenażowy w określonych warunkach cechuje się dużą efektywnością odmetanowania, a zakres wymaganych prac w czasie biegu ściany jest ograniczony.
- Przy doborze metody odmetanowania, kierując się względami bezpieczeństwa, należy brać pod uwagę czynniki

ludzki. Bardziej efektywne metody odmetanowania w większym stopniu uniezależniają bezpieczeństwo prowadzonej eksploatacji od działań człowieka oraz umożliwiają łatwiejszą organizację robót.

### Literatura

1. Krause E., Łukowicz K.: Określenie obszarów efektywnego odmetanowania środowiska ścian dla stosowanych sposobów przewietrzania. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” 2013 r, nr 6.
2. Krause E., Łukowicz K.: Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego. Instrukcja nr 17. GIG, Katowice 2004.
3. Krause E., Sebastian Z.: Raport o stanie zagrożenia metanowego. GiG, Katowice 2013.
4. Krause E.: Technologie ujmowania metanu w polskich kopalniach węgla kamiennego, doświadczenia oraz perspektywy. Międzynarodowa sesja nt. New Trends in Coal Mine Methane Recovery and Utilization. XXI Światowy Kongres Górniczy. Kraków-Katowice, 7-11 października 2008 r.
5. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.
6. <http://www.nettg.pl/news/106406/chlodniej-z-metanowa-lodowka>

# Analiza rezultatów testów DST na złożu gazu ziemnego Lachowice – Stryszawa w Karpatach Zachodnich

## Analysis of DST test results in Lachowice-Stryszawa gas field in the Western Carpathians



*Prof. dr hab. inż. Stanisław Dubiel\**



*Dr. inż. Mirosław Rzycznik\**

**Treść:** W publikacji przedstawiono technikę i technologię testów DST złoża gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa próbnikiem produkcji firmy Halliburton typu Ful-Flo. Podano charakterystykę techniczną tego próbnika oraz zasady kompletowania jego zestawu w zależności od planowanych rozwiązań technologicznych opróbowania i występujących warunków złożowych. Przeanalizowano stosowane w górnictwie naftowym rozwiązania technologiczne oraz rezultaty testów DST gazonośnych utworów dewonu na złożu Lachowice-Stryszawa w obszarze Karpat Zachodnich. Rezultaty tych testów interpretowano metodą Hornera oraz nowoczesną metodą log-log. Zestawiono tabelarycznie i szczegółowo omówiono wyniki interpretacji oraz wyniki obliczeń parametrów złożowych wszystkich udanych technicznie testów DST utworów dewonu, różniących się technologią, ze szczególnym uwzględnieniem przydatności uzyskanych informacji w procesie poszukiwań złóż węglowodorów i oceny ich produktywności.

**Abstract:** This paper presents the technique and technology of DST tests made in Lachowice-Stryszawa gas field with the use of Halliburton Ful-Flo equipment. The technical specification of the tester and way in which it can be composed, depending on the planned technological tests and reservoir conditions are given. Technological solutions applied in oil mining and DST results for gas-bearing Devonian strata in the Lachowice-Stryszawa gas field in the Western Carpathians are presented in this paper. The test results were interpreted with Horner method and modern log-log method. The results of the interpretation and calculations of all technically successful DST tests of Devonian strata performed in different technologies were tabularized and discussed in detail taking into account the usability of information in hydrocarbons prospecting and evaluation of their productivity.

### **Słowa kluczowe:**

*poszukiwania naftowe; Karpaty Zachodnie; złożo gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa; próbniki typu Ful-Flo; rezultaty testów DST*

### **Key words:**

*oil prospecting, Western Carpathians, Lachowice-Stryszawa gas field, Ful-Flo drill stem testers, DST test results*

## **1. Wprowadzenie**

Biorąc pod uwagę potrzeby energetyczne kraju, wskazany jest m.in. powrót do poszukiwań naftowych w obszarach występowania konwencjonalnych złóż gazu ziemnego. Do obszarów takich należy zaliczyć Karpaty Zachodnie, w którym, w podłożu osadów miocenu zalegają gazonośne utwory dewonu [1]. Odwiertami L-7 i S- 2K stwierdzono ponad

wszelką wątpliwość występowanie złoża gazu ziemnego o wartości komercyjnej, które dotychczas nie jest eksploatowane [4]. Złoże to występuje na dwóch oddzielnych blokach tektonicznych Lachowice i Stryszawa, zalegających na różnych głębokościach. W obydwu blokach tego złoża akumulacja gazu ziemnego występuje w dewońskich skałach węglanowych (wapień, wapień dolomityczny, dolomity) [1,7].

Dużą rolę w odkryciu tych dwóch oddzielnych elementów blokowych złoża gazu ziemnego odegrały pozytywne

\* AGH w Krakowie

rezultaty testów DST uzyskane przy zastosowaniu nowoczesnych próbników złoza firmy Halliburton typu Ful-Flo [4]. Umożliwiają one bowiem stosowanie szerokiego zakresu rozwiązań technologicznych, gdyż charakteryzują się pełną przelotowością całego zestawu, pozwalającą na zapuszczenie przez zestaw narzędzi, przyrządów oraz ładunków perforacyjnych. Próbniki typu Ful-Flo pozwalają na prowadzenie testów wielocyklowych. Stosowane są głównie do testów DST w odwiertach orurowanych, a dzięki zastosowaniu pakera RTTS z hydraulicznymi szczękami, również do wykonywania pomiarów wydajności przepływu płynu złożowego oraz do przeprowadzenia zabiegów intensyfikacji przepływu płynu złożowego [2,5].

Rezultaty testów DST zależą od stosowanej technologii [3,8]. W odwiertach L-7 i S-2K stosowano zróżnicowaną technologię testów DST: testy jednocyklowe (jeden test przepływu i jeden test odbudowy ciśnienia); testy dwucyklowe (dwa testy przepływu i dwa testy odbudowy ciśnienia); testy wielocyklowe połączone z długotrwałym syfonowaniem gazu ziemnego z odwiertu (testy produkcyjne).

W dziesięciu przypadkach jedno- lub dwucyklowych, wykresy ciśnienia zarejestrowane podczas testów DST utworów dewonu autorzy interpretowali metodą Hornera w półlogarytmicznym układzie współrzędnych [6].

W dwóch przypadkach do interpretacji rezultatów testu DST nr 117/94 utworów dewonu autorzy zastosowali metodę log-log, która polega na porównywaniu rzeczywistych i modelowych wykresów przyrostów ciśnienia oraz wykresów pierwszej pochodnej przyrostu ciśnienia w funkcji czasu, w układzie podwójnie logarytmicznym. Wykresy modelowe (diagnostyczne) opracowane zostały z uwzględnieniem modelu złoza, modelu udostępnienia złoza oraz modelu granicy złoza według programu „Saphir 202B” [9,10,11].

Ostatnio rezultaty testów DST wykorzystuje się do diagnozowania dopływu wody złożowej do odwiertów wydobywczych gazowych i ropnych [12].

## 2. Technika testów DST

Testy DST na złożu gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa wykonywano przy użyciu zestawu rurowego próbnika złoza firmy Halliburton typu Ful-Flo, zapuszczanego do odwiertu na kolumnie rur płuczkowych. Dla przykładu, podczas kompletowania zestawu próbnika typu Ful-Flo pod kątem planowanej technologii testu DST nr 133/94 utworów dewonu w odwiercie L-7, uwzględniono także warunki odwiertowe (zapięcie próbnika w rurach okładzinowych nad korkiem cementowym (rys.1), w interwale perforacji okładziny odwiertu) oraz warunki złożowe (spodziewany przepływ gazu ziemnego, wysokie ciśnienie złożowe i temperatura ) [4].

Dobrano następujące elementy wyposażenia powierzchniowego i wglębnego zestawu próbnikowego (rys.1):

**Głowica obrotowa.** Służy do przenoszenia obrotów pod obciążeniem na kolumnę próbnikową podczas zapinania pakera typu RTTS oraz otwierania zaworu cyrkulacyjnego typu RTTS.

**Manifold podłogowy.** Przeznaczony jest do testowania przepływu płynu złożowego. Składa się z trzech linii przepływowych, przy czym dwie z nich wyposażone są w zwężki pomiarowe, a trzecia posiada pełny przelot.

**Seperator** służy do rozdziału płynów złożowych (gaz, ropa, gazolina, woda). Wyposażony jest w pochodnię do spalania gazu ziemnego.

**Rury płuczkowe.** W tym przypadku do zapuszczenia zestawu próbnikowego do odwiertu użyto rur płuczkowych

o średnicy 3 1/2". Równocześnie rury te służą do odprowadzania płynu złożowego do powierzchniowego wyposażenia odwiertu. Kolumnę płuczkową podczas zapuszczania do odwiertu częściowo wypełniono wodą przebitkową o wysokości słupa około 450 m.

**Obciążniki.** W celu bezawaryjnego sterowania (ściskania i rozciągania) elementami wglębnego zestawu próbnikowego dobrano obciążniki o średnicy 3 1/2", które umieszczono nad i pod łącznikiem teleskopowym.

**Uniwersalny zawór główny typu kulowego.** Umożliwia podział procesu testowania DST na testy przepływu i testy odbudowy ciśnienia, w przypadku testu wielocyklowego. Sterowany jest naciskiem osiowym (otwarcie pod wpływem nacisku, zamknięcie podjęciu tego nacisku). Zawór ten ma wewnętrzną kanał przelotowy o średnicy  $D_w = 58$  mm.

**Oslona rejestrujących ciśnieniomierzy wglębnych i innych przyrządów pomiarowych** (np. termometrów) posłużyła w tym przypadku do podwieszenia ciśnieniomierza mechanicznego typu KPG firmy Kuster oraz typu elektronicznego firmy Panex. Oslania ona przyrządy pomiarowe przed erozyjnym niszczeniem płynu złożowego przepływającego wnętrzem kolumny próbnikowej. W analizowanym przypadku jedną taką osłonę umieszczono w przestrzeni nadpakerowej, a drugą w przestrzeni podpakerowej.

**Łącznik teleskopowy.** Umożliwia skuteczne sterowanie uniwersalnym zaworem głównym i zabezpiecza przed jego niezamierzonym otwarciem w interwałach odwiertu o dużej krzywiznie, a także przed niezamierzonym odpięciem pakera typu RTTS. Ma on wolny przesuw (skok jałowy) o długości 1,5 m. W rozpatrywanym przypadku użyto jeden taki łącznik, ale aby wydłużyć skok jałowy, można stosować dwa lub więcej takich łączników.

**Nożyce hydrauliczne** typu Big John służą jako narzędzie ratunkowe w przypadku przychwycenia w odwiercie kolumny próbnikowej. Siła udaru przenoszonego na kolumnę próbnikową zależy od siły jej napięcia. Opóźniacz zamontowany w nożycach hydraulicznych nie pozwala na ich przedwczesne lub przypadkowe uruchomienie.

**Łącznik bezpieczeństwa typu RTTS** służy do rozłączania się z uszczelniaczem typu RTTS w przypadku jego przychwycenia i braku możliwości jego odpięcia. Konstrukcja łącznika uniemożliwia jego przypadkowe rozłączenie w czasie operacji zapuszczania i wyciągania zestawu próbnika Ful-Flo z odwiertu.

**Paker rurowy typu RTTS** (od ang. *Retrievable Test-Treat-Squeeze*) w górnej części korpusu posiada szczęki o działaniu hydraulicznym, uruchamiane wówczas, jeżeli ciśnienie w przestrzeni pod uszczelniaczem przewyższa ciśnienie słupa płuczki w przestrzeni pierścieniowej nad uszczelniaczem. Dzięki tej właściwości uszczelniacza podczas opróbowania można wykonać płukanie skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej roztworami substancji powierzchniowo-czynnych lub ich kwasowanie. Uszczelniacz ten w połączeniu z zaworem cyrkulacyjnym typu RTTS oraz łącznikiem bezpieczeństwa typu RTTS stanowi standardowy zestaw do wszelkiego rodzaju zabiegów w odwiercie, kiedy ciśnienie pod uszczelniaczem przewyższa ciśnienie hydrauliczne słupa płuczki w odwiercie.

W tym przypadku pod pakerem RTTS umieszczono jeden kawałek rury płuczkowej o średnicy 3 1/2", zakończony przewodnikiem służącym do zapuszczania przyrządu pomiarowego na linie. Uszczelniające pierścienie gumowe tego pakera dobrano z uwzględnieniem średnicy wewnętrznej rur okładzinowych oraz temperatury złożowej.

### 3. Technologia testów DST

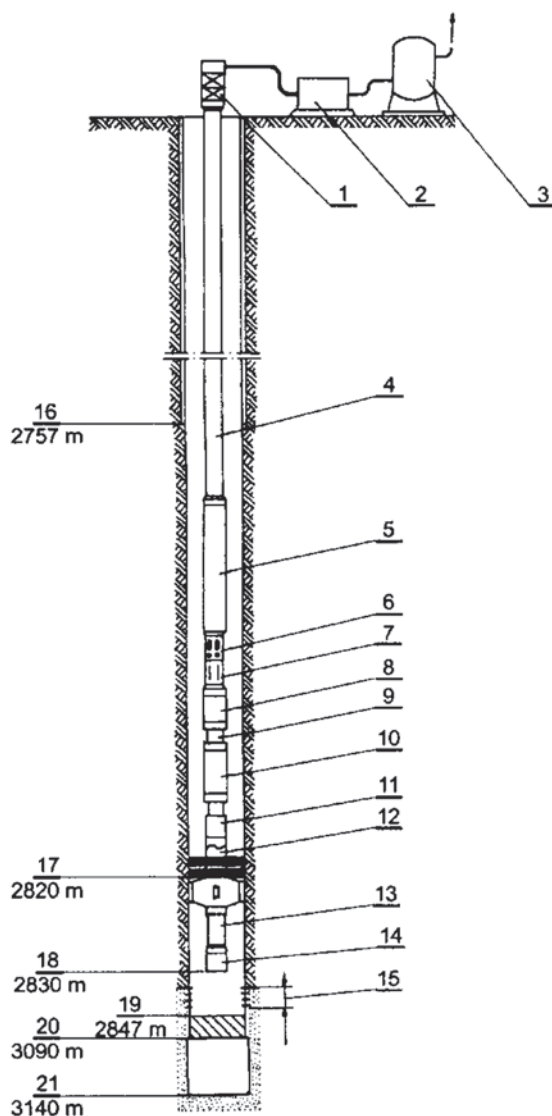
Zestaw próbnikowy typu Ful-Flo użyty do testu DST węglanowych skał zbiornikowych dewonu (interwał 2832-2844) w Karpatach Zachodnich, po wcześniejszej perforacji eksploatacyjnej kolumny rur okładzinowych o średnicy nominalnej 7", w odwiercie L-7 (test nr 133/94), umożliwił wykonanie trójcyklowej technologii testu DST wraz z syfonowaniem gazu ziemnego z odwiertu. Odwiert ten orurowany jest techniczną kolumną rur okładzinowych o średnicy nominalnej 9 5/8" do głębokości 2757 m, a kolumną eksploatacyjną o średnicy 7" – do głębokości 3090 m. Przed zapięciem zestawu próbnikowego wykonano w dolnej, nieorurowanej części odwiertu korek cementowy w interwale 3090 do 3140 m.

Wartość początkowej depresji ciśnienia ograniczono do 2,49 MPa w wyniku zastosowania w kolumnie próbnikowej słupa przybitki wodnej o wysokości 450 m (tab.1) oraz dławienia na manifoldzie wypływu płynu z kolumny próbnikowej. Podczas pierwszego testu przyływu, trwającego łącznie 74 minuty, przez około 65 minut obserwowano słaby wypływ powietrza z kolumny próbnikowej, a następnie wypływ gazu ziemnego. Podczas pierwszego testu odbudowy trwającego 251 minut, ciśnienie denne wzrosło do wartości 26,74 MPa. Podczas drugiego testu przyływu trwającego 15 minut, obserwowano stałą intensywność wypływu gazu ziemnego z kolumny próbnikowej (tab.1). Po zamknięciu głowicy na wylocie kolumny próbnikowej i upływie około trzech godzin, ciśnienie głowicowe wzrosło do wartości około 8 MPa. Następnie kilkakrotnie syfonowano gaz z odwiertu. Podczas trzeciego testu przyływu, trwającego 1881 minut, występował ciągle wypływ gazu ziemnego, z wydajnością około 14 m<sup>3</sup>/min. (w warunkach dennych), a w czasie drugiego testu odbudowy ciśnienie głowicowe ustabilizowało się przy wartości 26,85 MPa. Podczas wyciągania próbnika, stwierdzono przyływ do kolumny próbnikowej około 720 litrów gazoliny i około 240 litrów solanki (tab. 2).

W odwiertach L-7 i S-2K wykonano łącznie 12 jedno-, dwu- lub wielocyklowych testów DST dewonu zaraz po ich przewierceniu (jeden do kilkunastu dni) w interwałach nieorurowanych lub po dłuższym czasie (ponad 30 dni) w interwale orurowanym i perforowanym (tab.1).

Analizując dane zestawione w tabeli 1 można stwierdzić, że:

- Gęstość płuczki polimerowej stosowanej do dowiercania złoża wahała się w granicach: od 1030 ÷ 1240 kg/m<sup>3</sup>; przy stosunkowo niskim gradiencie ciśnienia złożowego, wynoszącym około 0,0094 MPa/m. Zalecana gęstość płuczki powinna wynosić nie więcej niż 1100 kg/m<sup>3</sup>, uwzględniając przy tym bezpieczeństwo erupcyjne. Zbyt duża gęstość płuczki powoduje bowiem nadmierne uszkodzenie przepuszczalności skał szczelinowo-porowych (wskaźnik S znacznie większy od zera).
- Wysokość słupa przybitki wodnej w większości przypadków dobierana była prawidłowo i wynosiła od 16% do 54% głębokości odwiertu (przy zalecanej wartości dla gazonośnych, węglanowych skał szczelinowo-porowych : 25% do 45%); umożliwiło to autorom określenie strumienia objętości (wydatku) przyływu gazu ziemnego z początkowego odcinka testu przyływu.
- Czas testów przyływu wahał się w bardzo szerokich granicach (4,5 ÷ 7800) min. Warto zauważyć właściwą prawidłowość, że dłuższe czasy przyływu (niekiedy połączone z syfonowaniem odwiertu) stosowano w drugich cyklach testów przyływu, a zwłaszcza w orurowanych interwałach odwiertu L-7.
- Czas testów odbudowy ciśnienia wynosił w granicach 17 ÷ 1086 min; był on w większości przypadków zde-



Rys. 1. Schemat zestawu próbnika firmy Halliburton o średnicy 5" typu Ful-Flo użytego do testu DST (nr 133/94) utworów dewonu w odwiercie L-7: 1 - głowica obrotowa; 2 - manifold podłogowy, 3 - separator; 4, 13 - rury płuczkowe o średnicy 3 1/2"; 5, 8, 10 - obciążniki o średnicy 3 1/2"; 6 - uniwersalny zawór główny typu Ful-Flo; 7, 14, 18 - osłona z przyrządami pomiarowymi 5"; 9 - łącznik teleskopowy, 11 - nożyce hydrauliczne, 12 - łącznik bezpieczeństwa, 15 - odcinek perforacji okładziny odwiertu, 16 - but rur okładzinowych o średnicy 9 5/8", 17 - uszczelniacz typu RTTS, 19 i 20 - odpowiednio strop i spąg korka cementowego, 21 - dno odwiertu

Fig. 1. Scheme of Halliburton Ful-Flo drill stem tester 5" used for DST test (no 133/94) in the Devonian formation in well L-7: 1 - LT swivel; 2 - floor manifold; 3 - separator; 4, 13 - drill pipe 3 1/2" diameter; 5, 8, 10 - drill collars 3 1/2" diameter; 6 - universal master valve Ful-Flo; 7, 14, 18 - running casing of manometers 5"; 9 - slip joint; 11 - hydraulic jar, 12 - safety joint; 15 - perforation; 16 - casing shoe 9 5/8" diameter; 17 - packer RTTS; 19, 20 - top and floor of cement plug; 21 - bottom hole

cydowanie dłuższy od testów przyływu i taka relacja jest właściwa, gdyż umożliwia badanie strefy złożowej o większym promieniu. Ponadto, wykresy długich czaso-

- wo testów odbudowy w drugim cyklu opróbowania można było interpretować metodą log-log, otrzymując ważne informacje o występowaniu granicy złoża.
- Ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy (28,75 ÷ 35,04) MPa w kilku przypadkach było zbyt duże i mogło spowodować głęboką filtrację płuczki wiertniczej w skałę szczelinowo-porową.
  - Naddatek ciśnienia słupa płuczki nad ciśnienie złożowe mieścił się w granicach 1,60 ÷ 8,38 MPa i był w kilku

- przypadkach dość duży, gdyż gradient ciśnienia złożowego jest stosunkowo mały (średnio około 0,0094 MPa/m).
- Początkowa depresja podczas testu DST wahała się w szerokich granicach 2,49 MPa ÷ 16,97 MPa. Należy w tym miejscu zauważyć, że dla skał węglanowych (szczelinowo-porowych) zbyt duża początkowa wartość depresji (większa od 10 MPa) może powodować ograniczenie dopływu płynu złożowego na skutek zwierania się szczelin i mikroszczelin.

**Tabela 1. Zestawienie danych o warunkach technicznych i parametrach technologicznych testów DST w odwiertach L-7 i S-2K**

**Table 1. Summary of data on technical and technological parameters from DST tests in wells L - 7 and S-2K**

Lp.	Nazwa otworu, nr testu	L-7, 39/94	L-7, 44/94	L-7, 53/94	L-7, 62/94	L-7, 70/94	L-7, 78/94	
1	Stratygrafia	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	
2	Opróbowany interwał, m n.o.- nieorurowany; perf.- perforacja rur	2757 – 2815 n.o.	2817 – 2845 n.o.	2757 – 2845 n.o.	2857 – 2887 n.o.	2887 – 2911 n.o.	2910 – 2941 n.o.	
3	Średnica otworu, m	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	
4	Głębokość posadowienia manometru, m	2722,5	2805	2765	2888	2899	2866	
5	Gęstość płuczki polimerowej podczas przewiercania, kg/m <sup>3</sup>	1220	1200 - 1150	1240 - 1190	1040	1040 - 1030	1040 - 1030	
6	Czas od nawiercenia do opróbowania, doba	1	1	13	3	1	1	
7	Wysokość słupa przybitki wodnej, m	1510	1500	1000	500	800	855	
8	Czas testów	czas I testu przyływu (i syfonowania), min	125	10	77	4,5	18,5	26
		czas II testu przyływu, min	-	82	7800	89	99	15
		czas III testu przyływu, min						6
		czas I testu odbudowy, min	173	35	353	50	17	30
		czas II testu odbudowy, min	-	97	-	146	50	70
		czas III testu odbudowy, min						67
9	Wartości ciśnienia	ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy, MPa	32,57	33,01	33,62	29,45	30,13	29,23
		naddatek ciśnienia słupa płuczki (represja) na poziom zbiornikowy, MPa	6,57	6,92	6,80	3,19	8,38	1,72
		początkowa depresja podczas opróbowania, MPa	9,27	11,27	14,8	11,67	12,49	8,34
Lp.	Nazwa otworu, nr testu	L-7, 87/94	L-7, 112/94	L-7, 117/94	L-7, 121/94	L-7, 133/94	S-2K, 8/97	
1	Stratygrafia	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	Dewon	
2	Opróbowany interwał, m	3019 – 3140 n.o.	3045 – 3054 perf.	2875 – 2877 perf.	2857 – 2864 perf.	2832 – 2844 perf.	3255-3265 n.o.	
3	Średnica otworu, m	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	
4	Głębokość posadowienia manometru, m	3010	3017,5	2855	2819	2768	2994	
6	Gęstość płuczki polimerowej podczas przewiercania, kg/m <sup>3</sup>	1040 – 1030	1040 - 1030	1040	1040	1240 - 1190	1195	
6	Czas od nawiercenia do opróbowania, doba	5	ponad 30 dni	ponad 30 dni	ponad 30 dni	ponad 30 dni	3	
7	Wysokość słupa przybitki wodnej, m	1220	1476	1185	1016	450	1343	
8	Czas testów	czas I testu przyływu (i syfonowania), min	59	117	186	66	74	9,2
		czas II testu przyływu, min		1095	2068	2198	575	56,5
		czas III testu przyływu, min					1881	
		czas I testu odbudowy, min	51	314	167	111	251	62,2
		czas II testu odbudowy, min		167	500	961	1086	84,6
		czas III testu odbudowy, min						
9	Wartości ciśnienia	ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy, MPa	30,70	30,76	29,12	28,75	33,66	35,04
		naddatek ciśnienia słupa płuczki (represja) na poziom zbiornikowy, MPa	2,31	1,60	2,28	1,88	6,81	8,05
		początkowa depresja ciśnienia podczas opróbowania, MPa	11,35	14,2	14,66	16,97	2,49	13,107



#### 4. Analiza rezultatów testów DST uzyskanych w odwiertach L-7 i 2-SK

##### 4.1. Analiza rezultatów testu nr 133/94 w odwiercie L-7 interpretowanych metodą Hornera:

Do interpretacji danych uzyskanych z testu nr 133/94 zastosowano metodę Hornera [6], uzyskując następujące rezultaty:

- ciśnienie złożowe 26,84 MPa, a gradient tego ciśnienia wynosi: 0,0097 MPa/m; jest to wartość bliska wartości normalnej, wywieranej przez słup wody złożowej;
- współczynnik przewodności hydrodynamicznej badanej warstwy dla gazu ziemnego:  $1072 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ; jest to wartość wystarczająca dla komercyjnego wydobycia gazu ziemnego;
- współczynnik przepuszczalności skał zbiornikowych dla gazu ziemnego:  $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (około 3 mD); dość dobre warunki filtracyjne dla przepływu gazu ziemnego;
- skin-efekt dodatni, świadczy o znacznym uszkodzeniu przepuszczalności skał w badanej strefie; może to stanowić podstawę do zastosowania zabiegu stymulacji wydobycia gazu ziemnego;
- współczynnik produktywności rzeczywistej gazu (po usunięciu uszkodzenia przepuszczalności skał):  $5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{MPa})$  w warunkach powierzchniowych;
- promień strefy złożowej badanej próbnikiem wynosi około 50 m; jest to wystarczająco duży zasięg testu DST, a uzyskane rezultaty mają duże znaczenie przemysłowe.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń można stwierdzić, że badany poziom gazonośnych skał węglanowych dewonu charakteryzuje się dość dobrymi parametrami złożowymi. Stwierdzone próbnikiem znaczne uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej może stanowić podstawę do wykonania zabiegu intensyfikacji przyływu gazu ziemnego do odwiertu w postaci hydraulicznego szczelinowania skał.

##### 4.2. Przykładowa analiza rezultatów testu nr 117/94 w odwiercie L-7, interpretowanych metodą log-log:

Poprzez dopasowanie wykresów rzeczywistych (pomiarowych) do wykresów diagnostycznych (modelowych), przy użyciu programu „Saphir 202B”, otrzymano następujące informacje o złożu i odwiercie:

- a) złożo ma budowę jednorodną, przy czym gorsze dopasowanie uzyskano dla złoża o podwójnej porowatości: szczelinowej i porowej, być może z powodu zbyt dużej kolmatacji skał zbiornikowych przez płuczkę;
- b) odwiert charakteryzuje się znacznym efektem magazynowym ( $9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{MPa}$ ) i skin-efektem, wskazującym na uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej;
- c) stwierdzona, pojedyncza granica złoża występuje w postaci uskoku w odległości około 154 m od odwiertu.

Pozostałe rezultaty tego testu DST są następujące:

- do próbnika przyłączyła się płuczka wiertnicza z solanką (NaCl około 59 g/l) słabo nagazowana gazem palnym; powrotny przyływ płuczki wiertniczej do odwiertu świadczy o dużej inwazji płuczki na złożo;
- wydatek przyływu płynu do próbnika złoża był mały i wynosił  $0,021 \text{ m}^3/\text{godz.}$ ;
- stwierdzono niski gradient ciśnienia złożowego:  $0,0094 \text{ MPa/m}$ ;
- bardzo mała przewodność hydrauliczna badanego poziomu zbiornikowego (kh) wynosząca  $1,67 \text{ mD} \cdot \text{m}$  (szkodliwy wpływ płuczki);
- mała przepuszczalność skał zbiornikowych ( $0,7 \text{ mD}$ ), z powodu uszkodzenia przez płuczkę;
- promień strefy badanej próbnikiem jest duży i wynosi około 200 m.

Podsumowanie: badany poziom wodo- i gazonośny charakteryzuje się bardzo niskimi parametrami złożowymi, znacznie obniżonymi przez szkodliwy wpływ płuczki wiertniczej.

W tabeli 2 zestawiono wszystkie obliczone przez autorów wartości parametrów złożowych dewonu testowanych w odwiertach L-7 i S-2K.

**Tabela 2. Zestawienie obliczonych wartości parametrów złożowych gazonośnych skał zbiornikowych dewonu w odwiertach L-7 i S-2K na podstawie rezultatów testów DST**

**Table 2. List of calculated reservoir parameters of gas-bearing reservoirs of the Devonian in wells L-7 and S-2K on the basis of DST test results**

Lp.	Nazwa otworu, nr testu	L-7, 39/94	L-7, 44/94	L-7, 53/94	L-7, 62/94	L-7, 70/94	L-7, 78/94
1	Rodzaj płynu złożowego	gaz	gaz	gaz	nagazowana płuczka z wodą złożową	płuczka nagazowana	nagazowana woda złożowa
2	Strumień objętości przyływu cieczy (wydatek), $\text{m}^3/\text{godz}$				12,3	0,3	8
3	Strumień objętości przyływu gazu, $\text{m}^3/\text{godz.}$	1380	1080	1104			
4	Gradient ciśnienia złożowego, MPa/m	0,00955	0,0093	0,0097	0,0093	-	0,0096
5	Przewodność hydrauliczna ( $k \cdot h/\mu$ ), $10^{-12} \text{ m}^3/\text{Pa} \cdot \text{s}$	858	1621	469	1461	2	273
6	Przepuszczalność skał, mD	0,4	2	0,2	22	0,07	7
7	Wsp. pojemności magazynowej odwiertu, $\text{m}^3/\text{MPa}$						
8	Wsp. produktywności rzeczywistej, $\text{m}^3/\text{godz} \cdot \text{MPa}$	79,716	111,781	112,815	1,299	0,0227	0,586
9	Stan strefy przyodwiertowej, $S_1, S_2, S_3$	$S_1 > 0$	$S_2 > 0$	$S_1 > 0$	$S_2 > 0$	$S_2 < 0$	$S_3 > 0$
10	Odległość odwiertu do granicy złoża, m						
11	Promień strefy badanej, m	13	40	12	70	16	108

Tabela 2. cd

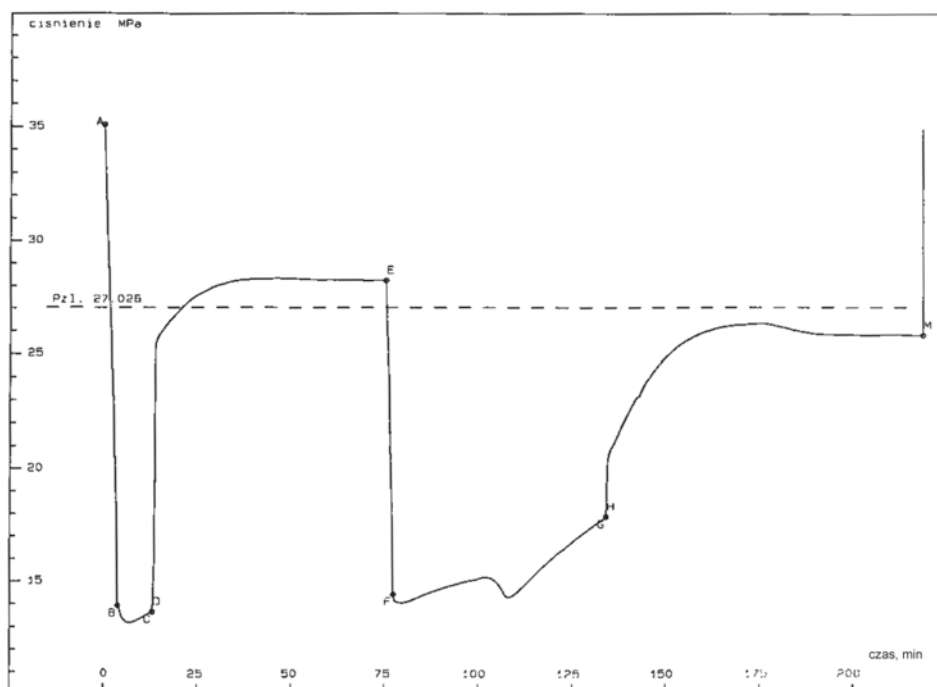
	Nazwa otworu, nr testu	L-7, 87/94	L-7, 112/94	L-7, 117/94	L-7, 121/94	L-7, 133/94	S-2K, 8/97
1	Rodzaj płynu złożowego	nagazowana płuczka z wodą złożową	solanka średnio nagazowana	nagazowana płuczka z solanką	silnie nagazowana płuczka z solanką	gaz z domieszką gazoliny i solanki	gaz
2	Strumień objętości przyływu cieczy, m <sup>3</sup> /godz.	14,7	0,27	0,021	0,2		
3	Strumień objętości przyływu gazu, m <sup>3</sup> /godz.				8,76	840	50
4	Gradient ciśnienia złożowego, MPa/m	0,0094	0,00967	0,0094	0,00953	0,0097	0,0090
5	Przewodność hydrauliczna ( $k\cdot h/\mu$ ), 10 <sup>-12</sup> m <sup>3</sup> /Pa·s	4003			1630	1702	483,880
6	Przepuszczalność skał, mD	26	4	0,7	105	3	2,48
7	Wsp. pojemności magazynowej odwiertu, m <sup>3</sup> /MPa			9·10 <sup>-4</sup>			
8	Wsp. produktywności rzeczywistej, m <sup>3</sup> /godz·MPa	44,183			0,382	43,397	327,19
9	Stan strefy przyodwiertowej, $S_1, S_2, S_3$	$S_1 < 0$	$S_2 < 0$	$S_2 > 0$	$S_2 > 0$	$S_2 > 0$	$S_2 > 0$
10	Odległość odwiertu do granicy złoża, m			154			
11	Promień strefy badanej, m	131		200	938	46	20,0

#### 4.3. Przykładowa analiza rezultatów testu DST nr 8/97 uzyskanych w odwiercie S-2K interpretowanych metodą Hornera:

Podczas drugiego testu przyływu, po upływie kilkunastu minut (rys. 2 - rys. 3), spadkowy efekt wykresu drugiego przyływu), obserwowano na głowicy wpływ gazu ziemnego o niewielkiej intensywności. Ocena autorska uzyskanych wyników obliczeń jest następująca:

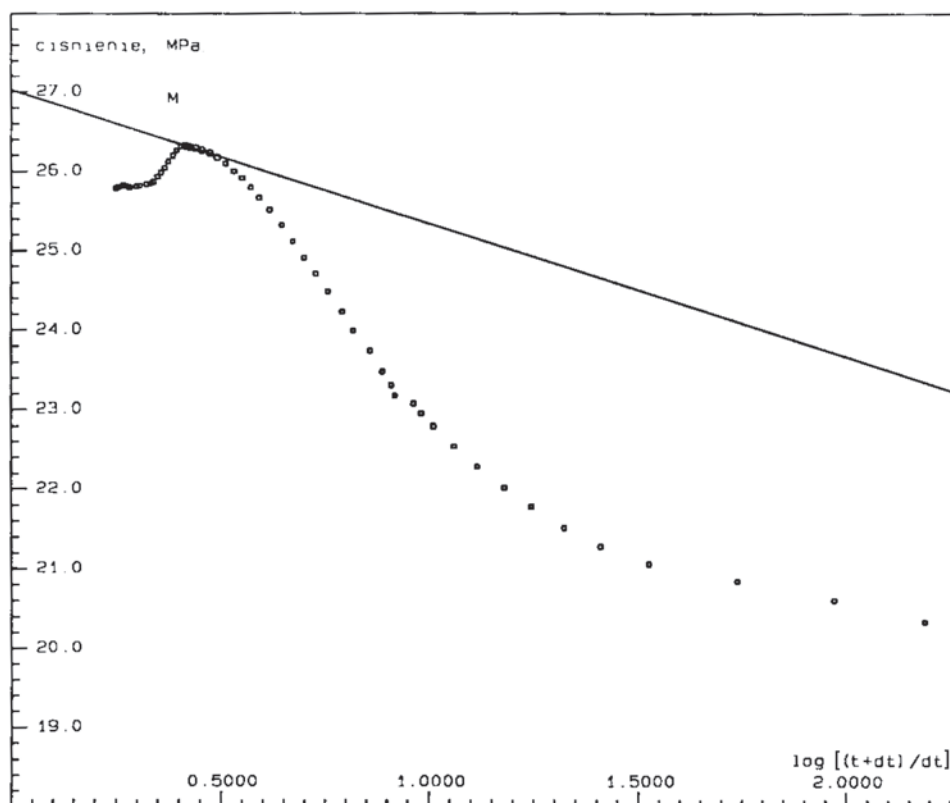
- niska wartość ciśnienia złożowego: 27,03 MPa;
- niski gradient ciśnienia złożowego: 0,0090 MPa/m;
- współczynnik nachylenia prostej w układzie Hornera (rys. 2) m: 1,68 MPa/cyklog, wskazuje na dość dobre właściwości filtracyjne skał;
- współczynnik ściśliwości gazu, obliczony przez autorów na podstawie składu chemicznego gazu pobranego podczas testu DST, ma dużą wartość (gaz gazolinowy) i wynosi 0,926;
- współczynnik objętościowy gazu ma dość dużą wartość: 0,00532 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

- średnia wartość przewodności hydraulicznej badanego poziomu dla : 483,9( m<sup>3</sup>/Pa·s)·10<sup>-12</sup>;
- dość duża przepuszczalność skał zbiornikowych dla gazu: 2,5 mD;
- niewielka wartość skin-efektu ( $S = 1,36$ ) wskazuje na nieznaczne uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej;
- wskaźnik strat ( 1,99 MPa) wskazuje na niewielkie opory hydrauliczne przepływu płynu złożowego do odwiertu;
- współczynnik produktywności rzeczywistej (uwzględniający uszkodzenie przepuszczalności skał): 5,45 (m<sup>3</sup>/min)/MPa, ma wartość porównywalną ze współczynnikiem produktywności potencjalnej, uwzględniającym usunięcie uszkodzenia przepuszczalności skał 6,97 (m<sup>3</sup>/min)/MPa;
- współczynnik uszkodzenia przepuszczalności skał przez płuczkę jest mały 1,28;
- próbnikiem testowano strefę złoża o stosunkowo niewielkim promieniu wynoszącym około 20 m.



Rys. 2. Wykres zmian ciśnienia dennego podczas testu DST nr 8/97 utworów dewonu (3255-3265) w odwiercie S-2K; pzi – ekstrapolowana wartość ciśnienia złożowego, MPa

Fig. 2. Downhole pressure while making DST test no. 8/97 of Devonian strata (3255-3265 m deep) in well S-2K; pzi – extrapolated reservoir pressure value, MPa



Rys. 3. Wyznaczanie wartości ciśnienia złożowego metodą Hornera na podstawie ekstrapolacji II krzywej odbudowy ciśnienia dennego zarejestrowanej w odwiercie S-2K podczas testu DST nr 8/97;  $t$  - czas testu przyływu w drugim cyklu DST, min;  $dt$  - czas testu odbudowy ciśnienia w drugim cyklu DST, min.

Fig. 3. Determination of reservoir pressure values with Horner method on the basis of extrapolation of II build-up curve in well S-2K while making DST test no. 8/97;  $t$  - time of flow test in the second cycle of DST, min;  $dt$  - time of build-up test in the second cycle of DST test, min

Analizując obliczone przez autorów wartości parametrów złożowych utworów dewonu zestawione w tabeli 2, można stwierdzić, że:

- rodzaj płynu złożowego przyływającego do testowanego odwiertu jest zróżnicowany (gaz, gazolina, solanka), lecz jednak z przewagą przypadków przyływu gazu ziemnego;
- gradient ciśnienia złożowego jest nieco niższy od wartości normalnej (około 0,01 MPa/m) i waha się w granicach (0,0090 ÷ 0,0097) MPa/m; niewielki strumień objętości przyływu cieczy (woda złożowa, płuczka): (0,2 ÷ 14,7) m<sup>3</sup>/godz.

Stwierdzono bardzo szerokie granice zmian obliczonych wartości parametrów złożowych (tab 2., wiersze: 2 - 6):

- strumień objętości przyływu gazu jest bardzo zróżnicowany, (8,76 ÷ 1380) m<sup>3</sup>/godz, w warunkach normalnych;
- gradient ciśnienia złożowego (0,0093 ÷ 0,0097) MPa/m;
- przewodność hydrauliczna ( $k \cdot h/\mu$ ) (2 ÷ 4003) · 10<sup>-12</sup> m<sup>3</sup>/Pa · s;
- przepuszczalność skał (0,07 ÷ 105) mD;
- współczynnik produktywności rzeczywistej (0,0227 ÷ 327,19) m<sup>3</sup>/godz · MPa.

Stan strefy przyodwiertowej będącej pod oddziaływaniem płuczki wiertniczej oceniano na podstawie wartości S1, S2, S3, stwierdzając w 9 przypadkach uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej ( $S > 0$ ), a w trzech przypadkach polepszenie tej przepuszczalności ( $S < 0$ ).

Promień strefy badanej próbnikiem wahał się w granicach 13 ÷ 938 m i w porównaniu z innymi obszarami poszukiwań naftowych są to wartości zadawalające.

#### 4. Wnioski

1. Należy podkreślić, że w wielu przypadkach przemysłowych zastosowana, nowoczesna technologia testów DST gazonośnych utworów dewonu (testy przyływu, stabilizacja ciśnienia głowicowego, testy odbudowy ciśnienia dennego oraz syfonowanie odwiertu - wstępny test produkcyjny) była możliwa do zrealizowania dzięki zastosowaniu próbnika typu Ful-Flo.
2. Dobry stan techniczny sprzętu próbnikowego typu Ful-Flo i sprawne działanie oraz właściwy jego dobór w zależności od warunków otworowych i złożowych, znacznie zmniejszyło ryzyko wystąpienia awarii i komplikacji oraz koszt opróbowania głęboko zalegających, gazonośnych utworów dewonu w odwiertach L-7 i S-2K. Pewność działania poszczególnych elementów tego próbnika jest najważniejszym czynnikiem bezkomplicyjnego opróbowania.
3. Analiza rezultatów testów DST uzyskanych tym próbnikiem obejmuje istotne dla poszukiwań naftowych informacje złożowe dotyczące:
  - rodzaju płynu złożowego (gaz ziemny i jego skład, gazolina, woda złożowa i jej zasolenie),

- podstawowych parametrów złożowych badanej warstwy gazonośnej (ciśnienie złożowe, współczynnik przewodności hydrodynamicznej dla gazu ziemnego, przepuszczalność skał dla gazu, współczynnik produktywności rzeczywistej),
  - występowania granic złoża ( uskoki),
  - zmian przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej oraz w strefie badanej próbnikiem,
  - produktywności testowanego odwiertu,
  - decyzji o konieczności zastosowania zabiegów stymulacji wydobycia gazu.
4. Przyipywy gazu ziemnego do odwiertów L-7 i S-2K, określone na podstawie testów DST wynoszą od około 0,15 m<sup>3</sup>/min do około 23 m<sup>3</sup>/min w warunkach powierzchniowych i po zabiegach stymulacyjnych wydobycie gazu ziemnego może mieć znaczną wartość komercyjną.

**Praca wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.190.555 Katedry Inżynierii Naftowej oraz Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH.**

## Literatura

1. Baran U., Jawor E., Jawor W.: Rozpoznanie geologiczne i wyniki prac poszukiwawczych za węglowodorami w zachodniej części polskich Karpat. „Przeгляд Geologiczny” 1997, nr 1, s. 66-75.
2. Composite catalog of oil field equipment and services. World Oil. A Gulf Publishing Company Publication. Huston, Texas USA, 1986-87.
3. Dubiel S.: Metodyka interpretacji wyników dwucyklowego opróbowania gazo- i roponośnego poziomu perspektywicznego rurowym próbnikiem złoża. Kwartalnik „Górnictwo” AGH, 1987, z. 1.
4. Dubiel S., Rzychniak M., Wójtowicz T., Kulaga T.: Analiza i interpretacja wyników badań rurowymi próbnikami złoża warstw perspektywicznych w rejonie Przedgórze Karpat, w celu oceny właściwości zbiornikowych skał i parametrów złożowych poszczególnych poziomów. Praca naukowa – badawcza. WVNIG – AGH, Kraków 1993-1998.
5. Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzychniak M.: Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
6. Horner D. R.: Pressure build-up in wells. Third World Cong. Hagua 1951.
7. Jawor E.: Rozpoznanie geologiczno-złożowe i kierunki dalszych prac w środkowej i zachodniej części Karpat i Zapadliska Przedkarpacciego. „Nafta Gaz” 1997, nr 3.
8. Kamal M. M., Freyder D.G., Murray M.A.: Use of transient testing in reservoir management. Journal of Petroleum Technology. November 1995.
9. Materiały Konferencyjne firmy Schlumberger: Well test interpretation for monophasicoil and gas by analysis of pressure behavior. 19 - 20 stycznia. Warszawa 1993.
10. Oprogramowanie interpretacji testów otworowych firmy Kappa. ZPNiG, Kraków 1993-95.
11. Oprogramowanie interpretacji testów złożowych francuskiej firmy Kappa. Materiały firmy Kappa, ZPNiG, Kraków 1993-1995.
12. Uliasz-Misiak B., Dubiel S.: Diagnostowanie dopływów wody złożowej do odwiertów wydobywczych na złożach węglowodorów. „Przeгляд Górnicy” 2013, nr 12, s. 49.

UKD 622.32: 620.193-034: 622.32.167/.168-048.24

## Ocena skuteczności ochrony chemicznej metali przed korozją w wybranych kopalniach gazu ziemnego

### Evaluation of the effectiveness of chemical protection of metals against corrosion in selected natural gas processing plants



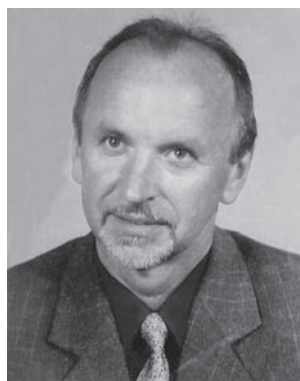
*Dr inż. Dariusz Bęben\**



*Mgr inż. Janusz Kuś\*\*)*



*Mgr inż. Arkadiusz Gliński\*\*)*



*Mgr inż. Józef Koźbiał\*\*)*

**Treść:** W artykule opisano czynności obsługowo-eksploatacyjne gazociągów kopalnianych, w celu zapewnienia chemicznej ochrony korozyjnej poprzez badanie środków chemicznych (również dwufunkcyjnych inhibitorów korozji i hydratów) w laboratorium, a następnie przetestowanie ich w kopalniach. Wykonano badania laboratoryjne, aby wybrać inhibitor, zapewniający ochronę korozyjną i hydratową podczas eksploatacji odwiertów gazowych. Następnie sprawdzono je w kopalniach. Próby przeprowadzone w kopalniach pozwoliły wyselekcjonować inhibitor, który nie powodował utrudnień eksploatacyjnych, jak również dobrze chronił metal przed korozją. Niektóre badane inhibitory powodowały utrudnienia eksploatacyjne, np. nie ograniczały w zakładanym poziomie postępu korozji (zakładana ochrona korozyjna 50µm/rok, osiągnięta podczas testów 227 µm/rok,) powodowały powstawanie osadów, które uszkodziły pompę dozującą.

**Abstract:** This paper describes the stages of service and operation of pipelines in order to ensure chemical corrosion protection by selecting the chemical (including bifunctional corrosion inhibitors and hydrates) in the laboratory and then to test them in these processing plants. Series of laboratory tests were performed to select the inhibitor, which provides corrosion and hydrate protection during the operation of gas wells. Then they were tested in processing plants, including the objects selected for testing inhibitors: - corrosion inhibitor were tested in the processing plants: Property I, II, - corrosion inhibitor-hydrates the Property III, IV, V As part of the selection of inhibitors in the laboratory were tested upstream of the three processing plants: A, B, C. After the laboratory tests the inhibitors were tested in the processing plants. The tests carried out in the processing plants helped to select inhibitors that do not cause operational difficulties as well as well protect the metal from corrosion. Some research inhibitors cause operational difficulties such as not limited to the assumed level of corrosion progress (expected corrosion protection 50µm/rok, reached in tests 227 microns / year) resulted in the formation of deposits which damaged the dosing pump.

#### **Słowa kluczowe:**

*korozja metali, chemiczna ochrona korozyjna, testy laboratoryjne oraz kopalniane*

#### **Key words:**

*corrosion of metals, chemical corrosion protection, laboratory and plant tests*

\*) Instytut Nafty i Gazu - Państwowy Instytut Badawczy \*\*) Polskie Górnictwo Nafty i Gazu w Warszawie, Oddział Zielona Góra

## 1. Wprowadzenie

Korozji metali nie można całkowicie wyeliminować, ale można znacznie ograniczyć. Prawidłowe uwzględnienie zagrożeń korozyjnych i metod ochrony przed korozją, w znaczny sposób obniża koszty eksploatacji.

Proces niszczenia metali zachodzi według mechanizmu chemicznego. Wywołują go substancje znajdujące się w wydobywanym gazie, takie jak: ditlenek węgla, woda, rtęć, wodór, siarkowodór, solanka [4,5]. Niszczenie materiałów na skutek korozji może być skutecznie obniżone przez umiejętne zapobieganie, głównie poprzez stosowanie metod ochrony przeciwkorozyjnej oraz właściwy dobór materiałów. Na rys. 1 przedstawiono skorodowane elementy instalacji eksploatacyjnej jednej z kopalni.

Już na etapie budowy rurociągu należy zwracać szczególną uwagę na techniki ochrony przeciwkorozyjnej, począwszy od doboru stali, obróbki chemicznej użytej stali, powłoki chroniącej rurę, czy stosowanie ochrony przeciwkorozyjnej. Korzyści ekonomiczne wynikające z wprowadzenia kompleksowej strategii zapobiegania korozji od dawna były stwierdzone przez właścicieli obiektów (kopalń). Koszty zapobiegania korozji zostały przyjęte w tych branżach w przekonaniu, że stanowią one zazwyczaj jedną dziesiątą lub mniej kosztu wymiany rurociągów i urządzeń eksploatacyjnych [1]. Zwrot nakładów w stosunku 10:1 z inwestycji jest rzadko spotykany w działalności gospodarczej – odzwierciedla jednak niewątpliwie korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania nowoczesnych technologii przeciwkorozyjnych, takich jak stosowanie środków chemicznych (inhibitorów) czy katodowa ochrona rurociągów i instalacji eksploatacyjnej.

Również ważnym zagadnieniem poruszonym podczas oceny korozji jest określenie jakości wykonania spawów łączy rurociągu, które ma duże znaczenie, ponieważ tam najczęściej dochodzi do awarii. Znane są metody kontroli spawów łączy rur, jednak obecnie nikt z wykonawców i nadzorujących wykonanie rurociągów nie zwraca uwagi na wygrzewanie spawów [3]. Ma to znaczenie w późniejszej eksploatacji rurociągu, zmniejszając jego awaryjność. Poza tym duże znaczenie ma izolacja miejsc łączy rur. Niejednokrotnie obserwowana jest korozja zewnętrzna źle oczyszczonych i zaizolowanych spawów.

## 2. Ochrona metali przed korozją

W zależności od rodzaju korozji i charakteru chemicznego czynników korozyjnych, istnieje wiele sposobów zapobiegania lub zmniejszania skutków korozji.

Podstawowym sposobem ochrony przed korozją chemiczną jest dobór odpowiedniego materiału do warunków środowiska agresywnego.

Działania korodujące niektórych składników można skutecznie ograniczyć przez zastosowanie **inhibitorów** (opóźniaczy) korozji. Z definicji inhibitor korozji jest to środek chemiczny, który po zastosowaniu w małych ilościach skutecznie ograniczy korozję. Inhibitory tworzą zwykle na powierzchni metalu warstwę ochronną, hamując szybkość korozji. Przed zastosowaniem inhibitora należy przeprowadzić najpierw badania laboratoryjne, a następnie sprawdzić jego działanie w kopalni. Tak dobrany inhibitor powinien skutecznie ograniczyć postęp korozji. Dobrze dobrany inhibitor ogranicza postęp korozji w granicach 95% przy użyciu 0,008% środka a 90% przy użyciu 0,004% środka [2]. Zazwyczaj skuteczność środka zależy od wielu czynników: ciśnienia, temperatury, szybkości przepływu oraz składu i ilości czynników powodujących korozję. Inhibitor pokrywa warstwą powierzchnię metalu, powodując tzw. pasywację powierzchni. Inhibitory możemy podzielić na:

- inhibitory tworzące warstwę pasywacyjną na powierzchni poprzez rozwój nierozpuszczalnego tlenku metalu na powierzchni. Wiązania te tworzą ochronną barierową powłokę, która staje się warstwą nieprzepuszczalną, a jednocześnie bardzo elastyczną i dobrze przywierającą do podłoża. Typowe przykłady to użycie fosforanów i chromianów.
- inhibitory neutralizujące jony powodujące korozję w środowisku. Typowy składnik inhibitora to neutralizujące amoniak. Są to inhibitory skuteczne w wodach kotłowych i lekko kwaśnych środowiskach.
- inhibitory usuwające żrące jony z roztworu. Typowe składniki inhibitora to hydrazyna i siarczan sodu. Inhibitory te usuwają rozpuszczony tlen w wodzie.

Od inhibitorów wymagana jest niska temperatura krzepnięcia ( $-30^{\circ}\text{C}$ ), ponieważ są one używane zwykle na zewnątrz. W zależności od czego będzie użyty inhibitor, to nie może być rozpuszczalny w wodzie czy węglowodorach. Inhibitor nie powinien tworzyć emulsji węglowodory – woda, wydobywana woda z węglowodorami powinna łatwo się rozdzielać w separatorach i nie pnieć.

Prace przy wyborze inhibitora powinny rozpocząć się od testu kuponowego, pozwalającego określić skuteczność inhibitora w wodzie złożowej. Szybkość korozji określa się poprzez wyliczenie ubytku masy kuponów z zastosowaniem inhibitora i bez zastosowania. Powierzchnia kuponu  $21,8\text{ cm}^2$ , ilość wody złożowej  $133\text{ cm}^3$ , temperatura kondycjonowania kuponów  $50^{\circ}\text{C}$ , czas 14 dni, po oczyszczeniu z korozji kupony są ważone.



Rys. 1. Elementy rurociągu zniszczone przez korozję. Autor D. Bęben  
Fig. 1. Items of the pipeline damaged by corrosion. Author D. Bęben

### 3. Wstępne badanie środka chemicznego

Badanie polega na potwierdzeniu wymaganych właściwości techniczno-użytkowych inhibitora przed jego wprowadzeniem do obrotu i użytkowania.

Wstępne badanie obejmuje:

- wygląd, barwę,
  - gęstość środka,
  - temperaturę krystalizacji (zamarzania),
  - szybkość korozji metali,
  - skłonność do pienienia,
- badanie mieszania się środka z np. wodą złożową.

#### 3.1. Metody badań

Metody badań środków chemicznych potwierdzających wymagania właściwości techniczno-użytkowych przed wprowadzeniem do użytkowania zestawiono w tabeli 1.

Sprawdzenie wyglądu i barwy należy przeprowadzić przez oględziny zewnętrzne nieuzbrojonym okiem, w świetle rozproszonym. Obserwacji poddawane są próbki wlane do zlewek z przezroczystego szkła o pojemności 500 ml, w świetle dziennym, po upływie 30 min i 24 h.

Sprawdzenie mieszania z wodą złożową polega na zmieszaniu w stosunku 1 do 1 inhibitora z wodą złożową. Obserwowane jest wytrącanie się osadów zaraz po zmieszaniu, 6 h i 24 h. W przypadku pojawienia się osadów środek nie jest rekomendowany do zastosowania w kopalni, może on powodować utrudnienia eksploatacyjne.

Sprawdzenie temperatury krystalizacji

Badany środek chemiczny według PN-ISO 3016, ASTM 97 nie powinien zamarzać w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ , w tej temperaturze środek chemiczny nie powinien zmieniać konsystencji, nie powinien być oleisty, ani nie powinien żelować. Temperatura ta jest ustalona jako najniższa temperatura w jakiej powinien być dozowany na kopalni środek chemiczny.

Metoda badania szybkości korozji metali polega na umieszczeniu w płynie złożowym po 3 próbki stali, z której wykonany jest rurociąg w kopalni. Badania należy wykonać przy minimalnej ilości płynu wynoszącej 10:1 w stosunku do powierzchni badanej próbki. Szybkość korozji należy wyliczyć z różnicy mas stali przed badaniem i po badaniu. PN-76/H-04601

Badane próbki mają wymiar: szerokość/grubość/wysokość – około 20,7/3,77/40,09 mm, powierzchnia kuponu 21,17 cm<sup>2</sup>. Próbki są mechanicznie szlifowane i polerowane, następnie odłuszczone w benzynie i przemyte alkoholem. Zanurzane są w cieczy (wodzie złożowej) o znanym składzie oraz pH. Temperatura prowadzenia testu jest  $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Czas trwania badania to około 14 dni. Próbki po zakończeniu badań korozyjnych zostają przemyte bieżącą wodą, następnie oczyszczane z produktów korozji, wypłukane i osuszone. Po zakończeniu badań sporządzany jest protokół z badań zawierający: rodzaj metalu, liczbę próbek, wymiary i kształt, sposób oczyszczenia powierzchni przed i po badaniach korozyjnych, skład cieczy lub roztworu stosowanego do badań oraz jego pH, temperaturę cieczy podczas testu, czas trwania badań, sposób oceny zmian korozji, dodatkowe uwagi o przebiegu badań, wyniki uwzględniające cel badań.

Odporność na pienienie to bardzo ważna własność środka chemicznego. Gdy w trakcie eksploatacji powstanie w układzie rurociągu i separatorów piana, następuje przerzucanie wody złożowej w dalsze części instalacji eksploatacyjnej, co może doprowadzić do utrudnień prowadzenia innych procesów oczyszczania gazu na kopalni. Metodologia oznaczania odporności na pienienie polega na pomiarze skłonności środka chemicznego do tworzenia piany i ocenie stabilności powstałej piany w oparciu o normy PN-93/C40008/06 i PN-93/C40008/06/Az1. Metoda polega na przedmuchaniu powietrzem przez badaną próbkę płynu ze stałą prędkością w określonej temperaturze i określonym czasie, a następnie na pomiarze objętości powstałej piany oraz zmierzeniu czasu jej zaniku.

Badanie prowadzone jest w bełkotce napowietrzającej zakończonej spiekami o średnicy porów 40-50 $\mu\text{m}$ , źródłem zasilania jest czyste powietrze z instalacji sprężonego powietrza. Pomiar ilości przepuszczonego powietrza mierzony jest za pomocą rotametry. Badanie prowadzone jest w określonej sekwencji temperatur, symulującej graniczne warunki pracy instalacji. Badanie prowadzone jest w trzech temperaturach: w  $25^{\circ}\text{C}$  w  $65^{\circ}\text{C}$  oraz w  $25^{\circ}\text{C}$  po badaniu w  $65^{\circ}\text{C}$ .

Przedmuch prowadzony jest ze stałą prędkością przepływu około 3500ml/min, przez 5 min.

Oceniany jest poziom piany w cylindrze, powinien on zanikać po upływie < niż 10 s.

**Tabela 1. Zestawienie badanych parametrów i norm**  
**Table 1. Summary of the parameters and standards**

L.p.	Właściwości	Wymagania	Ocena	Norma	Aparat
1	Wygląd	Jednorodność środka Rozwarstwianie się środka Osady Niejednorodność środka	+ - - -	p.1.	Szkló laboratoryjne
2	Mieszanie środka chemicznego w temp. $20^{\circ}\text{C}$ z wodą złożową	Brak osadów Osady Żele Rozwarstwianie się	+ - - -	p. 2	Szkló laboratoryjne
3	Temperatura krystalizacji, $^{\circ}\text{C}$	Nie zamarza w $-30^{\circ}\text{C}$ Oleista maź Galareta (żel)	+ - -	ASTM 97, ISO 3016, DIN EN 24015	Herzog HCP 852
4	Szybkość korozji metali, mm/rok	Nie może być większa niż korozja metalu bez środka Powyżej	+ -	PN-76/H-04601	Szkló laboratoryjne
5	Skłonność do pienienia	$\leq 15\%$ $\leq 10$ sek $> 15\%$ $> 10$ sek	+ + - -	PN-C-40008-06:1993 PN-C-40008-06:1993 Az1 2000	Szkló laboratoryjne





**Tabela 4. Pienienie wody złożowej po dodaniu inhibitora****Table 4. Foaming water after adding the inhibitor**

Firma	Środek	Obiekt I	Obiekt II	Obiekt III	Obiekt IV	Obiekt V
A	26	-	-	-	-	-
	27	-	-	-	-	-
	28		-	-	-	
B	H /1A					
	1A					
	1F		-			-
C	65					
	70					
	05					
	72					
	10					
	77					
	20					
	420					
	15					
	55					
	50					
077						
30						

Kolor czerwony - pieni

Inhibitory 26, 27 pieniały z wszystkimi badanymi wodami. Inhibitor 28 pieniał z wodą złożową obiektu II, obiektu III, obiektu IV.

Wymienione inhibitory nie mogą być zastosowane w wymienionych kopalniach, ponieważ mogą powodować utrudnienia eksploatacyjne.

#### 4.3. Badanie temperatury zamarzania środków

W celu sprawdzenia temperatury zamarzania środków wykonano badania sprawdzające czy środki chemiczne nie zamarzają w temperaturze -30°C. Badane środki nie powinny w tej temperaturze występować w postaci oleistej mazi, ani w postaci żelu (galarety).

Test temperatury krystalizacji wykonano na aparacie Herzog HCP 852 wg normy ASTM D 97, IP 15, ISO 3016. Aparat pozwala na oznaczenie temperatury płynięcia próbek środków chemicznych (rys. 3). Badanie wykonywane jest automatycznie, a parametry pracy urządzenia sterowane są przez zainstalowany w aparacie mikroprocesor z odpowiednim oprogramowaniem. Dane pomiarowe uzyskiwane są w postaci cyfrowej. Aparat przystosowany do badania szerokiego zakresu temperatur płynięcia próbek ropy naftowej od -60 do +35°C.



Rys. 3. Aparat do badania temperatury krzepnięcia inhibitorów. Autor D. Bęben

Fig. 3. Photography of camera to test the freezing point of inhibitors. Author D. Bęben

**Tabela 5. Badanie temperatury krzepnięcia inhibitorów****Table 5. Test of freezing point of the inhibitors**

Firma	Środek	Temperatura krzepnięcia -30°C
A	26	+
	27	+
	28	-
B	H /1A	+
	1A	+
	1F	+
C	65	+
	70	+
	05	+
	72	+
	10	+
	77	+
	20	+
	420	+
	15	+
	55	+
	50	+
077	+	
30	+	

- Konsystencja oleista

Inhibitor 28 w temperaturze -30°C, był konsystencji oleistej, może powodować problemy podczas eksploatacji (tab. 5).

#### 4.4. Badanie szybkości postępu korozji

Do badań szybkości korozji użyto kuponów wykonanych z fragmentów rur, z których wykonane są rurociągi w kopalniach (obiektu II).

Z powodu ograniczonej liczby wykonanych kuponów (rys. 4) ustalono ze zlecniodawcą, że do testów wykorzystana zostanie woda złożowa z obiektu I i obiektu II. Po 14-dniowym kondycjonowaniu kuponów w wodach oczyszczono

je i zważono, aby określić ubytek masy. Można wyliczyć efektywność jego zastosowania (tab. 6).

$$\text{Efektywność inhibitora} = \frac{\text{Postęp korozji} - \text{Ograniczenie korozji}}{\text{Postęp korozji}} \times 100\%$$

Inhibitor 10 przyspieszał korozję w wodzie złożowej obiektu II. Dla tej kopalni środek ten nie nadaje się zastosowania. Pozostałe inhibitory ograniczały korozję.

## 5. Podsumowanie badań laboratoryjnych

1. Badania mieszania się środków z wodą złożową wykazały że:

Inhibitory firmy C: 65, 70, 05, 72, 10, 77, 20, 15, 55, 50, 077 z wodą złożową obiektu I powodowały tworzenie się osadów i nie nadają się do zastosowania w tej kopalni.

Inhibitory Firmy B: H / 1A i 1A z wodą złożową obiektu II powodowały tworzenie się osadów i nie nadają się do zastosowania w tej kopalni.

Inhibitor Firmy A: 27 z wodą złożową obiektu V powodował osad i nie nadaje się do zastosowania w tej kopalni. Pozostałe badane inhibitory spełniają kryteria mieszalności z wodą złożową.

2. Inhibitory firmy A powodowały bardzo duże pienienie, przedmuch zostawał przerwany po pojawieniu się piany w górnej części płuczki.

Inhibitory 26 i 27 pieniały z wszystkimi badanymi wodami i nie nadają się do zastosowania w tych kopalniach.

Inhibitor 28 pieniał z wodą złożową obiektu II, III, IV, nie nadają się do zastosowania w tych kopalniach.

Wymienionych inhibitorów nie można zastosować w wymienionych kopalniach, ponieważ mogą powodować utrudnienia eksploatacyjne.

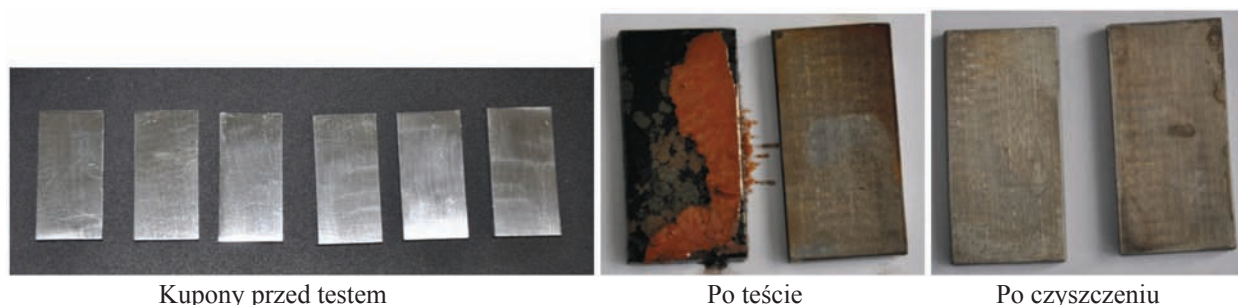
Pozostałe badane inhibitory spełniają kryteria pod kątem pienienia.

3. Badanie temperatury zamarzania wykazało, że inhibitor 28 w temperaturze - 30°C był konsystencji olejistej. Może powodować utrudnienia eksploatacyjne.

Pozostałe badane inhibitory spełniają kryteria pod kątem zamarzania.

4. Badanie szybkości korozji wykazało, że inhibitor 10 nie chroni metalu przed korozją w wodzie złożowej obiektu II i nie nadaje się do zastosowania w tej kopalni.

Pozostałe badane inhibitory można zastosować w kopalniach pod kątem ochrony korozyjnej.



Rys. 4. Fotografie kuponów użytych do pomiaru szybkości korozji. Autor D. Bęben  
Fig. 4. Photographs of coupons used to measure the corrosion rate. Author D. Bęben

Tabela 6. Ubytek masy na kuponach po teście 14 dni w temperaturze 50°C  
Table 6. Loss of weight after the test, the coupons 14 days at 50°C

Firma	Środek	Obiekt I g	Błąd pomiaru	% ochrony obiekt I	Obiekt II g	Błąd pomiaru	% ochrony obiekt II
A	26	0,0269	0,0041	66,79	0,0016	0,0090	97,92
	27	0,0205	0,0060	74,69	0,0209	0,0024	72,82
	28	0,0318	0,0209	60,74	0,0260	0,0157	66,19
B	H / 1A	0,0691	0,0048	14,69	0,0643	0,0277	16,38
	1A	0,0754	0,0154	6,91	0,0060	0,0021	92,20
	1F	0,0451	0,0105	44,32	0,0011	0,0002	98,57
C	65	0,0739	0,0267	8,77	0,0644	0,0103	16,25
	70	0,0722	0,0021	10,86	0,0673	0,0040	12,48
	05	0,0671	0,0023	17,16	0,0653	0,0048	15,08
	72	0,0651	0,0097	19,63	0,0657	0,0091	14,56
	10	0,0699	0,0028	13,70	0,0772	0,0114	-0,39
	77	0,0711	0,0042	12,22	0,0630	0,0116	18,08
	20	0,0681	0,0061	15,93	0,0618	0,0043	19,64
	420	0,0650	0,0084	19,75	0,0721	0,0102	6,24
	15	0,0641	0,0034	20,86	0,0579	0,0129	24,71
	55	0,0686	0,0073	15,31	0,0688	0,0031	10,53
	50	0,0728	0,0061	10,12	0,0602	0,0037	21,72
	077	0,0776	0,0171	4,20	0,0618	0,0026	19,64
	30	0,0544	0,0297	32,84	0,0614	0,0018	20,16
Brak inhibitora		0,0810	0,0048		0,0769	0,0084	

Badane inhibitory firmy A 26 i 27 powodowały bardzo duże pienienie. Natomiast inhibitor 28 w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  był o konsystencji oleistej. Wymienione inhibitory nie można zastosować w kopalniach, ponieważ mogą powodować utrudnienia eksploatacyjne.

Pozostałe inhibitory firmy B i C po odpowiednim doborze nadają się do zastosowania w kopalniach gazu ziemnego.

## 6. Testy w kopalniach (próby przemysłowe)

Testy wszystkich środków chemicznych (inhibitorów), zgodnie z założeniami, trwają około 60 dni, w tym czasie niezbędna jest bieżąca kontrola wskazań przyrządów pomiarowych w tych obiektach.

Procedura przeprowadzenia testów polowych środków chemicznych do ochrony korozyjnej i hydratowej (rys. 5).

Testy prowadzone w okresie jesienno-zimowym trwają około 21 dni dla każdego środka chemicznego. Podczas prowadzenia testów w kopalniach w miarę możliwości prowadzone są następujące czynności:

1. Monitorowanie szybkości korozji za pomocą sond korozyjnych na wytypowanym odwiercie: określenie tła, a następnie ochrony korozyjnej przy zastosowaniu środka chemicznego.
2. Monitorowanie ilości dozowanego środka chemicznego.
3. Podczas prowadzenia testów dla inhibitora korozji/hydratów na odwiercie, w miarę możliwości; tzn. utrzymanie ciągłego przepływu płynu złożowego od głowicy do ośrodka, obserwowane będzie ciśnienie, jeżeli ulegnie zmniejszeniu (powstawanie hydratów), wówczas test zostaje przerwany (środek nie zapewnia ochrony hydratowej). Sygnalizowane będzie to alarmem w systemie monitoringu eksploatacji kopalni.

Przed planowaną zmianą środka chemicznego należy pozyczyć następujące prace przygotowawcze: płukanie rurociągu i pompy doprowadzającej środek chemiczny do głowicy metanolem (wymieniona czynność jest po stronie wykonawcy).

Po tak przeprowadzonym procesie przygotowawczym zmiany środka chemicznego należy przeprowadzić pomiar tła sond. Pomiar tła wskazań sond powinno prowadzić się przez około 5 dni bez dozowania środka chemicznego. Podczas prowadzenia testu środków chemicznych należy: dokonywać okresowo (jeżeli to możliwe codziennie) pomiaru pH i temperatury otoczenia o określonej jednokowej godzinie pory dnia, np.  $8^{00}$  rano. Środek chemiczny ma spełniać funkcję nie tylko neutralizatora kwasu (łatwe do spełnienia), ale przede wszystkim ma tworzyć warstwę pasywacyjną, ochronną na ściankach gazociągu nieprowadzącą jednocześnie zakłóceń w pracy urządzeń technologicznych. Należy sprawdzić separator I stopnia pod kątem powstałych osadów. Dokonywać kontroli pompy, przewodów doprowadzających środek chemiczny oraz zaworów regulacyjnych, odcinających i zwrotnych. Dokonywać pomiaru wskazań sond, a w czasie 24 h po wyłączeniu tłoczenia obserwować utworzenie pasywacyjnej warstwy ochronnej. Wzrost szybkości korozji do poziomu zbliżonego do wartości wcześniej zapisanego tła odniesienia w czasie 24h po wyłączeniu tłoczenia będzie podstawą do stwierdzenia o nieskuteczności środka chemicznego. Przeliczeniowy współczynnik szybkości korozji podczas trwania testu nie może przekroczyć  $50\ \mu\text{m}/\text{rok}$ . Przekroczenie tej wartości będzie podstawą do nieuznania środka do stosowania jako inhibitor korozji. W przypadku wystąpienia przerw w pracy instalacji, następuje przerwanie testu i uznanie wyników za negatywne, jeżeli łączny czas postoju instalacji przekroczy 50 godzin. Testowane środki chemiczne nie mogą powodować zacierania i rozpuszczania uszczelnień znajdujących się w pompach oraz nie mogą wywoływać innych negatywnych skutków w urządzeniach.

Przygotowanie: sond pomiarowych, pojemników na inhibitory, miejsca dozowania oraz pomp dozujących inhibitory. Omówienie warunków testowania inhibitorów w kopalniach.



Rys. 5. Fotografie przygotowania procedur testowania środków chemicznych w kopalniach (objektach). Autor D. Bęben

Fig. 5. Photographs of preparation of procedures for testing of chemicals for mining (sites). Author D. Bęben

## 6.1. Testy inhibitorów firmy B w kopalniach

### Obiekt I

Sporządzone wykresy powstały w oparciu o otrzymane średnie dane zebrane podczas testów w kopalni w dniach:

5 dni, postęp korozji bez inhibitora 2421,9  $\mu\text{m}/\text{rok}$ ,

21 dni, postęp korozji z inhibitorem 1F 63,3254  $\mu\text{m}/\text{rok}$ ,

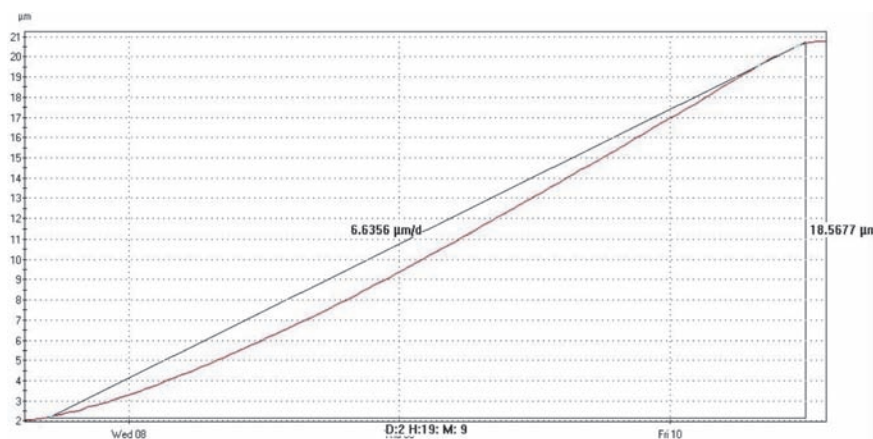
postęp korozji po teście 24 h – 516,8  $\mu\text{m}/\text{rok}$ .

Test wykazał, że inhibitor obniża korozję do 63,3254  $\mu\text{m}/\text{rok}$  i nie osiąga obniżenia wartości postępu korozji (50  $\mu\text{m}/$

rok) zapisanej w warunkach.

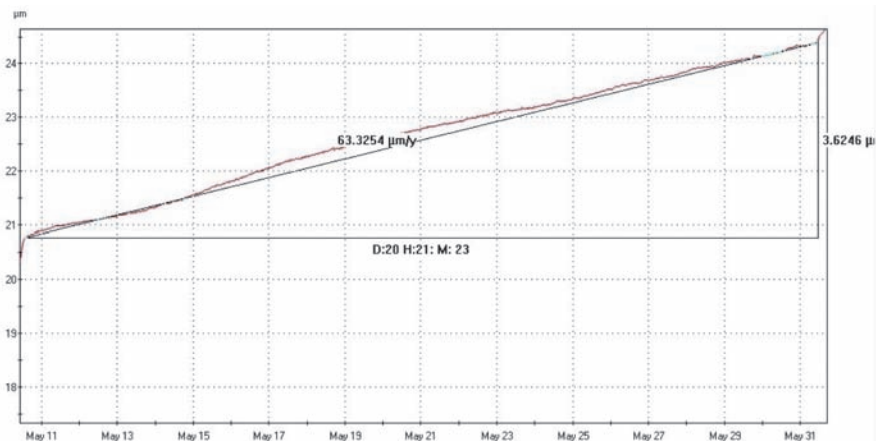
Po wyłączeniu tłoczenia inhibitora na 24 h. Po wyłączeniu tłoczenia inhibitora 1F zaobserwowano znaczny wzrost (516,8  $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) współczynnika postępu korozji. Na obiekcie zdemonstrowano sondę korozji oraz sprawdzono stan płynowskazu oraz separatora wstępnego. Nie stwierdzono "filmu" ochronnego na urządzeniach. W czasie całego testu nie zaobserwowano problemów w pracy urządzeń technologicznych.

W tabeli 7 i rysunkach 6,7,8,9 zestawiono wyniki otrzymane podczas testu inhibitora 1F w kopalni.



Rys. 6. Wskazania sondy na obiekcie I podczas testu bez inhibitora (tło)

Fig. 6. Displays of the probe on object I during the test without inhibitor (background)



Rys. 7. Wskazania sondy na obiekcie I podczas dozowania inhibitora 1F (test)

Fig. 7. Displays of the probe to object I during the dosing of inhibitor 1F (test)



Rys. 8. Wskazania sondy na obiekcie I po zakończeniu dozowania inhibitora 1F (ochrona 24h)

Fig. 8. Displays of the probe on object I at the end of dosing the inhibitor 1F (protection 24h)

Podczas testu stwierdzono awarię pompy dozującej inhibitor 1F. Brak drożności spowodowany był osadami w postaci kleistej mazi, która oblepiła głowicę pompy i elementy instalacji ssącej. Spowodowało to utratą całkowitego zaniku przepływu przez pompę.



Rys. 9. Fotografie zniszczonej sondy po zakończeniu testów inhibitora 1F firmy B. Autor A. Gliński

Fig. 9. Photographs of the destroyed probe after the tests of inhibitor 1F of company B. Author A. Gliński

Testy inhibitora rozpoczęto od wymiany sondy korozyjnej na nową. Podczas testów badano tło, które wynosiło 4500  $\mu\text{m}/\text{rok}$ , po zastosowaniu inhibitora 1F średnie wskazania postępu korozji wynosiły 6000  $\mu\text{m}/\text{rok}$ . Otrzymane wyniki wskazania sondy nie spełniają warunków.

Po zakończeniu testów inhibitora 1F firmy B sonda nie nadawała się do prowadzenia dalszych testów (rys.9).

### Ważniejsze parametry uzyskane podczas testów firmy B

Analizując otrzymane wyniki testów polowych, można stwierdzić, że inhibitory nie nadają się do zastosowania w kopalniach.

Testowane inhibitory w większości kopalni nie spełniały zakładanych warunków, nie nadają się do zastosowania – na wszystkich testowanych obiektach.

## 6.2. Testy inhibitorów firmy C

Zgodnie z ustalonym harmonogramem testów polowych po zakończeniu testów firmy B rozpoczęto testy inhibitorów firmy C. W początkowej fazie testów zebrano dane tła, a następnie przeprowadzono testy inhibitorów 70, 65, 30, 820.

Na obiekcie II test inhibitora 30 rozpoczęto od zebrania tła bez dozowania inhibitora i otrzymano postęp korozji 157  $\mu\text{m}/\text{rok}$ . Następnie przeprowadzono test z inhibitorem 30, gdzie uzyskano ograniczenie postępu korozji do 8,05  $\mu\text{m}/\text{rok}$ . Po wyłączeniu dozowania inhibitora 30 zaobserwowano ochronę korozyjną na poziomie 46,4  $\mu\text{m}/\text{rok}$ .

Na wykresach 10, 11, 12 zestawiono przebieg testu inhibitora 30.

Ważniejsze parametry uzyskane podczas testów firmy C pokazano w tab. 8.

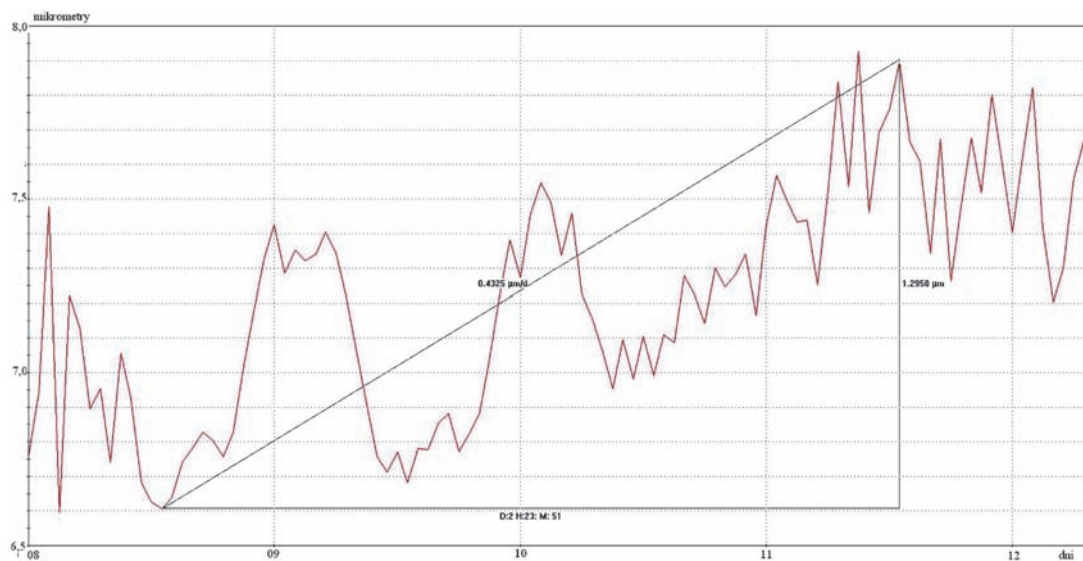
Badane inhibitory firmy C na wytypowanych odwiertach nie tworzyły problemów eksploatacyjnych. Spełniają wszystkie warunki, nadają się do zastosowania w kopalniach. Po skończonych testach inhibitory 70, 65, 30, 20 zachowywały ochronę 24 h, stwierdzono występowanie i pokrycie urządzeń "filmem" ochronnym. W czasie całego testu nie stwierdzono pienienia się wody.

## 7. Wnioski

Aby chronić rurociągi, celowe jest dobranie odpowiedniego inhibitora korozji i hydratów w celu zapobiegania niszczeniu rurociągów. Badania prowadzone są dwuetapowo – najpierw w laboratorium, a następnie przeprowadza się próby w kopalni. Do badań laboratoryjnych zebrano środki trzech firm. Po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych do prób przemysłowych w kopalniach (testy polowe) pozytywną rekomendację otrzymały środki dwóch firm (tab. 9).

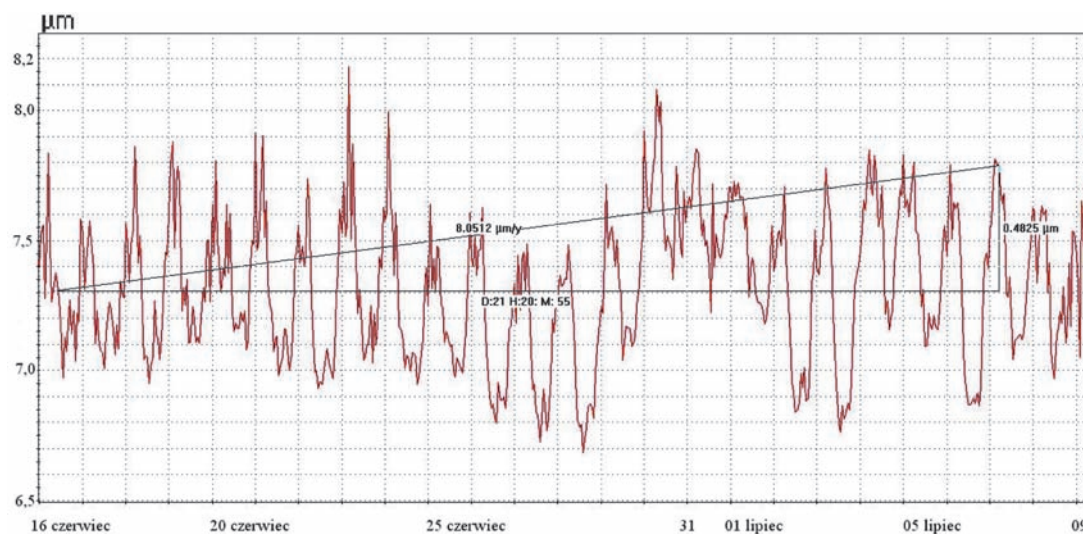
Tabela 7. Ważniejsze parametry testu inhibitorów firmy B  
Table 7. Selected test parameters of inhibitors of company B

Obiekt	I	II	III	IV	V
Pomiar tła $\mu\text{m}/\text{rok}$	2421,9	251	160,6	4500	-
Inhibitor	1F	1F	1F	1F	1/A
Ilość inhibitora l/h	0,6 - 0,9	0,25 - 0,35	6 - 4,2	0,43 - 0,3	0,25
Średnie wskazania sondy podczas testu $\mu\text{m}/\text{rok}$	63,32	37,59	227	6000	-
Ochrona po 24 h	516,8	175,2	brak	brak	-
Uwagi	Średnie wskazania podczas testu (63,3254 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) większe od zakładanych w warunkach (50 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ).	Test 24 h wykazał ubytek na poziomie 175 $\mu\text{m}/\text{rok}$ - 69% ochrony w stosunku do pomiaru tła.	Średnie wskazania podczas testu (227 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) większe od zakładanych w warunkach (50 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) Brak ochrony korozyjnej w trakcie testu i po zakończeniu dozowania inhibitora.	Średnie wskazania podczas testu (6000 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) większe od zakładanych w warunkach (50 $\mu\text{m}/\text{rok}$ ) Brak ochrony korozyjnej po zakończeniu dozowania inhibitora. Awaria głowicy pompy P501 nr 3, zaobserwowano osady w trakcie trwania testu.	Inhibitor testowany pod kątem pienienia, tworzenia osadów, nie powodował problemów eksploatacyjnych
Spełnia wymogi	Nie	Tak	Nie	Nie	Tak



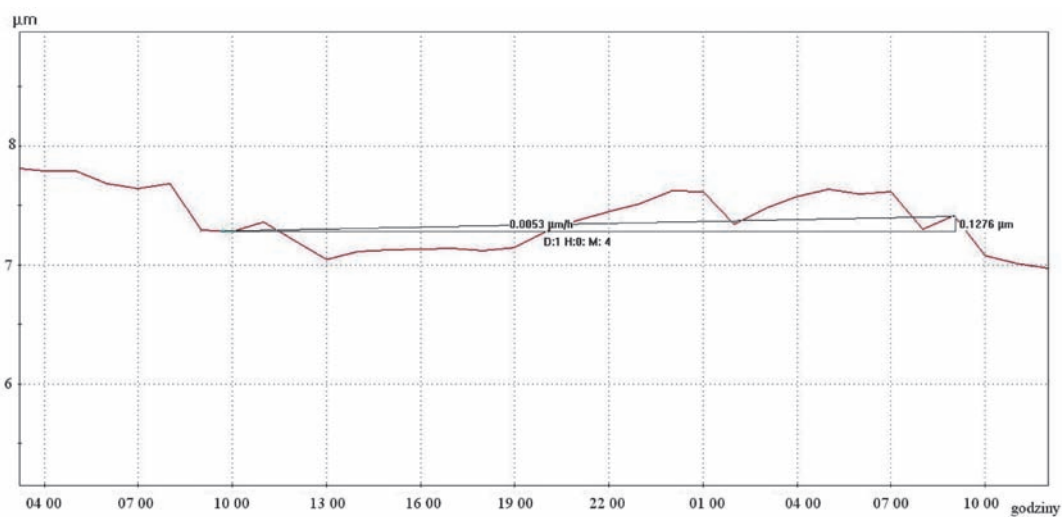
Rys. 10. Wskazania sondy na obiekcie II podczas testu bez inhibitora (tło)

Fig. 10. Displays of the probe on object II during the test without inhibitor (background)



Rys. 11. Wskazania sondy na obiekcie II podczas dozowania inhibitora 30 (test)

Fig. 11. Displays of the probe on object II during dosing the inhibitor 30 (test)



Rys. 12. Wskazania sondy na obiekcie II po zakończeniu dozowania inhibitora 30 (ochrona 24h)

Fig. 12. Displays of the probe on object II at the end of dosing the inhibitor 30 (protection 24h)

**Tabela 8. Ważniejsze parametry testu inhibitorów firmy C**  
**Table 8. Selected test parameters for inhibitors of company C**

Obiekt	I	II	III	IV	V
Pomiar tła $\mu\text{m}/\text{rok}$	1728	157,8	110		-
Inhibitor	30	30	70	65	20
Ilość inhibitora l/h	0,5	głowica 0,5 + 0,3 separator	9	0,5	4,5
Średnie wskazania sondy podczas testu $\mu\text{m}/\text{rok}$	24,67	8,05	5	-	-
Ochrona po 24 h $\mu\text{m}/\text{rok}$	59,56	46,42	5	-	-
Uwagi				Inhibitor testowany pod kątem pienienia, tworzenia się osadów, nie powodował problemów eksploatacyjnych	Inhibitor testowany pod kątem pienienia, tworzenia osadów, nie powodował problemów eksploatacyjnych
Spełnia warunki	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak

**Tabela 9. Wybrane inhibitory do testów**  
**Table 9. Selected inhibitors for the tests**

Obiekt / Firma	I	II	III	IV	V
B Inhibitor	1F	1F	1F	1F	1/A
C Inhibitor	30	30	70	65	20

Próby przemysłowe przeprowadzono na pięciu obiektach. Po zakończeniu testów na kopalnianych można stwierdzić:

Inhibitor 1F firmy B nie nadaje się do zastosowania w kopalniach, ponieważ nie spełnia warunków. Testowany inhibitor 1F na większości testowanych obiektów nie spełniał zakładanych wymogów skuteczności, nie ograniczał postępu korozji, a na odwiercie obiekt II po awarii pompy zaobserwowano osady. Badany inhibitor 1F w większości kopalń nie spełniał zakładanych warunków, nie nadaje się do zastosowania – wymagane było uzyskanie pozytywnych wyników na wszystkich testowanych obiektach.

Inhibitory 70, 65, 30, 20 firmy C nie stwarzały problemów eksploatacyjnych (nie powodowały powstawania hydratów, nie pieniały i nie powodowały wytrąceń osadów), ograniczały postęp korozji zgodnie z założeniami. Po skoń-

czonych testach inhibitory 70, 65, 30, 20 zachowywały 24-godzinną ochronę. Stwierdzono występowanie "filmu" ochronnego na urządzeniach. Badane inhibitory mogą być zastosowane w kopalniach.

Wykonane badania pozwalają na zabezpieczenie ludzi, majątku i środowiska przed szkodliwymi skutkami korozji. Zastosowanie zdobytego doświadczenia w znacznym stopniu przyczynia się do skutecznego dobrania inhibitorów, w celu wydłużenia okresu eksploatacji obiektów metalowych przez ograniczenie awaryjności i podniesienie bezpieczeństwa.

## Literatura

1. Bielski M.: Anty(korozja) w energetyce – skorodowane znaki zapytania? „Urządzenia dla Energetyki” 2010 nr 6, 70-73.
2. Osokogwu U., Oghenekaro E.: Evaluation of corrosion inhibitors effectiveness in oilfield production operations. International Journal of Scientific & Technology Research, May 2012, Volume 1, Issue 4.
3. Sokulski W.: „Certyfikacja personelu” 2008, nr 1-2, 2-7.
4. Stachowicz A.: Korozja rur wydobywczych odwiertów gazowych z zawartością CO<sub>2</sub>; „Nafta – Gaz” 2011, 395-400.
5. Z.W. Wicks, F.N. Jones, S.P. Papas, D.A. Wicks.: *Organic Coatings. Science and Technology*; Wiley 2007, 137-158.

# Wpływ eksploatacji węgla brunatnego na strukturę przestrzenną i funkcjonowanie systemów krajobrazowych (na przykładzie odkrywki Władysławów)

Impact of lignite exploitation on the spatial structure and functioning of landscape systems – a case study of the opencast Władysławów



Dr Katarzyna Fagiewicz\*)



Mgr Monika Szulc\*\*)

**Treść:** W artykule przedstawiono zmiany struktury przestrzennej i funkcjonowania systemu krajobrazowego terenu górniczego Władysławów związane z kolejnymi etapami odkrywkowej eksploatacji węgla brunatnego. Analizie poddano powierzchnię budowę geologiczną, ukształtowanie terenu oraz jego pokrycie (płaty gruntów ornych, lasów, łąk, zbiorników wodnych naturalnych i antropogenicznych, obszary antropogeniczne), a zmiany tych elementów scharakteryzowano w ujęciu ilościowym i jakościowym. Funkcjonowanie krajobrazu określono na podstawie analizy wielkości i natężenia głównych strumieni materialno-energetycznych w geosystemie górniczym (energia elektryczna, węgiel brunatny, nadkład, woda).

**Abstract:** This paper presents changes in the spatial structure and functioning of the landscape system of the mining area Władysławów related to the successive stages of opencast lignite exploitation. The surface geological structure, terrain, and its cover (patches of arable land, forests, meadows, natural and anthropogenic water reservoirs, anthropogenic areas) were analyzed, and changes in these components in terms of quantity and quality characterized. The functioning of the landscape was determined on the basis of the size and intensity of the main material and energy streams of mining geosystems (electricity, lignite, overburden, water).

## Słowa kluczowe:

eksploatacja węgla brunatnego, obszary pogórnice, rekultywacja, zmiany krajobrazu

## Key words:

lignite mining, post-mining areas, reclamation, changes in the landscape

## 1. Wprowadzenie

Systemy krajobrazowe są układami dynamicznymi: zmieniają swoją strukturę i funkcje w różnych kierunkach i z różną intensywnością, w zależności od miejsca, czasu, sposobu działania sił przyrody oraz charakteru działalności człowieka [3]. Z punktu widzenia ekologii krajobrazu najbardziej istotne są zmiany przestrzenne [1], ich charakter i dynamika, warunkujące funkcjonowanie systemów krajobrazowych. Są one podmiotem opracowania, rozpatrywanym w kontekście procesu eksploatacji węgla brunatnego. Eksploatacja węgla brunatnego metodą odkrywkową, z racji swojej specyfiki,

jest przykładem działalności człowieka powodującej spektakularne przekształcenia krajobrazu. W pierwszej fazie przyczynia się do degradacji krajobrazu, a w kolejnych etapach, poprzez proces rekultywacji i zagospodarowania kształtuje nowe (wtórne) krajobrazy pogórnice. Przez wiele lat pojęcie rekultywacji w polskich definicjach ograniczało się do technicznego i biologicznego odzyskiwania terenów na rzecz środowiska przyrodniczego. Nowe podejście polega na adaptacji obszarów pogórnich do pełnienia nowych funkcji, przy wykorzystaniu ich atrakcyjności naturalnej oraz elementów antropogenicznych powstałych podczas działalności wydobywczej [10], a także promowaniu nowego postrzegania obszarów pogórnich - nie jako zagrożenia, a szansę dla rozwoju [por. 11]. Realizacja tego podejścia winna się opierać na współpracy specjalistów z zakresu planowania przestrzennego, zarządzania środowiskiem, architektury krajobrazu,

\*) Zakład Geografii Kompleksowej, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM, Poznań. \*\*) Ekomos Ochrona Środowiska, Władysławów



a podstawę tej współpracy powinny stanowić kompleksowe studia geosrodowiskowe i krajobrazowe obszarów pogórnicych, charakteryzujące ich strukturę i funkcjonowanie, kierunki i dynamikę przemian, pozwalające określić optymalne kierunki rekultywacji i adaptacji tych terenów.

Modelowym przykładem obszaru zmian krajobrazu pod wpływem działań górnictwa odkrywkowego są okolice Władysławowa (gmina Władysławów, powiat turecki, województwo wielkopolskie). W opracowaniu poddano analizie wycinek przestrzeni geograficznej znajdującej się w granicach terenu górniczego Władysławów I. Obejmuje on powierzchnię 58,27 km<sup>2</sup>, z czego 20,8 km<sup>2</sup> stanowi obszar górniczy wraz z reprezentatywnymi formami w postaci zwałowiska zewnętrznego, zwałowisk wewnętrznych, wyrobiska końcowego. Eksploatację złoża węgla brunatnego w odkrywcę Władysławów rozpoczęto w 1977 roku, zdejmowanie nadkładu zakończono w czerwcu 2011, natomiast zakończenie wydobycia nastąpiło 2 kwietnia 2012 roku. Przemiany krajobrazu będące skutkiem zarówno procesów naturalnych, jak i rekultywacji oraz zróżnicowanych form gospodarczego użytkowania dokonywały się na tym obszarze ponad 36 lat, a ich dynamika może utrzymywać się przez kolejne lata, w zależności od przebiegu procesów rekultywacyjnych.

## 2. Cel i metody badań

Celem opracowania jest analiza zmian struktury przestrzennej i funkcjonowania systemu krajobrazowego w granicach terenu górniczego Władysławów związanych z kolejnymi etapami odkrywkowej eksploatacji węgla brunatnego i fazami rekultywacji. Jedną z podstawowych metod badania przekształceń zachodzących w systemach krajobrazowych jest analiza zmian struktury terenu w przekrojach czasowych. W opracowaniu analizie poddano ukształtowanie powierzchni terenu, jego powierzchniową budowę geologiczną oraz pokrycie terenu (płaty gruntów ornych, lasów, łąk, zbiorników wodnych naturalnych i antropogenicznych, obszary antropogeniczne), charakterystyczne dla badanego obszaru przed rozpoczęciem eksploatacji węgla brunatnego (obszar przedgórnicy) i strukturę ukształtowaną w wyniku procesów naturalnych oraz rekultywacji i zagospodarowania (obszar pogórnicy). Funkcjonowanie krajobrazu rozpatrywane jest najczęściej ze względu na przepływ materii i energii, zakładając, że w ekosystemach tworzących krajobrazy naturalne, dopływ i przepływ materii oraz energii zależy od sił przyrody, a stopień przekształcenia krajobrazu wyraża wielkość dopływu antropogenicznych strumieni materialno-energetycznych [por. 2]. Przyjmując powyższe założenie, zmiany funkcjonowania systemu krajobrazowego w obrębie odkrywki Władysławów określono na podstawie analizy wielkości i natężenia przepływów materialno-energetycznych w geosystemie górnicy.

## 3. Zmiany struktury krajobrazu w granicach terenu górniczego Władysławów

Cechą charakterystyczną obszarów pogórnicych są dynamiczne zmiany wszystkich komponentów środowiska obserwowane na różnych etapach postępu robót górniczych, prac rekultywacyjnych i zagospodarowania terenu. Przejawiają się najsilniej w morfologii i hydrografii terenu, w szacie roślinnej i pokryciu terenu, prowadząc w konsekwencji do zmian sposobów użytkowania ziemi. Teren górnicy Władysławów jest modelowym przykładem zmian, jakie zachodzą w środowisku przyrodniczym pod wpływem procesu eksploatacji węgla

brunatnego. Zmiany te przedstawiono w tabeli 1, aby umożliwić porównanie stanu środowiska przyrodniczego przed rozpoczęciem działalności górniczej i po jej zakończeniu.

Wizualizacją procesów i zjawisk zachodzących w środowisku przyrodniczym pod wpływem eksploatacji węgla brunatnego (tabela 1) są zmiany krajobrazu terenu górniczego Władysławów. Ilościową charakterystykę tych zmian przedstawia tabela 2.

Krajobraz terenu górniczego Władysławów przed rozpoczęciem eksploatacji charakteryzował się dużym urozmaiceniem rzeźby. Dominującym typem terenu były obszary faliste i pagórkowate z deniwelacjami dochodzącymi do 20 m i spadkami 10 – 15°. Wraz z długimi zboczami, strefami krawędziowymi oraz wzniesieniami moren czołowych o deniwelacjach 20 – 40 m, pokrywały one 77,5% powierzchni. Krajobraz uzupełniały doliny rzek i cieków (9,25%) oraz wyniesione ponad nimi wysoczyzny równinne zajmujące 13% powierzchni terenu górniczego. Powierzchniową budowę geologiczną charakteryzowała dla krajobrazów peryglacialnych z przewagą utworów piaszczystych (67,12%), piasków gliniastych i glin (16,84%). Grunty zmienione przez człowieka (antropogeniczne) występowały głównie pod zabudową mieszkaniową, przemysłową i miały niewielki udział (4,19%) w litologii badanego obszaru. Krajobraz przedgórnicy kształtowany był pod dominującym wpływem procesów zachodzących w systemie środowiska przyrodniczego, w niewielkim stopniu został zmieniony przez rolnicze użytkowanie. Płaty gruntów ornych (42,76 km<sup>2</sup>) zajmowały 73,38% powierzchni badanego obszaru. Drugim wyróżniającym się elementem krajobrazu pogórniczego były lasy, zajmujące powierzchnię 7,58 km<sup>2</sup> (13,01%), o charakterystycznej strukturze z dwoma dużymi, stabilnymi kompleksami leśnymi (2,97 km<sup>2</sup> i 1,18 km<sup>2</sup>) i licznymi, rozproszonymi w przestrzeni płatami leśnymi, o niewielkich powierzchniach, nieprzekraczających 1 ha. Powierzchnie leśne wraz z innymi elementami struktury ekologicznej w postaci łąk, pastwisk, obszarów podmokłych stanowiły 22,44%, natomiast pozostałe 4,19% powierzchni użytkowano głównie jako obszary zabudowy mieszkaniowej. Cechą charakterystyczną krajobrazu, typową dla obszarów starogłacialnych, był zupełny brak naturalnych jezior, a wody powierzchniowe reprezentowane były przez 6 niewielkich oczek wodnych o średniej powierzchni 0,26 ha. Krajobraz przedgórnicy miał charakter typowo rolniczy, o niewielkiej lesistości, a jego strukturę w 95,82% tworzyły elementy naturalne i półnaturalne.

Analiza wartości analogicznych wskaźników obliczonych dla obszaru pogórniczego pozwala wskazać kierunki i tendencje zmian, jakie zaszły w krajobrazie w wyniku naturalnych procesów (ewolucji krajobrazu) oraz eksploatacji węgla brunatnego, rekultywacji i zagospodarowania terenu.

Najbardziej istotne z punktu widzenia ekologii krajobrazu są trwałe i nieodwracalne przekształcenia rzeźby terenu. Ukształtowanie terenu to czynnik, który wzbudza ruch powietrza, obieg wilgoci w atmosferze, grawitacyjne przenoszenie materiału po stoku, spływ wody po powierzchni terenu, ruch wody w gruncie oraz decyduje o ich kierunkach i natężeniu. Rzeźba terenu jest zatem determinantą funkcjonowania środowiska przyrodniczego. Zmiany rzeźby w granicach terenu górniczego Władysławów wiązały się głównie ze wzrostem udziału obszarów równinnych. Ich powierzchnia wzrosła z 7,79 do 12,81 km<sup>2</sup>, co stanowi aktualnie 22% obszaru górniczego. Obszar eksploatacji objął swoim zasięgiem 5,84% obszarów falistych i pagórkowatych wraz ze strefami zboczowymi, 3,11% dolin oraz 1,69% równin. Obecnie obszar ten stanowi równopoziomowe, sypane do rzędnej wysokości terenu (tab. 1) zwałowisko wewnętrzne. Fizjonomię krajobrazu urozmaica pojedyncze, izolowane wzniesienie zwałowiska

**Tabela 1. Zmiany środowiska przyrodniczego pod wpływem eksploatacji węgla brunatnego na przykładzie terenu górniczego Władysławów**

**Table 1. Changes in the natural environment under the influence of lignite exploitation – the case of the mining area Władysławów**

TEREN GÓRNICZY WŁADYSŁAWÓW	
OBSZAR PRZEDGÓRNICZY	OBSZAR POGÓRNICZY
Ukształtowanie terenu	
Rzeźba ukształtowana w wyniku procesów glacialnych i fluwioglacjalnych zlodowacenia środkowopolskiego. Powierzchnię nadłożem stanowiła wysoczyzna morenowa płaska wyniesiona ponad dolinę Topca do wysokości 100 – 112 m n.p.m. Teren wokół złoża bardziej urozmaicony, o charakterze rzeźby decyduje wysoczyzna falista i pagórkowata, Wzgórza Władysławowskie i Białkowskie, ostatecznie denudacyjny. Deniwelacje średnio 20–40 m, max. 76,4 m, spadki 10-15%, max. 25%. Kulminację stanowi wzniesienie Wzgórz Władysławowskich o wys. 164,8 m n.p.m., a najniższy położony punkt (88,4 m n.m.) zlokalizowany jest w dolinie rzeki Topiec.	W zachodniej części obszaru (wieś Piorunów) nowa, dominująca ponad doliną Topca forma rzeźby w postaci zwałowiska zewnętrznego, o powierzchni 35,4 ha, wysokości względnej 20–28 m, stromych zboczach, niewyrównanej wierzchołkiem wyniesionej do wysokości 116 m n.p.m. Zwałowisko wewnętrzne równopoziomowe (pow. 620 ha) zlokalizowane między południkową osią doliny Topca i dochodzącą do niej równoleżnikową doliną erozyjno-denudacyjną, ograniczającą zwałowisko od północy. W części zachodniej zwałowisko wyniesione na wysokość 90 – 100 m n.p.m, w części środkowej i południowej na wysokość 110 – 130 m n.p.m i 140 m n.p.m w części wschodniej. W bezpośrednim sąsiedztwie zwałowiska znajduje się fragment wkopu otwierającego, zawodnionego i pełniącego obecnie funkcję osadnika wód kopalnianych. W części wschodniej obszaru górniczego, między Russocicami a Milinowem zlokalizowane jest wyrobisko końcowe o kubaturze ok. 42 mln. m <sup>3</sup> , powierzchni 119,3 ha, dno wyrobiska znajduje się na rzędnej od 65 do 80–83 m n.p.m. Planuje się wypełnienie wyrobiska wodą do wysokości 101-105 m n.p.m.
Budowa geologiczna	
W powierzchniowej budowie geologicznej występują warstwy skał trzeciorzędowych, głównie, neogeńskich piasków drobnoziarnistych z soczewkami węgla brunatnych, piasków pylastych oraz ilów, mułków i piasków ilastych. Przykryte w czwartorzędzie osadami lodowcowymi i wodnolodowcowymi zlodowacenia południowo i środkowopolskiego reprezentowanymi przez gliny piaszczyste i zwarte gliny zwałowe (rdzawe i szare), ropy oraz piaski fluwioglacjalne, żwiru, glazy narzutowe, piaski międzyglinowe. W nadkładzie złoża dominują utwory spoiście (60%), pozostałą część stanowią utwory piaszczysto-żwirowe. W dolinach cieków i obniżeniach występują holocenijskie torfy, gytie i utwory organogeniczne.	Proces urabiania, transportu i zwałowania utworów występujących w nadkładzie spowodował przemieszczenie gruntów: ilów, glin piaszczystych i zwałowych, glazów narzutowych, piasków i żwirów, a w efekcie nieodwracalne przekształcenie pierwotnej budowy geologicznej. Zmianom struktury towarzyszą zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów - rozluźnienie, zbrzylenie, rozdrobnienie, wzrost ściśliwości. W rezultacie grunty zwałowe charakteryzują się większą ściśliwością, niż grunty o nienaruszonej strukturze, co uzewnętrznia się w postaci osiadań. Na zwałowisku zewnętrznym odnotowano osiadania rzędu 91 mm, na obszarach przyległych do odkrywki 0 - 41 mm.
Wody powierzchniowe	
Obszar położony w dorzeczu Warty, w zlewni Topca. Topiec, lewostronny dopływ Warty, to rzeka o długości 19 km, o częściowo uregulowanym korycie, ograniczająca teren górniczy od zachodu. Sieć hydrograficzną obszaru zmieniono głównie w wyniku prac melioracyjnych jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji. Silnie zawodniona dolina została w znacznym procencie zmeliorowana, osuszona i przeznaczona na grunty orne i łąki.	Zmiany w obrębie sieci hydrograficznej niewielkie, polegające głównie na adaptacji koryt do przyjęcia i odprowadzania wód z odwodnienia górotworu. Koryto Topca zostało przelożone na odcinku 700 m (po zachodniej stronie wkopu udostępniającego) oraz uregulowane i obwałowane na długości 1,5 km powyżej przelożonego odcinka. Odwodnienie grawitacyjne do rzeki Topiec (i dalej do Warty) systemem równoleżnikowych rowów (północnego i południowego). Drenujący charakter eksploatacji spowodował osuszenie znacznej części zlewni. Nowe elementy sieci hydrograficznej stanowi osadnik wód kopalnianych (brudnych), odprowadzalni, a w przyszłości planowany w wyrobisku końcowym zbiornik wodny Władysławów o powierzchni 108,8 ha.
Gleby	
Dominują gleby wykształcone głównie na piaskach fluwioglacjalnych; pod względem typologicznym są to gleby brunatne wylugowane i płowe, zaliczane do 6 i 7 kompleksu rolniczej przydatności (V i VI klasa). Udział tych gleb w gruntach ornych stanowi ponad 70%. Korzystniejsze warunki glebowe występują w rejonie Władysławowa i Chyliny oraz Natalii i Leonii, gdzie miejscami na piaskach gliniastych lekkich, piaskach gliniastych mocnych i glinach lekkich wykształciły się gleby brunatne właściwe reprezentujące 5 i 4 kompleks oraz czarne ziemie właściwe kompleksu 2.	Od początku działalności górniczej zrehabilitowano w kierunku rolnym 560 ha gruntów zwałowych, z czego przekazano i zbyto 455 ha (stan na 2009 r.). Gleby wytworzone z gruntów zwałowych podlegają ciągłemu procesowi rozwoju. Poddane bonitacji po okresie 10–15-letniej rekultywacji biologicznej (poprawa właściwości fizyczno-chemicznych dzięki zastosowaniu wysokiego nawożenia mineralnego oraz stosowaniu zespołu upraw mechanicznych) sklasyfikowane są w V i VI klasie. Oznacza to odtworzenie warunków glebowych sprzed eksploatacji. Racjonalne użytkowanie rolnicze tych gleb, regulacja stosunków wodnych, agromelioracyjne wapnowanie gruntów kwaśnych sprzyjać będzie rozwojowi procesów glebotwórczych w kolejnych latach, co stwarza szansę na poprawę właściwości fizyczno-chemicznych gleb i podniesienie klasy bonitacyjnej.
Użytkowanie terenu	
Obszar rolniczy z przewagą pól uprawnych (73,4%) i niewielkim udziałem łąk i pastwisk (9,4%). Lesistość na poziomie 13%. We wschodniej części obszaru górniczego występuje jeden zwarty kompleks leśny o charakterze ostoi (pow. 707,4 ha), który uzupełniają pojedyncze, niewielkie płyty leśne. Grunty antropogeniczne, rozproszone, zajmują ok. 10% powierzchni i występują głównie pod zabudową.	W strukturze użytkowania wzrost udziału gruntów antropogenicznych, co wiąże się z rozwojem zabudowy na tym obszarze i dużym odsetkiem użytków kopalnianych. Wzrost lesistości o 11,7% związany z leśnym kierunkiem rekultywacji zwałowiska zewnętrznego i wschodniego fragmentu zwałowiska wewnętrznego. Znaczna część zwałowiska zewnętrznego (90,3%) zrehabilitowana w kierunku rolnym. Nowymi, niewystępującymi przed eksploatacją elementami w strukturze użytkowania są zbiorniki wodne: osadnik i powstający w wyrobisku końcowym zbiornik Władysławów.

Źródło: opracowanie K. Fagiewicz na podstawie [9], [4], [5], [7], Mapa geologiczna Polski 1 : 200 000

Source: developed by K. Fagiewicz using [9], [4], [5], [7], Polish Geological Map 1:200 000

**Tabela 2. Zmiany krajobrazu w granicach terenu górniczego Władysławów – ujęcie ilościowe**  
**Table 2. Landscape changes within the mining area Władysławów – quantification**

TEREN GÓRNICZY WŁADYSŁAWÓW (pow. 58,27 km <sup>2</sup> )	Typy rzeźby terenu (powierzchnia, km <sup>2</sup> )					
	Doliny, obniżenia terenu, zagłębienia bezodpływowe	Obszary faliste i pagórkowate	Obszary równinne	Wzgórza	Strefy krawędziowe, zbocza	
przed eksploatacją	5,55	26,54	7,79	13,54	4,85	
po eksploatacji	3,58	25,24	12,81	13,89	2,75	
Powierzchniowe utwory geologiczne (litologia) (powierzchnia, ha)						
	Rumosze i żwiry	Piaski luźne, słabo gliniaste	Piaski gliniaste, gliniaste mocne, gliny	Grunty organiczne (torfy i gleby murszowe)	Grunty antropogeniczne (zmieszane)	
przed eksploatacją	0,00	39,11	9,81	6,87	2,44	
po eksploatacji	0,00	32,34	8,02	6,95	10,96	
Użytkowanie terenu (powierzchnia, ha)						
	Obszary rolnicze (grunty orne, sady, uprawy trwałe)	Łąki, pastwiska	Lasy	Zabudowa mieszkaniowa, przemysłowa i usługowa	Zbiorniki wodne (naturalne i sztuczne)	Nieuzytki
przed eksploatacją	42,76	5,48	7,58	2,44	0,02	0,00
po eksploatacji*	38,21	1,77	14,39	2,63	0,07	1,19
po zakończeniu procesu rekultywacji (prognoza na rok 2018)	rekultywacja rolna gruntów w otoczeniu zbiornika	jw.	zalesienie NE części otoczenia zbiornika	rozwój zabudowy rekreacyjnej mieszkaniowej w otoczeniu zbiornika	powstanie zbiornika Władysławów w wyrobisku końcowym o pow. 1,09 km <sup>2</sup>	obszary poddane rekultywacji

Źródło: Opracowanie własne, Fagiewicz

Source: personal work, Fagiewicz

zewnątrznego, zlokalizowanego w dnie doliny Topca, które według klasyfikacji geokompleksów antropogenicznych [6] zalicza się do form obcych w tym środowisku, odcinających się od bliższego, a nawet dalszego otoczenia [5].

Do trwałych i nieodwracalnych zmian środowiska przyrodniczego związanych z górnictwem odkrywkowym należą przekształcenia litologii. Przemieszanie utworów występujących w nadkładzie złoża w procesie urabiania, transportu i zwałowania powoduje trwałe i nieodwracalne zmiany w powierzchniowej budowie geologicznej obszaru. W litologii obszaru górniczego Władysławów obecnie 14,3% stanowią grunty przekształcone w wyniku działalności wydobywczej, 4,3% grunty pod zabudową. Razem udział gruntów antropogenicznych zwiększył się z 4,19 do 18,81%.

Przekształcenia struktury dotyczą głównie zmian udziału poszczególnych typów użytkowania w krajobrazie. Powierzchnia gruntów ornych (z uwzględnieniem gruntów pogórnich zrehabilitowanych w kierunku rolnym) zmniejszyła się z 42,76 km<sup>2</sup> do 38,21 km<sup>2</sup> (o 10,64%), a ich procentowy udział w krajobrazie do 65,57%. Najbardziej charakterystyczną i pożądaną z punktu widzenia ekologii krajobrazu zmianą jest prawie 90-procentowy wzrost powierzchni lasów (z 7,58 do 14,39 km<sup>2</sup>) i zmiany ich struktury. Płaty leśne są mniej liczne w krajobrazie, natomiast ich powierzchnia się zwiększyła. We wschodniej części terenu górniczego wykształcił się duży kompleks leśny o powierzchni 7,36 km<sup>2</sup>, mający charakter ostoi, a powierzchnie kolejnych czterech kompleksów przekraczają 1 km<sup>2</sup>, co pozwala uznać je za stabilne kompleksy leśne. Udział lasów w strukturze krajo-

brazu terenu górniczego wzrósł z 13,01% do 24,7%. Wzrost lesistości związany jest głównie z polityką zalesieniową kraju, w mniejszym stopniu z rekultywacją w kierunku leśnym. Powierzchnia gruntów pogórnich zrehabilitowanych w kierunku leśnym wynosi 89 ha (stan na 2009 r.). Dużej redukcji, z 5,48 do 1,77 km<sup>2</sup> (68%) uległy powierzchnie obszarów podmokłych i użytków zielonych (łąk i pastwisk). Proces ten związany jest z eksploatacją węgla brunatnego w dolinie Topca i dopływającego do niego rowu północnego. Obecnie część dolin tych cieków zajmuje zachodni fragment zwałowiska wewnętrznego zrehabilitowany w kierunku rolnym, zalesione zwałowisko zewnętrzne i osadnik wód brudnych (we wkopie udostępniającym złożo). Odwodnienie złoża spowodowało wcześniejsze procesy melioracji, powodując osuszenie zlewni i przeznaczenie znacznej części użytków zielonych na grunty orne. Zbilansowanie powierzchni płatów tworzących strukturę ekologiczną (lasów, obszarów podmokłych, łąk i zbiorników wodnych) wskazuje, że ich udział w krajobrazie zwiększył się do 27,85% (z 22,44%). Nowy, nie-występujący w krajobrazie przedgórnym typ użytkowania, stanowi nieużytek (2,04%) w postaci wyrobiska końcowego. Według założeń rekultywacyjnych w okresie 5 lat (do 2018 r.) zagłębienie zostanie wypełnione wodą. Powstały zbiornik wodny o powierzchni 108,8 ha stanowić będzie nowy element krajobrazu pogórnego, który wzbogaci starogłębny, pozabawiony jezior obszar, wzmocni jego strukturę ekologiczną (udział płatów tworzących strukturę ekologiczną wzrośnie do 30%), będzie miał istotne znaczenie dla gospodarki wodnej oraz rozwoju turystyki i rekreacji wodnej.

#### 4. Zmiany funkcjonowania krajobrazu w granicach terenu górniczego Władysławów

Stopień przekształcenia krajobrazu w ujęciu funkcjonalnym wyraża się wielkością przepływów antropogenicznych strumieni materialno-energetycznych [2]. Funkcjonowanie geosystemów sztucznych (antropogenicznych), do których należą geosytemy górnicze, determinują przepływy materialno-energetyczne, których wielkością i natężeniem steruje człowiek. Analizę ich wielkości w odkrywce Władysławów przeprowadzono w oparciu o dwa podejścia: merologiczne i holistyczne (metoda „czarnej skrzynki”). Podejście merologiczne pozwoliło wyróżnić strumienie materii i energii na „wejściu” i „wyjściu” z ekosystemu (ryc.1). Metoda „czarnej skrzynki” zakłada pominięcie transformacji tych strumieni wewnątrz ekosystemu [8]. Przyjęcie takiego założenia wynikało z braku danych ilościowych określających wielkość i stopień przekształceń. Ocena funkcjonowania geosystemu górniczego Władysławów oparto na analizie dynamiki zmian wielkości i natężenia głównych strumieni materialno-energetycznych „wejściowych” (energii elektrycznej) i „wyjściowych” (węgiel brunatny, nadkładu, wody).

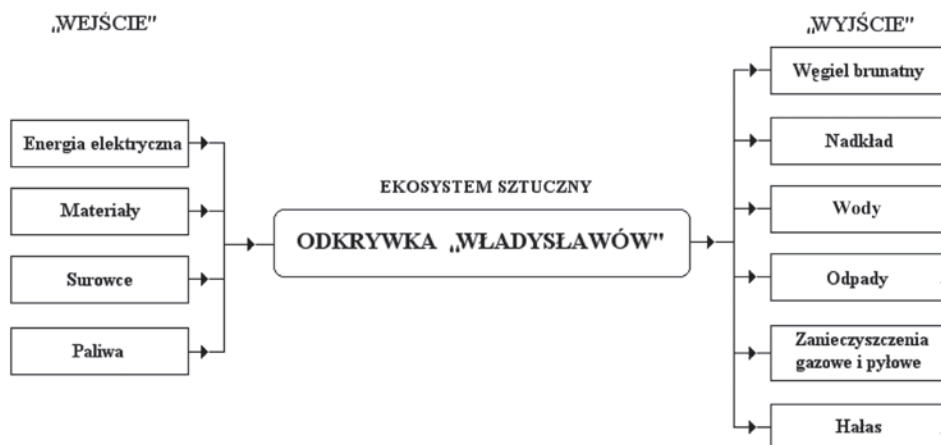
Najbardziej istotnym, z punktu widzenia działalności wydobywczej, strumieniem materii jest węgiel brunatny. Od momentu rozpoczęcia wydobywania węgla w 1978 r. do roku 2008 ze złoża „Władysławów” wydobyto 35,68 mln Mg

węgla. Ilość wydobywanego surowca w ciągu roku wahała się od 2,09 mln Mg w 1995 r. do 0,50 mln Mg w roku 2008 (ryc.2). Niskie wartości wydobywania charakterystyczne są dla okresu poprzedzającego zakończenie eksploatacji (2012 r.). Węgiel brunatny jest strumieniem materialnym wychodzącym poza geosystem. Jego trwały brak jest nieodwracalnym skutkiem przekształcenia budowy geologicznej i stanowi jeden z elementów zaburzających równowagę w geosystemie środowiska przyrodniczego.

Kolejnym strumieniem materii wychodzącym z ekosystemu górniczego jest nadkład. Nadkład stanowią utwory geologiczne zalegające nad złożem, które w pierwszej fazie eksploatacji opuszczają geosystem i powracają do niego po wydobywaniu kopaliny, tworząc zwałowiska nadziemowe, podziemowe lub równe rzędnej otaczającego terenu. Zmiana ich właściwości fizycznych (tab.1) wpływa na zmiany funkcjonowania wykształconych w procesie rekultywacji geosystemów pogórnich (osiadanie, infiltracja, retencja gruntowa, parowanie). Zbieranie nadkładu w Odkrywce „Władysławów” rozpoczęto w 1976 r. Do końca 2008 r. zdeponowano ponad 144,71 mln m<sup>3</sup> gruntów. Od początku rozpoczęcia eksploatacji do 1995 r. ilość zdejmowanego nadkładu systematycznie wzrastała, osiągając w latach kolejnych średnią wartość 4,39 mln m<sup>3</sup>. W porównaniu z pozostałymi odkrywkami KWB „Adamów” wielkość tego wskaźnika jest najniższa. W odkrywce „Adamów”

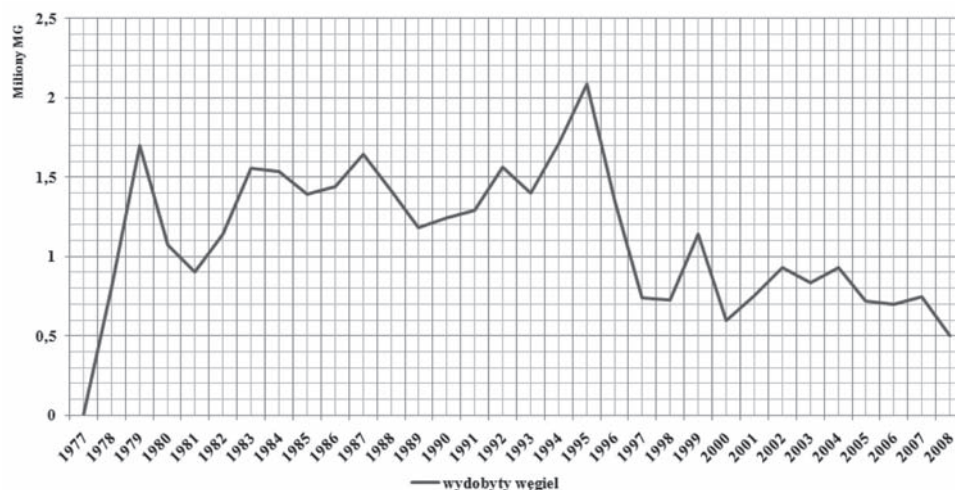
Ryc. 1. Model antropogenicznych przepływów materii i energii przez ekosystem kopalni węgla brunatnego  
Źródło: Opracowanie własne M. Szulc

Fig. 1. Model of anthropogenic flows of matter and energy through an ecosystem of a lignite mine  
Source: personal work Szulc



Ryc. 2. Wydobywanie węgla w odkrywce Władysławów w latach 1977 - 2008  
Źródło: Opracowanie własne M. Szulc na podstawie materiałów KWB „Adamów”

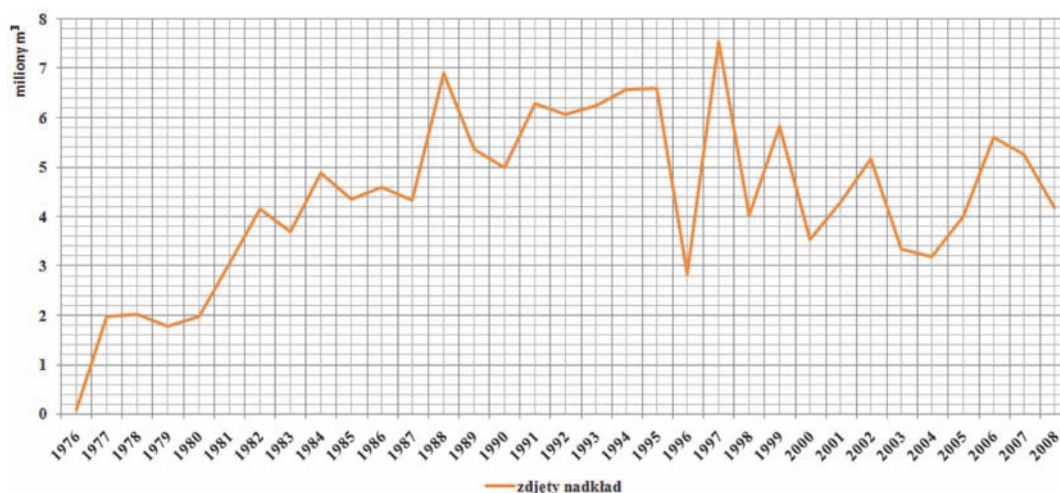
Fig. 2. Coal mining in opencast Władysławów from 1977 to 2008  
Source: personal work M. Szulc, based on the materials of the Lignite Mine “Adamów”



zdejmuje się 17,24 mln m<sup>3</sup>, w odkrywce „Kozmin” 8,67 mln m<sup>3</sup>. Odkrywka „Władysławów” charakteryzowała się korzystnym stosunkiem N/W (nadkładu do węgla) – 3,1 : 1. Średnia grubość nadkładu wynosiła 26,8 m, przy średniej miąższości pokładu węgla 8,6 m [12]. Tendencje zmian ilości zdejmowanego nadkładu prezentuje ryc. 3

Wydobycie węgla wiąże się z koniecznością odwodnienia złoża. Proces ten uruchamia odpływ wód powierzchniowych poza granice geosystemu górniczego i naturalnej zlewni. Wody z odwodnienia złoża Władysławów odprowadzane były poprzez rowy północny i południowy do rzeki Topieć. Izolacja odkrywki Władysławów względem pozostałych odkrywek KWB „Adamów” nie umożliwiała zagospodarowania wód z odwodnienia (wody z odwodnienia odkrywek „Adamów” i „Kozmin” wykorzystywane są jako źródło zasila-

nia budowanych zbiorników wodnych). Ogólną dynamikę ilości przetrzucanych wód kształtują wody z odwodnienia powierzchniowego i głębinowego, a wielkości obydwu wskaźników charakteryzują się dużym zróżnicowaniem. Wielkość odwodnienia powierzchniowego (z rzepia) kształtowana jest głównie przez warunki pogodowe, od których zależy wielkość parowania, opady itp., natomiast odwodnienie głębinowe (ze studni) uzależnione jest od warunków hydrogeologicznych (skał zalegających nad stropem i pod spągiem węgla brunatnego, głębokości zalegania węgla). Największe ilości wody z odwodnienia powierzchniowego odprowadzono do osadnika w latach 1976 – 1980. W 1979 r. wskaźnik ten osiągnął wartość maksymalną – ilość wypompowanej wody wyniosła ponad 24,9 mln m<sup>3</sup> wody. W kolejnych latach ilość wód odprowadzanych do osadnika w Piorunowie systema-

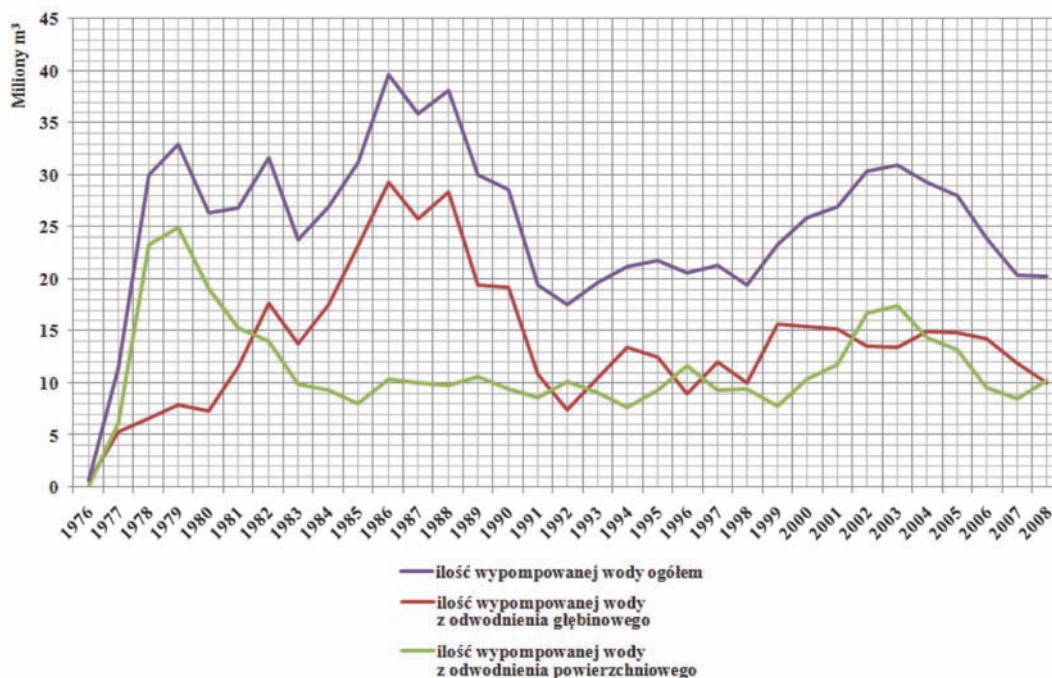


Ryc. 3. Wielkość zdejmowanego nadkładu w odkrywce Władysławów w latach 1977 – 2008

Źródło: Opracowanie własne K. Szulc na podstawie materiałów KWB „Adamów”

Fig. 3. Size of removable overburden in the opencast Władysławów from 1977 to 2008

Source: personal work, based on the materials of the Lignite Mine “Adamów”



Ryc. 4. Ilość wody wypompowanej w procesie odwadniania złoża Władysławów w latach 1976-2008

Źródło: Opracowanie własne K. Szulc na podstawie materiałów KWB „Adamów”

Fig. 4. Amount of water pumped in the process of drainage of the deposits Władysławów from 1976 to 2008

Source: personal work, based on the materials of the Lignite Mine “Adamów”

tycznie malała i ustabilizowała się na poziomie 7,71 - 11,79 mln m<sup>3</sup> wody. Ponowny wzrost ilości wód związany był z zakończeniem rozbudowy systemu odwodnienia głębinowego i zwiększającą się ilością wód podsiąkających ze spągu wyrobiska. W efekcie rowy powierzchniowe zbierające wodę z powierzchni wyrobiska odprowadzały większe ilości wód do rzepia.

Rozkład ilości wody pochodzącej z odwodnienia głębinowego jest odmienny. W pierwszych trzech latach od rozpoczęcia odwodnienia złoża ilość odpompowanej wody nie przekraczała 10 mln m<sup>3</sup> rocznie. Największą ilość wody wypompowano w latach 1985 – 1988. Każdego roku studnie odprowadziły ponad 40 mln m<sup>3</sup> wody. Od 2004 r. do 2008 r. ilość wód pochodzących z odwodnienia głębinowego maleje. Jest to skutek zakończenia rozbudowy systemu odwodnienia kopalni, które nastąpiło w 2005 r. w związku z planowanym zakończeniem eksploatacji złoża na 2012 r.

Od początku funkcjonowania odkrywki do 2008 r. poza zlewnię odprowadzono 833,6 mln m<sup>3</sup> wód z czego 457,61 mln m<sup>3</sup> stanowiły wody głębinowe, a 375,99 mln m<sup>3</sup> wody powierzchniowe.

Stronę rozchodową (wyjścia z geosystemu) uzupełniają strumienie materialno-energetyczne o charakterze antropogenicznym (odpady, emisja gazów i pyłów do atmosfery, hałas), które ze względu na niewielki wpływ na przekształcenia geosystemu nie zostały zbilansowane. Zasadnicze znaczenie dla funkcjonowania geosystemu kopalni mają przeanalizowane powyżej naturalne strumienie materialno-energetyczne (węgiel brunatny, wody, skały). Ich obieg wewnątrz geosystemu, przemieszczanie na zewnątrz (poza geosystem) i powrót do ekosystemu (np. masy ziemne w postaci zwalisk wewnętrznych) jest warunkowany dużymi subwencjami energii i paliw. Najważniejszym strumieniem energetycznym wchodzącym do ekosystemu kopalni jest energia elektryczna, wykorzystywana przez pracujące maszyny górnicze, taśmociągi transportujące węgiel i nadkład, pompy odwadniające oraz urządzenia oświetlające teren wyrobiska. Wielkość energii dostarczonej do geosystemu kopalni Władysławów ewidencjonowano w ostatnich 17 latach działalności odkrywki. W latach 1996 – 2008 odkrywka „Władysławów” zużyła łącznie 296 606,86 MWh energii elektrycznej (rys.

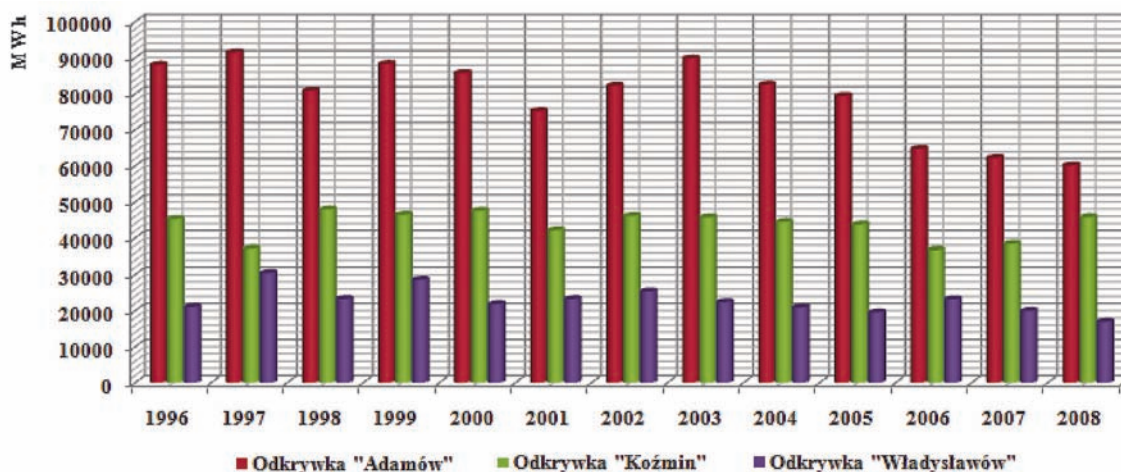
5). Średnie roczne zużycie kształtowało się na poziomie ok. 22 815,91 MWh i było najniższe w porównaniu z pozostałymi odkrywkami KWB „Adamów” (rys. 5). W analizowanym przedziale czasowym każdego roku największe zużycie energii elektrycznej na cele techniczne ma Odkrywka „Adamów” (powyżej 60 000 MWh/rok), Odkrywka „Kozmin” (powyżej 35 000 MWh/rok).

Wskaźnikiem bardziej obiektywnym, charakteryzującym energochłonność przemysłu wydobywczego jest zużycie energii na 1 Mg węgla (ryc. 6). Wartości charakterystyczne dla poszczególnych odkrywek i przedziałów czasowych, niewykazujące jednoznacznych tendencji, odzwierciedlają aktualne, w danym miejscu i czasie, warunki zalegania złoża i określają wielkość nakładów niezbędnych do wydobycia 1 Mg surowca.

Trudność identyfikacji wszystkich strumieni materialno-energetycznych i częsta ich niemierzalność nie umożliwia modelowania funkcjonowania geosystemów górniczych. Przedstawione wielkości strumieni materialno-energetycznych wchodzących do i wychodzących z ekosystemu kopalni obrazują dynamikę zmian funkcjonowania systemu przyrodniczego w efekcie działalności górniczej i wynikające z tego przeobrażenia struktury geosystemów (ich cech fizycznych, chemicznych i biologicznych), charakterystyczne dla etapu eksploatacji złóż.

## 5. Podsumowanie

Zmiany struktury i funkcjonowania geosystemu górniczego Odkrywki „Władysławów” określają stan degradacji - stan charakterystyczny dla pierwszego z trzech etapów procesu eksploatacji węgla brunatnego. Rozpoznanie dynamiki tych zmian, określenie ich wielkości i natężenia jest podstawą do formułowania prognoz, oceny niezbędnych nakładów oraz określenia kierunków działań, które umożliwią przejście ekosystemów górniczych do stanu wtórnej równowagi i wytworzenia nowych, antropogenicznych systemów krajobrazowych (etap II). Etap ten realizowany jest głównie poprzez proces rekultywacji. W Odkrywce „Władysławów” rekultywacja gruntów zdegradowanych prowadzona była równoległe z postępowaniem frontu wydobywczego, a po zakończeniu

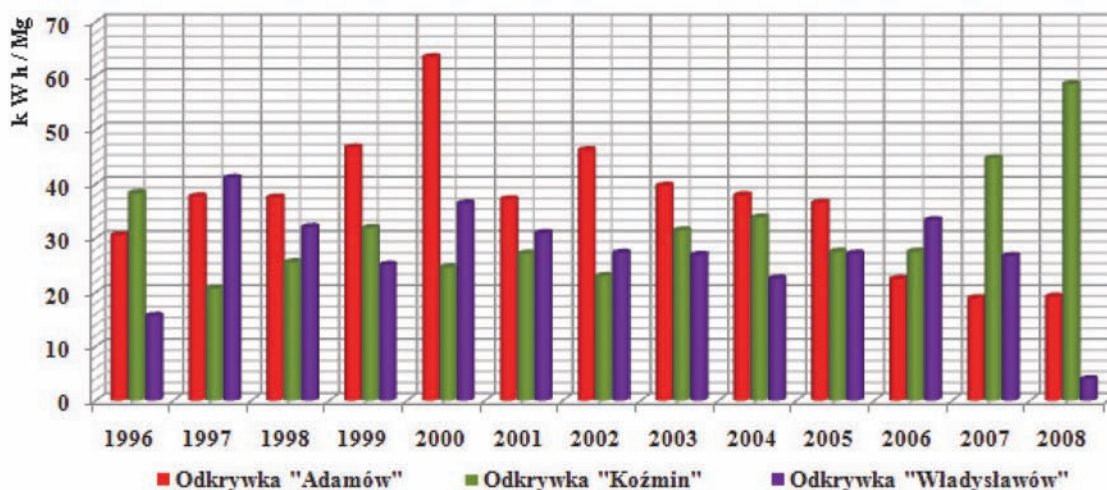


Ryc. 5. Zużycie energii elektrycznej na cele techniczne w poszczególnych odkrywkach należących do KWB „Adamów” w latach 1996 – 2008

Źródło: Opracowanie własne K. Szulc na podstawie materiałów KWB „Adamów”

Fig. 5. Electricity consumption for technical purposes in different opencast mines belonging to the KWB (Lignite Mine) “Adamów” from 1996 to 2008

Source: personal work, based on the materials of the Lignite Mine “Adamów”



Ryc. 6. Zużycie energii elektrycznej na 1 Mg węgla w poszczególnych odkrywkach KWB „Adamów” w latach 1996 – 2008

Źródło: Opracowanie własne Szulc na podstawie materiałów KWB „Adamów”

Fig. 6. Electricity consumption per 1 Mg of carbon in various opencast mines of KWB “Adamów” from 1996 to 2008

Source: personal work, based on the materials of the Lignite Mine “Adamów”

eksploatacji krajobraz tego obszaru tworzyć będzie ok. 466,2 ha gruntów zrekultywowanych w kierunku rolnym, 63,8 ha lasów oraz zbiornik wodny o powierzchni 108,8 ha, o nadzrędnym znaczeniu dla procesu kształtowania retencji wodnej krajobrazu i odbudowy utraconych zasobów wodnych. Etap III – zagospodarowanie terenów zrekultywowanych otwiera możliwości rozwoju nowych funkcji gospodarczych. W analizowanym przypadku, proces biologicznej rekultywacji gruntów pogórnich w oparciu o uprawy roślin strukturotwórczych, głównie traw luźnokępkowych i roślin motylkowych (lucerna, koniczyna) dał podstawę rozwoju hodowli bydła mlecznego w okolicach Władysławowa. Powstający zbiornik wodny i jego kompleksowe zagospodarowanie stanowi potencjał do rozwoju nowych, niewystępujących wcześniej (ze względu na brak naturalnych uwarunkowań terenu), form turystyki, głównie kwalifikowanej, związanej z wodą oraz aktywnej rekreacji i wypoczynku.

## Literatura

1. *Antrop M.*: Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopia? *Landscape and Urban Planning* 75, s. 187-197, 2006.
2. *Bartkowski T.*: Zastosowania geografii fizycznej, PWN, Warszawa 1986.
3. *Chmielewski T.J.*: Systemy krajobrazowe. Struktura – funkcjonowanie – planowanie. Wyd. I. PWN, Warszawa 2012.
4. *Kasztelewicz Z.*: Rekultywacja terenów pogórnich w polskich kopalniach odkrywkowych, Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze, AGH, Kraków 2010.
5. *Kozacki L.*: Geosystem antropogeniczny odkrywki „Władysławów”, w: *Geologia i ochrona środowiska Wielkopolski. Przewodnik LXXI Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2000.
6. *Kozacki L.*: Klasyfikacja geokompleksów antropogenicznych (poeksploatacyjnych). Sprawozdania PTPN 107, Poznań 1988.
7. *Langhamer L.*: Warunki przyrodnicze produkcji rolnej. Województwo konińskie. Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy 1990.
8. *Macias A.*: Antropogeniczny przepływ energii i materii na przykładzie wybranych małych miast Wielkopolski, Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, Poznań 2001.
9. *Ostrega A., Polak K., Cala M., Różkowski K., Bucholski K., Wojnicka-Put B.*: Koncepcja rewitalizacji zbiornika Władysławów wraz z otoczeniem, AGH, Kraków 2010.
10. *Pietrzyk-Sokulska E.*: Kryteria i kierunki adaptacji terenów po eksploatacji surowców skalnych. Studium dla wybranych obszarów Polski. Studia, Rozprawy, Monografie, Nr 131, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2005.
11. *Pietrzyk-Sokulska E.* (red): Tereny pogórnice szansą rozwoju obszarów ich występowania – studium na przykładzie Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków 2008.
12. *Piasecki A.*: Kopalnia Węgla Brunatnego Adamów 1956-1999, Wydawnictwo 910977, Turek 1999.
13. *Szulc (Glapińska) M.*: Antropogeniczne przepływy materii i energii w kontekście ochrony środowiska na przykładzie KWB „Adamów” – odkrywka Władysławów. Praca magisterska, (niepublikowana) wykonana pod kierunkiem dr. hab. A. Maciasa, Archiwum Zakładu Geografii Kompleksowej, WNGiG, UAM, Poznań 2010.



## Wykorzystanie kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego do budowy wałów przeciwpowodziowych

### Utilization of post coal waste composites and fly ash for levee construction

Dr inż. Andrzej Gruchot<sup>\*)</sup>

**Treść:** W pracy przedstawiono wyniki badań wodoprzepuszczalności nieprzepalonych odpadów powęglowych pochodzących ze składowiska KWK „Rydultowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsypu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów przy 10, 20 i 30-procentowym dodatku popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych. W oparciu o uzyskane wyniki badań wykonano obliczenia filtracji wody przez obwałowanie wykonane z kompozytów gruntów antropogenicznych o wysokości 6,0 m bez drenażu i uszczelnienia. Zakres obliczeń obejmował określenie natężenia przepływu przez korpus nasypu, czas ustalenia się przesiąku oraz czas, po którym ustabilizuje się przepływ filtracyjny. Stwierdzono znaczące ograniczenie wodoprzepuszczalności kompozytów odpadów powęglowych z popiołem lotnym w stosunku do odpadów powęglowych. Współczynnik filtracji kompozytów zmniejszył się, uzyskując wartości zbliżone do współczynnika filtracji spoistych gruntów mineralnych. Przeprowadzone obliczenia filtracyjne potwierdzają celowość stosowania popiołów lotnych jako składnika kompozytów gruntów antropogenicznych stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym. Najkrótszy czas przesiąku wody przez obwałowanie, jak również jego ustalenie stwierdzono dla obwałowania z odpadów powęglowych. Zwiększenie dodatku popiołu spowodowało zmniejszenie natężenia przepływu o 5 rzędów wielkości w stosunku do odpadów powęglowych.

**Abstract:** This paper presents the results of permeability tests of unburnt post coal waste from KWK “Rydultowy-Anna” landfill, fly ash from “Skawina” Power Plant and their composites with 10%, 20% and 30% addition of fly ash in relation to dry mass of the colliery spoils. Basing on the obtained results, calculations of water filtration through a 6.0 m high embankment made from composites of anthropogenic soils without drainage or sealing were performed. Flow rate through the body of the embankment, time for percolations to settle and time for filtration to reach steady state were calculated. A significant reduction of water permeability of composite colliery spoils with fly ash in comparison with colliery spoils was noticed. Percolation coefficient of composites decreased and it reached values close to the ones of mineral cohesive soils. The calculations showed that fly ash should be used as a component in anthropogenic soils composites used in hydraulic engineering. The shortest time for percolations to settle as well as for filtration to reach steady state was found for the embankments made of coal waste. Increase in the addition of ash caused a decrease in the flow rate by 5 orders of magnitude compared to coal waste.

#### Słowa kluczowe:

odpady powęglowe, popiół lotny, kompozyty, współczynnik filtracji

#### Key words:

post coal wastes, fly ash, composites, percolation coefficient

### 1. Wprowadzenie

Wały przeciwpowodziowe są zaliczane do budowli hydrotechnicznych i stanowią ochronę bierną przed skutkami powodzi [19] i dlatego muszą spełniać wiele wymogów. Wymagania te odnoszą się głównie do wymiarów korpusu obwałowania, które zależą od klasy technicznej oraz rodzaju materiału użytego do jego budowy. Konsekwencje źle dobranych materiałów do budowy wałów powodują zwiększoną ilość filtrującej wody, a co za tym idzie problem ze statecznością tego typu obiektów. W Polsce istnieje około 8,5 tys. km wałów przeciwpowodziowych, które w znacznej mierze charakteryzują się długim okresem eksploatacji [5]. Poziom stan technicznego wałów wpływa na ochronę ludności

zasiedlającej doliny rzeczne. Dlatego ważnym aspektem ich utrzymania są prace konserwacyjne. Poprawę stanu technicznego obwałowań można uzyskać, projektując między innymi ich rozbudowę i podwyższenie, a także dogęszczenie i uszczelnienie korpusu [4]. Ograniczenie filtracji lub jej wyeliminowanie przez korpus obwałowania zmniejszy ewentualne zmiany strukturalne w samej budowlu [2].

Do rozbudowy wałów można stosować materiały alternatywne w stosunku do gruntów mineralnych. Takimi materiałami mogą być kompozyty z odpadów powęglowych i popiołów lotnych. Odpady powęglowe, jako materiał gruboziarnisty cechują się wysoką nośnością i znacznym ciężarem, a więc gwarantują stateczność obwałowania, natomiast popiół lotny zwiększa ich szczelność ograniczając przepuszczalność. Takie podejście powoduje także ograniczenie objętości składowanych materiałów i wpływu składowisk na środowisko naturalne, co stanowi działanie proekologiczne.

<sup>\*)</sup> Uniwersytet Rolniczy w Krakowie



Odpady powęglowe stanowią mieszaninę płonnej skały karbońskiej o dość złożonym składzie petrograficznym i co za tym idzie, dużej zmienności właściwości geotechnicznych [7, 13]. Dlatego ich wykorzystanie wymaga właściwego rozpoznania geotechnicznego i przyjęcia właściwej technologii ich wbudowywania [16, 9]. Odpady poenergetyczne (popioły lotne, mieszaniny popiołowo-żużlowe i inne) powstają ze spalania węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Są materiałem o szerokim zakresie uziarnienia i dużej zmienności właściwości geotechnicznych. Jest to uzależnione od rodzaju zastosowanego paliwa, metody spalania oraz sposobu odbioru, transportu i składowania odpadów. Największym odbiorcą popiołu lotnego jest przemysł budowlany oraz cementownie [8], a materiał grubszy jest stosowany w budownictwie drogowym [3]. Należy jednak zaznaczyć, że materiały te muszą przejść pozytywną weryfikację w aspekcie ich właściwości geotechnicznych. Popioły lotne są również wykorzystane do wzmocnienia słabonośnego podłoża poprzez jego stabilizację lub jego doszczelniania [10, 14, 15].

## 2. Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu dodatku popiołu lotnego na zmianę właściwości geotechnicznych odpadów powęglowych w aspekcie ich wykorzystania, jako kompozytów z gruntów antropogenicznych do wznoszenia nasypów budownictwa hydrotechnicznego. Zakres badań obejmował oznaczenie charakterystyki geotechnicznej oraz współczynnika filtracji nieprzepalonych odpadów powęglowych ze składowiska KWK „Rydułtowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsyphu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów przy 10, 20 i 30-procentowym udziale popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczenia oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia odpadów powęglowych oznaczono metodą sitową dla ziarn i cząstek większych od 0,063 mm oraz areometryczną dla cząstek mniejszych od 0,063 mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości 2,2 dm<sup>3</sup> dla odpadów powęglowych i ich kompozytów z popiołami lotnymi oraz 1,0 dm<sup>3</sup> dla popiołów lotnych, przy energii zagęszczania 0,59 J · cm<sup>-3</sup>.

Współczynnik filtracji odpadów powęglowych i ich kompozytów z popiołami oznaczono w średniowymiarowym permeametrze. Próbkę o średnicy i wysokości po 36 cm były formowane bezpośrednio w aparacie, przez zagęszczanie materiału o wilgotności zbliżonej do optymalnej w 6 warstwach o wysokości 6,0 cm każda, do uzyskania wskaźnika zagęszczenia  $I_s = 0,95$ . Oznaczenie współczynnika filtracji przeprowadzono po przefiltrowaniu się wody przez próbkę i ustabilizowaniu przepływu. Badanie polegało na pomiarze objętości przefiltrowanej wody przez próbkę przy stałym spadku hydraulicznym, w stałych odstępach czasu. Pomiar przeprowadzono przy przepływie wody z dołu do góry (w celu wyeliminowania powietrza) i z góry do dołu próbki. Jako wynik przyjęto wartość średnią z obydwu pomiarów. Wartości współczynnika filtracji  $k_t$  obliczono ze wzoru

$$k_t = \frac{Q}{A \cdot i \cdot t} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- $Q$  – wydatek filtracji, m<sup>3</sup>,
- $A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, m<sup>2</sup>,
- $i$  – spadek hydrauliczny, -,
- $t$  – czas trwania pomiaru, s.

Współczynnik filtracji popiołu lotnego oznaczono w edometrze, na próbkach o wysokości 2,0 cm i średnicy 6,5 cm. Popiół o wilgotności zbliżonej do optymalnej zagęszczano bezpośrednio w pierścieniu aparatu do uzyskania wskaźnika zagęszczenia:  $I_s = 0,90, 0,95$  i  $1,00$ . Oznaczenie polegało na pomiarze przepływu wody z dołu do góry próbki w warunkach zmiennego spadku hydraulicznego. Przygotowane próbki umieszczano w edometrach, a następnie przykładano obciążenie o wartości 12,5 kPa. Pomiar filtracji rozpoczęto po całkowitym przepływie wody przez próbkę. Badania polegały na rejestracji zmian poziomu wody w rurce aparatu w jednostce czasu. Współczynnik filtracji ( $k_t$ ) obliczano ze wzoru

$$k_t t = a(l/A) \left( (t_2 - t_1) \cdot \ln h_1 / h_2 \right) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

- $a$  – pole przekroju rurki piezometrycznej, m<sup>2</sup>,
- $l$  – wysokość próbki, m,
- $A$  – pole przekroju próbki, m<sup>2</sup>,
- $(t_2 - t_1)$  – czas trwania badania, s,
- $h_1$  – wysokość słupa wody w rurce piezometrycznej o czasie  $t_1$ , m,
- $h_2$  – wysokość słupa wody w rurce piezometrycznej o czasie  $t_2$ , m.

Uzyskane wartości współczynnika filtracji  $k_t$  przeliczono do umownej temperatury wynoszącej 10°C  $k_{10}$  według wzoru

$$k_{10} = \frac{k_t}{0,7 + 0,03 \cdot T} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

- $T$  – temperatura wody w trakcie badania, °C.

W oparciu o uzyskane wyniki badań wykonano obliczenia filtracji wody przez obwałowanie wykonane z kompozytów gruntów antropogenicznych. Przyjęto, że wał o wysokości 6,0 m nie posiada drenażu i uszczelnienia i jest posadowiony na podłożu nieprzepuszczalnym. Zakres obliczeń obejmował określenie natężenia przepływu przez korpus nasypu, czas ustalenia się przesiąku oraz czas, po którym ustabilizuje się przepływ filtracyjny.

Zakładając warunki filtracji nieustalonej i stosując zmodyfikowany wzór Thiema (4) [11], wyznaczono czas  $T$ , po którym przesiąki dojdą do stopy skarpy odpowietrznej korpusu obwałowania na skutek nagłego podniesienia się wody w międzywale (rys. 1a).

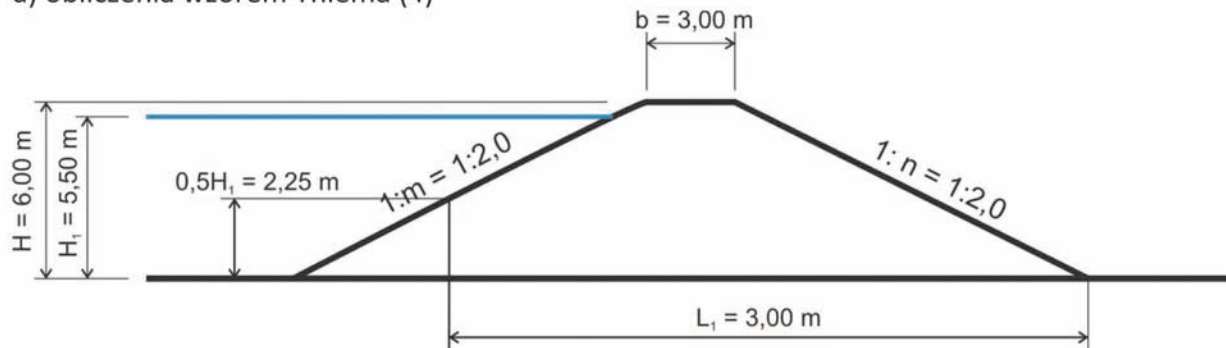
$$T = \frac{n_p \cdot L_1^2}{3k \cdot H_1} \text{ doby} \quad (4)$$

- $n$  – porowatość gruntu w korpusie, [-],
- $w$  – wilgotność gruntu w korpusie (w wartościach niemianowanych),
- $\rho_s, \rho_w$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego i wody, g · cm<sup>-3</sup>,
- $k$  – współczynnik filtracji gruntu korpusu, m · s<sup>-1</sup>
- $H_1$  – maksymalna wysokość wody przy wale w czasie wezbrania, m
- $L_1$  – zastępcza długość podstawy korpusu, m.

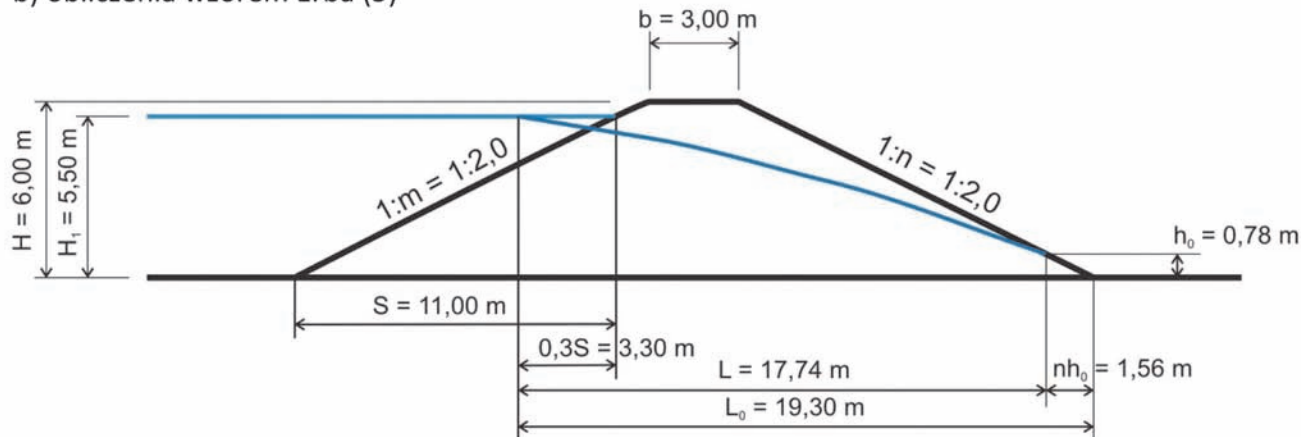
Następnie zakładając, że czas wezbrania będzie dłuższy niż czas ustalenia się natężenia przepływu, w oparciu o równanie Erba (5) [11], wyznaczono czas  $T_p$ , po którym nastąpi ustalenie się natężenia przepływu filtracyjnego (rys. 1b),

$$T_p = \frac{n_p \cdot L^2}{k \cdot H_1} \text{ doby} \quad (5)$$

## a) obliczenia wzorem Thiema (4)



## b) obliczenia wzorem Erba (5)



Rys. 1. Schemat do obliczeń filtracji przez nasyp kompozytów gruntów antropogenicznych

Fig. 1. Scheme for calculation of percolation through the embankments made of anthropogenic soils

Natężenie przepływu obliczono przy założeniu filtracji ustalonej przy długotrwałym piętrzeniu wody o wysokości 5,5 m, z równania [b]

$$T = \frac{k}{2} \cdot \frac{H_1^2 - h_0^2}{L_0 - n \cdot h_0} \quad [m^2 \cdot s^{-1} \cdot mb^{-1}] \quad (6)$$

gdzie (oznaczenia dla równania (4, 5, 6)):

$n_p$  – objętość porów wypełnionych powietrzem, [-]

$$n_p = n - \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot w \quad (7)$$

$L, L_0, H, n$  – w oparciu o rysunek 1b, przy czym

$$h_0 = \frac{H^2}{2L_0} \quad (8), (9)$$

$$L = L_0 - n \cdot h_0$$

### 3. Wyniki badań i ich analiza

#### 3.1. Właściwości fizyczne

Uziarnienie odpadów powęglowych odpowiadało kilkufrakcyjnym żwirom średnim (tab. 1). Udział frakcji żwirowej wynosił 88%, frakcji piaskowej blisko 9%, pyłowej ponad 2%, a ilowej ponad 1% (rys. 2). W przypadku popiołów lotnych przeważała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła ponad 86%, udział frakcji piaskowej wynosił 8%, a ilowej ponad 5%. Pod względem geotechnicznym popioły zostały sklasyfikowane jako jednofrakcyjny pył.

W składzie uziarnienia kompozytów dominowała frakcja żwirowa, a jej zawartość zmniejszała się wraz ze wzrostem

dotądki popiołu i wynosiła od 74% przy dodatku 10% do około 64% przy dodatku 30%. Zawartość frakcji piaskowej zmniejszyła się od 14 do 11%, a pyłowej i ilowej zwiększyła się odpowiednio od 10 do 18% i od 2 do blisko 7% wraz ze wzrostem dodatku popiołu (tab. 1). Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną kompozyty odpadów powęglowych z dodatkiem 10% popiołów odpowiadały żwirom średnim, z dodatkiem 20% - żwirom pylastym, a z dodatkiem 30% - żwirom ilastym. Wskaźnik różnorodności wynosił od 400 do 1481 co pozwoliło określić kompozyty jako wielofrakcyjne.

Gęstość właściwa szkieletu odpadów powęglowych wynosiła  $2,37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  a popiołu lotnego około  $2,24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . W przypadku kompozytów odpadów powęglowych z popiołem gęstość właściwa szkieletu wynosiła od  $2,27$  do  $2,29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

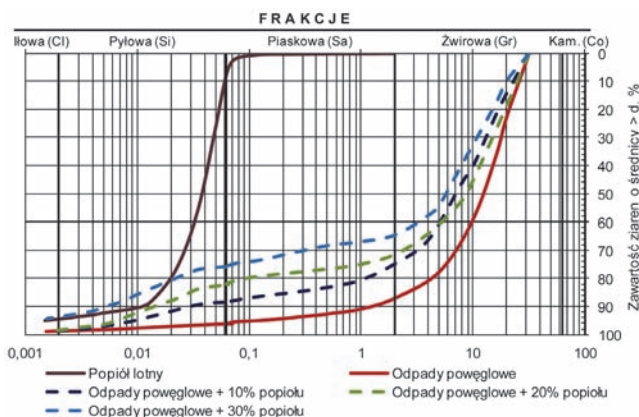
Ze względu na zawartość cząstek mniejszych od  $0,075$  i  $0,02 \text{ mm}$  (tab. 1) popioły lotne zaliczono do gruntów wysadziniowych, a odpady powęgłowe do gruntów niewysadziniowych [17]. W przypadku kompozytów stwierdzono, że były to materiały wątpliwe pod względem wysadziniowości.

#### 3.2. Parametry zagęszczalności

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów powęglowych była wysoka i wynosiła  $1,83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , a popiołu lotnego znacznie niższa –  $1,12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (tab. 1). Dodatek popiołu w ilości 10% do odpadów powęglowych spowodował wzrost parametru o nieco ponad  $0,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu. Kolejne zwiększanie dodatku popiołu do 20 i 30% w odpadach powęglowych spowodowało zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu o ponad  $0,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  w stosunku do wartości najwyższej uży-

**Tabela 1. Skład uziarnienia i podstawowe właściwości fizyczne badanych materiałów**  
**Table 1. Graining and basic physical properties of the tested materials**

Parametr	Odpady powęglowe	Popiół lotny	Kompozyt odpadów powęglowych z popiołem lotnym w ilości:		
			10%	20%	30%
Zawartość frakcji, %					
– żwirowa, Gr: $63 \div 2$ mm	88,0		74,0	71,5	64,0
– piaskowa, Sa: $2 \div 0,063$ mm	8,5	8,0	14,0	10,5	11,5
– pyłowa, Si: $0,063 \div 0,002$ mm	2,3	86,5	10,0	16,0	18,0
– ilowa, Cl: $< 0,002$ mm	1,2	5,5	2,0	2,0	6,5
Nazwa wg [18]	MGr	Si	MGr	siGr	clGr
Wskaźnik różnoziarnistości, CU [-]	11,1	3,6	400	667	1481
Zawartość cząstek:					
– $\leq 0,075$ mm	4,4	98,0	12,3	19,6	25,2
– $\leq 0,02$ mm	3,5	20,5	8,2	12,0	19,5
Gęstość właściwa szkieletu, $\rho_s, \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,37	2,24	2,27	2,28	2,29
Wilgotność optymalna, $w_{opt}, \%$	7,80	35,0	9,60	12,70	15,20
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, $\rho_{ds}, \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1,83	1,12	1,95	1,865	1,725



**Rys. 2. Krzywe uziarnienia badanych materiałów odpadowych oraz ich kompozytów**

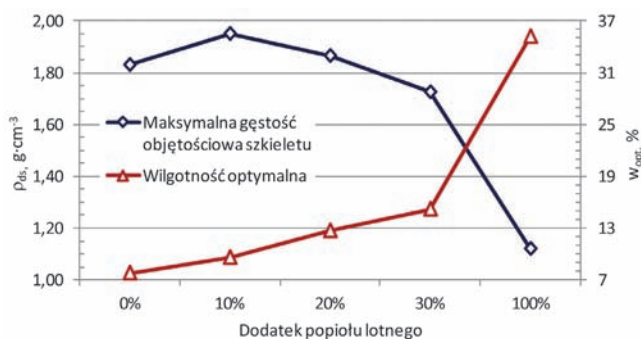
**Fig. 2. Graining curves of the tested waste materials and their composites**

skanej przy 10% dodatku popiołu i  $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu (rys. 3).

Wilgotność optymalna odpadów powęglowych wynosiła blisko 8% i była 4,5-krotnie niższa od wilgotności optymalnej popiołu lotnego (około 35%). Dodatek popiołu lotnego od 10 do 30% spowodował prawie 2-krotne zwiększenie analizowanego parametru w stosunku do odpadów powęglowych bez dodatku popiołu (rys. 3).

**3.3. Współczynnik filtracji**

Uzyskane wyniki badań wskazują, że największe wartości współczynnika filtracji występowały na początku badania,



**Rys. 3. Wpływ dodatku popiołu lotnego na parametry zagęszczenia odpadów powęglowych**

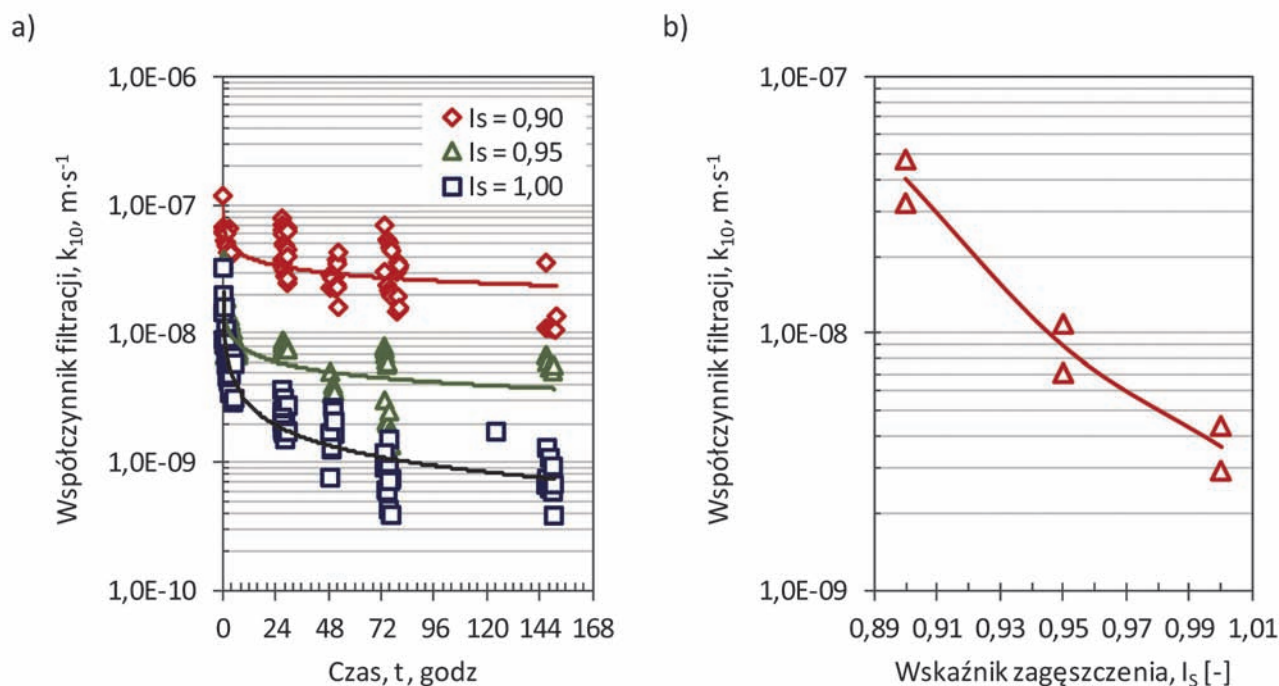
**Fig. 3. Influence of the addition of fly ash on the parameters of post coal waste compactibility**

natomiast w miarę upływu czasu jego wartości zmniejszyły się w wyniku stabilizacji przepływu wody przez próbkę. Zależność ta była obserwowana głównie dla próbek popiołu lotnego (rys. 4) oraz odpadów powęglowych bez i z 10-procentowym dodatkiem popiołu (rys. 5). Dla kompozytów z 20 i 30-procentowym udziałem popiołu nie stwierdzono istotnych zmian współczynnika filtracji wraz z czasem trwania badania.

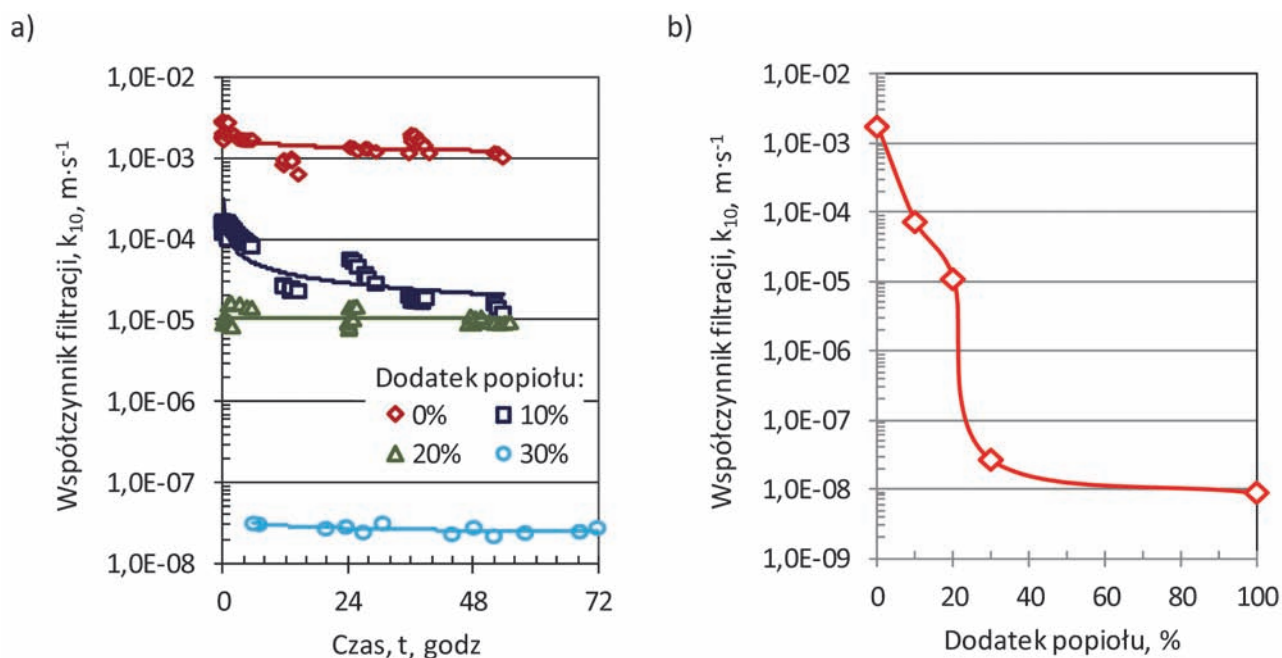
Wzrost zagęszczenia popiołu lotnego od  $I_s = 0,90$  do 1,00 spowodował zmniejszenie współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości, od  $3,99 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $3,66 \cdot 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (tab. 2). Uzyskane wartości wskazują, że był to materiał nieprzepuszczalny i pod tym względem odpowiadał glinom i ilom [12].

**Tabela 2. Zestawienie średnich wartości współczynnika filtracji badanych materiałów**  
**Table 2. Summary of average values of percolation coefficient of the tested materials**

Wskaźnik zagęszczenia, $I_s$ [-]	Kierunek przepływu wody w próbce	Współczynnik filtracji $k_{10}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$				
		Popiół lotny	Odpady powęglowe 10%	Kompozyt odpadów powęglowych z popiołem lotnym w ilości		
				20%	30%	
0,90	z dołu do góry	$3,99 \cdot 10^{-8}$	–	–	–	–
0,95	z dołu do góry	$8,96 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$
	z góry do dołu	–	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
	średnia	$8,96 \cdot 10^{-9}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-8}$
1,00	z dołu do góry	$3,66 \cdot 10^{-9}$	–	–	–	–



Rys. 4. Zależność współczynnika filtracji popiołu lotnego od czasu trwania badania (a) i zagęszczenia (b)  
 Fig. 4. Relationship between the percolation coefficient of fly ash and test duration (a) and compacting (b)



Rys. 5. Wpływ czasu trwania badania (a) i dodatku popiołu (b) na współczynnik filtracji kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego przy wskaźniku zagęszczenia  $I_S = 0,95$

Fig. 5. Influence of test duration (a) and fly ash addition (b) on the percolation coefficient of post coal waste (b) composites and fly ash with compacting indicator  $I_S = 0,95$

Współczynnik filtracji odpadów powęglowych był rzędu  $10^{-3}$  m·s<sup>-1</sup>, a więc odpowiadał przepuszczalnym gruntom mineralnym (rumosze, żwiry, piaski gruboziarniste) [12]. Dodatek popiołu do odpadów powęglowych spowodował znaczne zmniejszenie współczynnika filtracji. W przypadku kompozytów z 10 i 20-procentowym udziałem popiołu było to zmniejszenie średnio o 2 rzędy wielkości (odpowiada to gruntom średnio przepuszczalnym – piaski drobnoziarniste, pylaste i gliniaste), a w przypadku kompozytu z 30-pro-

centowym udziałem popiołu o 5 rzędów wielkości (grunty półprzepuszczalne - gliny, namuły) w stosunku do odpadów powęglowych bez dodatku popiołu. Można więc stwierdzić, że uzyskano efekt doszczelniania odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Należy podkreślić, że kompozyt z 30-procentowym udziałem popiołu jest praktycznie nieprzepuszczalny, a wartości współczynnika filtracji były zbliżone do uzyskanych dla popiołu lotnego (rys. 5b).

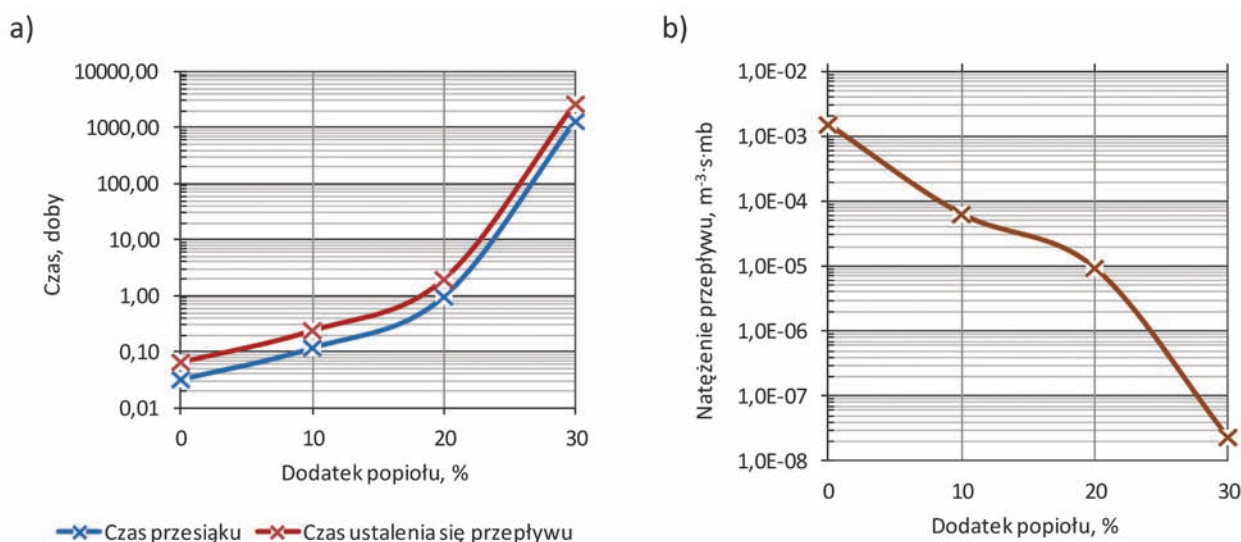
#### 4. Wyniki obliczeń i ich analiza

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają celowość stosowania popiołów lotnych jako składnika kompozytów gruntów antropogenicznych stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym. Najkrótszy czas przesiąku wody przez obwałowanie, jak również jego ustalenie, stwierdzono dla obwałowania z odpadów powęglowych (tab. 3). Dodatek popiołu lotnego do odpadów powęglowych od 10 do 30% spowodował znaczne wydłużenie tych czasów (rys. 6a). Należy zaznaczyć, że czas przesiąku czy też ustalenia się przepływu jest na tyle duży, że przekracza czas wystąpienia przepływu wezbraniowego dla większości polskich rzek [1].

rozwiązaniem korzystnym, pozwalającym na zmniejszenie pozyskiwania ziemnych surowców naturalnych, a także ograniczenie rozbudowy składowisk, na których deponowane są te odpady. Jak wykazały prezentowane badania, tworzenie, tego typu kompozytów ogranicza wodoprzepuszczalność odpadów powęglowych. Współczynnik filtracji kompozytów z dodatkiem popiołu w znaczący sposób zmniejszył się, uzyskując wartości zbliżone do współczynnika filtracji spoiстых gruntów mineralnych. Przeprowadzone obliczenia filtracyjne przez obwałowanie wykonane z tego typu kompozytów potwierdzają celowość ich stosowania w budownictwie hydrotechnicznym.

**Tabela 3. Zestawienie wyników przeprowadzonych obliczeń filtracyjnych**  
**Table 3. Summary of the results of percolation calculations**

Dodatek popiołu %	Współczynnik filtracji $m \cdot s^{-1}$	Czas przesiąku wody przez obwałowanie, $T$		Czas ustalenia się przepływu, $T_p$		Natężenie przepływu, $q$ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot mb^{-1}$
		h	doby	h	doby	
0	$1,74 \cdot 10^{-3}$	0,78	0,03	1,58	0,07	$1,52 \cdot 10^{-3}$
10	$7,25 \cdot 10^{-5}$	2,84	0,12	5,79	0,24	$6,34 \cdot 10^{-5}$
20	$1,08 \cdot 10^{-5}$	23,10	0,96	47,13	1,96	$9,42 \cdot 10^{-6}$
30	$2,68 \cdot 10^{-8}$	31058,12	1294,09	63382,08	2640,92	$2,35 \cdot 10^{-8}$



**Rys. 6. Wpływ dodatku popiołu lotnego do odpadów powęglowych na czas przesiąku i ustalenia się przepływu wody w obwałowaniu (a) i jego natężenia (b)**

**Fig. 6. Influence of the addition of fly ash to post-coal wastes on the percolation period and settlement of water flow through the embankment (a) and its intensity (b)**

Jak wykazały obliczenia, czas przesiąku czy też ustalenia się przepływu zależy od współczynnika filtracji zastosowanych materiałów, który wcześniej, jak już przedstawiono, zależy od procentowego dodatku popiołu.

Podobne zależności stwierdzono w obliczeniach natężenia przepływu wody przez obwałowanie wykonane z przedmiotowych kompozytów. Zwiększenie dodatku popiołu spowodowało zmniejszenie natężenia przepływu o 5 rzędów wielkości w stosunku do odpadów powęglowych (tab. 3, rys. 6b).

#### 5. Podsumowanie

Zastosowanie kompozytów odpadów powęglowych z popiołami lotnymi w budownictwie hydrotechnicznym jest

*Artykuł powstał w ramach badań finansowanych z Własnego Funduszu Stypendialnego dla Pracowników Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie.*

#### Literatura

1. Bednarczyk S., Jarzębińska T., Mackiewicz S., Włoszyn E.: Vademecum ochrony przeciwpowodziowej. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Gdańsk 2006.
2. Bolt A.: Śródlądowe budowle wodne - aspekty geotechniczne. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła - Kraków 2009.
3. Borowski G.: Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. „Inżynieria Ekologiczna” 2010, nr 22, 52-62.

4. *Borys M., Mosiej K., Topolnicki M.*: Projektowanie i wykonawstwo pionowych przegród przeciwnieprzepuszczalnych z zawieszin twardniejących w korpusach i podłożu wałów przeciwpowodziowych. Wydawnictwo IMUZ, 2006.
  5. *Borys M.*: Przepisy i wymogi oraz aktualny stan obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce. „Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie” 2007, t. 7, z. 2a, 25-44.
  6. *Fanti K., Fiedler K., Kowalewski J., Wójcicki S.*: Budowle piętrzące. Arkady, Warszawa 1972.
  7. *Filipowicz P., Borys M.*: Wykorzystanie odpadów przemysłowych do budowy i umacniania wałów przeciwpowodziowych. Rocznik „Ochrona Środowiska” 2008, nr 10, 633-644.
  8. *Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.*: Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2005, nr 1, 23-42.
  9. *Gruchot A., Zawisza E.*: Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. „Przeгляд Górnicy” 2007, nr 10, 26-32.
  10. *Kraszewski C., Pachowski J.*: Popioły w drogownictwie, wymagania i zastosowanie. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, 13+22.
  11. *Król P., Mioduszewski W., Wolski W., Żbikowski A.*: Wały przeciwpowodziowe – wytyczne instruktażowe projektowania. Filtracja. Zał. 3. (Opracowanie zbiorowe pod kierunkiem A. Żbikowskiego). Melioracje Rolne, 1983, 2-3.
  12. *Pazdro Z.*: Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1983.
  13. *Pieczyrak J.*: Przydatność odpadów górnictwa węgla kamiennego w inżynierii lądowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, „Inżynieria Środowiska” 2007, nr 54, 101-108.
  14. *Szydło A.*: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużlowych z Elektrociepłowni Wrocław w budownictwie drogowym. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, 93+101.
  15. *Zawisza E., Pomietło M.*: Wodoprzepuszczalność mieszanek odpadów hutniczych i energetycznych. „Przeгляд Górnicy” 2011, nr 1-2, 68-71.
  16. *Żydroń T.*: Badania właściwości geotechnicznych nieprzepalonych odpadów powęglowych z kopalni „Janina”. „Przeгляд Górnicy” 2010, nr 1-2, 38-42.
  17. PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
  18. PN-EN-ISO-14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikacji. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
  19. Dz.U. z 1996 r. Nr 21 poz. 111, Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej.
-

# Dopływy wody do odkrywkowego wyrobiska piasku Maczki-Bór

## Water inflows to open sand-pit Maczki-Bór



Dr Janusz Kropka<sup>\*)</sup>



Mgr Jacek Wróbel<sup>\*)</sup>

**Treść:** Odkrywkowa kopalnia piasku Maczki-Bór położona jest w dolnym odcinku doliny kopalnej Białej Przemszy. Kopalnia znajduje się w „schyłkowej” fazie eksploatacji kopaliny. Eksploatacja górnicza zostanie zakończona w latach 2015-2016. Równocześnie z eksploatacją zakład górnicy prowadzi rekultywację techniczną wyrobisk popiaskowych. Obecne prognozy zakładają, że około roku 2029/2030 obszar dzisiejszych wyrobisk zostanie wypełniony odpadami pogórnicznymi do poziomu około +255,0 m, tj. do rzędnej otaczającego terenu. Od drugiej połowy lat 90. XX wieku główną rolę w odwadnianiu wyrobiska górniczego Maczki-Bór odgrywa Kanał główny Wschód III. Średni dopływ wody do wyrobiska piaskowni w latach 1987-2012 wynosił 28,4 m<sup>3</sup>/min. W pracy przedstawiono relacje pomiędzy pięcioma okresami zróżnicowanych opadów atmosferycznych a wielkością dopływu wody do wyrobiska. Zmiany w systemie odwadniania wyrobiska w ostatnich 4 latach wytyczają kolejne daty: czerwiec 2010 r. – likwidacja Kanału głównego Zachód III i Rowu podskarpowego 4/I; maj 2013 r. – przełożenie wody płynącej dolnym odcinkiem Kanału głównego Wschód III do rurociągu o średnicy 800 mm, oraz lipiec 2013 r. – rozpoczęcie likwidowania wspomnianego odcinka kanału.

**Abstract:** Open sand-pit Maczki-Bor is located in the bottom section of Biala Przemsza buried valley. The pit is in its final exploitation stage. Mining exploitation will be finished in years 2015-2016. Along with exploitation, the plant performs technical reclamation of former sand-pits. Present estimations assume that around 2029/2030 the present area of pits will be reclaimed up to the level of +255,0 m, i.e. up to level of surrounding grounds. Since the second half of the 90s of the 20th century, the sand-pit Maczki-Bór has been drained mostly through the Main Channel East III. Average water inflow into the sand-pit in years 1987-2012 was 28,4 m<sup>3</sup>/min. The study presents relationships between the five periods of differentiated precipitation and the amount of water flowing into the pit. Changes in the pit drainage system in the last 4 years have been marked out with the following dates: June 2010 – liquidation of the Main Channel West III and sub-embankment trench 4/I; May 2013 – moving the stream of water running through the bottom section of the Main Channel East III into the ø 800 mm pipeline and, July 2013 – starting the liquidation process of the mentioned section of the channel.

### Słowa kluczowe:

piaski podsadzkowe, odkrywkowa kopalnia Maczki-Bór, dopływy wody

### Key words:

filling sands, Maczki-Bór open pit, mine-water inflow

## 1. Wprowadzenie

W pracy scharakteryzowano dopływy wody do odkrywkowego wyrobiska piasku Maczki-Bór w wieloletniu 1987-2012 (tabl. 1), a także relacje pomiędzy pięcioma okresami zróżnicowanych opadów atmosferycznych a wielkością dopływu wody do wyrobiska. Wcześniejsze publikacje [7, 8] charakteryzowały budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne dolnego odcinka doliny kopalnej Białej Przemszy, w tym także

drenaż wody z plejstocénskiego poziomu wodonośnego wyrobiskami górnicznymi obecnie zlikwidowanych kopalń węgla kamiennego (rys. 1). Prezentowana praca zawiera nowe dane na temat eksploatacji resztkowych partii złoża piasku oraz szybko postępującej rekultywacji technicznej popiaskowych wyrobisk Bór Zachód i Bór Wschód. Dokonano w niej również korekty, w stosunku do wspomnianej publikacji z 2006 r. [7], udziału dopływu wody z obu pól. Wcześniejsza propozycja, różniująca dopływy z pola Bór Zachód i Bór Wschód, uwzględniała wielkość drenażu plejstocénskiego poziomu wodonośnego przez dwa główne kanały: Zachodni z pola Bór

<sup>\*)</sup> Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej

**Tablica 1. Średnie roczne dopływy wody do odkrywkowych wyrobisk górniczych CTL Maczki-Bór S.A. w latach 1987-2012**  
**Table 1. Average yearly water inflows to open sand-pits in CTL Maczki-Bór S.A. in years 1987-2012**

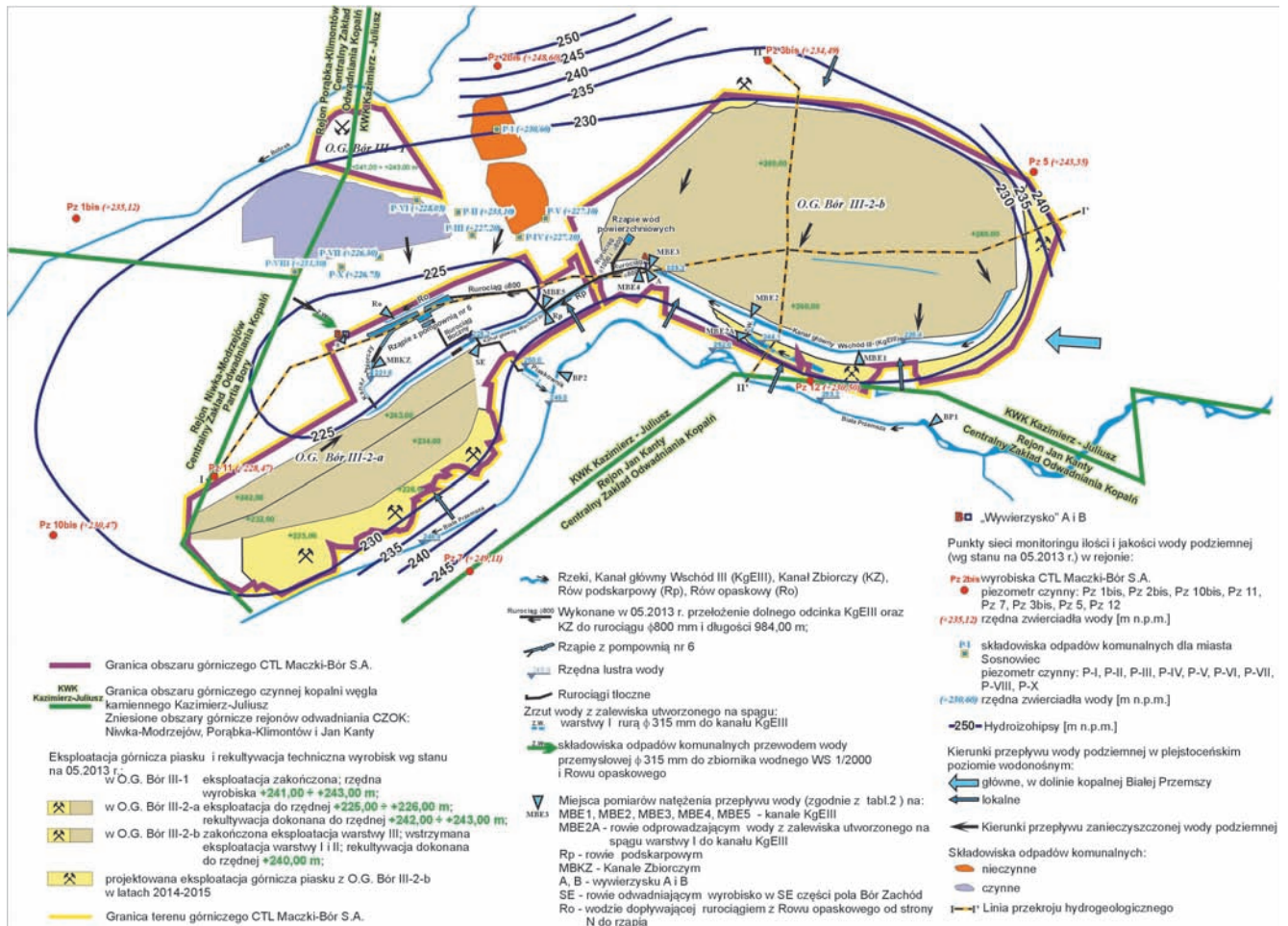
Rok	Pole Bór Wschód		Pole Bór Zachód		Razem	Opad atmosferyczny
	m <sup>3</sup> /min	%	m <sup>3</sup> /min	%		
1987	21,9	66,8	10,9	33,2	32,8	763
1988	22,4	66,5	11,3	33,5	33,7	667
1989	21,5	70	9,2	30	30,7	525
1990	18,4	72,2	7,1	27,8	25,5	741
1991	20,4	76,1	6,4	23,9	26,8	670
1992	19,7	77,6	5,7	22,4	25,4	619
1993	18,5	78,4	5,1	21,6	23,6	604
1994	19,9	78,7	5,4	21,3	25,3	823
1995	22,2	84,1	4,2	15,9	26,4	677
1996	21	87,9	2,9	12,1	23,9	793
1997	22,8	90,1	2,5	9,9	25,3	967
1998	32	93,8	2,1	6,2	34,1	694
1999	31,3	96,6	1,1	3,4	32,4	811
2000	30,4	97,1	0,9	2,9	31,3	737
2001	27,01	82,81	5,61	17,21	32,6	958
2002	27,6	83,0	5,7	17,0	33,3	746
2003	24,1	82,4	5,2	17,6	29,3	592
2004	21,6	80,5	5,2	19,5	26,8	565
2005	21,2	80,0	5,4	20,0	26	711
2006	21,7	80,0	5,4	20,0	27,1	734
2007	21,8	78,5	6,0	21,5	27,8	744
2008	20,4	84,4	3,8	15,6	24,2	642
2009	20,1	85,3	3,5	14,7	23,6	858
2010	22,6	73,0	8,4	27,0	31,0	1012
2011	22,3	69,5	9,8	30,5	32,1	560
2012	19,8	70,2	8,4	29,8	28,2	729

1- oszacowano w oparciu o wyniki pomiarów hydrometrycznych wykonanych w latach 2001-2012 (tabl. 2);

Źródło: opracowanie własne

1- estimated on the basis of hydrometric measures performed in years 2001-2012 (table 2);

Source: own elaboration



**Rys. 1. Mapa hydrogeologiczno-górnictwa odkrywkowego wyrobiska górniczego CTL Maczki-Bór S.A. (wg stanu na 05.2013 r.)**  
**Fig. 1. Hydrogeological-mining map of the open sand-pit CTL Maczki-Bór S.A. (as of May 2013)**



Zachód oraz Wschódni z pola Bór Wschód. Pięć serii pomiarów hydrometrycznych wykonanych na kanale wschodnim (w przekroju MBE4) i kanale zbiorczym (w przekroju MBKZ), wraz z pozostałymi wynikami pomiarów (tabl. 2), pozwoliły na korektę relacji w dopływach z obu pól. Korekta uwzględnia ustanowione w 2006 r. i obowiązujące do dnia dzisiejszego granice obszarów górniczych (patrz rozdz. 2).

Na obszarze między Maczkami i Niwką czwartorzędowe piętro wodonośne zbudowane jest głównie z piasków różnoziarnistych z wkładkami żwirów oraz ze żwirów z piaskiem. W warunkach niezakłóconego reżimu generalnie wyróżniano tu jeden główny, plejstoceński poziom wodonośny, podzielony miejscami przez warstwy utworów zastoiskowych, na dwa lub trzy warstwy wodonośne. Warunki naturalne oraz obecne, zakłóconego reżimu wód podziemnych działalnością głównie górnictwa odkrywkowego, a także relacje plejstoceńskiego poziomu wodonośnego z wodami cieków powierzchniowych, były przedmiotem licznych badań [2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12, 13, 14].

## 2. Eksploatacja górnicza piasków i rekultywacja popiaskowych wyrobisk Bór Zachód i Bór Wschód

CTL Maczki-Bór S.A. – Zakład Górniczy Maczki-Bór w Sosnowcu prowadził w latach 2006-2012 odkrywkową eksploatację piasku podsadzowego ze złóż Bór Zachód i Bór Wschód, w trzech niezależnych obszarach górniczych (O.G.) i terenach górniczych (T.G.; rys. 1), zgodnie z koncepcją udzieloną decyzją Marszałka Województwa Śląskiego nr 1429/OS/2006 z dnia 24.07.2006 r. granice T.G. współliniowo pokrywają się z granicami O.G. [1].

O.G. Bór III-1 o powierzchni 12,31 ha obejmuje część złoża Bór Zachód, tylko w warstwie I, w izolowanej północnej części złoża, eksploatowanej w przeszłości z przeznaczeniem piasku na cele budowlane. Eksploatacja skarpy 1a/I w tym obszarze osiągnęła docelowy zasięg i została zakończona w maju 2007 r. Z chwilą zakończenia eksploatacji górniczej wyrobisko wzdłuż wspomnianej skarpy osiągnęło głębokość 12,0-14,0 m p.p.t.

**Tablica 2. Pomiar hydrometryczny wykonany w przekrojach pomiarowych na kanałach odwadniających odkrywkowe wyrobisko CTL Maczki-Bór S.A. w latach 1999-2013**

**Table 2. Hydrometric measures performed in measure cross-sections on channels draining the open mining pit CTL Maczki-Bór S.A. in years 1999-2013**

Lp.	Przekrój pomiarowy	Data pomiaru	Natężenie przepływu	
			(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /min)
1.	MBKZ (kanał zbiorczy)	13.10.1999	0,493	29,58
2.	MBKZ	05.10.2000	0,402	24,12
3.	MBE4 (Kanał główny Wschód III ÷ KgEIII)	17.05.2001	0,450	27,00
4.	Rów podskarpowy 4/III (pole Bór Wschód)	17.05.2001	0,017	1,02
5.	Kanał główny Zachód (KgWIII; szacunkowo z obliczeń)	17.05.2001	0,018	1,10
6.	MBKZ	17.05.2001	0,531	31,86
7.	MBKZ	23.10.2001	0,419	25,14
8.	MBE4 (KgEIII)	08.11.2004	0,379	22,74
9.	Rów podskarpowy 4/III	08.11.2004	0,014	0,84
10.	Kanał główny Zachód (KgWIII; szacunkowo z obliczeń)	08.11.2004	0,013	0,78
11.	MBKZ	08.11.2004	0,463	27,80
12.	MBE4 (KgEIII)	17.05.2005	0,358	21,48
13.	Rów podskarpowy 4/III	17.05.2005	0,013	0,78
14.	Kanał główny Zachód (KgWIII; szacunkowo z obliczeń)	17.05.2005	0,013	0,78
15.	MBKZ	17.05.2005	0,429	25,74
16.	MBE1 (KgEIII)	13.04.2012	0,203	12,18
17.	MBE2 (KgEIII)	13.04.2012	0,270	16,20
18.	MBE2A <sup>1</sup>	13.04.2012	0,027	1,62
19.	„wywierzyisko” A <sup>2</sup>	13.04.2012	0,005-0,007	0,30-0,42
20.	MBE4 (KgEIII)	13.04.2012	0,303	18,18
21.	rów odwadniający wyrobisko w SE części pola Bór Zachód (w O.G. Bór III-2-a)	13.04.2012	0,005	0,30
22.	MBKZ	13.04.2012	0,383	22,98
23.	„wywierzyisko” B <sup>3</sup>	13.04.2012	0,005	0,30
24.	woda dopływająca rurociągiem z rowu opaskowego od strony północnej do rząpia	13.04.2012	0,020	1,20
25.	MBE3 (KgEIII)	23.05.2013	0,274	16,44
26.	MBE4 (KgEIII)	23.05.2013	0,022	1,32
27.	MBE5 (KgEIII)	23.05.2013	0,042	2,52
28.	Rp (Rów podskarpowy w O.G. Bór III-2-a)	23.05.2013	0,021	1,26
29.	rów odwadniający wyrobisko w SE części pola Bór Zachód (w O.G. Bór III-2-a)	23.05.2013	0,0005	0,03
30.	MBKZ (szacunkowo z obliczeń)	23.05.2013	0,135	8,1
31.	„wywierzyisko” B <sup>3</sup>	23.05.2013	0,003	0,18
32.	woda dopływająca rurociągiem z Rowu opaskowego od strony północnej do rząpia	23.05.2013	0,015	0,90

<sup>1</sup> zrzut wody z zalewiska utworzonego na spągu warstwy I rurą ø315 mm do kanału KgEIII;

<sup>2</sup> wypływ wody w miejscu zlikwidowanego ujścia rowu podskarpowego 4/III do KgEIII;

<sup>3</sup> wypływ wody w miejscu uszkodzenia (pęknięcia) przewodu wody przemysłowej ø315 mm, odprowadzającej wody z zalewiska utworzonego na spągu składowiska odpadów komunalnych;

Źródło: opracowanie własne

<sup>1</sup> water discharge from fen created on the bottom of the first layer through the pipe ø315 mm to the Main Channel East III;

<sup>2</sup> water outflow in the place of liquidated escape of 4/III sub-embankment trench into the Main Channel East III;

<sup>3</sup> water outflow in the place of breakage (crack) of industrial water pipe ø315 mm that let water out of fen created on the bottom of municipal dumping ground;

Source: own elaboration

W O.G. Bór III-2-a o powierzchni 113,44 ha, obejmującą pozostałą część złoża Bór Zachód, zakład prowadzi eksploatację zasobów przemysłowych piasku podsadzowego w trzech warstwach w południowej części złoża. Rzędna spągu warstwy III w tym rejonie może oscylować od około +225,0 m do około +226,0 m. Po wyeksploatowaniu warstwy III, wyrobisko osiągnie głębokość maksymalną około 30,0 m p.p.t.

W O.G. Bór III-2-b o powierzchni 199,33 ha, obejmującym złożo Bór Wschód, zakład prowadził do 2011 r. eksploatację zasobów przemysłowych piasku podsadzowego w północnej części warstwy I złoża. Eksploatacja warstwy II skarpy 4/II o miąższości 11-16 m została wstrzymana także w 2011 r. Przewiduje się, że w latach 2013-2014 zakład górniczy dokończy eksploatację warstwy I i II (rys. 1). Warstwa III, o zmieniającej się miąższości w przedziale 8-2 m, była eksploatowana skarpy 4/III. Po zakończeniu eksploatacji warstwy III w 2011 r. wyrobisko osiągnęło głębokość około 25,0-30,0 m p.p.t. Zakład górniczy projektuje eksploatację warstwy I i II skarpami 5/I i 4/II wzdłuż wschodniej i południowej krawędzi wyrobiska w latach 2014-2015 (rys. 1).

Wyrobiska popiaskowe CTL Maczki-Bór S.A., powstałe po eksploatacji piasku podsadzowego, są likwidowane poprzez wypełnienie (zazwałowanie) odpadami pogórnictwa z kopalń węgla kamiennego, a w przeszłości także odpadami z elektrowni i elektrociepłowni, oraz materiałami obojętymi, dopuszczonymi odpowiednimi decyzjami do odzysku w ramach rekultywacji wyrobisk. Zwałowanie stanowi jednocześnie rekultywację podstawową (techniczną), będącą pierwszym etapem zagospodarowania terenu. Zwałowisko Bór Zachód powstawało od 1977 r. na podstawie decyzji Urzędu Miejskiego w Sosnowcu z dnia 15.12.1977 r., zatwierdzającej plan realizacyjny ZTE jego budowy. Obecnie, według stanu na wrzesień 2013 r., całkowita powierzchnia zrehabilitowanego wyrobiska wynosi 192,00 ha (decyzja Urzędu Miejskiego w Sosnowcu z dnia 07.06.2011 r. uznająca zakończenie rekultywacji). Zwałowisko Bór Wschód powstaje od 2004 r. na podstawie decyzji Prezydenta Miasta Sosnowca z dnia 07.01.2004 r., uzgadniającej warunki rekultywacji pola Bór Wschód. Obecnie rzędna obszaru nie przekracza +240,00 m, a całkowita powierzchnia zrehabilitowanego wyrobiska wynosi około 150,00 ha. Zwałowanie pustek poeksploatacyjnych prowadzone jest zgodnie z zapisami w Planie Zagospodarowania Przestrzennego dla wschodniej i południowo-wschodniej części gminy Sosnowiec przedstawionego w Uchwale nr 711/XLIII/05 Rady Miejskiej w Sosnowcu z dnia 25.08.2005 r.

### 3. Dopływy wody do odkrywkowego wyrobiska górniczego Maczki-Bór S.A.

#### 3.1. System odwadniania wyrobiska górniczego

Odwodnienie skarp eksploatacyjnych i wyrobiska odbywa się systemem grawitacyjnym. Sieć rowów i kanałów zmieniała swój przebieg wraz z postępem robót górniczych i udostępnianiem kolejnych warstw złoża piasku, a następnie z postępem prac rekultywacyjnych. Jeszcze w latach 2008-2009 odwodnienie wyrobisk eksploatacyjnych odbywało się rowami podskarpowymi, opaskowymi, a następnie dwoma kanałami głównymi. Wyrobisko w południowej części pola Bór Zachód było odwadnianie przez Kanał główny Zachód III (KgWIII). Północną część wyrobiska eksploatacyjnego Bór Wschód odwadniał Rów podskarpowy 4/I, który przebiegał generalnie wzdłuż skarpy eksploatacyjnej nr 4/III. Rów ten w południowo-zachodniej części pola Bór Wschód (w rejonie zlikwidowanego we wrześniu 2013 r. „wywierzyska” A), łączył się z Kanałem głównym Wschód III (KgEIII) [7].

Kanał KgWIII oraz Rów podskarpowy 4/I zostały ostatecznie zlikwidowane poprzez zasypanie materiałem odpadowym w czerwcu 2010 r. Obecnie podstawowe znaczenie w odwadnianiu wyrobiska eksploatacyjnego Maczki Bór ma Kanał KgEIII, odwadniający trzecią warstwę złoża (rys. 1). Kanał przebiega wzdłuż wschodniej, południowo-wschodniej i południowej skarpy wyrobiska Bór Wschód. Rzędne spągu wyrobiska w tych miejscach wahają się od +226,2 m do +226,8 m. Lustro wody w kanale kształtuje się od +225,9 m do +225,2 m. Dalej kanał skręca na południowo zachód i kieruje się na południowo-wschodnią część pola Bór Zachód, gdzie lustro wody w kanale kształtuje się od +225,2 m do +225,0 m. Tu kanał skręca na północ, zmieniając nazwę na Kanał zbiorczy (KZ; z lustrem wody na rzędnej +221,6 m), a następnie poprzez przepusty rurowe odprowadza wodę do rzędni pompowni głównej nr 6. Lustro wody w rzędni kształtuje się na średniej rzędnej  $+220,90 \div +221,50$  m.

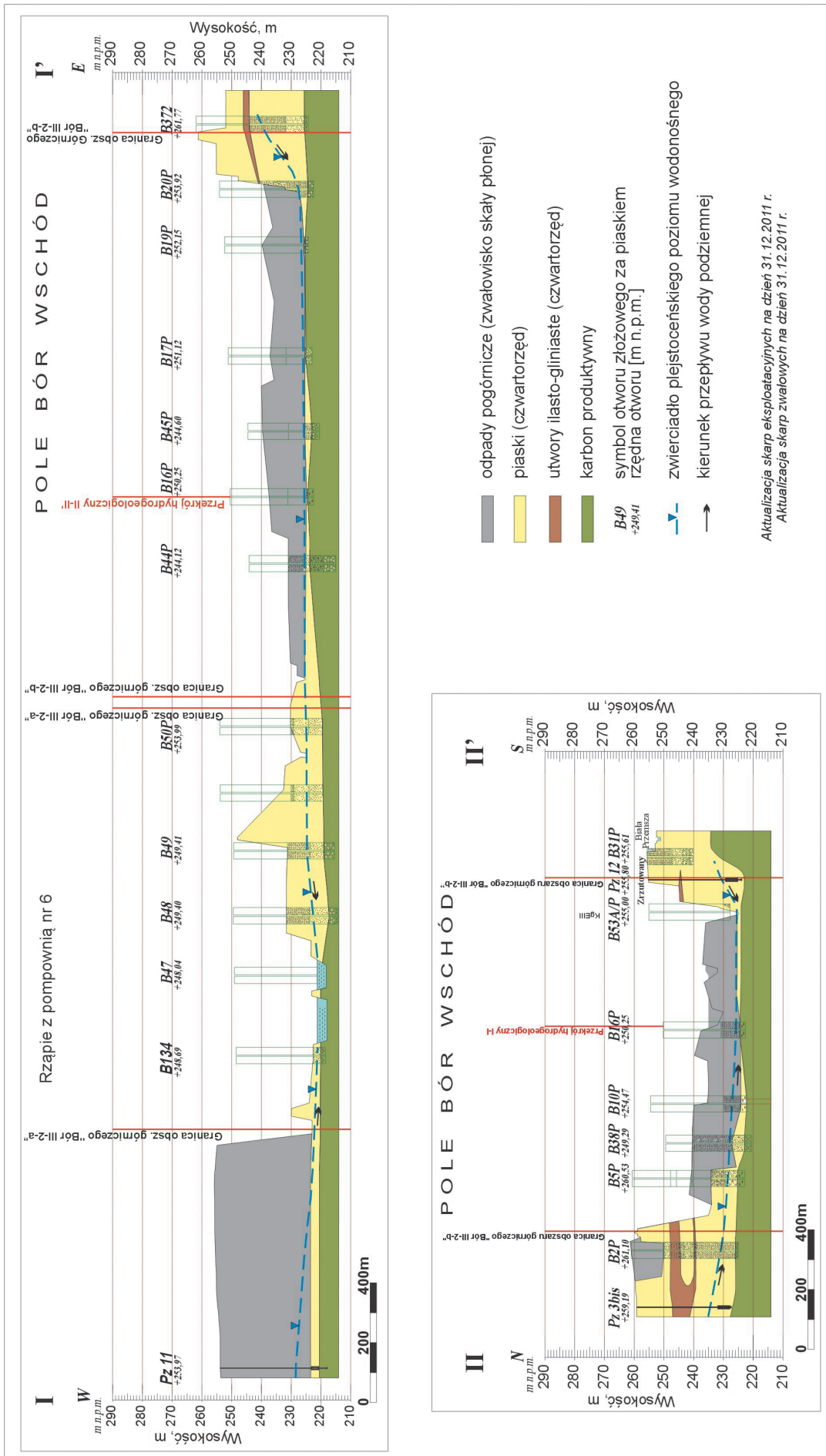
W maju 2013 r. dokonano istotnej korekty w systemie odwadniania odkrywkowego wyrobiska (rys. 1). Wodę płynącą źródłowym oraz środkowym odcinkiem kanału KgEIII, poniżej przekroju hydrometrycznego MBE3, skierowano rurociągiem o średnicy 800 mm bezpośrednio do rzędni. Pozostały, dolny odcinek kanału, na długości od „wywierzyska” A oraz KZ, stanowią podstawę drenażu dla wody podziemnej dopływającej do wyrobiska od strony południowej i zachodniej pola Bór Zachód. Dodatkowym, nowym elementem w sieci kanałów na polu Bór Zachód był Rów podskarpowy (Rp) o długości około 375,0 m (rys. 1). W lipcu 2013 r. rozpoczęto powolne zasypywanie kanału KgEIII i Rp na odcinku od „wywierzyska” A w kierunku na zachód.

#### 3.2. Zmienność dopływu wody w latach 1987-2012

Dopływy wody do wyrobiska górniczego Maczki-Bór S.A. zostały scharakteryzowane dla okresu 1987-2012 (tabl. 1; rys. 3). Natężenie wody dopływającej systemem rowów i kanałów do wyrobiska było rejestrowane na podstawie ilości godzin pracy pomp w pompowni nr 6. Pompownia nr 6 wypompuje wodę z rzędni, a następnie maksymalnie czterema rurociągami o średnicy 600 mm tłoczy wodę do piaskownika, skąd grawitacyjnie odpływa do Białej Przemyszy. Określenie rzeczywistych (chwilowych) dopływów, a także procentowego udziału wody dopływającej z pola Bór Zachód i Bór Wschód w sumarycznym dopływie do wyrobisk górniczych, dokonano w oparciu o sporadycznie wykonane pomiary hydrometryczne w kanałach i rowach (tabl. 2). Najwięcej pomiarów wykonano w latach 2004-2005 dla potrzeb realizacji projektu badawczego wykonanego w Katedrze Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Śląskiego [6], oraz w latach 2012-2013 dla potrzeb ekspertyzy [9] i dokumentacji hydrogeologicznej [10]. Zestawione dane umożliwiły analizę zmienności natężenia dopływu wody do odkrywkowego wyrobiska w wieloletniu 1987-2012. W interpretacji zmienności dopływu wody wykorzystano roczne sumy opadów atmosferycznych dla posterunku opadowego Maczki (tabl. 1; rys. 3).

W wieloletniu 1987-2012 sumy roczne opadów atmosferycznych wahały się w przedziale od 525 mm (1989) do 1012 mm (2010). Opisywany okres charakteryzował się dużymi wahaniami opadów. Wyróżniono w nim pięć okresów różniących się wysokością opadów. Dwa okresy wysokich opadów przypadły na lata:

- 1996-2002 z wartościami w przedziale od 694 mm (1998) do 967 (1997) i 958 mm (2001); średni opad atmosferyczny dla siedmioletnia 1996-2002 wynosił 815 mm;
- 2009-2010 z wartościami 858 mm (2009) i 1012 mm (2010), oraz ze średnią wartością opadu 935 mm.



Rys. 2. Przekrój hydrogeologiczny I-I' i II-II' (wykonane na podstawie przekrojów geologicznych z aktualizacją skarp eksploatacyjnych oraz skarp zwalowych na dzień 31.12.2011 r.)  
Fig. 2. Hydrogeological cross-section I-I' and II-II' (drafted on the basis of geological cross-sections with the update of exploitation and dumping slopes as of 31 December 2011)

Trzy okresy niskich opadów przypadły na lata:

- 1987-1995 z wartościami w przedziale od 525 mm (1989) do 823 mm (1994); średni opad atmosferyczny dla dziesięciolecia 1987-1995 wynosił 677 mm; na lata 1987-1993 przypada susza hydrologiczna, która swój początek miała w 1982 r.;
- 2003-2008 z wartościami opadu od 565 mm (2004) do 744 mm (2007); średni opad atmosferyczny dla sześciolecia 2003-2008 wynosił 665 mm;
- 2011-2012 z niskimi opadami atmosferycznymi wynoszącymi 560-729 mm oraz średnim opadem dla dwulecia wynoszącym 644 mm.

Średni opad dla wielolecia 1987-2012 wynosił 729 mm.

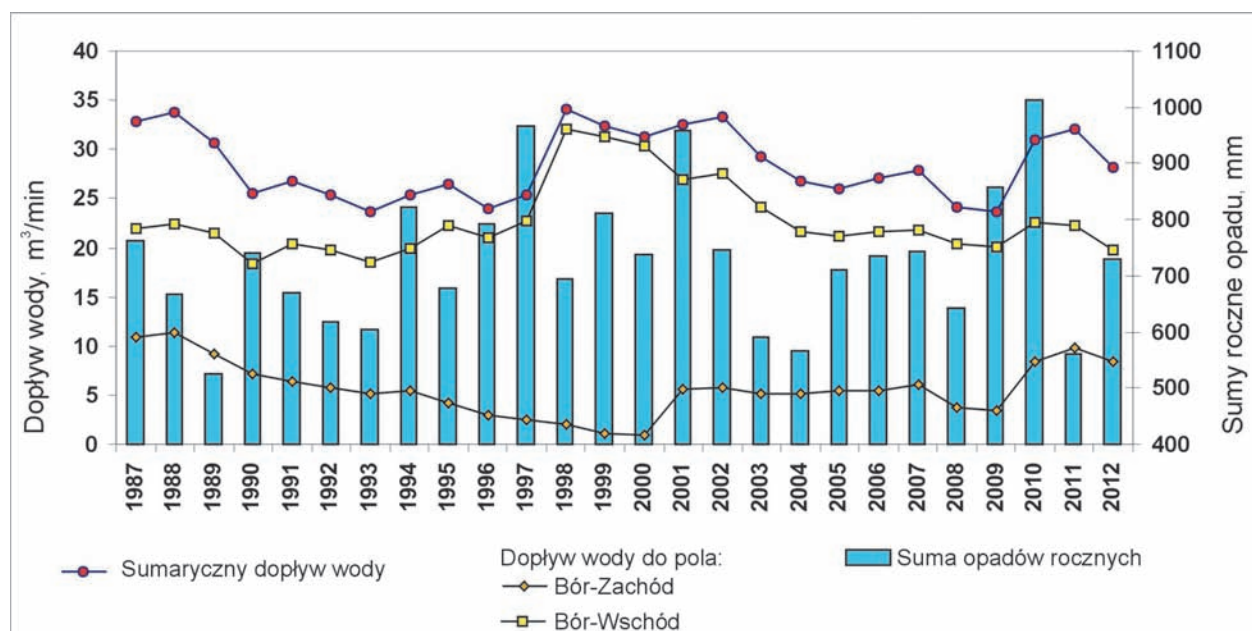
W latach 1987-1996 dopływy wody do wyrobiska zmniejszyły się z 30,7-33,7 m<sup>3</sup>/min. (1987-1989) do 23,6 m<sup>3</sup>/min. (1993) i 23,9 m<sup>3</sup>/min. (1996). W 1997 r. wzmożone opady spowodowały wzrost dopływu do 25,3 m<sup>3</sup>/min, a w kolejnych latach do wielkości powyżej 30,0 m<sup>3</sup>/min. W latach 1998-2002 dopływy wahały się od 31,3 m<sup>3</sup>/min. (2000) do 34,1 m<sup>3</sup>/min. (1998). Wyraźny wzrost dopływu do wyrobiska, poza wysokimi opadami, spowodowały także eksploatacja III, najniższej warstwy piasków na polu Bór Wschód oraz towarzyszący jej wzmożony dopływ strumienia wody podziemnej z rozcinanej doliny kopalnej Białej Przemyszy. Od 2003 r. dopływy wody malały od 29,3 m<sup>3</sup>/min. (2003) do 24,2 m<sup>3</sup>/min. (2008) i 23,6 m<sup>3</sup>/min. (2009; tabl. 1; rys. 3). Lata 2004-2009 to okres zdecydowanie niższych dopływów 23,6 m<sup>3</sup>/min. (2009) – 27,8 m<sup>3</sup>/min. (2007). W kopalni Maczki-Bór była to trwała tendencja związana z niższymi opadami. W 2010 r. dopływ gwałtownie wzrasta do 31,0 m<sup>3</sup>/min. Był on związany z ekstremalnie wysokimi opadami 1012 mm zarejestrowanymi w tym roku. Pomimo suszy hydrologicznej w 2011 r. (z sumą rocznych opadów 560 mm), dopływ wody do wyrobiska w dalszym ciągu utrzymywał się na wysokim poziomie (32,1 m<sup>3</sup>/min). Dowodzi on kilkunastomiesięcznego opóźnienia natężenia dopływającej wody w stosunku do ekstremalnie wysokich opadów je poprzedzających. Wspomniane opóźnienie wynika z porowego i odsłoniętego plejstoceńskiego poziomu wodonośnego, który w rozległym obszarze spływu wody do centrum drenażu górniczego (kopalni Maczki-Bór) charakteryzuje się wysoką pojemnością wodną (współczyn-

nikiem zasobności). Ekstremalnie wysokie opady w 2010 r., wyższe o około 45-55 mm od opadów w latach 1997 i 2001, spowodowały niższy o około 2,0-3,0 m<sup>3</sup>/min. dopływ wody. Przypuszczalnie wpływ na to ma „schyłkowa” faza eksploatacji piasku (i brak dopływu wody z zasobów statycznych), oraz rosnąca powierzchnia wyrobiska na polu Bór Wschód, a także w południowej części pola Bór Zachód, zazwalowana większą miąższością odpadów pogórnich. Średni dopływ wody do odkrywkowego wyrobiska w wieloleciu 1987-2012 wynosił 28,4 m<sup>3</sup>/min.

Z archiwalnych danych wynika, że do 1981 r. udział dopływu wody z pola Bór Zachód (71,9%) przeważał w sumarycznym dopływie wody do odkrywkowego wyrobiska. Przypuszczalnie w 1982 r. nastąpiło wyrównanie się relacji w dopływach wody z obu pól. W 1987 r. dopływ wody z pola Bór Zachód stanowił 33,2%, natomiast z pola Bór Wschód 66,8% sumarycznego dopływu (tabl. 1). W latach 1988-1995 udział wody dopływającej z pola Bór Wschód zwiększył się z 66,5% do 84,1%. W kolejnych latach 1996-2000, m.in. po zakończeniu budowy kanału KgEIII, umownie przyjmowano [7], że o wielkości udziału wody dopływającej z dwóch pól decydowało natężenie wody dopływającej kanałami KgVIII i KgEIII. W analizowanym pięcioletniu notowano wyraźny wzrost udziału wody dopływającej z pola Bór Wschód, który w 2000 r. osiągnął 97,1%. Granice O.G. ustanowione w 2006 r. wyraźnie rozdzielają powierzchnie pola Bór Zachód od pola Bór Wschód. Wspomniane granice O.G. oraz przesłanki hydrogeologiczne charakteryzujące rejon wyrobiska górniczego, a udokumentowane m.in. pomiarami hydrometrycznymi wykonanymi w wyrobisku w latach 2001-2013, stworzyły nowe możliwości dokonania rozdziału sumarycznego dopływu wody do wyrobiska na:

- wodę dopływającą z pola Bór Wschód, w granicach O.G. Bór III-2-b (przepływ wody w przekroju MBE4 na kanale KgEIII);
- wodę dopływającą z pola Bór Zachód, w granicach O.G. Bór III-2-a (suma przepływu wody w przekroju na KZ oraz Rowie opaskowym Ro minus przepływ w przekroju MBE4 na kanale KgEIII).

W latach 2001-2012, udział wody dopływającej z pola Bór Wschód wahał się od 69,5% (2011) do 85,3% (2009).



Rys. 3. Dopływ wody do odkrywkowego wyrobiska górniczego CTL Maczki-Bór S.A. w latach 1987-2012

Fig. 3. Water inflow to the open sand-pit CTL Maczki-Bór S.A. in years 1987-2012

Dopływy wody z pola Bór Zachód (zlikwidowanym w 2010 r. kanałem głównym KgVIII, Rowem opaskowym (Ro) bezpośrednio do rząpia, rowem z czynnego wyrobiska w O.G. Bór III-2-a oraz dolnym odcinkiem kanału KgEIII), wahały się we wspomnianych latach w przedziale 3,5-9,8 m<sup>3</sup>/min.

#### 4. Podsumowanie

Eksploatację piasku podsadzowego w rejonie kopalni Maczki-Bór rozpoczęto w latach międzywojennych XX wieku. Początkowo dopływ do wyrobiska odwadnianego systemem grawitacyjnym wynosił 5,0-7,0 m<sup>3</sup>/min. Eksploatacja górnicza zostanie prawdopodobnie zakończona w latach 2015-2016. W kolejnych, przypuszczalnie 14-15 latach (do roku ok. 2029/2030), obszar dzisiejszej odkrywkowej kopalni będzie wypełniany odpadami pogórnymi do rzędnej otaczającego terenu, aż do całkowitego zamknięcia wyrobiska. W latach 1987-2012 dopływy wody do wyrobiska wahały się od 23,6 m<sup>3</sup>/min (1993 i 2009) do 34,1 m<sup>3</sup>/min (1998). Średni dopływ wody wynosił 28,4 m<sup>3</sup>/min.

Trzy naturalne czynniki decydują o wielkości dopływu wody do omawianej kopalni:

- wysokość opadów atmosferycznych;
- lokalizacja wyrobiska górniczego Bór Zachód i Bór Wschód w osi zawodnionej, plejstocenijskiej doliny kopalnej Białej Przemyszy;
- warunki brzegowe porowego i odsłoniętego plejstocenijskiego poziomu wodonośnego, decydujące o rozległości zlewni podziemnej (lub obszarze spływu wody), z której woda spływa do centrum górniczego drenażu.

W świetle prezentowanej analizy wpływ wysokości opadów na wielkość dopływu wody do wyrobiska nie podlega dyskusji. Lokalizacja wyrobiska górniczego w osi doliny kopalnej powoduje, że wody podziemne z rozciętego plejstocenijskiego poziomu wodonośnego odgrywają kluczową rolę w dopływie. Podstawą drenażu plejstocenijskiego poziomu wodonośnego od kilkunastu lat jest kanał KgEIII. Budowę kanału zakończono w grudniu 1997 r. Mimo, że w dziesięcioleciu 2004-2013 wzrasta powierzchnia rekultywowana odpadami górnymi o około 150,0-170,0 ha oraz rosną miąższości (w przedziale kilka-14,0 m) bryły zdeponowanych odpadów (przede wszystkim na polu Bór Wschód (rys. 2), spadek dopływu wody do wyrobiska nie przekracza około 10% (tabl. 1; rys. 3). Niewielkie spadki w dopływie wody, potwierdzają zbliżone także wielkości dopływu wody do wyrobiska po ekstremalnie wysokich opadach atmosferycznych w 1997 r. (opad-967 mm), 2001 r. (958 mm) i 2010 r. (1012 mm), mimo zgromadzonych w ciągu tego 17-letniego okresu odpadów powęglowych w wyrobisku. Wspomniany niewielki spadek w dopływie notowany był m.in. w kanale KgEIII (tabl. 2). Porównując wyniki pomiarów hydrometrycznych w kanałach, stwierdzamy, że mimo intensywnej rekultywacji technicznej, przede wszystkim wyrobiska na polu Bór Wschód, całkowity odpływ wody kanałem KgEIII niezmiennie stanowił ok. 90,0-95,0% w całkowitym dopływie do wyrobiska w latach 2001, 2004, 2005, 2012 oraz 2013.

Przeprowadzona w maju 2013 r. zmiana systemu odwadniania wyrobiska oraz rozpoczęte w lipcu br. zasypywanie i skracanie kanału KgEIII na odcinku poniżej profilu pomiarowego MBE3, nie spowodowały po krótkim okresie 3 miesięcy zmian w wielkości odpływu ze zlewni wspomnianego kanału. Celem pracy nie jest prognozowanie dopływu wody do rekultywowanego wyrobiska w okresie do roku 2029/2030. Jest to zagadnienie złożone. Niewielki spadek dopływu wody będzie uzależniony od postępów rekultywacji technicznej wyrobiska, zmian w technologii rekultywacji (np. zastoso-

wanie procesu doszczelniania bryły zwałowiska emulgatem wodno-popiołowym) oraz od istotnych jakościowo zmian w systemie jego odwadniania. Ze wstępnych prognoz wynika, że praktycznie do ostatnich 2-3 lat (tj. do roku 2027/2028) istnienia rekultywowanego wyrobiska, podstawę drenażu plejstocenijskiego poziomu wodonośnego doliny kopalnej Białej Przemyszy, będzie stanowić dzisiejsze rząpie (ze średnią rzędną zwierciadła w przedziale +220,9 ÷ +221,50 m), oraz bardzo krótki odcinek kanału KgEIII (z lustrem wody na rzędnej około +225,2 m). Kanał ten nie powinien zostać zasypywany odpadami pogórnymi na odcinku o długości około 100,0 m, tj. powyżej miejsca przełożenia wody z kanału do rurociągu o średnicy 800 mm i profilu pomiarowego MBE3 [9] (rys. 1). Skrócony odcinek kanału oraz rząpie powinny ograniczyć możliwość niekontrolowanego „podpiętrzania” wody podziemnej, płynącej doliną kopalną Białej Przemyszy w zetknięciu z bryłą odpadów pogórnymi, powstającą w ramach rekultywacji technicznej wyrobisk do rzędnej otaczającego terenu (+255,0 m), oraz równoczesnego obmywania odpadów pogórnymi przez wspomniane wody.

Na wielkość i zmienność dopływu wody do analizowanej odkrywkowej kopalni piasku nie mają wpływu antropogeniczne czynniki:

- końcowe stadium rozwoju kopalni; od wielu lat obserwowana jest malejąca intensywność eksploatacji złoża, której towarzyszy brak dopływu wody z zasobów statycznych oraz zmniejszająca się powierzchnia i głębokość wyrobisk górniczych na skutek prowadzonej rekultywacji technicznej wyrobisk;
- antropogenicznie uregulowane i uszczelnione koryta cieków powierzchniowych sąsiadujących z odkrywkowym wyrobiskiem (Biała Przemysza, Bobrek).

#### Literatura

1. *Batko R.*: Opinia hydrogeologiczna w sprawie leja depresji spowodowanego działalnością Zakładu Górniczego „Maczki Bór” w Sosnowcu. Pracownia Geologiczna GEOMA Maciej Jaworski. Jaworzno 2006, s. 1-6.
2. *Gajowiec B., Siemiński A.*: Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000. Arkusz Jaworzno (944; wraz z objaśnieniami). Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 1997, s. 1-26.
3. *Górnik M., Duda I.*: Dokumentacja hydrogeologiczna Kopalni Piasku Maczki-Bór. Przeds. Rob. Geol.-Wiertn. w Sławkowie. 1994.
4. *Kędziorek E.*: Warunki hydrogeologiczne w obszarze Kopalni Piasku Maczki-Bór w Sosnowcu. Praca magisterska. Arch. Kat. Hydrog. i Geol. Inż. Uniwersytetu Śląskiego. Sosnowiec 2001, s. 1-84.
5. *Kropka J.*: Hydrogeologia obszaru doliny Białej Przemyszy między Sławkowem a Niwką. Praca doktorska. Arch. Inst. Hydrog. i Geol. Inż. AGH. Kraków 1984, s. 1-99.
6. *Kropka J.*: Infiltracja efektywna w obszarach drenażu górniczego i intensywnie zurbanizowanych w północnej części GZW (niecka bytomska i kopalnie piasku). Projekt badawczy 4 T12B 011 27. Arch. Kat. Hydrog. i Geol. Inż. Uniw. Śl. Sosnowiec 2006, s. 1-83.
7. *Kropka J.*: Infiltracja efektywna w rejonie odkrywkowej kopalni piasku Maczki-Bór. „Przeгляд Górnicy” 2006, nr 12, s. 45-53.
8. *Kropka J., Wróbel J.*: Przekształcenia warunków hydrogeologicznych w obszarze odkrywkowej eksploatacji piasków podsadzowych w rejonie Górnosląskiego Zagłębia Węglowego. „Przeгляд Geologiczny” 2001, vol. 49, nr 7, s. 631-638.
9. *Kropka J. i in.*: Wielowariantowa koncepcja odwadniania zakładu górniczego CTL Maczki-Bór S.A. w Sosnowcu po 2011 r., tj. w okresie prowadzenia rekultywacji w kierunku przemysłowym pola Bór Wschód oraz południowo-wschodniej części pola Bór Zachód do rzędnej otaczającego terenu. Arch. Kat. Hydrog. i Geol. Inż. Uniw. Śl. Sosnowiec 2012, s. 1-31.

10. *Kropka J., Witkowski A., Waligóra J., Rubin H., Kaźmierczak J.*: Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku ze zmianą odwodnienia w celu wydobywania piasku w odkrywkowym wyrobisku CTL Maczki-Bór S.A., Sosnowiec-Bór, woj. śląskie. Arch. Kat. Hydr. i Geol. Inż. Uniw. Śl. Sosnowiec 2013, s. 1-94.
  11. *Lączny M.J., Bukowski P., Kubica J., Niedbalska K., Augustyniak I., Bauerek A., Janoszek T., Cempa M., Świnder H., Gogola K.*: Prognoza wpływu Pola Bór Wschód oraz Pola Bór Zachód na środowisko wodno-gruntowe. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2011.
  12. *Rózkowski A., Rudzińska-Zapaśnik T., Siemiński A.* (red.) Mapa warunków występowania, użytkowania, zagrożenia i ochrony zwykłych wód podziemnych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i jego obrzeżenia w skali 1:100 000 (wraz z objaśnieniami). Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 1997, s. 1-63.
  13. *Solik-Heliasz E., Bukowski P.*: Projekt monitoringu wód w rejonie zwałowiska Bór Zachód. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 1994.
  14. *Wagner J., Chmura A.*: Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000. Arkusz Katowice (943; wraz z objaśnieniami). Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 1997, s. 1-31.
- 
-

# Wybrane metody oznaczania zawartości fosforu w węglach koksowych

## Selected analytical methods for the determination of phosphorus coking coals



Mgr inż. Iga Kuklis\*)



Mgr Agnieszka Skawińska\*)



Beata Micek\*)

**Treść:** Zawartość fosforu w węglu jest bardzo ważnym parametrem jakości węgla stosowanych jako składniki mieszanek wsadowych przy produkcji koksu. Fosfor jest niepożądanym składnikiem zwłaszcza węgla koksowych, ponieważ podczas koksowania 98% fosforu przechodzi do koksu, a następnie w procesie wielopieczym do stali, powodując jej kruchość. W związku z tym jedyną możliwością obniżenia poziomu fosforu w mieszanekach wsadowych jest dobór składników o niskiej zawartości tego pierwiastka. Istnieje wiele metod analitycznych wykorzystywanych do analizy zawartości fosforu w paliwach stałych. W pracy podjęto próbę porównania metody miareczkowej i metody spektrometrii emisyjnej. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano charakterystykę obu metod badawczych, obejmującą takie parametry statystyczne jak powtarzalność i odtwarzalność metody, granice oznaczalności, niepewności rozszerzone wyniku pomiaru oraz współczynnik zmienności dla metody miareczkowej i spektrometrycznej. W celu określenia dokładności metod, porównano uzyskane wyniki analiz z wartościami certyfikowanymi.

**Abstract:** The phosphorus content of the coal is a very important parameter used to evaluate the quality of coal utilized as a component of blends in the production of coke batch. Phosphorus is an undesirable component, particularly, of coking coals because during coking 98% of the phosphorus enters the coke, and then, in the blast furnace process, the steel making it fragile. Therefore, the only way to reduce the level of phosphorus in the compound is the selection of a batch of components having a low content of this element. There are many analytical methods used for the analysis of phosphorus in solid fuels. This paper attempts to compare titration and emission spectrometry methods. The obtained results allowed to develop characteristics of both research methods, including statistical parameters such as repeatability and reproducibility of the method, the limit of quantification, extended uncertainties of the measurement result as well as the coefficient of variation for titration and spectrometric methods. In order to determine the accuracy of the methods the obtained results of analyses were compared with the certified values.

### Słowa kluczowe:

fosfor, węgiel koksowy, ICP-OES

### Key words:

phosphorous, coking coal, ICP-OES

## 1. Wprowadzenie

Fosfor jest pierwiastkiem występującym powszechnie w środowisku. Wchodzi w skład skorupy ziemskiej, w ilości 0,078% [15]. Stanowi ważny element budowy skał i minerałów oraz jest naturalnym składnikiem komórek żywych. Według Olkulskiego [13] obecność fosforu ma istotny wpływ na proces uwęglania paliw z uwagi na kluczową rolę kwasu ortofosforowego w procesach konwersji węgla, zachodzących w organizmach żywych. Według B. Ryana [19]

fosfor w węglu pochodzi zarówno ze źródeł organicznych, jak i nieorganicznych. Organiczna geneza fosforu w węglu jest uzasadniona występowaniem tego pierwiastka w podstawowych budulcach roślin i zwierząt. Poziom fosforu w węglu jest ściśle uzależniony od ilości tego pierwiastka w tkankach roślin, z których dany węgiel powstał. Przechodzenie fosforu z roślin w paleotorfowisku mogło odbywać się pod wpływem czynników nieorganicznych znajdujących się w głębi paleotorfowiska lub przy udziale czynników biologicznych (bakterii, grzybów) obecnych na powierzchni [13]. Geneza fosforu w węglu ze źródeł nieorganicznych jest związana z obecnością tego pierwiastka w osadach wprowadzanych do paelo-

\*) Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze

torfowiska oraz ze składem popiołu wulkanicznego. Fosfor do paleotorfowiska mógł się dostać w formie jonów z wodami powierzchniowymi lub w postaci ziaren z materiałem wulkanogenicznym [7]. Zawartość fosforu w węglach jest na ogół niska, ale może być zmienna i jest zależna od rodzaju złoża oraz zagłębia, z którego wywodzi się analizowany węgiel. Dane literaturowe wskazują, że średnia zawartość fosforu w węglu szacowana jest na poziomie 0,05% wag. [2]. Według Stadnikova udział fosforu w węglu nie przekracza 0,30% wag. [22]. Rózkowska i Parzenty [21], wskazują na dwa rodzaje połączeń fosforu w węglu. Przewaga połączeń organicznych fosforu występuje w węglach niskofosforowych, natomiast w węglach o dużej zawartości fosforu przeważają połączenia z frakcją mineralną. Zdania wielu badaczy dotyczące tej kwestii są podzielone. Według Jasienko [6], zdecydowana większość fosforu obecnego w węglu ma charakter nieorganiczny, natomiast fosfor organiczny w węglu występuje tylko w minimalnych ilościach. Wyniki badań Kuhl i Dąbek [10] wykazały wyższą zawartość związków fosforowych w węglach wzbogaconych, co wskazuje na obecność fosforu związanego z substancją organiczną węgla.

Węgle stosowane jako składniki mieszanek wsadowych przy produkcji koksu mają ściśle określony dopuszczalny przedział zawartości fosforu, który wynosi 0,040- 0,045% wag. [13]. Fosfor jest niepożądanym składnikiem zwłaszcza węgla koksowych, ponieważ podczas koksowania 98% fosforu przechodzi do koksu, a następnie w procesie wielkopiecowym do stali, powodując jej kruchość [2]. Z uwagi na to, że związki fosforu są zazwyczaj silnie zdyspergowane i mocno związane z substancją organiczną węgla, są one bardzo trudne do usunięcia w procesach mechanicznego wzbogacania [11]. W związku z tym, jedyną możliwością obniżenia poziomu fosforu w mieszankach wsadowych jest dobór składników o niskiej zawartości tego pierwiastka.

Odbiorcy koksu określają w kontraktach handlowych wartości jego parametrów jakościowych, w tym również dopuszczalny poziom zawartości fosforu. Wartości tego parametru uzależnione są od przeznaczenia koksu. Według wymagań wielkopiecowników zawartość fosforu w koksie powinna mieścić się w granicach 0,060-0,065% wag. [13], natomiast najnowocześniejsze technologie wielkopiecowe zastrzegają wymagania dotyczące udziału fosforu w koksie do poziomu 0,025% wag. [14].

Wobec przedstawionych faktów istotnym zagadnieniem jest więc wiarygodne oznaczanie zawartości fosforu w węglach stosowanych jako komponenty mieszanek wsadowych dla procesu koksowania.

Istnieje wiele metod oznaczania zawartości fosforu w paliwie stałym. Między innymi są to metody: fluorescencji rentgenowskiej wykorzystującej spektrometr sekwencyjny, atomowej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie, metoda miareczkowa (objętościowa) oraz liczne metody kolorymetryczne, gdzie oznaczany fosfor w próbce przeprowadza się w ortofosforany [13,1].

W Zespole Laboratoriów Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla (IChPW) w Zabrze posiadającym certyfikat akredytacji laboratorium badawczego numer AB 081, oznaczanie zawartości fosforu wykonywane jest metodą optycznej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej ICP-OES (ang. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) i metodą miareczkową (objętościową).

W publikacji przedstawiono porównanie wymienionych metod oznaczania zawartości fosforu w węglach koksowych oraz ocenę ich dokładności i precyzji.

## 2. Metody oznaczania zawartości fosforu w węglu, stosowane w IChPW

W IChPW oznaczanie zawartości fosforu w węglu, wykonywane jest zgodnie z własnymi procedurami badawczymi. Przed wprowadzeniem tych metod do praktyki laboratoryjnej zostały one właściwie zwalidowane, czego potwierdzeniem jest ujęcie ich w zakresie akredytacji, po pomyślnej ocenie przeprowadzonej przez Polskie Centrum Akredytacji. Zgodnie z opracowanymi procedurami próbki analityczne węgla do badań przygotowuje się według normy PN-90/G-04502 [17], a następnie spopiela się do stałej masy według normy PN-ISO-1171:2002 [13].

W celu przeprowadzenia próbek popiołu węgla do roztworu zastosowano: - metodę stapiania z tetraboranem litu wg normy PN-G-04528-10:1998 w metodzie ICP-OES [16]; - metodę mineralizacji w stężonych kwasach z wykorzystaniem wielostanowiskowego mineralizatora Ethos One w metodzie miareczkowej.

### 2.1. Metoda miareczkowa (objętościowa)

Oznaczenie zawartości fosforu w paliwach stałych metodą objętościową wykonywane jest według procedury własnej Q/LP/02/A:2011 [19]. Oznaczanie zawartości fosforu w paliwach, zgodnie z tą procedurą, polega na usunięciu krzemionki z popiołu paliwa stałego, a następnie strąceniu zawartego w nim fosforu w postaci fosfomolibdenianu amonowego. Wytrącenie krzemionki wykonywane jest w obecności mieszaniny kwasu chlorowodorowego i kwasu azotowego (V) w wielostanowiskowym mineralizatorze mikrofalowym [1]. Metodą końcową oznaczania zawartości fosforu jest metoda miareczkowa. Zawartość fosforu przeliczana jest na rzeczywistą odważkę popiołu. Etapem wpływającym istotnie na wynik jest proces mineralizacji, polegający na przeprowadzeniu analizów z matrycy pierwotnej do roztworu próbki analitycznej.

W wyniku tego rozkładu organiczne składniki próbki powinny ulec mineralizacji, natomiast nieorganiczne powinny zostać ilościowo przeprowadzone w formy rozpuszczalne [12]. Większość obecnie stosowanych metod rozkładu próbek można zaliczyć do dwóch podstawowych sposobów rozkładu: na sucho, kiedy tlen wprowadzany jest do środowiska reakcji w postaci gazowej lub pochodzi z powietrza atmosferycznego oraz na mokro, kiedy tlen uwalniany jest w podwyższonej temperaturze z kwasów utleniających np.  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HClO}_4$ , lub nadtlenku wodoru [9]. Dokładny opis procesu mineralizacji oraz dobór ilości reagentów i odważki analitycznej szczegółowo opisuje procedura techniczna Q/LP/02/A:2011 [19].

### 2.2. Metoda spektrometrii emisyjnej ICP-OES

Obecnie rynek specjalistycznej aparatury laboratoryjnej, proponuje nowe rozwiązania aparaturowe mające na celu automatyzację metod analitycznych, które pozwolą na sprawniejsze wykonywanie analiz i oszczędność czasu.

W 2011 roku wprowadzono do praktyki laboratoryjnej IChPW metodę oznaczania zawartości fosforu w paliwach stałych, techniką emisyjnej spektrometrii atomowej ICP-OES. Metoda ta polega na badaniu widm atomowych. Atomy wykazują zdolność do emisji promieniowania charakterystycznego dla poszczególnych pierwiastków. Wywołanie efektu emisji atomowej wymaga więc dostarczenia energii koniecznej do odparowania próbki, dysocjacji zawartych w niej cząsteczek i wzbudzenia powstałych atomów do wyższych stanów energetycznych. W tym celu wykorzystuje się plazmę argonową generowaną indukcyjnie za pomocą zmiennego pola elektromagnetycznego, dzięki której atomizacja zachodzi w obojęt-



nym chemicznie otoczeniu. Temperatura plazmy jest bardzo wysoka, co wpływa na zwiększenie efektywności procesów wzbudzenia i jonizacji oraz zmniejszenie możliwości występowania interferencji chemicznych i wynosi od 6000 do 10 000 K [3,4]. Ponadto krótka droga optyczna oraz względnie równomierny rozkład temperatur w plazmie zapobiegają zjawisku samoabsorpcji, które może być obserwowane w przypadku dużych stężeń analitów. Aktualnie techniką ICP-OES oznaczają się około siedemdziesięciu pierwiastków, w bardzo szerokim zakresie stężeń [8]. Ogromną zaletą metody jest możliwość jednoczesnego oznaczania prawie wszystkich pierwiastków, podczas jednego wzbudzenia.

Oznaczanie zawartości fosforu techniką ICP-OES obejmuje następujące etapy: przeprowadzenie próbek stałych w roztwory wodne, usunięcie materii organicznej, zoptymalizowanie parametrów pracy spektrometru, analiza próbki techniką ICP-OES.

Analizę spektrometrii emisyjnej poprzedza wykonanie kalibracji spektrometru poprzez pomiar emisji promieniowania charakterystycznego dla poszczególnych pierwiastków z roztworów wzorcowych i próby ślepej, w celu wyboru odpowiedniej linii analitycznej dla danego pierwiastka. Roztwór analizowanej próbki pobierany jest za pomocą pompy perystaltycznej. Zapewnia ona stały przepływ próbki do komory rozpylania za pomocą nebulizatora. Następnie próbka w postaci aerozolu jest wtryskiwana do centrum plazmy, w której zachodzi wzbudzenie atomów. W wyniku powrotu wzbudzonych atomów do stanu pierwotnego następuje emisja promieniowania, którego wiązka kieruje się do spektrometru. Po uformowaniu jej w ściśle zdefiniowaną, następuje jej rozszczepienie w układzie optycznym i rozdzielenie na poszczególne linie, które kierowane są do detektora CID (ang. *Charge Injection Device*).

### 3. Aparatura i odczynniki

Do badań zastosowano mineralizator wielostanowiskowy Ethos One (Milestone) (rys.1) wyposażony w Rotor HPR1000/10S, elektryczny piec mufłowy umożliwiający osiągnięcie temperatury  $950 \pm 25^\circ\text{C}$ , spektrometr emisyjny iCAP 6500 DUO firmy Thermo Scientific (rys. 2) wyposażony w detektor CID oraz palnik poziomy z podwójną obserwacją plazmy: osiową i radialną. Do przygotowania próbek zastosowano wodę dejonizowaną o przewodnictwie  $0,08 \mu\text{S}$  (system Hydrolab HLP 5) oraz odczynniki i roztwory przygotowane zgodnie z instrukcjami podanymi w procedurach technicznych.



Rys. 1. Mineralizator wielostanowiskowy Ethos One  
Fig. 1. The mineralizer multiposition Ethos One



Rys. 2. Spektrometr emisyjny iCAP 6500 DUO  
Fig. 2. Emission spectrometer iCAP 6500 DUO

### 4. Przebieg i wyniki badań

Badano węgle koksowe stosowane jako komponenty mieszanek wsadowych w krajowych koksowniach. W pierwszym etapie przebadano 3 próbki węgla koksowego o różnej zawartości fosforu. Dla każdej próbki węgla, wykonano sześciokrotnie oznaczenie zawartości fosforu metodami: miareczkową i ICP-OES. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano charakterystykę obu metod badawczych, obejmującą następujące parametry statystyczne: powtarzalność i odtwarzalność metody, granice oznaczalności, niepewności rozszerzone wyniku pomiaru (przy współczynniku rozszerzenia  $k=2$ , na poziomie istotności 95%). Zgodnie ze wzorem 1 obliczono również współczynnik zmienności dla metody miareczkowej i spektrometrycznej

$$CV = \frac{s_1}{x_1} \times 100\%$$

W tabeli 1 i 2 przedstawiono wyniki oznaczenia zawartości fosforu w węglach oraz parametry statystyczne porównywalnych metod. Zgodnie z procedurą opracowaną w IChPW istnieje możliwość przeliczenia wyniku oznaczenia zawartości P<sup>a</sup> w paliwie metodą miareczkową na zawartość P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> w popiele oraz przedstawienia wyników uzyskanych metodą ICP-OES jako zawartość fosforu w paliwie.

Metoda miareczkowa, dla której wartość wyznaczonego odchylenia standardowego jest wyższa, jest metodą mniej precyzyjną, a więc obciążoną większym błędem przypadkowym [5].

W celu oceny precyzji obu metod, obliczono również współczynnik zmienności (wzór 1), którego wartości są mniejsze dla metody ICP-OES w porównaniu ze współczynnikami zmienności metody miareczkowej. Uzyskane wyniki wskazują na wyższą precyzję metody ICP-OES.

Jednym z parametrów charakterystyki metody jest dokładność, która może być przedstawiona za pomocą procentu odzysku. Na podstawie uzyskanych wyników oznaczania zawartości fosforu w materiale odniesienia obliczono procent odzysku stosując zależność (wzór 2)

$$CV = \frac{C_{\text{oznaczone}}}{C_{\text{CRM}}} \times 100\%$$

Wyniki badań próbki certyfikowanego materiału odniesienia ASRM 010-2, zarówno dla metody ICP-OES, jak i metody miareczkowej, mieściły się w granicach wartości podanych w certyfikacie (tab.3).

Tabela 1. Wyniki pomiarów zawartości fosforu w paliwie oraz parametry charakterystyki metody ICP-OES  
Table 1. Results of measurements of the phosphorus content in the fuel and parameters of the characteristics of ICP-OES method

Metoda	Węgiel 1 P <sup>a</sup> % wag.	Węgiel 1 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.	Węgiel 2 P <sup>a</sup> % wag.	Węgiel 2 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.	Węgiel 3 P <sup>a</sup> % wag.	Węgiel 3 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.
ICP-OES	0,0170	0,162	0,0872	2,343	0,1099	5,037
	0,0171	0,163	0,0872	2,342	0,1096	5,022
	0,0169	0,161	0,0870	2,337	0,1092	5,004
	0,0166	0,158	0,0866	2,326	0,1096	5,022
	0,0169	0,162	0,088	2,364	0,1101	5,047
	0,0168	0,160	0,0877	2,357	0,1100	5,042
Wartość średnia, % wag.	0,0269	0,161	0,0873	2,345	0,1097	5,029
Odchylenie standardowe, % wag.	0,0002	0,0018	0,0005	0,0137	0,0003	0,0160
Powtarzalność, % wag.	-	≤ 0,5 0,05 % wartości bezwzględnej	-	> 1,0 -5,0 0,20 % wartości bezwzględnej	-	> 5,0 5,0 % wyniku wyższego
Niepewność wyniku, % wag.	0,04	0,002	0,04	0,002	0,04	0,002
Współczynniki zmienności, %	1,02	1,12	0,57	0,58	0,30	0,32
Granica oznaczalności, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.	0,01					

Tabela 2. Wyniki pomiarów zawartości fosforu w paliwie oraz parametry charakterystyki metody miareczkowej  
Table 2. Results of measurements of the phosphorus content in the fuel and parameters of the characteristics of titration method

Metoda	Węgiel 1 P <sup>a</sup> %wag.	Węgiel 1 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.	Węgiel 2 P <sup>a</sup> %wag.	Węgiel 2 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.	Węgiel 3 P <sup>a</sup> %wag.	Węgiel 3 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %wag.
Miareczkowa	0,0177	0,168	0,0840	2,255	0,0980	4,488
	0,0177	0,168	0,0847	2,274	0,0971	5,112
	0,0174	0,165	0,0845	2,269	0,0974	4,457
	0,0152	0,145	0,0766	2,054	0,1034	4,734
	0,0152	0,145	0,0767	2,057	0,1041	4,764
	0,0163	0,155	0,0769	2,064	0,0905	4,140
Wartość średnia, % wag.	0,0166	0,158	0,0806	2,162	0,0984	4,616
Odchylenie standardowe, % wag.	0,0012	0,0109	0,0042	0,1140	0,005	0,3317
Powtarzalność, % wag.	≤ 0,02 0,002 % wartości bezwzględnej	-	≤ 0,02 0,002 % wartości bezwzględnej	-	> 0,02 10 % wartości średniej	-
Odtwarzalność, % wag.	≤ 0,02% 0,005% wartości bezwzględnej	-	> 0,02% 15% wartości średniej	-	> 0,02% 15% wartości średniej	-
Niepewność wyniku, % wag.	0,002	-	0,002	-	0,002	-
Współczynniki zmienności, %	7,17	6,90	5,22	5,27	5,03	7,19
Granica oznaczalności P <sup>a</sup> , % wag.	0,002					

Tabela 3. Średnie wartości wyników oznaczania zawartości fosforu w certyfikowanym materiale odniesienia  
Table 3. Average values of the results for the determination of phosphorus in the certified reference material

Próbka	Metoda miareczkowa, % wag.	Metoda ICP-OES, % wag.	Wartości certyfikowane wraz z niepewnościami, % wag.
CRM ASRM 010-2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - 1,07	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - 1,18	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - 1,13±0,11

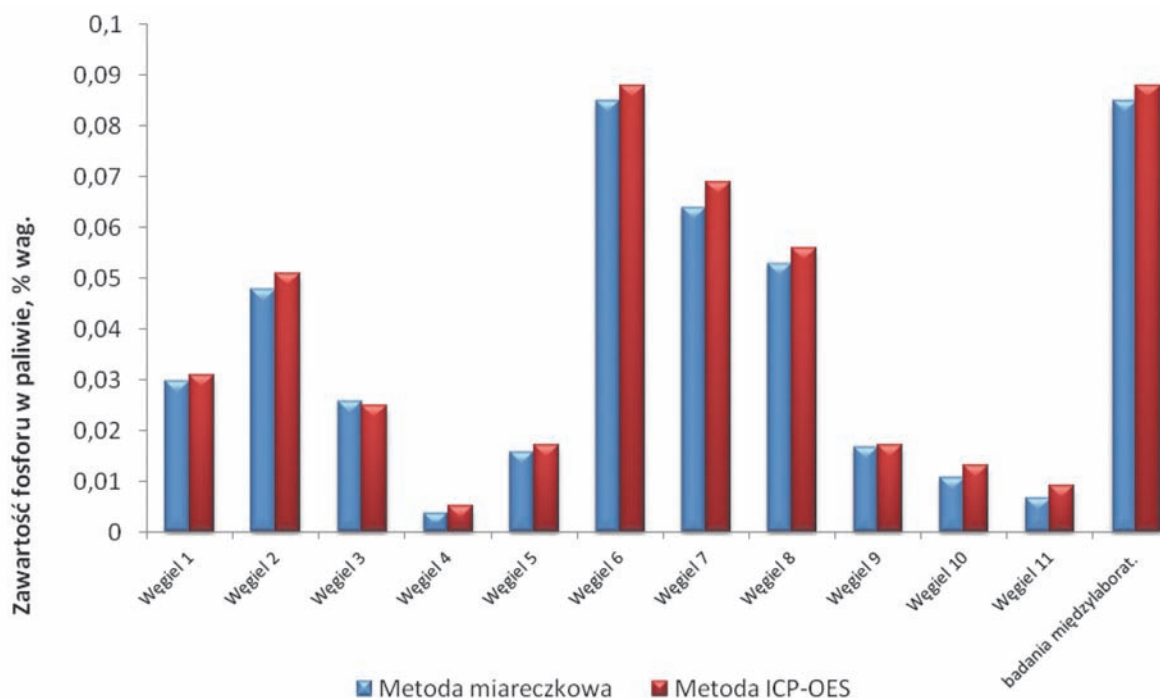
W obydwu przypadkach uzyskano zadowalający odzysk metody, wahający się w granicach od 94,7% do 104,4%. Średnie wyników odpowiadają wartościom certyfikowanym, co świadczy o tym, że prezentowane metody są dokładne.

W celu porównania obydwóch metod wykonano oznaczanie zawartości fosforu metodą miareczkową i ICP-OES

w jedenastu próbkach węgla kamiennych pochodzących z różnych kopalń produkujących węgle koksowe oraz w próbce węgla z badań międzylaboratoryjnych. Wszystkie analizy rutynowo wykonuje się w dwóch powtórzeniach, a wartości średnie uzyskanych wyników badań przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 3.

**Tabela 4. Porównanie wyników oznaczania zawartości fosforu w paliwie metodą miareczkową i ICP-OES**  
**Table 4. Comparison of the results for the determination of phosphorus in the fuel titration method and ICP-OES method**

Próbka	Metoda miareczkowa	Metoda ICP-OES	Różnica (wartość bezwzględna)
Węgiel 1	0,030	0,031	0,001
Węgiel 2	0,048	0,051	0,003
Węgiel 3	0,026	0,025	0,001
Węgiel 4	0,004	0,005	0,001
Węgiel 5	0,016	0,017	0,001
Węgiel 6	0,085	0,088	0,003
Węgiel 7	0,064	0,069	0,005
Węgiel 8	0,053	0,056	0,003
Węgiel 9	0,017	0,017	0,000
Węgiel 10	0,011	0,013	0,002
Węgiel 11	0,007	0,009	0,002
Badania międzylaboratoryjne	0,085	0,088	0,003



**Rys. 3. Średnie wyniki oznaczania zawartości fosforu w węglach koksowych uzyskanych różnymi metodami**  
**Fig. 3. Average results for the determination of phosphorus coking coals obtained by use of different methods**

W analizowanych próbkach zawartość fosforu w paliwie jest zróżnicowana i waha się w granicach od 0,004 do 0,085% wag. (metoda objętościowa) i od 0,005 do 0,088% wag. (metoda ICP-OES). Różnica między wynikami otrzymanymi za pomocą omawianych metod analitycznych nie przekracza 0,005% wartości bezwzględnej, przy czym w znaczącej większości przypadków wyniki uzyskane metodą ICP-OES są wyższe.

Ze względu na jednakowy sposób przygotowania próbki analitycznej, lecz różne metody oznaczania zawartości fosforu w węglu, w celu porównania wyników bierze się pod uwagę wyznaczoną wartość odtwarzalności wewnątrzlaboratoryjnej metod. Różnica pomiędzy wynikami oznaczania zawartości fosforu uzyskanymi dwoma metodami mieści się w granicy odtwarzalności wyznaczonej dla metody miareczkowej. Większość uzyskanych wyników mieści się nawet w dopuszczalnej wartości powtarzalności określonej dla metody miareczkowej.

## 5. Podsumowanie

- Oznaczanie zawartości fosforu w paliwach stałych od wielu lat w IChPW wykonywane jest metodą miareczkową. Obecnie rynek specjalistycznej aparatury laboratoryjnej, proponuje nowe rozwiązania aparaturowe mające na celu automatyzację metod analitycznych, które pozwolą na sprawne i dokładne wykonywanie analiz i oszczędność czasu. Przykładem jest technika ICP-OES stosowana do oznaczania zawartości składu pierwiastkowego w badanej próbce, w tym również zawartości fosforu.
- Na podstawie oszacowanych wartości parametrów statystycznych dla uzyskanych wyników oznaczeń zawartości fosforu w węglach koksowych stwierdzono, że metoda spektrometryczna charakteryzuje się większą precyzją.
- Dokonano oceny dokładności obu metod. Średnie wyniki zarówno metody ICP-OES, jak i miareczkowej odpowiadają wartościom certyfikowanym. W większości przypadków uzyskano zadowalający odzysk metody, wahający się

- w granicach od 94,7% do 104,4%, co świadczy o dokładności prezentowanych metod.
4. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi metodą miareczkową a ICP-OES mieszczą się w granicy odtwarzalności wyznaczonej dla metody miareczkowej.
  5. Technika ICP-OES w porównaniu z metodą miareczkową, pozwala na równoległe oznaczenie kilkunastu pierwiastków podczas jednej analizy. Zaletą metody spektrometrycznej jest krótszy czas wykonania oznaczenia. Jednakże koszty eksploatacji aparatury niezbędnej do przeprowadzenia analizy metodą miareczkową są znacznie niższe w odróżnieniu od metody ICP-OES. Dlatego też, istotną rolę w wyborze metody analitycznej odgrywają koszty pojedynczej analizy, wyposażenie laboratorium oraz czas przeznaczony na wykonanie oznaczenia.

## Literatura

1. *Bątorek-Giesza N., Sobolewski A., Gładych –Winnicka G.*: Analiza porównawcza metod oznaczania zawartości fosforu w węglach i koksach, *Karbo* 2, 2001, s. 61-65.
2. *Bertine K.K., Goldberg E.D.*: Fossil fuel combustion and the major sedimentary cycle. *Science*, vol. 173. 1971, s. 233–235.
3. *Bulska E.*: Spektrometria atomowa – Możliwości analityczne, Wydawnictwo Malamut, Warszawa 2008.
4. *Cygański A.*: Metody spektroskopowe w chemii analitycznej, WNT, Warszawa 2009.
5. *Dobecki M.*: Zapewnianie jakości analiz chemicznych, Łódź 2004, s. 35-41.
6. *Jasieńko S.*: Chemia i fizyka węgla. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
7. *Judowicz J.E., Kietris M.P., Mierc A.W.*: Elementy primiesi w iskopajemych Ugliach. Izd. Nauka, Leningrad 1985.
8. *Kozak M.*: Zastosowanie optycznej spektrometrii emisyjnej, ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej w badaniach przetworów naftowych, „*Nafta-Gaz*” 2010, s. 606-612.
9. *Kozak M.*: Zastosowanie reaktora mikrofalowego do mineralizacji próbek z matrycą węglowodorową. „*Nafta-Gaz*” 2012, nr 11, s. 859-867.
10. *Kuhl J., Dąbek H.*: O chlorze i fosforze w węglach kamiennych Górnego Śląska. „*Przeгляд Górnicy*” 1961 nr 9, s. 443–446.
11. *Morga R.*: Struktura zmienności zawartości fosforu w eksploatowanych pokładach węgla kamiennego KWK Pniówek. „*Gospodarka Surowcami Mineralnymi*” 2007, t. 23, z.1, s. 29-48.
12. *Namięnik J., Jamrógiewicz Z., Pilarczyk M., Torres L.*: Przygotowanie próbek środowiskowych do analizy. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000, s. 56-67.
13. *Olkulski T., Ozga-Blaschke U., Stala-Szlagaj K.*: Występowanie fosforu w węglu kamiennym, „*Gospodarka Surowcami Mineralnymi*” 2010, t. 26, z.1, s. 23-31.
14. *Ozga-Blaschke U.*: Gospodarka węglem koksowym, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2010, s. 20.
15. *Podraza Z., Krupa-Żuczek K., Wzorek Z.*: Technologie otrzymywania kwasu fosforowego (V), „*Czasopismo Techniczne*” 2011, z. 10.
16. PN-G-04528-10:1998 Paliwa Stałe. Oznaczanie składu chemicznego popiołu. Oznaczanie zawartości tlenu disodu i tlenu dipotasu.
17. PN-90/G-04502 Węgiel kamienny i brunatny. Metody pobierania i przygotowywania próbek do badań laboratoryjnych.
18. PN-ISO-1171:2002 Paliwa Stałe. Oznaczanie popiołu.
19. Q/LP/02/A:2011 Paliwa stałe oznaczanie zawartości fosforu.
20. *Rayan B.D., Grieve D.A.*: Source and distribution of phosphorus in British Columbiacoal seams. *Geological Fieldwork* 1995, Paper 1996-1.
21. *Różkowska A., Parzenty H.*: Zawartość fosforu w węglach kamiennych Górnosląskiego Zagłębia Węglowego, „*Kwartalnik Geologiczny*” 1990, t. 34, nr 4, s. 611-622.
22. *Stadnikov G.L.*: *Chimija koksowych uglej*, Goschmitechizdat, Moskva-Leningrad 1934.

## Wskazówki dla Autorów współpracujących z „Przełędem Górniczym”

Przełęd Górniczy (The Polish Mining Review) jest czasopismem naukowo-technicznym, merytorycznie obejmującym całokształt zagadnień związanych z górnictwem kopalin stałych i jest organem Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa.

Przełęd Górniczy w zakresie problematyki górniczej, jest bezpośrednim kontynuatorem Przełędu Górniczo-Hutniczego założonego w dniu 1.10.1903 r.

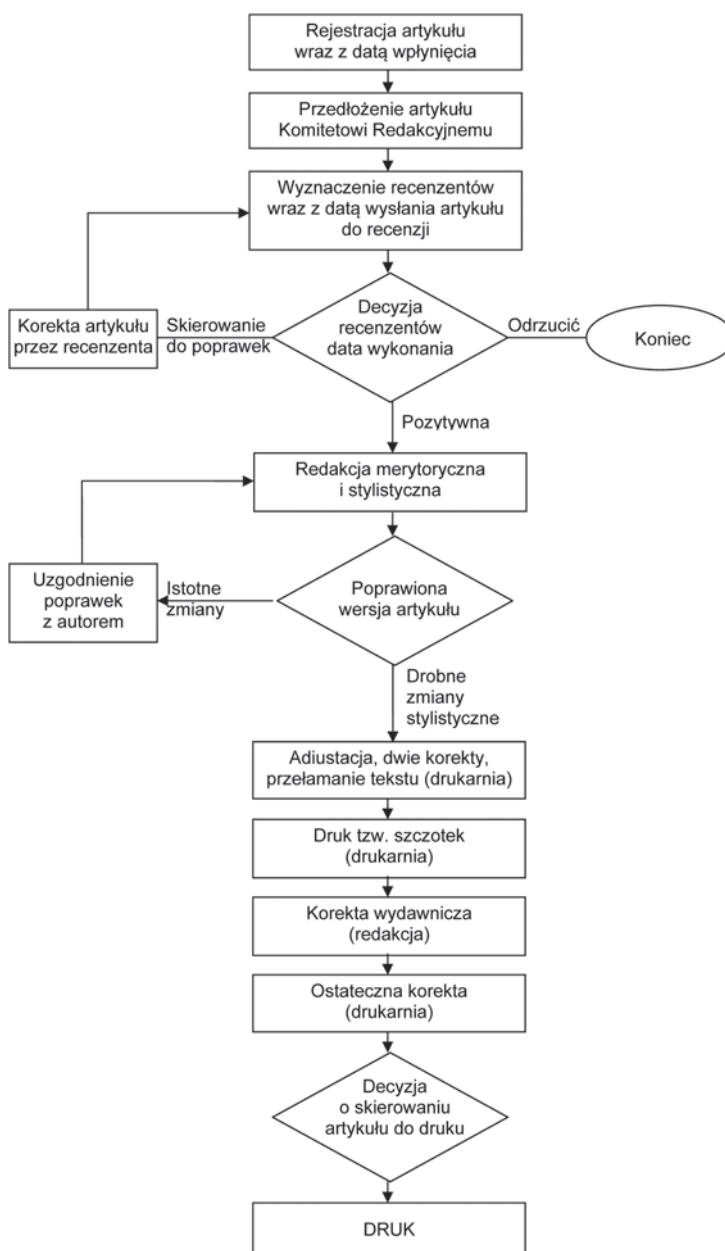
Miesięcznik Przełęd Górniczy znajduje się w wykazie, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wybranych czasopism punktowanych. Zgodnie z najnowszymi zmianami MNiSzW (załącznik do komunikatu MNiSzW z dnia 17 grudnia 2013 r.) za umieszczone w PG publikacje naukowe uzyskuje się 6 punktów.

Przełęd Górniczy podlega ocenie przez Zespół ekspertów afiliowanych przy Komitecie Ewaluacji Jednostek Naukowych, w tym celu Redakcja wypełnia, w terminach ustalonych przez MNiSzW, generator ankiety aplikacyjnej czasopisma naukowego. Nowa ankieta – kreator czasopisma Przełęd Górniczy, w systemie PBN/New journal question-naire submitted to the Polish Scholarly Bibliography, została złożona 12 lipca 2013 r.

Redakcja – Komitet Redakcyjny i Rada Naukowa – przestrzega zasad opracowanych przez MNiSzW przyjmowania i przygotowania do druku zgłaszanych do publikacji artykułów – szczegółowa procedura pokazana jest w niniejszej informacji dla Autorów.

### I. Schemat cyklu wydawniczego w Przełędzie Górniczym

Wydawca Przełędu Górniczego (ZG SITG) opracował instrukcję wydawniczą obowiązującą od roku 2011 do 2015. Obowiązuje ona Redakcję PG i jest także informacją dla Autorów.



### II. Zgłaszanie artykułów do druku

Redakcja prosi Autorów zgłaszających artykuły do druku w Przełędzie Górniczym o przestrzeganie poniższych zaleceń. Przyspieszy to istotnie datę opublikowania artykułu.

1. Treść artykułów i sposób ich ujęcia powinny odpowiadać poziomowi i profilowi tematycznemu publikacji w „PG”.
2. Nadsyłane artykuły powinny stanowić zamkniętą tematycznie całość i ujmować w zasadzie tylko jedno zagadnienie czy też przełęd stanu i perspektyw jakiegoś działu nauki, techniki, czy (lub) technologii górniczej.

3. Każdy artykuł należy rozpocząć krótkim wprowadzeniem i zakończyć wnioskami lub podsumowaniem. Podać należy obowiązkowo słowa kluczowe.
4. Na końcu artykułu na oddzielnej karcie z tytułowanej Literatura, należy obowiązkowo podać ponumerowany wykaz literatury. Należy zamieścić tytuły artykułów związanych z prezentowaną tematyką publikowanych w Przeglądzie Górnicy. Wykaz artykułów, wraz ze streszczeniami, znajduje się na stronie internetowej PG pod adresem [www.sitg.pl/strona-przeglad\\_info.html](http://www.sitg.pl/strona-przeglad_info.html)
5. Objętość artykułów powinna mieścić się w granicach 12÷14 stron maszynopisu; jedynie wyjątkowo objętość ta może być większa, jeżeli redaktor działowy uzna to za konieczne ze względu na celowość ujęcia w jednorazowej publikacji tematycznej całości zagadnienia, a naczelny redaktor wyrazi na to zgodę.
6. Do każdego artykułu należy obowiązkowo dołączyć streszczenie o objętości około 20 wierszy. Streszczenia tłumaczone są na języki: angielski, rosyjski, niemiecki i francuski. Należy je tak przygotować, aby obcojęzyczni czytelnicy abstraktów mieli jasną informację co do treści artykułu. W streszczeniu można powołać się na wykresy, tabele, wzory. Zaleca się dołączenie tłumaczenia w języku angielskim. Mile widziane będą tłumaczenia streszczeń na inne ww. języki.
7. Tytuły artykułów, tytuły tablic, podpisy pod rysunkami, fotografiami i innymi ilustracjami oraz słowa kluczowe obowiązkowo należy podać w językach polskim i angielskim.
8. Do artykułów należy dołączyć fotografię Autora (Autorów) formatu 4 × 5 cm barwną lub czarno-białą (ze względu na naukowy charakter Wydawnictwa wymaga się zdjęć w odpowiednim ubiorze). Nie będą publikowane artykuły gdy nie będzie kompletu zdjęć autorów. Zdjęcia należy podpisać tytułami, imionami i nazwiskami. Przy każdym nazwisku gwiazdkami należy podać afiliację autorów, której pełny tekst zamieszczony zostanie u dołu pierwszej kolumny tekstu. Zaleca się podawanie adresów e-mailowych, które ułatwią kontakt czytelników z autorem (autorami). Adresy te umieszczane będą pod nazwiskami autorów.
9. Tekst należy przygotować w edycji komputerowej, stosując jeden z edytorów tekstu: (Word 97, Word XP) z oznaczeniem wersji edytora tekstu i rysunków. Do maszynopisu należy dołączyć płytę CD z plikami tekstowym i rysunkami. Kompletny artykuł należy także przesłać pocztą elektroniczną na adres [zgsekretariat@sitg.pl](mailto:zgsekretariat@sitg.pl). Wersję poprawioną jeżeli będzie taki wymóg recenzentów, wraz z płytą CD należy przesłać pocztą na adres: Redakcja Przegląd Górnicy, ul. Powstańców 25, 40-952 Katowice lub dostarczyć osobiście.
10. Warunkiem opublikowania artykułu jest uzyskanie dwóch pozytywnych recenzji. Recenzentów wyznacza Komitet Redakcyjny.
11. Autorzy obowiązkowo składają oświadczenie, że praca nie była i nie będzie w tej samej postaci publikowana w innym czasopiśmie, a także oświadczenia o przeniesieniu autorskich praw majątkowych i niewystępowania przypadków „ghostwriting” i „guest authorship”. Formularze oświadczeń są w niniejszej informacji oraz do pobrania na stronie internetowej PG.
12. W przypadku konieczności wykorzystania w innych czasopismach wykresów, tablic, rysunków, fotografii, schematów itp., zamieszczonych w artykule opublikowanym w Przeglądzie Górnicy, autorzy zobowiązują się zwrócić do Redakcji PG o wyrażenie na to zgody. Cytowane w innych czasopismach materiały opublikowane w PG należy zaopatrzyć w informację (Przegląd Górnicy, rok, nr zeszytu, strona, nr np. fot.).
13. W artykułach nadsyłanych do PG należy stosować jednostki systemu SI (System International).
14. Autor wydrukowanego artykułu otrzymuje bezpłatnie jeden egzemplarz czasopisma. Nie dotyczy to recenzentów (opiniodawców). Redakcja nie przewiduje honorariów autorskich.
15. W związku z bardzo dużą ilością artykułów zgłaszanych do druku w PG Redakcja zastrzega sobie prawo publikowania w pierwszej kolejności prac autorów, których afiliowana przez nich jednostka prenumeruje Przegląd Górnicy.

### III. Zasady recenzowania artykułów

Procedura recenzowania artykułów do druku w Przeglądzie Górnicy jest zgodna z kryteriami i trybem czasopism naukowych podanymi w załączniku Komunikatu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 4 września 2012 r. Podstawowe zasady recenzowania publikacji podano poniżej oraz udostępniono na stronie internetowej Przeglądu Górnicy.

1. Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch Recenzentów spoza jednostki naukowej afiliowanej przez Autora (Autorów) publikacji.
2. W przypadku publikacji w języku obcym, co najmniej jeden z Recenzentów jest afiliowany w instytucji zagranicznej mającej siedzibę w innym państwie niż państwo pochodzenia Autora publikacji.
3. Autor lub Autorzy publikacji i Recenzenci nie znają swoich tożsamości (tzw. „double-blind review proces”); w innych rozwiązaniach Recenzent musi podpisać deklarację o niewystępowaniu konfliktu interesów, przy czym za konflikt interesów uznaje się zachodzące między Recenzentem a Autorem bezpośrednie relacje osobiste (pokrewieństwo do drugiego stopnia, związki prawne, związek małżeński), relacje podległości zawodowej lub bezpośrednią współpracę naukową w ciągu ostatnich dwóch lat poprzedzających rok przygotowania recenzji.
4. Większość (co najmniej 75 %) Recenzentów zgłoszonych publikacji stanowią Recenzenci zewnątrzni, czyli osoby nie będące członkami Rady Naukowej Przeglądu Górnicy, niezatrudnione w redakcji Przeglądu Górnicy lub w podmiocie, w którym afiliowany jest redaktor naczelny Przeglądu Górnicy.
5. Nazwiska Recenzentów poszczególnych publikacji lub numerów wydań Przeglądu Górnicy nie są ujawniane; raz w roku Przegląd Górnicy podaje do publicznej wiadomości listę współpracujących Recenzentów; lista publikowana jest w zeszycie 12/danego roku i na stronie internetowej PG.
6. Kryteria kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i formularz recenzji są podane do publicznej wiadomości na stronie internetowej Przeglądu Górnicy oraz zamieszczone poniżej.
7. Recenzja ma formę pisemną i zawiera jednoznaczny wniosek Recenzenta dotyczący dopuszczenia artykułu do publikacji lub jego odrzucenia.
8. Artykuły informacyjne, reklamowe, teksty polemiki i dyskusji nie wymagają recenzji.

### IV. Formularz recenzji

Redakcja Przeglądu Górnicy przygotowała formularz recenzji maszynopisu przesłanego do opublikowania w Przeglądzie Górnicy. Formularz ten wypełniają powołani przez kolegium redakcyjne Recenzenci. Formularz zawiera odpowiedzi na podane następujące pytania.

1. Kategoria rękopisu/artykuł naukowy/ przeglądowy/ opis doświadczeń/.....
2. Zakres / uniwersalny/ lokalny/ ściśle lokalny/.....
3. Czy tytuł jest związany i właściwy w stosunku do treści – (tak, nie).....
4. Czy tekst jest uporządkowany i napisany w sposób jasny – (tak, nie).....
5. Czy jasno określone są główne argumenty – (tak, nie).....
6. Czy wyniki są oryginalne – (tak, nie).....
7. Czy wnioski są logiczne i uzasadnione – (tak, nie).....
8. Czy dane są dokumentowane – (tabelarycznie lub graficznie) – (tak, nie).....
9. Czy rysunki i tablice są właściwe i czytelne – (tak, nie).....
10. Czy rysunki i tablice zawierają podpisy również w języku angielskim – (tak, nie).....
11. Czy streszczenie wystarczająco informuje o treści artykułu – (tak, nie).....
12. Czy objętość artykułu jest właściwa – czy wymaga drobnych / znacznych zmian.....
13. Czy literatura jest – (optymalna/ częściowo niepotrzebna/ występują pewne braki).....
14. Czy artykuł można opublikować – (w obecnej formie/z poprawkami/po całkowitym przeredagowaniu).....
15. Czy artykuł należy odrzucić – (tak, nie).....

Recenzent przekazuje sporządzoną na formularzu recenzję do redakcji Przeglądu Górniczego. Każda odpowiedź „nie” (za wyjątkiem pkt. 10, 11) wymaga uzasadnienia lub zalecenia dołączonego do recenzji (na odwrocie formularza). Sekretarz redakcji kieruje recenzję zawierającą uwagi krytyczne do Autora (zgłaszającego artykuł do druku).

Autor powinien w ciągu jednego miesiąca dokonać wymaganych poprawek. Autor może nie zgodzić się z uwagami Recenzenta – w takim przypadku przygotowuje pisemną odpowiedź na recenzję. Jeżeli Recenzent stwierdzi konieczność, po wprowadzeniu poprawek przez autora lub nie zgodzeniu się z uwagami powtórnej recenzji, sekretarz redakcji kieruje ponownie artykuł do Recenzenta. Nie ustosunkowanie się do propozycji Recenzenta lub brak odpowiedzi na uwagi przez Autora po miesiącu uważane będzie automatycznie – bez powiadomienia Autora za rezygnację z publikacji.

W przypadku recenzji negatywnej (odrzućcie artykułu) Kolegium Redakcyjne podejmuje decyzję o odrzuceniu pracy lub może skierować artykuł do kolejnego Recenzenta.

**Uwaga.** Formularz recenzji jest do pobrania na stronie internetowej [www.sitg.pl/strona-przeglad\\_info.html](http://www.sitg.pl/strona-przeglad_info.html)

## V. Procedura zabezpieczająca przed zjawiskiem ghostwriting i guest authorship

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego żąda wdrożenia procedury ujawniania wkładu poszczególnych Autorów w powstanie publikacji. W Komunikacie z dnia 4.10.2012 roku podano, że ocena czasopisma zależeć będzie od wprowadzenia tzw. zapory ghostwriting.

*„Rzetelność w nauce stanowi jeden z jej jakościowych fundamentów. Czytelnicy powinni mieć pewność, iż Autorzy publikacji w sposób przejrzysty, rzetelny i uczciwy prezentują rezultaty swojej pracy, niezależnie od tego czy są jej bezpośrednimi autorami, czy też korzystali z pomocy wyspecjalizowanego podmiotu (osoby fizycznej lub prawnej).*

*Dowodem etycznej postawy pracownika naukowego oraz najwyższych standardów redakcyjnych powinna być jawność informacji o podmiotach przyczyniających się do powstania publikacji (wkład merytoryczny, rzeczowy, finansowy ect.), co jest przejawem nie tylko dobrych obyczajów, ale także społecznej odpowiedzialności”.*

Redakcja Przeglądu Górniczego wprowadza więc odpowiednie procedury aby przeciwdziałać przypadkom:

- ghostwriting – z przypadkiem tym mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z Autorów lub bez jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji,
- guest authorship (honorary authorship) – z przypadkiem takim mamy do czynienia wówczas, gdy udział Autora jest znikomy lub wogóle nie miał miejsca, a pomimo to jest autorem/współautorem publikacji.

Redakcja Przeglądu Górniczego wymagać będzie od Autorów publikacji ujawnienia wkładu poszczególnych Autorów w powstanie publikacji (z podaniem ich afiliacji oraz kontrybucji tj. kto jest autorem koncepcji, założeń, metod, protokołu itp. wykorzystywanych przy przygotowaniu publikacji); przy czym główną odpowiedzialność ponosi Autor zgłaszający manuskrypt i podpisujący stosowne oświadczenie.

Osoba wnosząca istotny wkład w powstanie publikacji, a nie będąca współautorem, powinna być wymieniona w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji.

Redakcja powinna uzyskać informację o źródłach finansowania publikacji, wkładzie instytucji naukowo-badawczych, stowarzyszeń i innych podmiotów („financial disclosure”). Informacje te są jawne i powinny się znaleźć w tekście artykułu, przed spisem literatury, w „Podziękowaniach”.

Zgodnie z tekstem Komunikatu MNiSzW redakcja będzie dokumentować wszelkie przejawy nieuczynności naukowej, zwłaszcza łamania i naruszania zasad etyki obowiązującej w nauce. Wszelkie wykryte przypadki „ghostwriting” lub „guest authorship” będą demaskowane, włącznie z powiadomieniem odpowiednich podmiotów (instytucje zatrudniające autorów, towarzystwa naukowe, stowarzyszenia edytorów naukowych itp.).

**Uwaga.** Formularz oświadczenia jest do pobrania na stronie internetowej [www.sitg.pl/strona-przeglad\\_info.html](http://www.sitg.pl/strona-przeglad_info.html).

## VI. Instrukcja sposobu przygotowania maszynopisu artykułu

- Praca powinna być napisana jednostronnie pismem maszynowym, na ponumerowanych arkuszach A-4, na stronie około 30 wierszy pisma z około 60 znakami w wierszu; margines z lewej strony powinien mieć szerokość 3+3,5 cm, natomiast z prawej strony około 1 cm.
- W miejscu tekstu, gdzie ma być umieszczony rysunek lub tablica, należy podać na marginesie z lewej strony: Rys. 1, Rys. 2, Tabl. 1, Tabl. 2 itd.
- Wszelkie rysunki, wykresy, schematy, fotografie należy nazywać w tekście rysunkami i numerować kolejnymi cyframi arabskimi; tablice i tabele także numerować kolejnymi cyframi arabskimi. Pod nimi należy podać źródło pochodzenia (np. opracowanie własne lub nazwisko i pozycja literatury z której zostało zacytowane).
- Na zacytowanie (w formie ich przedrukowania) rysunków, wykresów, schematów, tabel itp. z publikacji innych Autorów należy uzyskać zgodę redakcji czasopisma, w którym były zamieszczone i opatrzyć podpisem „Za zgodą Redakcji czasopisma .....”.
- Nazwy użytych liter greckich należy podawać na lewym marginesie w brzmieniu fonetycznym np.  $\alpha$  – alfa;  $\gamma$  – gamma.
- Do każdej pracy powinien być dołączony na oddzielnych arkuszach spis podpisów pod rysunkami i spis tablic.
- Rysunki należy wykonać w edycji komputerowej, przestrzegając obowiązujących zasad rysunkowych. Opis rysunków powinien być wykonany pismem prostym Times o wysokości 10p. (przy założeniu, że rysunek zostanie wydrukowany w skali 1:1; maksymalna szerokość z opisem rysunku jednoszpaltowego wynosi 8,5 cm, a dwuszpaltowego 17,5 cm).
- Tablice powinny być wykonane na oddzielnych arkuszach formatu A4.
- Przy cytowaniu wzorów należy stosować podany schemat np.:

$$R_m = \frac{P}{F} \quad (1) \quad \text{gdzie: } R_m - \text{wytrzymałość na rozciąganie, MPa}$$

$$P - \text{siła MN}$$

$$F - \text{pole przekroju próbki, m}^2.$$

Indeksy górne, dolne i wykładniki potęgowe należy pisać szczególnie dokładnie i wyraźnie.

Wzory numerować kolejno cyframi arabskimi w nawiasach okrągłych.

- Fotografie powinny być wykonane kontrastowo na papierze gładkim, błyszczącym z delikatnym, wykonanym ołówkiem, opisem zawierającym numer rysunku, nazwisko Autora (Autorów) i pierwsze tytuły opracowania, umieszczonym na odwrocie zdjęcia. Gdy zachodzi obawa odwrócenia fotografii lub rysunku, należy strzałkami zaznaczyć prawidłowe jego usytuowanie (G – góra, D – dół). Minimalne wymiary fotografii (z wyjątkiem mikroskopowych) 9×12 cm. Na fotografii mikroskopowej pożądane jest umieszczenie odcinka z określeniem jego rzeczywistej długości.
- Literaturę, której wykaz podaje Autor artykułu cytuje się następujący sposób:

**Książki:** Nazwisko i inicjały imion autora; dwukropek; tytuł pracy (pełny); kropka; Oznaczenie wydania (np. Wyd. 3); Miejsce wydania; nazwa wydawcy (np. Wydawn. Geologiczne) rok wydania; przecinek; liczba stron; jeżeli cytujemy fragment tekstu (np. s. 170-173).

**Przykład:** Broen A.: Kombajny chodnikowe. Wyd. 2. Katowice Śl. Wydawn. Techn. 1992

**Czasopisma:** Nazwisko i inicjały imion autora; dwukropek; tytuł artykułu; kropka; nazwa czasopisma (ew. obowiązujący skrót) rok wydania (ew. tom lub wolumin; t., vol); numer zeszytu ew. numer strony lub stron (pierwszej i ostatniej).

**Przykład:** Winter K.: Desorbierbarer Methan gehalt und ausgasungs verhalten von Kohle. Glückauf-Forschungshefte 1975, Nr 3.

**Uwaga:** Wszystkie elementy opisu podajemy w języku oryginału (poza oznaczeniem stron). W przypadku alfabetów cyrylickich np. jęz. rosyjski, ukraiński, bułgarski) stosuje się transliterację – zgodnie z normą PN-70/N-01201.

Powołania się w tekście na literaturę dokonuje się wyłącznie przez podanie w nawiasie kwadratowym numeru zgodnego ze spisem literatury, np. [3]. Nie będą przyjmowane artykuły, w których cytowanie literatury odbywa się poprzez wymienianie w tekście nazwisk autorów i roku publikacji (sposób stosowany w niektórych czasopismach).

## Oświadczenie Autorów w sprawie przeniesienia praw autorskich i majątkowych

1. Podpisani poniżej Autor/Autorzy oświadczają, że napisali zgłoszony do druku w Przeglądzie Górniczym artykuł zwany dalej „utworem” pt:  
.....  
.....
2. Autorzy/Autor przenosi(szą) na Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa Wydawcę Przeglądu Górniczego w Katowicach autorskie prawa majątkowe do utworu bez honorarium autorskiego w zakresie opublikowania w wersji papierowej i elektronicznej utworu, w miesięczniku Przegląd Górniczy. Prawa obejmują następujące pola eksploatacyjne:
  - utrwalanie i zwielokrotnianie utworu za pomocą techniki drukowanej, reprograficznej, zapisu cyfrowego, zapisu magnetycznego,
  - obrót oryginałem wydrukowanego w Przeglądzie Górniczym utworu, egzemplarzami jego kopii, ich wynajmowanie, użyczenie, udostępnianie,
  - udostępnianie utworu w taki sposób, że każdy zainteresowany może mieć do niego dostęp w czasie i miejscu przez siebie wybranym,
3. Autor/ Autorzy zapewnia(ją), że utwór jest całkowicie oryginalny i nie był do tej pory publikowany i nie zawiera żadnych zapożyczeń z innego dzieła, które mogłyby spowodować odpowiedzialność Wydawcy, oraz że prawa autorskie Autora/ Współautorów do tego utworu nie są ograniczone w zakresie objętym niniejszym oświadczeniem.
4. W przypadku gdy Autor/Autorzy włączył(li) do utworu ilustracje lub inne materiały chronione prawem autorskim, to obowiązany(ni) jest (są) do uzyskania pisemnego zezwolenia, od osoby uprawnionej, do ich wykorzystania przez Wydawcę oraz zobowiązuje(ją) się do uregulowania w własnym zakresie związanych z tym kosztów.
5. Wydawca ma prawo dokonania koniecznych zmian utworu wynikających z opracowania redakcyjnego. Nie narusza ono praw autora w zakresie autorskich praw osobistych.
6. Współautorzy oświadczają, że Autorem głównym (do korespondencji) jest:  
.....tel. kontaktowy .....

Imię i Nazwisko	Adres zamieszkania (z kodem)	Afiliacja	Podpis

Katowice, dnia .....



## OŚWIADCZENIE AUTORÓW W SPRAWIE ZAPÓR „GOSTHWITING” I „GUEST AUTHORSHIP”

1. Tytuł artykułu do opublikowania w Przeglądzie Górniczym

.....  
 .....

2. Autor/Autorzy artykułu (podać imię i nazwisko, tytuły naukowe, email)

.....  
 .....  
 .....

Na podstawie Komunikatu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 4 września 2012 r. wyjaśniającego pojęcia „ghostwriting” i „guest authorship” opublikowane w Informacji dla Autorów Przeglądu Górniczego Autorzy składają poniższe oświadczenia.

3. Oświadczenie w związku z zaporą „ghostwriting”

Autor(autorzy) oświadcza(ją), że nie zachodzi przypadek pominięcia osoby, wnoszącej istotny wkład w powstanie publikacji, w składzie autorów. Osoby pomagające w badaniach będących podstawą publikacji są wymienione w „Podziękowaniach”.

[Uwaga: jeżeli taki przypadek nie zachodzi, proszę przekreślić ostatnie zdanie i parafować przez głównego Autora].

4. Oświadczenie w związku z zaporą „guest authorship”

Autor (autorzy) oświadcza(ją), że wśród współautorów nie ma osoby, której udział w przygotowaniu publikacji nie miał miejsca lub jej udział był znikomy.

5. Oświadczenie o źródłach finansowania publikacji

Autor (autorzy) oświadcza(ją), że jednostki będące źródłem finansowania publikacji „financial disclosure” oraz podmioty mające istotny wkład w przygotowanie publikacji są wymienione w „Podziękowaniach”

[Uwaga: jeżeli takie przypadki nie występują, proszę przekreślić to oświadczenie i parafować przez głównego Autora].

6. Oświadczenie ujawniające wkład poszczególnych Autorów w powstanie publikacji

Autor (autorzy) oświadcza(ją) zgodnie, że ich udział procentowy w powstaniu publikacji wynosi:

– Autor główny ..... udział .....%

Imię i Nazwisko

– Współautorzy:

..... udział .....%

Imię i Nazwisko

..... udział .....%

Imię i Nazwisko

..... udział .....%

Imię i Nazwisko

..... udział .....%

Imię i Nazwisko

7. Autor (autorzy) oświadcza(ją), że powyższe informacje są zgodne z rzeczywistością oraz zdają sobie sprawę, że nieprawdziwe oświadczenia będą, zgodnie z tekstem Komunikatu MNiSzW, „demaskowane włącznie z powiadomieniem odpowiednich podmiotów”.

Podpisy

Autor główny

Współautorzy

.....

.....

.....

.....

.....

DK 622.333: 622.001.891.53: 622.324

**Majewska Z., Majewski S., Ziętek J.:** Die Anwendung der akustischen Emission zur Untersuchung der Steinkohle-Grubengas-Formation im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in den Kohlelagerstätten. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 1-11, 13 Abb., 1 Tab., 44 Lit.

**Akustische Emission. Steinkohle. Spannungen. Sorption/Desorption von Gasen, CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in den Kohlelagerstätten.**

In dem Artikel wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen dargestellt, die die Möglichkeit der Anwendung von der akustischen Emission (AE) zur ferngesteuerten Untersuchung der gegenseitigen Einwirkung von Kohle und Gasmoleküle präsentieren. Die Untersuchungen sind mit zwei nach wie vor aktuellen Problemen verbunden, und zwar mit der Gewinnung vom Methan aus den Kohlelagerstätten als alternative Energiequelle und mit der Notwendigkeit der Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emission. Eine der Technologien, die die heutigen wirtschaftlichen und ökologischen Verhältnisse berücksichtigt, ist die Injektion von CO<sub>2</sub> in die Kohlelagerstätten mit Methan, bei gleichzeitiger Erhöhung der Methangewinnung (CO<sub>2</sub>-ECBM). Die Kenntnis der gegenseitigen Einwirkungen in der Steinkohle-Grubengas-Formation ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg dieser Technologie. Aus den durch die Autoren durchgeführten, gleichzeitigen seismo-akustischen Untersuchungen, sowie Sorption- und Dilatometrieuntersuchungen von den Steinkohleproben mit bekanntem petrographischem Bau gehen zahlreiche wichtige Informationen hervor. Die Experimente wurden sowohl in einem Sorption-Desorption-Zyklus durchgeführt, als auch in mehreren nacheinander folgenden Zyklen mit Proben ohne und unter Zwang. Zur Charakterisierung der AE, die in der Kohle durch die Sorption/Desorption von Gasen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und ihre binären Gemische) induziert wurde, sind traditionelle Parameter benutzt worden: akustische Aktivität und die Intensität der freigesetzten Energie. Die wichtigsten erzielten Resultate: - die seismo-akustischen Charakteristiken und die Charakteristiken der Verformungskinetik zeigen wesentliche Unterschiede auf, abhängig von der Kohleart und der angewandten Sorbatart, - die registrierte AE und die Volumendeformation während der aufeinanderfolgenden Sorption-Desorption-Zyklen zeigen, dass die Struktur der untersuchten Kohle bei dem ersten Zyklus, also infolge von dem ersten Kontakt zwischen Kohle und Sorbat, umgebaut wurde, - bei dem Prozess der CO<sub>2</sub>-Sorption auf den Proben, die einer konstanten einachsigen Spannung ausgesetzt wurden, wurde die Entstehung der Sorptionsspannung in der Probe beobachtet (sog. self-stressing), sowie die Reduktion der AE und der Volumendeformationen um entsprechend 80% und 60%, - die Untersuchungen der gegenseitigen Abhängigkeit der AE und der Volumendeformationen der Kohle in der Funktion der Menge des sorbierten Gases haben aufgezeigt, dass diese Abhängigkeit nicht linear ist und außerdem einen anderen Charakter hat, abhängig von der Kohle- und Sorbatart (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>). Die gewonnenen, neuen Informationen über den Charakter der Volumendeformation der Kohle, sowie die beobachtete Entstehung der Sorptionsspannung in der Kohle als Folge der CO<sub>2</sub>-Sorption von der Kohle, die den äußeren Spannungen ausgesetzt wird, können für CO<sub>2</sub>-ECBM von großer Bedeutung sein. Es handelt sich hier sowohl um die Etappe der Planung als auch um die Vorausberechnung der Folgen von Injektion der CO<sub>2</sub> aus dem Gesichtspunkt der langjährigen Lagerung dieses Gases.

DK 622.333: 622.1: 550.8: 550.3

**Pilecki Z., Harba P., Adamczyk A., Krawiec K., Pilecka E.:** Die Geophone in der Ingenieurseismik. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 12-21, 10 Abb., 1 Tab., 21 Lit.

**Ingenieurseismik. Die Klassifizierung der seismischen Sensoren. Seismometer. Geophon. Beschleunigungssensor. Dreiteilige Sensoren. Technische Parameter der Geophone. Impulsantwort. Dämpfen.**

In der Ingenieurseismik dienen die Sensoren als Registriergeräte der mechanischen Schwingungen des Bodens. In der Arbeit wurde ihre Klassifizierung dargestellt. Am meisten populär sind die Geophone, die in den ingenieurgeologischen, hydrogeologischen, geotechnischen, geomechanischen Untersuchungen und im Bergbau Anwendung finden. Die richtige Wahl der technischen Parameter beeinflusst wesentlich die Qualität der erzielten Daten und die Auflösung der Methode. Die wichtigsten Parameter die in Betracht genommen werden sollen sind: Eigenfrequenz, Empfindlichkeit, Dämpfen, harmonische Verzerrung und Spulewiderstand. Wichtig ist auch die Befestigung des Geophons auf dem Boden, weil sie die Impulsantwort des Messsystems wesentlich beeinflussen kann. Die Geophonhersteller in der Welt bieten die Anlagen mit verschiedenen technischen Parametern an, um die beste Datenerfassung in konkreten seismischen Situationen zu gewährleisten. Darüber hinaus können die modernen Geophone in drei Richtungen registrieren, was die Identifizierung der seismischen Wellen und die Charakteristik des Wellenfeldes erleichtert. In dem Artikel wurden die grundlegenden technischen Parameter der Geophone der weltmarktführenden Hersteller ausführlich präsentiert. Die Kriterien der Wahl von einem Geophon für die seismischen Untersuchungen wurden formuliert.

DK 622.333: 550.3: 622.167: 168: 662.1/4

**Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta S., Psonka J.:** Die Quellen der

Schwingungen in der Seismik. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 22-31, 12 Abb., 2 Tab., 24 Lit.

**Seismik. Seismische Quelle. Stoß mit Pendelhammer. Ramme. Sprengstoff. Sparker. Vibrator.**

Die Quellen der Schwingungen dienen zur Erzeugung der seismischen Energie in Form von einer seismischen Welle, die demnächst durch die Schwingungssensoren registriert wird. Bei den Ingenieurarbeiten finden aktive und passive Quellen Anwendung. Die populärsten oder aktiven Quellen sind: Pendelhammer, Ramme, Sprengstoffe und Vibratoren. Abhängig von der Art der seismischen Untersuchungen wird eine Quelle mit erwarteter Teufereichweite gewählt, die eine entsprechende Auflösung des Seismogramms gewährleistet. Von den in dem Artikel präsentierten seismischen Quellen erzeugen die Sprengstoffe die größte seismische Energie in einem breiten Frequenzband. Stoß mit einem Pendelhammer ist bei den Ingenieurarbeiten am meisten verbreitet. Zu den passiven Quellen in der Seismik werden hauptsächlich die Schwingungen gerechnet, die durch die vorbeifahrende Fahrzeuge, oder durch Maschinen- oder Menschenarbeit verursacht werden. In dem Artikel wurden manche aktiven seismischen Quellen genauer besprochen, die durch die Hersteller in der Welt erzeugt werden und in den Ingenieuruntersuchungen Anwendung finden können. Die technischen Parameter der gewählten Rammen und seismischen Vibratoren wurden verglichen. Die Kriterien zur Wahl einer richtigen Quelle in den seismischen Untersuchungen wurden formuliert.

DK 622.333: 550.3: 001.891.54

**Pilecki Z., Harba P., Laszczak M., Adamczyk A., Cielesta S.:** Die Streamer in der Ingenieurseismik. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 32-38, 7 Abb., 3 Tab., 25 Lit.

**Seismischer Streamer. Seismik. Verkehrswege. Klassifizierung der seismischen Streamer.**

In dem Artikel wurden die seismischen Streamer präsentiert, die in der ingenieurseismischen Untersuchungen Anwendung finden. Sie werden vor allem bei der Untersuchung des Bodens von den Verkehrswegen verwendet. Die Messung mit diesen Anlagen kann auch für andere Forschungszwecke gebraucht werden, jedoch auf einem flachen oder nur wenig inhomogenen Gelände. Die seismischen Streamer werden gegenwärtig dort angewandt, wo die Länge und Zahl der Messprofile zur mehrmaligen Aufstellung und Zerlegung der seismischen Anlagen zwingen. Die Autoren definieren den Begriff - seismischer Streamer. Eine Klassifizierung im Hinblick auf Konstruktionsart und Montageart der Sensoren in den Streamern wurde erarbeitet. Das Wirkungsprinzip wurde charakterisiert und bildlich dargestellt. Heutiger Stand und Entwicklungsrichtung der Streamertechnologie wurden präsentiert. Die möglichen Konfigurationen der seismischen Streamer, zusammen mit den Zusanlagen und den in den Messungen angewandten seismischen Quellen wurden dargestellt. Die Beispiele der in der Ingenieurseismik angewandten seismischen Streamer wurden dargestellt. Die Konstruktion der gewählten seismischen Streamer wurde verglichen.

DK 622.333: 550.3

**Matula R., Czaja K.:** Die Anwendung von einem Vibrator in den seismischen Untersuchungen des Bodens an der Oberfläche. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 39-43, 5 Abb., 9 Lit.

**Seismische Quellen. Seismik an der Oberfläche. Seismische Messungen im bebauten Gebiet.**

Eine Herausforderung für die seismischen Untersuchungen in kleinen Teufen ist bildliche Darstellung der Struktur an der Oberfläche auf den Gebieten, wo das Dämpfen der elastischen Wellen besonders stark ist. Das wichtigste Problem in der Situation sind die Einschränkungen in der Anwendung von einem Stoß zur Wellenerzeugung, weil seine Energie durch den Boden um die Unterlageplatte herum schnell absorbiert wird. Dieses Phänomen beeinflusst relevant die Qualität der registrierten Daten. Die einzige Lösung ist die Erzeugung einer seismischen Welle über einen längeren Zeitraum her und in einem bestimmten Frequenzabstand. In dem Artikel wurde die Anwendung von einem akustischen Vibrator als eine seismische Quelle dargestellt, die über eine entsprechende Leistung für die Untersuchungen der Oberfläche mit heterogenem Bau verfügt. Es wurde auch eine experimentale Vorgehensweise bei den seismischen Untersuchungen auf einem begrenzten bebauten Stadtteil dargestellt.

DK 622.363.1: 622.83/84: 622.556.3

**d'Obyrn K., Kucharz J.:** Die Sicherung der Kammer Ferdynand d'Este als eine Maßnahme zur Einschränkung der Wassergefahr an der Nordgrenze der Salzlagerstätte von Wieliczka. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 44-50, 13 Abb., 11 Lit.

**Salzbergwerk. Wassergefahr. Bruchgefahr. Stabilisierung vom Gebirge. Sicherung der Kammer.**

In dem Artikel wurde die Art und Weise der Sicherung einer der Kammer von Salzbergwerk „Wieliczka“ dargestellt. Die Kammer Ferdynand d'Este befindet sich

an der Nordgrenze der Lagerstätte, an der III. Grad der Wassergefahr herrscht. Der Salzbergwerk „Wieliczka“ führt regelmäßig Arbeiten, die die Wasser- und Bruchgefahr besonders an der Nordgrenze der Lagerstätte einschränken. Es handelt sich hier um Sicherung oder Liquidation der Kammer zum Zwecke der Stabilisierung des Gebirges. Im Fall von den historischen Kammern, die nicht liquidiert werden können, wird eine geomechanische und hydrogeologische Analyse durchgeführt, die eine Grundlage für das Projekt der Kammerabsicherung bildet. Die Sicherung der Kammer Ferdynand d'Este ist ein Beispiel für eine komplexe Vorgehensweise bei den hydrogeologischen Problemen in einem historischen Salzbergwerk, weil sie sowohl Ankerausbau als auch Unterstützungsausbau und druckdichte Schließung umfasst.

DK 622.363.1: 622.1: 550.8: 622.83/.84

**Hejmanowski R., Malinowska A., d'Obyrn K.:** Die Kinematik der Konvergenz von Salzgebirge und von Bewegungen der Punkte im Bereich von Schacht „Kinga“ des Salzbergwerks „Wieliczka“. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 51-55, 4 Abb., 1 Tab., 9 Lit.

**Konvergenz der Strecken. Geodätischen Messungen. Deformationen des Gebirges. Salzgebirge.**

Die Messung der Konvergenz wird im Gebirge angewandt, um die Stellen zu lokalisieren und untersuchen, die besonders durch die Spannungen bedroht sind. Die Spannungen kommen wegen Abbaukonzentration in dem bestimmten Bereich vor, oder wegen besonderen geologischen Eigenschaften des Gebirges. Die Ergebnisse solcher Messungen sind von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung der geomechanischen Gefahren in den Bergwerken, die unter Tage gewinnen. Sie sind auch eine Grundlage für die Ermittlung und Schätzung der Parameter der theoretischen Modelle. Die Analyse der Ergebnisse der Konvergenzmessung in Bezug auf das ganze durchbaute Gebirgskörper ist sehr komplex und kann mit relevanten Fehlern behaftet sein. Die Ergebnisse der langjährigen Höhemessungen wurden zusammengestellt und analysiert. Die Ergebnisse der zugänglichen Konvergenzmessungen aus einigen Salzkammern wurden auch gesammelt. In dem Artikel wurde der Versuch unternommen die Analyse zusammen mit der Beurteilung der Bewegung der Höhepunkte in den Abbaustrecken und in der Schachtsäule zu führen. Eine räumliche Analyse die alle Ergebnisse mit der abbautektonischen Situation vergleicht erlaubt eine einfachere und genauere Schlussfolgerung. Solche Analysen erlauben es, den ursächlichen Zusammenhang zwischen Kammerkonvergenz und Bewegungen der Punkte zu bestimmen und somit die bedrohten Teile des Bergwerks zu lokalisieren. Die Einführung der Geoinformationssysteme (GIS) hat die Zweckmäßigkeit dieser Analysen aufgewiesen.

DK 622.333: 622.83/.84: 622.167/.168

**Tomecka-Suchoń S.:** Die Beurteilung der Tagbruchgefahr mit dem Bodenradar 4D für die Zwecke der Rekultivierung des Baugrundes auf den ehemaligen bergbaulichen Gebieten. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 56-60, 10 Abb., 11 Lit.

**GPR-Methode. Hohlräume und Auflockerungszonen. Tagbrüche. Abbau in kleinen Teufen.**

In dem Artikel wurden die Ergebnisse der Untersuchungen mit einem Bodenradar dargestellt, die im Bereich der bergbaubedingten Tagbrüche in Trzebinia-Siersza durchgeführt wurden. Die raumzeitlichen Untersuchungen mit einem Bodenradar, sog. 4D, erlaubten es die Änderungen im Gebirge zu folgen und das Auftreten der Tagbrüche vorzusehen. Auf der Grundlage der Bodenradaruntersuchungen wurde festgestellt, dass auf dem analysierten Gebiet in dem Gebirge ständig Deformationen vorkommen, die zur Entstehung der Unstetigkeiten in den nächsten Jahren führen können. Die Notwendigkeit der geophysikalischen Untersuchungen vor dem Beginn der Rekultivierungsarbeiten wurde aufgezeigt, sowie auch die Unentbehrlichkeit der Bestätigung, dass die den Boden rekultivierenden Arbeiten richtig ausgeführt worden sind. Die durch die AGH Mitarbeiter geführten Untersuchungen hatten einen wissenschaftlichen Charakter. Es stellte sich jedoch heraus, dass sie einen großen nützlichen Wert haben.

DK 622.1: 550.8: 622.333.167/.168

**Siwek S.:** Die Lokalisierung der Störungszonen mit der Konduktometrie in dem Oberschlesischen Kohlenrevier. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 61-68, 7 Abb., 1 Tab., 8 Lit.

**Angewandte Geophysik. Konduktometrie. Tektonik, Bildgebendes Verfahren in der Geophysik.**

Die Konduktometrie (GCM) in Form von mehrschichtigem Profilieren mit variabler Einstellung des Antennendipols ist eine oft angewandte geophysikalische Methode zur Lokalisierung der Zonen mit geologischen Störungen. In der Arbeit wurden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt, die in einem durch Menschenhand geänderten Gebirge im nördlichen Teil des Oberschlesischen Kohlenreviers durchgeführt wurden. Sie hatten zum Ziel die Charakteristik der gewählten Störungszonen in der Bodenschicht nah an der Oberfläche zu erkunden. Die Arbeit charakterisiert die durchgeführten Untersuchungen und analysiert die erzielten Ergebnisse in Hinsicht auf die abbautektonischen Daten.

DK 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Pilecki Z., Isakow Z.:** Das Projekt LOFRES - passive Seismik LFS unter Ausnutzung des seismischen Rauschens. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 69-73, 6 Abb., 23 Lit.

**LOFRES-System. Niederfrequente passive Seismik. Seismische Messungen mit Mikrosonden. Seismische Interferometrie. Regionales seismisches Rauschen. Lokales seismisches Rauschen. Auflösung, Teufereichweite.**

In dem Artikel wurden die methodischen Annahmen des LOFRES-Systems besprochen, das zur Messungen mit der niederfrequenten passiven Seismik dient. Dieses System dient zur Untersuchung des Baus und der Eigenschaften der geologischen Schichten an der Oberfläche und nutzt dabei das seismische Rauschen. Die Untersuchungen werden mit zwei Methoden durchgeführt: seismische Messung mit Mikrosonden und seismische Interferometrie. In dem Artikel wurden ihre methodischen Grundlagen dargestellt, sowie Algorithmen der Verarbeitung und Interpretation von seismischen Daten. Die Beispiele der Untersuchungsergebnisse wurden auch präsentiert. In der Zusammenfassung wurden auf die Vor- und Einschränkungen der passiven Seismik hingewiesen. Die größere Bedeutung der seismischen Interferometrie bei der Lösung der Fragen in der geologischen Ingenieurwissenschaft wurde betont.

DK 622.333: 550.3: 622.83/.84

**Marcak H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.:** Die Möglichkeiten der Anwendung von der seismischen Interferometrie in dem Bergbau. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 74-83, 12 Abb., 25 Lit.

**Niederfrequente passive Seismik. Seismische Interferometrie. Regionales seismisches Rauschen. Lokales seismisches Rauschen. Bergbau. Gebirgsschläge. Greensche Funktion.**

Die seismische Interferometrie hat Anwendung bei der Erkundung der Geologie des Bodens in großen Teufen gefunden, sowie in der suchenden Seismik zur Abbildung des Baus vom Boden. Es besteht auch die Möglichkeit, diese Methode in dem Bergbau anzuwenden. In dem ersten Teil der Arbeit wurden die mathematischen und physischen Grundlagen der Methode präsentiert. Demnächst wurde die Anwendung dieser Methode zur Lösung der abbautektonischen Probleme dargestellt. Es wurden die seismischen Phänomene charakterisiert, die in den bergbaulichen Gebieten vorkommen und in der seismischen Interferometrie verwendet werden können. Die Beispiele der abbautektonischen Situationen, in denen die seismische Interferometrie wertvolle Informationen liefern kann, wurden besprochen.

DK 622.333: 550.3: 622.333-047.36

**Czarny R.:** Ein Überblick der Anwendungsmöglichkeiten von der seismischen Interferometrie. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 84-91, 13 Abb., 33 Lit.

**Seismische Interferometrie. Greensche Funktion. Bodenwelle. Rayleighsche Welle.**

Der Artikel ist ein Überblick der zahlreichen Möglichkeiten der Anwendung der seismischen Interferometrie. Diese Methode ist relativ neu, wenn man die Tatsache berücksichtigt, dass die ersten Experimente im Jahr 2001 durchgeführt worden sind, und entwickelt sich sehr dynamisch. In der Arbeit wurde die Anwendung dieser Methode in vielen mit der Abbildung des Erdinneren verbundenen Fragen dargestellt, sowie bei der Untersuchung der Schichten an der Oberfläche und z.B. zur Überwachung der aktiven Bergstürze. Die dargestellten Untersuchungen wurden in anerkannten wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht.

DK 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Isakow Z., Pilecki Z., Sierodzki P.:** LOFRES - das moderne System der niederfrequenten passiven Seismik. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 92-96, 6 Abb., 1 Tab., 9 Lit.

**LOFRES-System. Niederfrequente passive Seismik. Seismische Messungen mit Mikrosonden. Seismische Interferometrie. Seismisches Rauschen. Seismometer.**

In dem Artikel wurde das LOFRES-System dargestellt, das für Messung der geologischen Schichten an der Oberfläche mit der niederfrequenten passiven Seismik unter Ausnutzung des seismischen Rauschens bestimmt ist. Die in den polnischen Bergwerken angewandten und für die passive Seismik entsprechenden Messsysteme wurden charakterisiert. Der Bau und das Funktionieren des LOFRES-Systems wurden dargestellt. Die technischen Parameter und die Tests der angewandten Seismometer wurden präsentiert. Die positiven Testergebnisse des Modellsystems wurden betont. Die Möglichkeiten der Anwendung des Systems wurden besprochen.

DK 622.333: 622.25-347.736/739

**Kortas L.:** Eine Modellanalyse der mikrogravimetrischen Effekte, die über den alten Schachten registriert wurden. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 97-105, 8 Abb., 3 Tab., 12 Lit.

**Schacht, Gravimetrie, Messungen, gravimetrische Modellierung.**

Der Artikel ist eine Fortsetzung und Erweiterung der Forschungen, die der Autor

in den Jahren 2008-2012 geführt hat (Kortas, 2008, 2012). Der Beitrag enthält eine Interpretation der gravimetrischen Anomalien im Bereich der stillgelegten Schächte unter Ausnutzung der Modellierung und der inversen Analyse. Für die Untersuchungen wurden ein stillgelegter Schacht „Wschodni“ und Schacht „Władysław“ gewählt. Die Analyse der durch Messung registrierten Anomalien beruhte darauf, dass die Modelluntersuchungen so durchgeführt wurden, damit die beste Anpassung des modellierten Gravitationseffekts an die Messergebnisse gefunden wird. Die Anpassung im Fall von dem Schacht „Wschodni“ wurde weniger zufriedenstellend, vor allem wegen schlechter Wahl des Messgeländes. Die Modellierungsergebnisse für den Schacht „Władysław“ waren den Messdaten sehr nah. Dies beweist, dass die in dem Artikel dargestellte Methode zur Interpretation der gravimetrischen Daten verwendet werden kann. Zum Schluss werden die aus dem Artikel resultierenden praktischen Empfehlungen angegeben für die Suche nach einem Hohlraum (nach einem Schacht) mit gravimetrischen Methoden.

DK 622: 622.351.85: 622.83/84

**Lipski Z., Mrozek D.:** Die Probleme bei der Analyse vom Einfluss der Bergschläge auf einen bergbaulichen Baudenkmal am Beispiel von einem Aussichtsturm. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 106-111, 3 Abb., 3 Tab., 6 Lit.

#### **Baudenkmal. Gemauerter Turm. Bergschläge.**

In dem Artikel wurden die gewählten Probleme dargestellt, die mit der Anpassung von einem Baudenkmal an die neuen Belastungen verbunden sind. Die analysierten Belastungen kamen bisher nie vor. Es wurde ein gemauerter Aussichtsturm analysiert. Es wurden unterschiedliche Belastungen berücksichtigt, darunter dynamische Belastungen, die durch den laufenden Kohleabbau bedingt werden. Die heutige Form des Gebäudes ist damit verbunden, dass die Bestimmung des Turmes zweimal geändert wurde und der Turm umgebaut wurde. Die Methoden zur Einschätzung der Sicherheit des Gebäudes bei den dynamischen Einwirkungen und unter Berücksichtigung des eingeschränkten Zutritts zu der technischen Dokumentation wurden präsentiert. Die Folgen der Wahl verschiedener Analysemethoden wurden präsentiert.

DK 622.333: 622.4: 622.81/82

**Markefka P., Przystolik A., Stefanowicz T.:** Die Konzeption der Gestaltung des aerodynamischen Potenzials in den Steinkohlenbergwerken zur Gegenwirkung der mit der Änderung des atmosphärischen Drucks verbundenen Brand- und Gasgefahr. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 112-124, 6 Abb., 16 Lit.

#### **Hauptbewetterung. Änderungen des atmosphärischen Drucks. Gegenwirkung der von den Abbauhohlräumen ausgehenden Brand- und Gasgefahr.**

In den polnischen Steinkohlenbergwerken wird eine Erhöhung der von den Abbauhohlräumen ausgehenden Brand- und Gasgefahren beobachtet, die mit den Änderungen des atmosphärischen Drucks verbunden sind. Es sind Gefährdungen, die mit der sog. „Abbauhohlraumatemung“ verbunden sind. Es resultiert vor allem aus der Tatsache, dass die Vorrichtung und Gewinnung aus Notwendigkeit immer öfter nahe an großen Abbauhohlräumen lokalisiert sind. Die bisher angewandten Mittel und Maßnahmen zur Gegenwirkung den gefährlichen Folgen dieses Phänomens sind nicht ausreichend und nicht rationell. Deswegen müssen neue, effektivere Vorbeugungsmaßnahmen in diesem Bereich gesucht und angewandt werden. In dem Artikel wurden viele neuen praktischen Möglichkeiten der Ausschluss oder Milderung der Folgen von Änderung des atmosphärischen Drucks auf die Abbauhohlräume dargestellt, indem entsprechende Änderungen des aerodynamischen Potenzials um den genannten Hohlraum herum getätigt werden. Solche rationellen Maßnahmen – die Konzeption der Bildung von dem aerodynamischen Potenzial zum Zwecke der Gegenwirkung der mit der „Abbauhohlraumatemung“ verbundenen Brand- und Gasgefahr – wurden in einigen Bergwerken von KHW S.A. erfolgreich realisiert. Da die mit den Änderungen des atmosphärischen Drucks verbundene Gefahr wächst, ist das Streben nach eine allgemeine Anwendung dieser Konzeption in den polnischen Steinkohlenbergwerken zweckmäßig.

DK 622.333: 622.8: 622.331.103: 622.331.45

**Wróblewski P.:** Die technischen und organisatorischen Aspekte der Methanabsaugung in einem Streb, die die Strebsicherheit beeinflussen. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 125-130, 5 Abb., 6 Lit.

#### **Methanabsaugung. Gefährdung durch Methan. Arbeitssicherheit und -organisation.**

In dem Artikel wurden die technischen und organisatorischen Probleme bei der Methanabsaugung aus einer Kohlelagerstätte dargestellt, wobei hier für einen Streb mit der Wetterführung in U-Schaltung drei Methoden der Absaugung angewandt worden sind. Die technischen und organisatorischen Aspekte wurden besprochen, sowie die Strebsicherheit in Hinsicht auf: Kollision der Methanabsaugung- und Gewinnungsarbeiten, Methanabsaugungseffektivität und Einfluss des menschlichen Faktors. Die Vorteile der jeweiliger Absaugungstechnologie, sowie Probleme bei ihrer Anwendung wurden präsentiert. Auf der Grundlage der durchgeführten Analyse wurde bewiesen, dass das Auffahren von einem Streb und die angewandte Methanabsaugungstechnologie ein einheitliches Organisationssystem bilden sollten. Es wurde auch die günstigste Methanabsaugungsmethode dargestellt.

DK 622.323: 622.550.87: 553.98(438)

**Dubiel S., Rzycki M.:** Eine Analyse der Resultate von DST-Test auf einer Erdgaslagerstätte Lachowice – Stryszawa in Westkarpaten. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 131-138, 3 Abb., 2 Tab., 12 Lit.

#### **Erdölsuche. Westkarpaten. Erdgaslagerstätte Lachowice – Stryszawa. Probeerät Ful-Flo. Resultate der DST-Tests.**

In der Arbeit wurde die Technik und Technologie der DST-Tests an einer Erdgaslagerstätte Lachowice – Stryszawa dargestellt, die mit einem Probeerät Ful-Flo der Firma Halliburton durchgeführt wurden. Die technische Charakteristik des Geräts wurde angegeben; die Grundsätze der Erstellung eines Satzes zur Probenahme wurden genannt, abhängig von den geplanten technologischen Lösungen der Probenahme und den Lagerstätteverhältnissen. Es wurden die in dem Erdölbergbau angewandten technologischen Lösungen und die Resultate der DST-Tests analysiert, die an den gasführenden Formationen der Lagerstätte Lachowice – Stryszawa im Bereich von Westkarpaten durchgeführt wurden. Die Testresultate wurden mit dem Horner-Schema und mit der modernen log-log-Methode interpretiert. Die Ergebnisse der Interpretation und die Ergebnisse der Berechnungen der Lagerstätteparameter aller technisch gelungenen DST-Tests der Formationen wurden in Tabellen zusammengestellt und ausführlich besprochen. Die Tests haben sich mit der Technologie unterschieden. Die Tauglichkeit der gewonnenen Informationen bei der Suche der Lagerstätten der Kohlenwasserstoffe und bei der Beurteilung ihrer Produktivität wurde besonders hervorgehoben.

DK 622.32: 620.193-034: 622.32.167/168-048.24

**Beben D.:** Die Beurteilung der Wirksamkeit des chemischen Schutzes gegen Metallkorrosion in gewählten Erdgasförderanlagen. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 139-149, 12 Abb., 9 Tab., 5 Lit.

#### **Metallkorrosion. Chemischer Schutz gegen Korrosion. Untersuchungen im Labor und in der Förderanlage.**

In dem Artikel wurden die Maßnahmen charakterisiert, die ergriffen werden um den chemischen Schutz der Gasleitungen gegen Korrosion zu gewährleisten. In dem Labor wurden die chemischen Mittel untersucht (unter anderen doppelfunktionale Inhibitoren der Korrosion und Hydrate), die demnächst in den Förderanlagen getestet wurden. Die Laboruntersuchungen hatten zum Ziel den Inhibitor zu finden, der den Korrosions- und Hydratschutz während der Gasgewinnung in den Bohrungen gewährleisten würde. Die Inhibitoren wurden demnächst in den Förderanlagen geprüft. Die in den Förderanlagen durchgeführten Versuche erlaubten einen Inhibitor zu wählen, der die Gewinnung nicht störte und dabei einen guten Schutz gegen Korrosion sicherte. Manche untersuchte Inhibitoren haben die Gewinnung erschwert, indem sie z.B. den Korrosionsschutz nicht in dem geplanten Ausmaß sicherten (der angenommene Korrosionsschutz 50µm/Jahr, der in den Versuchen erreichte Schutz 227 µm/Jahr) oder die Entstehung von einem Niederschlag verursachten, der die Dosierpumpe beschädigt hat.

DK 622.332: 622.502.17: 622.332-049.7

**Fagiewicz K., Szulc M.:** Der Einfluss von Braunkohlegewinnung auf die räumliche Struktur und das Funktionieren einer Landschaft (am Beispiel von Tagebau Władysławów). *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 150-157, 6 Abb., 2 Tab., 13 Lit.

#### **Braunkohlegewinnung. Ehemalige bergbauliche Gebiete. Rekultivierung. Landschaftsänderung.**

In dem Artikel wurden die Änderungen der räumlichen Struktur und des Funktionierens von einer Landschaft des bergbaulichen Gebiets von Władysławów dargestellt, die mit den aufeinanderfolgenden Etappen der Braunkohletagebau verbunden waren. Es wurde die Geologie der Oberfläche, das Relief, die Art der Nutzung (Kulturboden, Wald, Wiesen, natürliche und künstlich geschaffene Stillgewässer, anthropogene Gebiete) analysiert. Die Änderungen dieser Komponente wurden quantitativ und qualitativ gefasst. Das Funktionieren der Landschaft wurde auf der Grundlage der Analyse von Größe und Intensität der wichtigsten Material- und Energieflüsse in einem bergbaulichen Geosystem (elektrische Energie, Braunkohle, Abraumgestein, Wasser) bestimmt.

DK 622.333: 622.33-027.332.662.6

**Gruchot A.:** Die Ausnutzung der Verbundwerkstoffe aus Berge und Flugasche zum Aufbau der Hochwasserdämme. *Przeegląd Górniczy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 158-164, 6 Abb., 3 Tab., 19 Lit.

#### **Berge. Flugasche. Verbundwerkstoffe. Durchlässigkeitsbeiwert.**

In der Arbeit wurden die Ergebnisse der Untersuchungen von Durchlässigkeit für Wasser der folgenden Werkstoffe dargestellt: nicht durchbrannte Berge aus der Bergehalde des Steinkohlenbergwerks „Rydultowy-Anna“, Flugasche aus den Elektrofiltern des Kraftwerks „Skawina“ und deren Gemische von 10-, 20- und 30-prozentigem Anteil der Flugasche im Verhältnis zu der trockenen Masse der Berge. In Anlehnung an die erzielten Ergebnisse wurde die Wasserdurchlässigkeit

keit der 6 m hohen Dämme aus den anthropogenen Verbundwerkstoffen, ohne Entwässerung und Abdichtung berechnet. Die Berechnungen umfassten die Bestimmung der Durchflussintensität durch den Dammkörper, die Ausgleichzeit der Sickerung und die Zeit, nach der sich der Durchfluss stabilisiert. Es wurde festgestellt, dass die Wasserdurchlässigkeit der Verbundwerkstoffe von Berge und Flugasche niedriger war, als die Wasserdurchlässigkeit der Berge selbst. Der Durchlässigkeitsbeiwert der Verbundwerkstoffe sank ab und erreichte einen Wert, der nahe den Werten für den festen Mineralboden steht. Die durchgeführten Berechnungen der Durchlässigkeit haben bewiesen, dass die Anwendung der Flugasche in den anthropogenen Verbundstoffen, die in dem hydrotechnischen Bau verwendet werden, zweckmäßig ist. Die kürzeste Zeit des Wassersickerung durch den Damm sowie ihr Ausgleich wurden für den Damm aus dem Berge festgestellt. Die Vergrößerung des Fluchascheanteils hat die Durchflussintensität um 5 Größenordnungen im Vergleich zu Berge verkleinert.

---

DK 622.271: 622.36: 622.556.3

**Kropka J., Wróbel J.:** Der Wasserzufluss in den Sandtagebau *Maczki-Bór*. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 165÷172, 3 Abb., 2 Tab., 14 Lit.

**Versatsand. Tagebau Maczki-Bór. Wasserzufluss.**

Der Sandtagebau *Maczki-Bór* liegt in dem unteren Teil des Tals von Weiße Przemsza. Der Tagebau befindet sich in der „Endphase“ der Gewinnung. Die Gewinnung wird in den Jahren 2015-2016 beendet. Zusammen mit der Gewinnung führt das Bergwerk auch die technische Rekultivierung der übertägigen Grubenbaue. Gegenwärtig wird angenommen, dass bis 2029/30 die heutigen Grubenbaue bis zu +255 m Höhe mit Berge gefüllt werden, d.h. bis zur Höhe des umgebenden Gebiets. Seit Mitte 90-er Jahre des 20. Jahrhunderts spielte der Kanal Osten III die wichtigste Rolle bei der Entwässerung des Tagebaus. Der mittlere Wasserzufluss in den Tagebau betrug in den Jahren 1987-2012 28,4 m<sup>3</sup>/min. In der Arbeit wurde die Beziehung zwischen fünf Zeiträumen des unterschiedlichen Niederschlags und der Zuflussmenge von Wasser in den Tagebau dargestellt. In den letzten vier Jahren sind folgende Änderungen in der Entwässerung des Tagebaus durchgeführt worden: Juni 2010 – Liquidation des Kanals Westen III und des Grabens bei der Böschung 4/I; Mai 2013 – Umleitung von Wasser aus dem unteren Teil des Kanals Osten III in eine Rohrleitung von 800 mm Durchmesser; Juli 2013 - Beginn der Liquidation des oben genannten Kanalabschnitts.

---

DK 622.333: 662.7: 622.661.7

**Kuklis I., Skawińska A., Micek B.:** Die Methode zur Bestimmung des Phosphorgehalts in der Fettkohle. *Przeгляд Górnicy* 2014 Bd. 70, Nr. 7., S. 173÷178, 3 Abb., 4 Tab., 22 Lit.

**Phosphor. Fettkohle. ICP-OES.**

Der Phosphorgehalt ist ein relevanter Qualitätsparameter von der Kohle, die als Bestandteil des Ofeneinsatzes für die Herstellung vom Koks verwendet wird. Der Phosphor wird besonders bei der Fettkohle unerwünscht, da er bei der Verkokung zu 98% in den Koks übergeht und demnächst, in dem Hochofenverfahren, in den Stahl, der dadurch brüchig wird. Demzufolge ist die Wahl der Bestandteile mit niedrigem Gehalt dieses Elements die einzige Möglichkeit, um den Phosphorgehalt in dem Ofeneinsatz herabzusetzen. Es gibt viele analytischen Methoden, die zur Analyse des Phosphorgehalts in den festen Brennstoffen verwendet werden. In der Arbeit wurde der Versuch unternommen die Titrationsmethode und die ICP-OES-Methode zu vergleichen. Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde eine Charakteristik beider Methoden erarbeitet, die folgende Statistikparameter umfasste: Präzision, Reproduzierbarkeit, Bestimmungsgrenze, erweiterte Unsicherheit des Messergebnisses und Variationskoeffizient für die Titrationsmethode und die ICP-OES Methode. Um die Genauigkeit der Methoden zu bestimmen, wurden die erzielten Resultate mit den zertifizierten Werten verglichen.

---

UKD 622.333: 622.001.891.53: 622.324

**Majewska Z., Majewski S., Ziętek J.:** L'utilisation du phénomène de l'émission acoustique pour étudier la configuration houille - gaz de mine du point de vue de la séquestration du CO<sub>2</sub> dans les gisements de charbon. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 1÷11, fig. 13, tab. 1, réf. 44.

**Émission acoustique. Houille. Contractions. Sorption/désorption de gaz. Séquestration du CO<sub>2</sub> dans les gisements de charbon**

Sont présentés dans l'article les résultats des tests de laboratoire qui illustrent les possibilités d'utilisation du phénomène de l'émission acoustique (AE) comme un outil pour étudier à distance les interactions réciproques de la matrice du charbon avec les molécules de gaz. Ces études ont une relation étroite avec les deux problèmes toujours d'actualité, à savoir : récupération du méthane provenant de gisements du charbon comme source d'énergie alternative et avec la nécessité de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Une de technologies, qui prend en compte les conditions économiques et environnementales actuelles est l'injection de CO<sub>2</sub> dans les gisements hors bilan avec le pouvoir grisoutoux du charbon avec la récupération intensifiée du méthane (CO<sub>2</sub>-ECBM). La meilleure connaissance des interactions réciproques dans la configuration houille-gaz de mine est cruciale pour le succès de cette technologie. A partir de recherches simultanées sismoacoustiques, de sorption et dilatométriques, réalisées par les auteurs sur les échantillons de charbon, dont la construction pétrographique est connue, certaines informations importantes ont été obtenues. Les expériences étaient réalisées en mode simple sorption-désorption ainsi que dans plusieurs cycles consécutifs sur des échantillons libres et contraints. Pour la description AE de l'adsorption/désorption, induite dans le charbon, de gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et leurs mélanges binaires) ont été utilisés les paramètres traditionnels: activité acoustique, l'intensité de l'énergie libérée. Résultats les plus importants obtenus : - les caractéristiques sismoacoustiques et les cinétiques de déformations montrent les différences significatives selon le type de charbon et le genre de sorbate utilisé, - enregistré AE et les déformations volumétriques au cours des cycles subséquents d'adsorption/désorption des gaz indiquent le convertissement de la structure du charbon examiné pendant le premier cycle, c'est-à-dire, à la suite du premier contact du charbon avec le sorbat, - au cours du processus de sorption de CO<sub>2</sub> sur des échantillons soumis à la contrainte uniaxiale a été observée l'induction d'un échantillon de la contrainte de sorption (appelé self-stressing) et la réduction de l'AE et des déformations volumiques respectivement de 80 % et 60 %, - étude de corrélation des phénomènes AE et des déformations volumiques du charbon dans la fonction de la quantité de volume du gaz indiquent la non-linéarité de cette dépendance et en plus, sa nature différente, qui dépend du type de charbon et de la nature de la sorbate utilisée (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>). Les informations nouvelles obtenues sur la nature des changements dans le volume et la proportion de charbon et aussi le phénomène observé de l'induction de la contrainte de sorption dans le charbon comme le résultat de la sorption de CO<sub>2</sub> dans la sorption de charbon en cours d'exécution sur le charbon sous une contrainte extérieure, peut avoir des implications importantes pour le CO<sub>2</sub> - ECBM, tant au stade de la conception et les effets de la prédiction d'injection de CO<sub>2</sub>, du point de vue du stockage à long terme de ce gaz.

UKD 622.333: 622.1: 550.8: 550.3

**Pilecki Z., Harba P., Adamczyk A., Krawiec K., Pilecka E.:** Géophones dans le génie sismique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 12÷21, fig. 10, tab. 1, réf. 21.

**Génie sismique. Classification des capteurs sismiques. Sismomètre. Géophone. Accéléromètre. Capteurs à trois éléments. Paramètres techniques des géophones. Réponse impulsionnelle. Amortissement.**

Dans le génie sismique les capteurs servent comme des enregistreurs des vibrations mécaniques du centre géologique. Est présentée dans l'ouvrage leur classification. Les plus communs sont les géophones qui sont utilisés pour la recherche-génie géologique, hydrogéologique, géotechnique, géomécanique et dans le secteur minier. La sélection correcte de leurs paramètres techniques a un impact significatif sur la qualité des données obtenues et la méthode de résolution. Les paramètres les plus importants qui doivent être pris en considération sont : la fréquence propre, la sensibilité, l'amortissement, distorsions harmoniques et la résistance de la bobine. Il est aussi très important le moyen d'attachement du géophone au sol, car il peut affecter significativement le système de mesure de réponse impulsionnelle. Les fabricants mondiaux des géophones proposent une large gamme d'appareils avec différentes valeurs de paramètres techniques pour l'acquisition de meilleures données possibles dans certaines applications sismiques. En outre, les géophones à trois éléments sont capables d'enregistrer dans trois directions en même temps, ce qui rend l'identification des ondes sismiques plus facile et la description du champ des ondes. Est présentée dans l'ouvrage une large revue des caractéristiques techniques des bases de géophones des principaux fabricants dans le monde. Sont formulées les critères de sélection des géophones pour les études sismiques.

UKD 622.333: 550.3: 622.167/168: 662.1/4

**Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta S., Psonka J.:** Sources des vibrations dans le génie sismique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 22÷31, fig. 13, tab. 2, réf. 24.

**Génie sismique. Source sismique. Coup de marteau. Mouton. Explosif. Étinceleur. Vibromasseur.**

Les sources des vibrations sont utilisées pour déclencher l'énergie sismique sous la forme d'onde sismique qui est ensuite enregistrée par les capteurs des vibrations. Dans les applications du génie sont utilisées les sources actives et passives. Parmi les sources les plus actives sont utilisées: le marteau, le mouton, les explosifs et les vibromasseurs. Selon la nature des études sismiques planifiées la source est sélectionnée avec la gamme attendue de la portée de la profondeur avec une résolution appropriée du séismogramme. Les explosifs génèrent la plus grande énergie sismique sur une bande de fréquences large de sources sismiques présentées dans l'article. Le coup de marteau est le plus répandu dans les applications d'ingénierie. Dans le génie sismique, les sources passives sont représentées principalement par les vibrations causées par les voitures qui passent, le fonctionnement des machines machines ou bien l'activité de l'homme. Sont abordées dans l'ouvrage certaines sources sismiques actives produites par des fabricants mondiaux qui peuvent être appliquées dans les études de l'ingénierie. Sont comparés les paramètres techniques des moutons sélectionnés et des vibromasseurs sismiques. Sont établis les critères pour la sélection de la source appropriée dans les études sismiques.

UKD 622.333: 550.3: 001.891.54

**Pilecki Z., Harba P., Laszczak M., Adamczyk A., Cielesta Sz.:** Flûtes dans le génie sismique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 32÷38, fig. 7, tab. 3, réf. 25.

**Flûtes sismique. Génie sismique. Routes. Classification de flûtes sismiques**

Est présenté dans l'article un aperçu sur les flûtes sismique utilisées dans les études du génie sismique. Elles sont utilisées principalement dans les études du sous-sol des voies de communication. Les mesures réalisées avec de tels matériels peuvent être également effectuées à d'autres fins de recherche, mais dans des conditions dont la configuration du terrain est plate, ou change légèrement de forme. Les flûtes sismiques sont actuellement utilisées dans des conditions où la longueur et le nombre de profils de mesure exigent la mise en place et le démontage à plusieurs reprises de l'équipement sismique. Les auteurs définissent la notion de la flûte sismique. Ont été développées les classifications prenant en considération les types de construction et les moyens de fixation des capteurs dans les flûtes. Est caractérisé et illustré le principe de fonctionnement et est décrit le stade actuel et la direction de développement des technologies des flûtes. Sont présentées les configurations possibles des flûtes sismiques avec les véhicules tracteurs et les sources sismiques utilisées dans les mesures. Sont présentés des exemples des flûtes sismiques utilisées dans le génie sismique avec leurs descriptions détaillées. Est également effectuée la comparaison de la construction des flûtes sismiques sélectionnées.

UKD 622.333: 550.3

**Matula R., Czaja K.:** L'application et l'utilisation du vibreur ultra léger dans les études sismiques de la partie du milieu géologique près de la surface. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 39÷43, fig. 13, tab. 3, réf. 6.

**Sources sismiques. Sismique pres de la surface. Mesures sismiques sur le terrain bâti**

L'enjeu pour des techniques sismiques peu profondes est de présenter la structure près de la surface sur les terrains avec l'affaiblissement particulièrement important des ondes élastiques. Le problème principal lié avec est la limitation de l'utilisation de la source de l'onde sonore dont l'énergie est rapidement absorbée par le sol autour de la plaque de base. Ce phénomène a un impact très important sur la qualité des données enregistrées. La seule solution est de générer des ondes sismiques pendant une longue période et dans une gamme de fréquences spécifiques. Est présentée dans l'article l'utilisation d'un vibreur acoustique comme source sismique au rendement respectif dans le cas d'études de la zone près de la surface à la structure hétérogène. Est également présentée une approche expérimentale des essais sismiques sur un l'espace urbain limité.

UKD 622.363.1: 622.83/84: 622.556.3

**d'Obyrn K., Kucharz J.:** Protection de la chambre Ferdynad d'Este comme l'action réduisant le risque d'eau dans l'environnement de la limite nord du gisement de sel de Wieliczka. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 44÷50, fig. 13, réf. 11.

**Mine de sel. Risque d'eau. Risque de foudroyage. Stabilisation du terrain. Protection de la chambre.**

Est présenté dans l'article le moyen de protection d'une de chambres dans la Mine de Sel "Wieliczka". La chambre Ferdinand d'Este se trouve dans l'entourage de la zone du III-ème degré de risque, près de la limite nord du gisement. La Mine de Sel « Wieliczka » réalise les travaux systématiques qui réduisent le risque d'eau et de foudroyage surtout à proximité de la limite nord du gisement par la protection ou bien la liquidation des chambres afin de stabiliser le terrain. Dans le cas des chambres historiques, qui ne peuvent pas être fermées, l'analyse géomécanique et hydrogéologiques est effectuée et sur leur base le projet de protection de la chambre est effectué. La protection de la chambre Ferdinand d'Este est un exemple d'un travail planifié, couvrant simultanément le boulonnage, le soutènement et la

liquidation étanche, ce qui est un exemple d'une approche globale approche par rapport aux problèmes hydrogéologiques et miniers dans la mine de sel historique.

UKD 622.363.1: 622.1: 550.8: 622.83/.84

**Hejmanowski R., Malinowska A., d'Obyrn K.:** Cinématique du déplacement de la convergence dans les points et l'arbre de roche chlorhydrique roi KS « Wieliczka » S.A. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 51-55, fig. 4, tab. 1, réf. 9.

**Convergence des chantiers. Mesures géodésiques. Déformations du terrain. Massif de sel.**

Les mesures de convergence sont utilisés dans le terrain dans le but d'étudier et de localisation des endroits exposés particulièrement au risque de contraintes présentes à la suite de la concentration dans la zone respective ou bien à la suite de propriétés géologiques spécifiques de la roche. Les résultats de ces mesures sont donc d'une importance cruciale pour l'évaluation des risques géomécaniques dans les mines profondes. Ils représentent également la base pour la construction et l'estimation des paramètres des modèles théoriques. L'analyse de résultats des mesures de convergence pour l'ensemble du terrain affecté est extrêmement complexe et peut faire l'objet d'erreurs significatives. Ont été rassemblés et analysés les résultats de plusieurs années des mesures géodésiques à hauteur. Ont été recueillis les résultats des mesures de la convergence d'un certain nombre de chambres de sel. Est présentée dans l'article une tentative d'effectuer l'analyse conjointement avec l'évaluation de déplacement des points trigonométriques dans les chantiers d'exploitation et dans le puits. Analyse spatiale qui intègre tous les résultats avec la situation de l'exploitation minière et géologique permet de tirer les conclusions d'une manière plus facile et moins accablés avec l'inférence de l'incertitude. Ce type des analyses permet à l'emplacement des relations de cause et d'effet entre la convergence des chambres et les déplacements des points et ce qui en résulte vers la détermination et localisation des zones avec le risque. La mise en œuvre de systèmes d'information géographique (GIS) a permis de présenter l'utilité de ce type des analyses.

UKD 622.333: 622.83/.84: 622.167/.168

**Tomecka-Suchoń S.:** Evaluation du risque de la création des fontis en utilisant la méthode de GPR 4D pour les besoins de l'aménagement du sol bâti sur les terrains après mine. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 56-60, fig. 10, réf. 11.

**Méthode de GPR. Vides et zones de desserments. Fontis. Exploitation minière peu profonde.**

Est présenté dans l'article le résultat des recherches réalisées avec le géoradar dans la zone des fontis issus de l'exploitation minière à Trzebinia-Siersza. Les études de géoradar, appelées 4D, ont permis de suivre les changements dans le massif et d'anticiper la création de fontis. Sur la base des essais de géoradar, il a été constaté que dans la zone analysée, les changements continus de la déformation du massif sont observées, qui peuvent entraîner l'apparition d'une déformation discontinue dans les années suivantes. A été démontrée la nécessité d'effectuer des recherches géophysiques avant de lancer les travaux de réparation, ainsi que de recherches confirmant la justesse du travail effectué afin d'aménager le sol. Les recherches menées par le personnel de l'AGH avaient la nature des recherches scientifiques mais il s'est avéré qu'ils ont l'importance pratique.

UKD 622.1: 550.8: 622.333.167/.168

**Siwek S.:** Emplacement des zones de faille dans la région des Huillères du Bassin de la Haute Silésie (GZW) en utilisant la méthode de conductivimètre. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 61-68, fig. 7, tab. 1, réf. 8.

**Géophysique appliquée. Conductimétrie. Tectonique. Imagerie géophysique.**

La méthode géophysique souvent utilisée dans l'emplacement des zones de dislocations tectoniques est celle de conductivimètre (GCM) sous la forme d'un profilage de multicouches en flottant l'antenne dipôle. Sont présentés dans l'ouvrage présent les résultats des essais effectués dans les conditions du terrain altéré par suite de l'activité humaine dans la partie nord des Houillères du Bassin de la Haute Silésie. Leur objectif étant d'identifier les caractéristiques des zones sélectionnées des dislocations tectoniques dans la couche près du sol. Est présentée dans l'ouvrage la description des études effectuées et l'analyse des résultats obtenus en ce qui concerne l'exploration de données géologiques.

UKD 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Pilecki Z., Isakow Z.:** Projet LOFRES – sismique passive LFS avec l'utilisation de bruit sismique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 69-73, fig. 6, réf. 23.

**Système LOFRES. Sismique passive à basses fréquences. Microsondage sismique. Interférométrie sismique. Bruit sismique régional. Bruit sismique local. Résolution. Portée de profondeur.**

Sont décrits dans l'ouvrage les principes méthodologiques du système LOFRES pour les mesure en utilisant la méthode de sismique passive à basses fréquences. Ce système est utilisé pour étudier la structure et les propriétés des couches

à proximité de la surface du milieu géologique à l'aide de bruit sismique. Les études sont effectuées à l'aide de deux méthodes: sondage microsismique et l'interférométrie sismique. Sont présentées dans l'article leurs bases méthodiques et les algorithmes de traitement et d'interprétation des données sismiques. Sont également présentés les exemples de résultats des recherches. Sont indiquées dans le résumé les avantages et les limitations de la sismique passive. Est accentuée l'importance accrue de la méthode d'interférométrie sismique dans la solution de problèmes en géo-ingénierie.

UKD 622.333: 550.3: 622.83/.84

**Marcał H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.:** Possibilité de l'utilisation de l'interférométrie sismiques dans les mines. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 74-83, fig. 12, réf. 25.

**Sismique passive de basses fréquences. Interférométrie sismique. Bruit sismique régional. Bruit sismiques local. Industrie minière. Secousses du terrain. Fonction de Green.**

La méthode de l'interférométrie sismique a trouvé l'application dans les problèmes de reconnaissance de la structure géologique du sous-sol profond et dans la prospection sismique pour la représentation de la structure du centre. Il y existe aussi une possibilité d'utilisation de cette méthode pour répondre aux besoins de l'exploitation minière. Dans la partie initiale sont présentés les principes mathématiques et les méthodes physiques de l'interférométrie sismique. Sont ensuite discutés les possibilités d'utilisation de cette méthode pour résoudre les problèmes géologiques et miniers. Sont caractérisés les types des phénomènes sismiques présents sur les terrains miniers, possibles pour être utilisés dans l'interférométrie sismique. Sont décrits les exemples des situations géologiques et minières dans lesquelles la méthode d'interférométrie sismique peut fournir des informations importantes.

UKD 622.333: 550.3: 622.333-047.36

**Czarny R.:** Révision de l'application de la méthode de l'interférométrie sismique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 84-91, fig. 13, réf. 33.

**Interférométrie sismique. Fonction de Green. Ondes de surface. Onde de Rayleigh. Ondes de code.**

D'une manière de révision sont présentées dans l'ouvrage les possibilités larges de l'application de l'interférométrie sismique. La méthode est relativement nouvelle, alors que les premières expériences ont été effectuées en 2001 et elle est actuellement en cours de son développement dynamique. Est présentée dans l'article son utilisation dans large éventail de problèmes liés avec la représentation de la construction du centre de la Terre et de ses couches près de la surface, ainsi que des sujets de la géoingénierie, par exemple de suivi des éboulements. Les exemples présentés ont été publiés dans des revues scientifiques reconnues.

UKD UKD 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Isakow Z., Pilecki Z., Sierodzki P.:** Le système moderne LOFRES de la sismique passive à basses fréquences. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 92-96, fig. 6, tab. 1, réf. 9.

**Système LOFRES. Sismique passive de basses fréquences. Microsondage sismique. Interférométrie sismique. Bruit sismique. Sismomètre.**

Est présenté dans l'ouvrage le système LOFRES conçu pour les études par la méthode de la sismique passive à basses fréquences des couches géologiques en utilisant le bruit sismique. Sont caractérisés les systèmes de mesure utilisés dans les mines polonaises, utiles pour les mesures de la sismique passive. Sont décrits la construction et le fonctionnement du système LOFRES. Sont présentés les paramètres techniques et les tests des sismomètres utilisés. Sont accentués les résultats positifs des tests du système modulaire. Sont décrites les utilisations prévues du système.

UKD 622.333: 622.25-347.736/739

**Kortas L.:** Analyse de modèle des effets microgravimétrique enregistrés au-dessus de puits fermés. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 97-105, fig. 8, tab. 3, réf. 12.

**Puits. Gravimétrie. Mesures. Simulation gravimétrique.**

L'article représente une continuation et le développement des essais de l'auteur réalisés dans les années 2008-2012 (Kortas, 2008, 2012). La publication contient l'interprétation des anomalies gravimétriques dans l'environnement de puits fermés avec l'utilisation de la simulation et l'analyse inverse. Pour la réalisation de recherches ont été choisis les puits fermés « Wschodni » et « Władysław ». L'analyse des anomalies, enregistrées par les mesures, consistait à la réalisation des essais de modèle d'une manière afin de trouver les meilleures adaptations de l'effet de gravitation simulé aux résultats des mesures. L'adaptation pour le puits « Wschodni » s'est révélée moins satisfaisante, principalement en raison de la sélection manquée du champ de mesure. Les résultats de la simulation pour le puits « Władysław » étaient proches aux données provenant de mesures. Ceci indique la pertinence de la, présentée dans l'ouvrage, méthode pour l'interprétation des

données gravimétriques. Dans la dernière partie de l'ouvrage sont présentées les recommandations pratiques sur la façon de rechercher le vide après la fermeture du puits en utilisant la méthode gravimétrique.

UKD 622: 622.351.85: 622.83/84

**Lipski Z., Mrozek D.:** Problemes de l'analyse de l'objet historique « apres mine » du point de vue de l'influence des secousses minières sur l'exemple de la tour d'observation. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 106-111, fig. 3, tab. 3, réf. 6.

**Objet historique. Tour construite en briques. Secousses minières.**

Sont présentés dans l'article les problèmes choisis liés avec l'adaptation de l'objet historique aux nouvelles charges, inexistantes auparavant. A été soumise à l'analyse la tour d'observation, construite en briques, prenant en compte les diverses charges y comprises celles dynamiques, des chocs induits par l'exploitation actuelle des gisements de charbon. La forme actuelle est le résultat de la double conversion de destination de l'objet liés avec à la reconstruction générale. Sont présentés les moyens d'évaluation de la sécurité de l'objet dans les conditions des interactions dynamiques et un accès limité aux informations techniques et les conséquences du choix de diverses méthodes d'analyse de l'objet.

UKD 622.333: 622.4: 622.81/82

**Markefka P., Przystolik A., Stefanowicz T.:** Le concept de formation de la distribution du potentiel aérodynamique dans les mines souterraines de charbon pour lutter contre les risques de feu et de gaz associés aux changements de pression atmosphérique. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 112-124, fig. 6, réf. 16.

**Aéragé principal. Changements de pression atmosphérique. Lutte contre les risques de feu et de gaz issus de vieux travaux.**

Est observé dans les mines polonaises de charbon la croissance du risque de feu et de gaz issus de vieux travaux causé par les changements de la pression atmosphérique, c'est-à-dire des risques liés au phénomène de la respiration des vieux travaux. C'est en grande partie une conséquence de l'emplacement de travaux minières et préparatoires, effectués par nécessité de plus en plus souvent dans le voisinage de plus en plus vastes zones de vieux travaux. Utilisés avant les moyens pour lutter contre ce risque ne sont pas pleinement suffisants et raisonnables. Cela oblige à chercher et utiliser des solutions préventives plus efficaces dans ce domaine. Sont présentées dans l'article plusieurs possibilités pratiques pour éliminer ou atténuer les effets de l'influence des variations de pression atmosphérique dans les zones de vieux travaux, en apportant les modifications appropriées dans la distribution du potentiel aérodynamique dans l'entourage de la zone donnée. Ces actions rationnelles – le concept de formation de la distribution du potentiel aérodynamique pour lutter contre les risques de feu et de gaz associés à la « respiration des vieux travaux » ont été mis en œuvre avec des résultats positifs dans plusieurs mines de KHW S.A. À la croissance de risques aérologiques liés aux changements de la pression atmosphérique, la tendance vers l'application plus large de ce concept dans les mines polonaises de charbon paraît d'être conforme au but.

UKD 622.333: 622.8: 622.331.103: 622.331.45

**Wróblewski P.:** Aspects organisationnels et techniques de captage du grisou dans la taille exploitée, influençant la sécurité de son avancement. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 125-130, fig. 5, réf. 6.

**Captage du grisou. Risque de grisou. Sécurité et l'organisation des travaux.**

Sont présentés dans l'ouvrage les problèmes techniques et d'organisation lors de la réalisation de captage du grisou dans les gisements de charbon avec la mise en oeuvre de trois moyens de captage du grisou pour les tailles exploitées à partir de champ avec le système d'aéragé en «U». Sont abordés les aspects techniques et d'organisation ainsi que de sécurité de la réalisation de travaux dans le contexte des facteurs tels que: contradictions des travaux liés avec le captage du grisou et l'exploitation de la taille d'exploitation, l'efficacité de captage du grisou et l'influence du facteur humain. Sont décrits les avantages et les problèmes liés avec l'utilisation de la technologie donnée de captage du grisou. Sur la base de l'analyse effectuée il a été montré que l'exploitation de la taille avec la technologie mise en place de captage du grisou doit représenter le système unifié d'organisation, ainsi que la méthode la plus avantageuse de captage du grisou a été suggérée.

UKD 622.323: 622.550.87: 553.98(438)

**Dubiel S., Rzyczniak M.:** Analyse de résultats des tests DST sur le gisement de gaz naturel Lachowice-Stryszawa dans les Carpates de l'Ouest. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 131-138, fig. 3, tab. 2, réf. 12.

**Exploration pétrolière. Carpates de l'Ouest. Gisement de gaz naturel Lachowice-Stryszawa. Échantillonneurs de type Full-Flo. Résultats des tests DST.**

Sont présentées dans l'ouvrage la technique et la technologie des tests DST du gisement de gaz naturel Lachowice-Stryszawa en utilisant l'échantillonneur fabriqué par la société Halliburton du type Ful-Flo. Est présentée la caractéristique technique de cet appareil d'échantillonnage et le principe d'achever son

set selon les solutions technologiques prévues d'échantillonnage et les conditions présentes du gisement. Ont été analysées les solutions technologiques utilisées dans l'exploration pétrolière et les résultats des tests DST de structures dévoniennes sur le gisement Lachowice-Stryszawa dans les environs de Carpates de l'Ouest. Les résultats de ces tests ont été interprétés par la méthode de Horner et la méthode moderne de log-log. Sont présentés dans les tableaux et décrits d'une manière détaillée les résultats des calculs de paramètres de gisement de tous les tests DST réussis du point de vue technique des structures dévoniennes différents du point de vue de la technologie, en mettant l'accent sur l'utilité des renseignements obtenus dans le processus d'exploration des hydrocarbures et de l'évaluation de leur productivité.

UKD 622.32: 620.193-034: 622.32.167/168-048.24

**Bęben D., Kuś J., Gliński A., Koźbial J.:** Évaluation de l'efficacité de la protection chimique des métaux contre la corrosion dans certaines mines de gaz naturel. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 139-149, fig. 12, tab. 9, réf. 5.

**Corrosion des métaux. Protection chimique contre la corrosion. Essais en laboratoire et dans les mines.**

Sont décrits dans l'ouvrage les travaux de service et d'exploitation des gazoducs dans les mines afin d'assurer la protection chimique contre la corrosion chimique à travers l'étude des produits chimiques (également les double inhibiteurs de la corrosion et hydrates) en laboratoire et leurs tests ultérieurs dans les mines. Afin de choisir l'inhibiteur ont été réalisés les tests au laboratoire assurant la protection contre la corrosion et l'hydratation au cours de l'exploitation de forages de gaz. Ils ont été ensuite vérifiés dans les mines. Les essais réalisés dans les mines ont permis de sélectionner l'inhibiteur qui ne causait pas de difficultés lors de l'exploitation et assuraient aussi la protection du métal contre la corrosion. Certains inhibiteurs examinés causaient les difficultés opérationnelles, ne limitant pas par exemple au niveau limité, la progression de la corrosion (protection contre la corrosion assumée 50 µm/an, obtenue au cours des essais de 227 µm/an), entraînaient la formation de sédiments qui ont endommagé la pompe doseuse.

UKD 622.332: 622.502.17: 622.332-049.7

**Fagiewicz K., Szulc M.:** L'influence de l'exploitation du lignite sur la structure spatiale et le fonctionnement des systèmes naturels (sur l'exemple de la mine à ciel ouvert Władysławów). *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 150-157, fig. 6, tab. 2, réf. 13.

**Exploitation du lignite, terrains "après mine". Remise en état. Modification du paysage.**

Sont présentés dans l'ouvrage les modifications apportées à la structure spatiale et le fonctionnement du système de paysage du terrain minier Władysławów associées aux étapes successives de l'exploitation à ciel ouvert du lignite. Ont été soumis à l'analyse la structure géologique proche à la surface, la configuration du terrain et son recouvrement (parcelles de terres arables, forêts, prés, réservoirs d'eau anthropiques, espaces anthropiques), les changements dans ces composants sont décrits en termes de quantité et de qualité. Le fonctionnement du paysage a été déterminé sur la base de l'analyse de la taille et de l'intensité des flux importants de matériel-énergie dans le géosystème minier (énergie électrique, lignite, morts terrains, eaux).

UKD 622.333: 622.33-027.332.662.6

**Gruchot A.:** L'utilisation de matériaux composites provenant de déchets issus de l'exploitation minière et des cendres volantes dans la construction des digues insubmersibles. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 158-164, fig. 6, tab. 3, réf. 19.

**Déchets issus de l'exploitation minière. Cendres volantes. Composites. Coefficient de filtration.**

Sont présentés dans l'ouvrage les résultats des études de la perméabilité de déchets issus de l'exploitation minière provenant de stockages de l'UE «Rydułtowy-Anna», des cendres volantes provenant de vide des électrofiltres de la Centrale "Skawina" et leurs composites avec 10, 20 et 30 % pour les cendres en ce qui concerne le poids sec des déchets. Sur la base des résultats obtenus de la recherche ont été effectués les calculs de filtration de l'eau par rempart fabriqué à partir de composites anthropiques de hauteur de terre 6,0 m sans vidange et joint. La gamme des calculs comprenait la détermination du débit à travers le corps du remblai, le temps d'établissement du suintement et le temps après lequel le flux de filtre est stabilisé. Est constatée une réduction significative de la perméabilité des composites des déchets issus de l'exploitation minière avec les cendres volantes par rapport aux déchets issus de l'exploitation minière. Le coefficient de filtration des composites a diminué obtenant les valeurs proches au coefficient de filtration des terres minérales compactes. Ont été effectués les calculs de filtration qui confirment l'opportunité de l'utilisation des cendres volantes comme un composant des composites des terres anthropiques utilisées dans la construction hydrotechnique. Le temps le plus court de suintement de l'eau à travers l'encaissement ainsi que sa détermination a été constatée pour l'encaissement de déchets issus de l'exploitation minière. L'aug-



mentation de la quantité de cendres volantes a entraîné une réduction du débit de 5 ordres de grandeur en ce qui concerne les déchets issus de l'exploitation minière.

---

UKD 622.271: 622.36: 622.556.3

**Kropka J., Wróbel J.:** Venues d'eau vers l'excavation de sable Maczki-Bór. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 165÷172, fig. 3, tab. 2, réf. 14.

**Sables de remblayage hydraulique. Mine à ciel ouvert Maczki-Bór. Venues d'eau.**

La mine de sable Maczki-Bór est située dans la partie inférieure de la vallée du minéral utile de Przemsza Biała. La mine se trouve dans la phase « terminale » du minéral utile. L'exploitation minière sera achevée dans les années 2015-2016. Simultanément avec l'exploitation minière, l'entreprise minière réalise la réhabilitation technique des gisements après l'exploitation de sable. Les estimations actuelles supposent que vers l'an 2029/2030, la zone des excavations actuelles sera rempli des déchets issus de l'exploitation minière, jusqu'au niveau d'environ +255,0 m, c'est-à-dire jusqu'à la cote du terrain environnant. Depuis la seconde moitié des années 90 du XX-ème siècle, le rôle majeur dans l'exhaure du gisement minier Maczki-Bór, est joué par le Canal principal III Wschód. Dans les années 1987-2012, la moyenne venue d'eau vers le gisement de la mine de sel était de 28,4 m<sup>3</sup>/min. Sont présentées dans l'ouvrage les relations entre les cinq périodes de précipitations différentes avec la grandeur des affluents de l'eau vers l'excavation. Les changements dans le système d'exhaure de l'excavation, lors de 4 dernières années, déterminent les dates suivantes: juin 2010 – liquidation du Canal principal Zachód III et de la fossé du talus 4/I ; mai 2013 – transport de l'eau coulant dans la partie basse du Canal principal Wschód III vers le conduit d'un diamètre de 800 mm et juillet 2013 – début de la liquidation de la partie mentionnée du canal.

---

UKD 622.333: 662.7: 622.661.7

**Kuklis I., Skawińska A., Micek B.:** Méthodes choisies de la détermination de la teneur en phosphore dans les charbons à coke. *Przeгляд Górnicy* 2014, Vol. 70, No. 7, pp. 173÷178, fig. 3, tab. 4, réf. 22.

**Phosphore. Charbon à coke. ICP-OES.**

La teneur en phosphore contenu dans le charbon est un paramètre très important de la qualité des charbons utilisés comme ingrédients de mélanges pour le lot de production de coke. Comme lors de carbonisation, 98% du phosphore pénètre dans le coke et dans le processus de grand fourneau vers l'acier, causant sa fragilité, le phosphore est l'ingrédient indésirable particulièrement dans les charbons à coke. Par conséquent, la seule possibilité d'une réduction du niveau de phosphore dans les mélanges d'un lot est la sélection des ingrédients à faible contenu de cet élément. Il y existe de nombreuses méthodes d'analyse utilisées pour l'analyse du phosphore contenu dans les combustibles. Sont présentées dans l'ouvrage les comparaisons de deux méthodes: méthode de titrage et celle de spectrométrie d'émission. Sur la base de résultats obtenus est élaborée la caractéristique de deux méthodes de test, y compris les paramètres statistiques tels que la répétabilité et la reproductibilité de la méthode, limites de détermination, les incertitudes étendues du résultat de mesure et le coefficient de variation pour les méthodes de titrage et de spectrométrie. Afin de déterminer l'exactitude des méthodes, ont été comparés les résultats des analyses obtenus avec les valeurs certifiées.

---

UKD 622.333: 622.001.891.53: 622.324

**Маевска З., Маевски С., Зентек Е.:** Применение явления акустической эмиссии для испытания системы каменный уголь – шахтные газы в аспекте секвестрации CO<sub>2</sub> в угольных пластах. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, № 7, с. 1–11, рис. 13, табл. 1, лит. 44.

**Акустическая эмиссия. Каменный уголь. Напряжения. Сорбция/десорбция газов. Секвестрация CO<sub>2</sub> в угольных пластах**

В статье представлено результаты лабораторных испытаний, которые иллюстрируют возможности использования явления акустической эмиссии (АЕ) как инструмента для дистанционного испытания взаимных воздействий угольной матрицы с молекулами газов. Эти испытания обладают тесной связью с двумя актуальными проблемами, а именно: с извлечением метана из угольных пластов как альтернативного источника энергии, а также с необходимостью ограничения эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу. Одной из технологий учитывающей актуальные экономические и экологические обусловленности является нагнетание CO<sub>2</sub> в нерабочие метаноносные угольные пласты с одновременной интенсификацией улавливания метана CO<sub>2</sub>-ЕСВМ). Ознакомление с взаимными воздействиями в системе каменный уголь – шахтные газы обладает ключевым значением для успеха этой технологии. Из проведенных, авторами, одновременных сейсмоакустических, сорбционных и дилатометрических испытаний на кусковых пробах каменного угля с известным петрографическим строением, получено ряд ценных информаций. Эксперименты проводили как в режиме единичного цикла сорбция – десорбция так и в нескольких происходящих один за другим циклах на свободных и принужденных пробах. Для описания АЕ индуцируемой в угле процессами сорбции/десорбции газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и их бинарные смеси) использовано традиционные параметры: акустическая активность, интенсивность освобожденной энергии. Важнейшие полученные результаты: характеристики сейсмоакустические и кинетики деформации показывают существенные различия в зависимости от типа угля и типа использованного поглощаемого вещества, зарегистрированная АЕ и объемные деформации во время очередных циклов сорбция/десорбция газов показывают на перестройку структуры исследуемого угля во время первого цикла, то есть в результате первого контакта угля с поглощаемым веществом, во время процесса сорбции CO<sub>2</sub> на пробах подвергнутых постоянному одноосевому напряжению наблюдали индуцирование в пробе сорбционного напряжения (т.н. self-stressing), а также редукцию АЕ и объемных деформаций соответственно на 80 % и 60 %, испытания взаимозависимости явлений АЕ и объемных деформаций угля в функции объема сорбируемого газа показывают на нелинейность этой зависимости, а кроме того на ее разный характер, зависящий от типа угля и типа использованного поглощаемого вещества (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>). Полученные новые информации о характере изменений объемных деформаций угля, а также наблюдаемое явление индуцирования сорбционного напряжения в угле как следствие сорбции CO<sub>2</sub> проходящей на угле подвергнутом внешним напряжениям, могут обладать существенным значением для CO<sub>2</sub> - ЕСВМ, как на этапе проектирования так и прогноза последствий инъекции CO<sub>2</sub>, с точки зрения продолжительного захоронения этого газа.

UKD 622.333: 622.1: 550.8: 550.3

**Пилецки З., Харба П., Адамчик А., Кравец К, Пилецка Э.:** Геофоны в инженерской сейсмике. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, No. 7, с. 12–21, рис. 10, табл. 1, лит. 21.

**Инженерская сейсмика. Классификация сейсмических датчиков. Сейсмометр. Геофон. Акселерометр. Трехкомпонентные датчики. Технические параметры геофонов. Импульсная характеристика. Демпфирование.**

В инженерской сейсмике датчики служат в качестве регистраторов механических колебаний геологической среды. В работе представлено их классификацию. К всеобщим принадлежат геофоны, которые применяем для геолого – инженерских, гидрогеологических, геотехнических испытаний и в горном деле. Правильный подбор их технических параметров значительно влияет на качество полученных данных и степень разрешения метода. Самыми важными параметрами, которые стоит принять по внимание являются: собственная частота, чувствительность, демпфирование, гармонические деформации и сопротивление катушки. Очень существенным является также способ прикрепления геофона к почве, так как он может значительным способом влиять на импульсную характеристику измерительной системы. Мировые производители геофонов предлагают широкий масштаб устройств с разными значениями технических параметров для самой лучшей аквизиции данных в конкретных сейсмических применениях. Дополнительно, современные трехкомпонентные геофоны могут регистрировать одновременно в трех направлениях, что облегчает идентификацию сейсмических волн и описание волнового поля. В статье возможно широко рассмотрено основные технические параметры геофонов выдающихся производителей в мире. Сформулировано критерии подбора геофонов для сейсмических испытаний.

UKD 622.333: 550.3: 622.167/168: 662.1/4

**Пилецки З., Харба П., Чарны Р., Целеста Ш., Пшонка Й.:** Источники колебаний в инженерской сейсмике. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, № 7, с. 22–31, рис. 12, табл. 2, лит. 24.

**Инженерская сейсмика. Сейсмический источник. Удар молотом. Свайный копер. Взрывчатые вещества. Спаркер. Вибратор.**

Источники колебаний предназначаются для освобождения сейсмической энергии в форме сейсмической волны, которая в дальнейшем регистрируется датчиками колебаний. В инженерских применениях пользуются активными и пассивными источниками. Среди активных источников наиболее распространенными являются использование молота, свайного копра, взрывчатых веществ и вибраторов. В зависимости от типа проектируемых сейсмических испытаний выбирается источник дающий ожидаемую глубинную область с соответствующим разрешением сейсмограммы. Взрывчатые вещества генерируют самую высокую сейсмическую энергию в широкой полосе частот среди представленных в статье сейсмических источников. Удар молотом является самым распространенным в инженерских применениях. Пассивными источниками в инженерской сейсмике являются в основном колебания вызванные проезжающими машинами, работой машин или человека. В статье шире описано некоторые активные сейсмические источники производимые мировыми производителями, которые могут применяться в инженерских испытаниях. Сравнено технические параметры избранных свайных копров и сейсмических вибраторов. Сформулировано критерии выбора надлежашего источника в сейсмических испытаниях.

UKD 622.333: 550.3: 001.891.54

**Полецки З., Харба П., Ляшак М., Адамчик А., Целеста Ш.:** Стримеры в инженерской сейсмике. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, № 7, с. 32–38, рис. 7, табл. 3, лит. 25.

**Сейсмический стример. Инженерская сейсмика. Коммуникационные маршруты. Классификация сейсмических стримеров.**

В статье представлено просмотр сейсмических стримеров используемых в испытаниях инженерской сейсмике. Они находят применение в основном в испытаниях грунтового основания коммуникационных маршрутов. Измерения такими устройствами можно также проводить в других исследовательских целях, но в местных условиях с плоским или слабо изменяющимся рельефом. Актуально сейсмические стримеры применяются в условиях, где длина и число измерительных профилей вынуждают многократную установку и сборку сейсмического оснащения. Авторы определяют понятие сейсмического стримера. Разработано классификации с точки зрения типов конструкции и способов закрепления датчиков в стримерах. Охарактеризовано и иллюстрировано принцип действия, а также описано актуальную стадию и направление развития технологии стримеров. Представлено возможные конфигурации сейсмических стримеров вместе с транспортными средствами –тягачами и сейсмическими источниками используемыми в измерениях. Представлено примеры сейсмических стримеров используемых в инженерской сейсмике вместе с их подробным описанием. Сравнено конструкции избранных сейсмических стримеров.

UKD 622.333: 550.3

**Матула Р., Чаа К.:** Применение инженерского вибратора в сейсмических испытаниях приповерхностной части геологической среды. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, № 7, с. 39–43, рис. 5, лит. 9.

**Сейсмические источники. Приповерхностная сейсмика. Сейсмические измерения на застроенной территории.**

Вызовом для неглубоких сейсмических техник является представление приповерхностной структуры на территориях с особенно большим тушением упругих волн. Основной проблемой связанной с этим являются ограничения применения ударного источника волны, энергия которого быстро поглощается грунтом вокруг пластовой плиты. Это явление особенно сильно влияет на качество зарегистрированных данных. Единственным решением является генерирование сейсмической волны длинное время и в определенном диапазоне частот. В статье представлено применение акустического вибратора, как сейсмического источника с соответствующей производительностью в случае испытания приповерхностной зоны с неоднородным строением. Представлено также экспериментальный подход к сейсмическим испытаниям на ограниченной застроенной городской поверхности.

UKD 622.363.1: 622.83/84: 622.556.3

**д'Обыри К., Куаж Я.:** Защита камеры Ferdinand d'Este как мероприятие ограничивающее опасность прорыва воды при северной границе месторождения соли. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, № 7, с. 44–50, рис. 13, лит. 11.

**Соляная шахта. Опасность прорыва воды. Опасность обрушения пород. Стабилизация горного массива. Защита камеры.**

В статье представлено способ защиты одной из камер в Соляной шахте «Величка». Камера Ferdinand d'Este находится в районе причисленном к III степени опасности прорыва воды, при северной границе месторождения. Шахта соли «Величка» ведет систематические работы ограничивающие опасность прорыва воды и обрушения пород особенно при северной границе месторождения, посредством защиты или ликвидации камер для стабилизации горного массива. В случае исторических камер, которые нельзя закрыть проводят геомеханический и гидрогеологический анализы и на их основании возникает проект защиты камеры. Защита камеры Ferdinand d'Este является примером планируемых работ охватывающих как анкерную крепь, поддерживающую крепь так и плотную ликвидацию, что представляет собой пример комплексного подхода к существующим гидрогеологическим – горным проблемам в исторической шахте соли.

UKD 622.363.1: 622.1: 550.8: 622.83/.84

**Хеймановски Р, Малиновска А, Д'обьри К.:** Кинематика конвергенции соляного горного массива и перемещений точек в районе ствола Кинга Соляной шахты «Величка» А.О. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 51÷55, рис. 4, табл. 1, лит. 9.

**Конвергенция выработок. Геодезические измерения. Деформации горного массива. Соляной горный массив.**

Измерения конвергенции применяются в горном массиве для испытания и локализации мест особенно опасных по напряжениям существующим в результате концентрации разработки в данном районе, либо особенных геологических свойств горного массива. Результаты таких измерений обладают ключевым значением для оценки геомеханических опасностей в глубинных шахтах. Они представляют собой также основу для строения и оценки параметров теоретических моделей. Анализ результатов измерений конвергенции по отношению к всему массиву нарушенных горных пород очень сложный и может быть нагружен значительными ошибками. Собрали также результаты доступных измерений конвергенции из нескольких соляных камер. В статье предпринято попытку проведения анализа вместе с оценкой движений высотных точек в шахтных выработках и отверстии шахтного ствола. Пространственный анализ содержащий совокупность результатов с горно – геологической ситуацией позволяет представлять более легкие и обремененные меньшей недоуверенностью итоги. Анализы такого типа позволяют локализовать связи причин – последствий между конвергенцией камер и перемещениями точек и одновременно локализовать опасные районы шахты. Внедрение географических информационных систем (GIS) позволило показать целесообразность анализов такого типа.

UKD 622.333: 622.83/.84: 622.167/.168

**Томецка-Сухонь С.:** Оценка опасности впадинами методом GPR 4D для нужд подготовки строительного основания на территориях оставленных после горных работ. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 56÷60, рис. 10, лит. 11.

**Метод GPR. Пустоты и зоны разрыхлений. Впадины. Неглубокие горные работы.**

В статье представлено результат георадарных испытаний проводимых в районе впадин горного происхождения в Тжебини – Серша. Время-пространственные георадарные испытания т.н. 4D позволили наблюдать за изменениями происходящими в горном массиве и позволили предвидеть появление впадин. На основании георадарных испытаний отмечено, что в анализируемом районе наблюдают непрерывные изменения деформации в горном массиве, последствием которых может быть появление разрывных деформаций в очередные годы. Показано необходимость проведения геофизических испытаний перед началом ремонтных работ, а также испытаний подтверждающих правильность проведенных работ по подготовке основания. Испытания проводимые работниками Горно-металлургической академии обладали характером научных испытаний, но оказалось, что у них большое утилитарное значение.

UKD 622.1: 550.8: 622.333.167/.168

**Сивек С.:** Локализация сбросовых зон кондуктометрическим методом на территории Верхнесилезского угольного бассейна (GZW). *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 61÷68, рис. 7, табл. 1, лит. 8.

**Прикладная геофизика. Кондуктометрия. Тектоника. Геофизическое изображение.**

Кондуктометрический метод (GCM) в форме многоярусного профилирования при изменяющейся установке диполя антенн является часто используемым геофизическим методом в локализации зон тектонических дислокаций. В настоящей работе представлено результаты испытаний проведенных в условиях преобразованного деятельностью человека горного массива на территориях северной части Верхнесилезского угольного бассейна. Их целью было обследование характеристики избранных зон тектонических

дислокаций в приповерхностном слое почвы. Работа содержит описание проведенных испытаний и анализ полученных результатов по отношению к геологу – горным данным.

UKD 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Пилецки З, Исаков З.:** Проект LOFRES – пассивная сейсмика LFS с использованием сейсмического шума. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 69÷73, рис. 6, лит. 23.

**Система LOFRES. Низкочастотная пассивная сейсмика. Сейсмическое микронзондирование. Сейсмическая интерферометрия. Сейсмический региональный шум. Локальный сейсмический шум. Степень разрешения. Глубинный радиус действия.**

В статье представлено методические положения системы LOFRES для измерения методом низкочастотной пассивной сейсмики. Эта система предназначена для испытания структуры и свойств приповерхностных слоев геологической среды с использованием сейсмического шума. Испытания проведено с помощью двух методов: микросейсмического зондирования и сейсмической интерферометрии. В статье представлено их методические основы, а также алгоритмы переработки и интерпретации сейсмических данных. Представлено также примеры результатов испытаний. В итогах показано достоинства и ограничения пассивной сейсмики. Подчеркнуто большое значение метода сейсмической интерферометрии в решении вопросов в геотехнике.

UKD 622.333: 550.3: 622.83/.84

**Марцак Х., Пилецки З., Исаков З., Чарны Р.:** Возможности использования сейсмической интерферометрии в горном деле. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 74÷83, рис. 12, лит. 25.

**Низкочастотная пассивная сейсмика. Сейсмическая интерферометрия. Региональный сейсмический шум. Локальный сейсмический шум. Горное дело. Толчки горного массива. Функция Грина.**

Метод сейсмической интерферометрии нашел применение в проблемах обследования геологического строения глубокого основания и в разведочной сейсмике для отражения структуры центра. Существует также возможность использования этого метода для горного дела. Во вступительной части представлено математические и физические основы метода сейсмической интерферометрии. Дальше описано возможности использования этого метода в решении геологу – горных проблем. Охарактеризовано типы сейсмических явлений, существующих на территориях отведенных под горные работы, возможных для использования в сейсмической интерферометрии. Описано примеры геологу – горных ситуаций, в которых метод сейсмической интерферометрии может поставлять ценную информацию.

UKD 622.333: 550.3: 622.333-047.36

**Чарны Р.:** Просмотр применения метода сейсмической интерферометрии. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 84÷91, рис. 13, лит. 33.

**Сейсмическая интерферометрия. Функция Грина. Поверхностные волны. Волна Рэля. Волны кода.**

В статье рассмотрены широкие возможности применения сейсмической интерферометрии. Метод является сравнительно новым, принимая во внимание первые эксперименты проведенные в 2001 году и актуально находится в фазе динамического развития. В работе описано его применение в многих вопросах связанных с отражением строения недр Земли и приповерхностных слоев, а также геотехнических вопросов напр. из мониторинга активных оползней. Представленные примеры испытаний опубликовано в известных научных журналах.

UKD 622.333: 550.3: 622.333.167/.168

**Исаков З., Пилецки З., Серодзки П.:** Современная система LOFRES низкочастотной пассивной сейсмики. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 92÷96, рис. 6, табл. 1, лит. 9.

**Система LOFRES. Низкочастотная пассивная сейсмика. Сейсмическое микронзондирование. Сейсмическая интерферометрия. Сейсмический шум. Сейсмометр.**

В статье представлено систему LOFRES предназначенную для испытаний методом низкочастотной пассивной сейсмики приповерхностных геологических слоев с использованием сейсмического шума. Охарактеризовано измерительные системы применяемые в польских шахтах пригодные для измерений пассивной сейсмики. Описано строение и действие системы LOFRES. Представлено технические параметры и тесты примененных сейсмометров. Подчеркнуто положительные результаты тестов модельной системы. Описано предвидимые способы использования системы.

UKD 622.333: 622.25-347.736/739

**Кортас JL:** Модельный анализ микрогравиметрических эффектов зарегистрированных над закрытыми шахтными стволами. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 97÷105, рис. 8, табл. 3, лит. 12.

**Стволы. Гравиметрия. Измерения. Гравиметрическое моделирование.**

Статья является продолжением и развитием испытаний автора проводимых в годы 2008-2012 (Kortas, 2008, 2012). Публикация содержит интерпретацию гравиметрических аномалий в районе закрытых шахтных стволов с использованием моделирования и обратного анализа. Для проведения испытаний выбрали закрытый ствол «Всходни» и «Владыслав». Анализ зарегистрированных измерений аномалий заключался в проведении модельных испытаний способом направленным на то, чтобы найти самые лучшие согласования гравитационного модельного эффекта с результатами измерений. Согласование для ствола «Всходни» оказалось менее удовлетворительным, в основном по поводу неудачного выбора измерительного полигона. Результаты моделирования для ствола «Владыслав» были близки данным из измерений. Это показывает пригодность представленного в статье метода для интерпретации гравиметрических данных. В конечной части работы приводятся вытекающие из этой работы практические рекомендации при поиске пустоты после ствола гравиметрическим методом.

UKD 622: 622.351.85: 622.83/84

**Липски З., Мрозек Д.:** Проблемы анализа послешахтного исторического объекта на влияние горных толчков на примере пейзажной башни. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 106÷111, рис. 3, табл. 6, лит. 6.

**Исторический объект. Каменная башня. Горные толчки.**

В статье представлено избранные проблемы связанные с приспособлением исторического объекта к новым нагрузкам, не существовавшим раньше. Анализ подвергнуто каменную пейзажную башню с учетом разных нагрузок, в том динамических от толчков индуцируемых текущей разработкой угольных месторождений. Актуальная форма является результатом двухкратного изменения предназначения объекта связанного с генеральной перестройкой. Представлено способы оценки безопасности объекта в условиях динамических воздействий и ограниченного доступа к техническим информации, а также последствия выбора разных методов анализа объекта.

UKD 622.333: 622.4: 622.81/82

**MarkefkaP., Przystolik A., Stefanowicz T.:** Концепция формирования распределения аэродинамического потенциала в подземных каменноугольных шахтах для противодействия пожарной и газовой опасностям связанным с изменением атмосферного давления. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 112÷124, рис. 6, лит. 16.

**Главное проветривание. Изменения атмосферного давления. Противодействие пожарным и газовым опасностям со стороны выработанного пространства**

В польских каменноугольных шахтах наблюдается рост пожарных и газовых опасностей со стороны выработанного пространства вызванных изменениями атмосферного давления, то есть опасностей связанных с явлением т.н. дыхания выработанного пространства. Это в основном вследствие локализации подготовительных и очистных горных работ проводимых по необходимости все чаще в соседстве больших выработанных пространств. Применяемые до сих пор способы и средства для противодействия нежелательным опасностям последствиям не полностью достаточны и рациональны. Это требует поиска и применения более эффективных профилактических решений в этой области. В статье представлено много дополнительных практических возможностей устранения или облегчения влияния изменений атмосферного давления на выработанные пространства, через проведение соответствующих изменений в распределении аэродинамического потенциала вокруг данного пространства. Такие рациональные действия – концепция формирования распределения аэродинамического потенциала для противодействия пожарной и газовой опасностям связанным в «дыханием выработанного пространства» – были проведены с положительным результатом в нескольких шахтах КУХ А.О. По поводу нарастания аэрологических опасностей связанных с изменениями атмосферного давления, целевым кажется стремление к более широкому применению этой концепции в польских каменноугольных шахтах.

UKD 622.333: 622.8: 622.331.103: 622.331.45

**Врублевски П.:** Техничко – организационные аспекты дегазации добычной лавы, влияющие на безопасность ее подвигания. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 125÷130, рис. 5, лит. 6.

**Дегазация. Опасность по метану. Безопасность и организация труда.**

В статье представлено технико – организационную проблематику во время проведения дегазации разрабатываемых угольных пластов при применении трех способов дегазации для лав проводимых обратным ходом в системе проветривания „U”. Описано технико – организационные аспекты, а также

касающиеся безопасности проведения работ в контексте таких факторов как: столкновение работ связанных с дегазацией и проведением добычной лавы, эффективность дегазации и влияние человеческого фактора. Представлено пользы и проблемы связанные с применением данной технологии дегазации. На основании проведенного анализа показано, что проведение лавы вместе с примененной технологией дегазации должно представлять собой однородную организационную систему, а также определено самый полезный метод дегазации.

UKD 622.323: 622.550.87: 553.98(438)

**Дубель С., Жичняк М.:** Анализ результатов тестов DST на месторождении нефтяного газа Ляховице – Стрышава в Западных Карпатах. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 131÷138, рис. 3, табл. 2, лит. 12.

**Нефтяные поиски. Западные Карпаты. Месторождение нефтяного газа Ляховице – Стрышава. Пробоотборники типа Ful-Flo. Результаты тестов DST**

В публикации представлено технику и технологию тестов DST месторождения нефтяного газа Ляховице – Стрышава пробоотборником производства фирмы Halliburton типа Ful-Flo. Приведено техническую характеристику этого пробоотборника, а также принципы комплектования его набора в зависимости от планируемых технологических решений опробования и существующих условий месторождения. Проанализировано применяемые в нефтяной промышленности технологические решения, а также результаты тестов DST газоносных отложений девона на месторождении Ляховице – Стрышава в районе Западных Карпат. Результаты этих тестов разъяснено методом Горнера, а также современным методом log-log. Составлено в таблицах и подробно описано результаты интерпретации, а также результаты расчетов параметров меторождения всех проведенных успешно технических тестов DST отложений девона отличающихся технологией, с особым учетом пригодности полученных информации в процессе поисков месторождений углеводородов и оценки их производительности.

UKD 622.32: 620.193-034: 622.32.167/168-048.24

**Бембен Д., Кусь Я., Глиньски А., Козьбял Ю.:** Оценка эффективности химической защиты металлов от коррозии в избранных шахтах нефтяного газа. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 139÷149, рис. 12, табл. 9, лит. 5.

**Коррозия металлов. Химическая защита от коррозии. Лабораторные и шахтные тесты.**

В статье описано работы по обслуживанию – эксплуатации шахтных газопроводов, для обеспечения химической защиты от коррозии посредством испытания химических средств (также бифункциональных ингибиторов коррозии и гидратов) в лаборатории, а дальше их тестов в шахтах. Проведено лабораторные испытания для того, чтобы выбрать ингибитор, гарантирующий защиту от коррозии и гидратов во время разработки газовых скважин. Дальше проверено их в шахтах. Пробы проведенные в шахтах позволили выделить ингибитор, который не вызывал эксплуатационных затруднений, а также хорошо защищал металл от коррозии. Некоторые исследуемые ингибиторы вызывали затруднения в эксплуатации напр. не ограничивали в предполагаемой степени развития коррозии (предполагаемая защита от коррозии 50µm/год, достигнутая во время тестов 227 µm/год.) вызывали возникновение отложений, которые повредили дозирующий насос.

UKD 622.332: 622.502.17: 622.332-049.7

**Фагевич К., Шульц М.:** Влияние разработки бурого угля на пространственную структуру и функционирование пейзажных систем (на примере карьера Владыславув). *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 150÷157, рис. 6, табл. 2, лит. 13.

**Разработка бурого угля. Послегорные территории. Рекультивация. Изменения пейзажа.**

В статье представлено изменения пространственной структуры и функционирования пейзажной системы горной территории Владыславув связанные с очередными этапами разработки бурого угля открытым способом. Анализ подвергнуто поверхностное геологическое строение, рельеф местности, а также ее покрытие (крылья пахотной земли, лесов, лугов, естественных и антропогенических водных резервуаров, антропогенических территорий), а изменения этих компонентов охарактеризовано в количественном и качественном подходах. Функционирование пейзажа определено на основании анализа размеров и интенсивности основных материально – энергетических струй в горной геосистеме (электрическая энергия, бурый уголь, вскрышные породы, воды).

UKD 622.333: 622.33-027.332.662.6

**Грухот А.:** Использование композитов из угольных отходов и летучих зол для строения противопаводковых дамб. *Przeгляд Górnicy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 158÷164, рис. 6, табл. 3, лит. 19.

**Угольные отходы. Летучие золы. Композиты. Коэффициент фильтрации.**

В работе представлено результаты испытаний водопроницаемости непережженных угольных отходов происходящих из отвала Каменноугольной шахты «Рыдултовы – Анна», летучих зол из люка из электрофильтров Электростанции «Скавина», а также их композитов при 10, 20 и 30% добавки зол по отношению к сухой массе угольных отходов. Опираясь на полученные результаты испытаний проведено вычисления фильтрации воды через обвалование выполненное из композитов антропогенических грунтов высотой 6,0 м без дренажа и уплотнения. Область расчетов охватывала определение интенсивности течения корпусом насыпи, время определения просачивания и время, после которого стабилизируется фильтрационное течение. Отмечено значительное ограничение водопроницаемости композитов угольных отходов с летучими золами по отношению к угольным отходам. Коэффициент фильтрации композитов понизился получая значение близкое коэффициенту фильтрации связанных минеральных грунтов. Проведенные фильтрационные расчеты подтверждают целесообразность применения летучих зол как компонента композитов антропогенических грунтов применяемых в гидротехническом строительстве. Самое короткое время просачивания воды обвалованием, а также его определение отмечено для обвалования из угольных отходов. Повышение добавки золы вызвало понижение интенсивности течения на 5 рядов величин по отношению к угольным отходам.

UKD 622.271: 622.36: 622.556.3

**Кропка Я., Врубель Я.:** Притоки вод в открытую горную выработку песка Мачки – Бур. *Przeegląd Górniczy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 165÷172, рис. 3, табл. 2, лит. 14.

**Закладочные пески. Карьер Мачки – Бур. Притоки воды.**

Песчаный карьер Мачки – Бур размещается на нижнем отрезке ископаемой долины Бялей Пжемши. Карьер находится в «упадочнической» фазе разработки полезного ископаемого. Горные работы окончат в годы 2015-2016. Одновременно с разработкой горный завод ведет техническую рекультивацию выработок оставшихся после разработки песка. Актуальные прогнозы полагают, что около 2029/2030 года район сегодняшних выработок будет заполнен горными отходами до горизонта около +255,0 м, т.е. отметки окружающей территории. С второй половины 90-тых годов XX века основную роль в обезвоживании горной выработки Мачки – Бур выполняет Основной канал Всхуд III. Средний приток воды в выработки песчаного карьера в годы 1987-2012 составил 28,4 м<sup>3</sup>/мин. В работе представлено отношения между пятью периодами дифференцированных атмосферных осадков и размерами притока воды в выработки. Изменения в системе обезвоживания выработки в последние 4 годы определяют очередные даты: июнь 2010 г. – ликвидация Основного канала Захуд III и Подоткосной канавы 4/1; май 2013 г. – передвижение воды текущей нижним отрезком Основного канала Всхуд III в трубопровод диаметром 800 мм, а также июль 2013 г. – начало ликвидации упомянутого отрезка канала.

UKD 622.333: 662.7: 622.661.7

**Куклис И., Скавиньска А., Мицек Б.:** Избранные методы определения содержания фосфора в коксовых углях. *Przeegląd Górniczy* 2014, Т. 70, №. 7, с. 173÷178, рис. 3, табл. 4, лит. 22.

**Фосфор. Коксовый уголь. ICP-OES.**

Содержание фосфора в угле является очень важным параметром качества углей применяемых в качестве компонентов шихтовых смесей при производстве кокса. Фосфор является нежелательным компонентом особенно коксовых углей, так как во время коксования 98% фосфора переходит в кокс, а дальше в доменном процессе в сталь вызывая ее ломкость. В связи с тем единственной возможностью понижения объема фосфора в шихтовых смесях является подбор компонентов с низким содержанием этого элемента. Существует много аналитических методов используемых для анализа содержания фосфора в твердых топливах. В работе предпринята попытка сравнения титриметрического метода с методом эмиссионной спектрометрии. На основании полученных результатов разработано характеристику обоих исследовательских методов, охватывающую такие статистические параметры как повторяемость и воспроизводимость метода, границы определяемости, расширенные недостоверности результата измерения, а также коэффициент изменчивости для титриметрического и спектрометрического методов. Для определения точности методов, сравнено полученные результаты анализов со значениями подвергнутыми процессу сертификации.

# Prenumerata na 2014 rok

Cena jednego egzemplarza pojedynczego 25 zł + 5% VAT  
Prenumerata całoroczna 300 zł + 5% VAT

..... dnia .....

Zamawiający .....

.....

Dokładny adres .....

.....

Nr NIP .....

Redakcja miesięcznika  
„Przegląd Górniczy”  
ul. Powstańców 25  
40-952 Katowice

## Zamówienie

na prenumeratę ..... (liczba egzemplarzy) miesięcznika „Przegląd Górniczy”  
na 2014 rok

Kwotę ..... zł .....

(słownie) .....

wpłacono na konto: ING Bank Śląski o/Katowice 63 1050 1214 1000 0007 0005 6898

Załączamy kopię dowodu wpłaty.

Oświadczamy, że jesteśmy płatnikami podatku VAT i upoważniamy Was do wystawienia faktur VAT bez podpisu osoby uprawnionej z naszej strony.

Zamówione egzemplarze miesięcznika proszę przesłać na adres:

.....

.....

.....

Imię i nazwisko oraz telefon osoby kontaktowej .....

Pieczętka i podpis

## Nr 7/2014

dr hab. inż. Zofia Majewska, prof. AGH dr hab. inż. Stanisław Majewski, prof. AGH dr inż. Jerzy Ziętek	„Zastosowanie zjawiska emisji akustycznej do badania układu węgiel kamienny-gazy kopalniane w aspekcie sekwestracji CO <sub>2</sub> w pokładach węgla”	1
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN mgr inż. Paulina Harba inż. Andrzej Adamczyk mgr inż. Krzysztof Krawiec dr hab. inż. Elżbieta Pilecka, prof. PK	„Geofony w sejsmice inżynierskiej”	12
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN mgr inż. Paulina Harba mgr inż. Rafał Czarny inż. Szymon Cielesta mgr Joanna Pszonka	„Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej”	22
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN mgr inż. Paulina Harba inż. Mateusz Laszczak inż. Andrzej Adamczyk inż. Szymon Cielesta	„Strimery w sejsmice inżynierskiej”	32
mgr inż. Rafał Matuła mgr inż. Klaudia Czaja	„Implementation and application of ultralight vibrator in shallow seismic acquisition”	39
dr hab. inż. Kajetan d'Obyrn mgr inż. Jan Kucharz	„Zabezpieczenie komory Ferdinand d'Este jako działanie ograniczające zagrożenie wodne przy północnej granicy wielickiego złoża soli”	44
dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski, prof. AGH dr inż. Agnieszka Malinowska dr hab. inż. Kajetan d'Obyrn	„Kinematyka konwergencji górotworu solnego oraz przemieszczeń punktów w rejonie szybu Kinga KS "Wieliczka" S.A.”	51
dr hab. inż. Sylwia Tomecka-Suchoń	„Ocena zagrożenia zapadliskami metodą GPR 4D dla potrzeb uzdatnienia podłoża budowlanego na terenach pogórnich”	56
mgr inż. Sławomir Siwek	„Lokalizacja stref uskokowych metodą konduktometryczną na terenie GZW”	61
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. nadzw. IGSMiE PAN dr inż. Zbigniew Isakow, prof. nadzw. Instytutu EMAG	„Projekt LOFRES - sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego”	69
prof. dr hab. inż. Henryk Marczak dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. nadzw. IGSMiE PAN dr inż. Zbigniew Isakow, prof. nadzw. Instytutu EMAG mgr inż. Rafał Czarny	„Możliwości wykorzystania interferometrii sejsmicznej w górnictwie”	74

mgr inż. Rafał Czarny	„Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej”	84
dr inż. Zbigniew Isakow, prof. nadzw. Instytutu EMAG dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. nadzw. IGSMiE PAN mgr inż. Przemysław Sierodzki	„Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej”	92
dr inż. Łukasz Kortas	„Analiza modelowa efektów mikrograwimetrycznych zarejestrowanych nad zlikwidowanymi szybami górnictwami”	97
dr inż. Zbigniew Lipski dr inż. Dawid Mrozek	„Problemy analizy pokopalnianego obiektu zabytkowego na wpływ wstrząsów górniczych na przykładzie wieży widokowej”	106
dr inż. Piotr Markefka mgr inż. Arnold Przystolik mgr inż. Tadeusz Stefanowicz	„Koncepcja kształtowania rozkładu potencjału aerodynamicznego w podziemnych kopalniach węgla kamiennego dla przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym i gazowym związanym ze zmianami ciśnienia atmosferycznego”	112
mgr inż. Paweł Wróblewski	„Techniczno-organizacyjne aspekty odmetanowania ściany eksploatacyjnej, wpływające na bezpieczeństwo jej ruchu”	125
prof. dr hab. inż. Stanisław Dubiel dr inż. Mirosław Rzyczniak	„Analiza rezultatów testów DST na złożu gazu ziemnego Lachowice-Stryżawa w Karpatach Zachodnich”	131
dr inż. Dariusz Bęben mgr inż. Janusz Kuś mgr inż. Arkadiusz Gliński mgr inż. Józef Koźbiał	„Ocena skuteczności ochrony chemicznej metali przed korozją w wybranych kopalniach gazu ziemnego”	139
dr Katarzyna Fagiewicz mgr Monika Szulc	„Wpływ eksploatacji węgla brunatnego na strukturę przestrzenną i funkcjonowanie systemów krajobrazowych (na przykładzie odkrywki Władysławów)”	150
dr inż. Andrzej Gruchot	„Wykorzystanie kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego do budowy wałów przeciwpowodziowych”	158
dr Janusz Kropka mgr Jacek Wróbel	„Dopływy wody do odkrywkowego wyrobiska piasku Maczki-Bór”	165
mgr inż. Iga Kuklis mgr Agnieszka Skawińska Beata Micek	„Wybrane metody oznaczania fosforu w węglach koksowych”	173