

333 DISSERTATIONS
MONOGRAPHS

JUSTYNA SWOLKIEN

The flow of gases in the goaf of caved longwalls
and the assessment of the impact of changes
in barometric pressure
on the emission of gases to the excavations



ROZPRAWY
MONOGRAFIE **333**

JUSTYNA SWOLKIEN

Przepływ gazów w zrobach ścian zawałowych
i ocena wpływu zmian ciśnienia barometrycznego
na wydzielanie gazów do wyrobisk



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2018

Monografia wydawnictw naukowych
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Naczelny Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:

Andrzej Pach (przewodniczący)

Jan Chlopek

Barbara Gąciarz

Bogdan Sapiński

Stanisław Stryczek

Tadeusz Telejko

Recenzenci:

dr hab. inż. Marian Branny, prof. nadzw. AGH

dr hab. inż. Krzysztof Cybulski, prof. nadzw. GIG

Afiliacja autorki:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Adiustacja: *Marcin Grabski*

Opieka redakcyjna: *Magdalena Grzech*

Skład komputerowy: Wydawnictwo JAK, www.wydawnictwojak.pl

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2018

ISSN 0867-6631

ISBN 978-83-66016-18-7

Wydawnictwa AGH

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

<http://www.wydawnictwo.agh.edu.pl>

Spis treści

Streszczenie.....	7
Summary.....	9
1. Wprowadzenie.....	11
1.1. Wstęp.....	11
1.2. Cel i zakres pracy.....	14
2. Dotychczasowe badania nad przepływem powietrza oraz rozkładem stężeń gazów w zrobach ścian zawałowych.....	15
3. Numeryczne wyznaczenie pola prędkości mieszaniny gazowej oraz pól stężeń składników tej mieszaniny w przestrzeni zrobów w kopalni węgla kamiennego.....	18
3.1. Wstęp.....	18
3.2. Porowatość i przepuszczalność obszaru zrobów.....	20
3.3. Numeryczne wyznaczenie pola prędkości i stężenia składników mieszaniny gazów w zrobach.....	24
3.4. Podstawy teoretyczne zagadnienia oraz ogólne sformułowanie modelu matematycznego.....	26
3.5. Szczegółowe rozpisanie równań modelu matematycznego.....	34
3.6. Opis stosowanej metody numerycznej.....	37
3.7. Wyznaczanie dyskretnych pól ciśnienia i stężeń składników mieszaniny gazowej.....	37
3.8. Określanie wartości stałych dobieralnych dotyczących przepływu powietrza wzdłuż chodnika.....	42
3.9. Przykład obliczeniowy.....	44
3.10. Podsumowanie.....	48
4. Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu do wyrobisk.....	49
4.1. Kształtowanie się stężenia gazów w zrobach ścian zawałowych – analiza problematyki w literaturze.....	49
4.2. Zależność wydzielania metanu do wyrobisk od zmian ciśnienia barometrycznego.....	51
4.3. Ocena wpływu ciśnienia barometrycznego i wydobycia na wydzielanie metanu w ścianach z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U”.....	53

4.3.1. Ściana D-2 w pokładzie 412łg+1d i 412łg KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”	53
4.3.2. Ściana D-2 w pokładzie 410 KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”	72
4.3.3. Ściana F-3 w pokładzie 406/1 KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”	97
4.4. Ocena wpływu ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu w ścianach z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U” z nadległym chodnikiem drenażowym	115
4.4.1. Charakterystyka ściany B-11 w pokładzie 348 KWK „Krupiński”	115
4.5. Ocena wyników badania wpływu ciśnienia barometrycznego i wydobywania na emisję metanu do ścian eksploatacyjnych.....	141
5. Wpływ wydzielania metanu z szybów wentylacyjnych kopalń węgla kamiennego na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego.....	145
5.1. Wstęp	145
5.2. Źródła emisji metanu z kopalń węgla kamiennego.....	147
5.3. Źródła ujmowania metanu	151
5.4. Stan emisji metanu z kopalń węgla kamiennego	154
5.5. Emisja metanu z szybów wentylacyjnych kopalni zespolonej KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”	155
6. Podsumowanie.....	161
Bibliografia	167

JUSTYNA SWOLKIEN

Przepływ gazów w zrobach ścian zawałowych i ocena wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie gazów do wyrobisk

Streszczenie

W monografii skupiono się na poznaniu procesów zachodzących w zrobach ścian zawałowych. Przedstawiono w niej opracowanie modelu matematycznego filtracji powietrza oraz rozkładu stężenia gazów (metanu, azotu i tlenu) w zrobach ścian zawałowych, kierując się kryterium najczęściej stosowanych systemów przewietrzania ścian: na „U” od granic i na „Y”. Opisano symulację transportu substancji wewnątrz porowatej struktury powstałej po wyeksploatowaniu pokładu węgla systemem ścianowym w kopalni podziemnej. Wewnątrz zrobów, w przestrzeni porowatej, występują nieuniknione złożone procesy utleniania węgla, następuje także wypływ metanu z warstw nasyconych metanem. Szybkość filtracji metanu, a co zatem idzie – średnia wydajność jego źródeł w przestrzeni zawału, może być w przybliżeniu określona na podstawie wyników odpowiednich pomiarów kontrolnych dokonywanych w trakcie eksploatacji pokładu węgla. W obliczeniach uwzględniono dodatkowo lokalną emisję azotu o zadanym wydatku, doprowadzonego rurociągiem do wnętrza zawału wzdłuż dłuższego brzegu obszaru. W wyniku symulacji uzyskano – występujące w przestrzeni zawału – dyskretne dwuwymiarowe (2D) pola fizyczne: przyrostu ciśnienia, prędkości porzornej mieszaniny składników gazowych, koncentracji molowej azotu, koncentracji metanu CH_4 , koncentracji tlenu O_2 . Opracowany program komputerowy umożliwił określenie wyżej wymienionych pól w dwóch wariantach różniących się warunkami brzegowymi. Wyniki obliczeń pozwalają na ocenę wybuchowości mieszaniny metanu w zrobach oraz rozkładu zawartości tlenu przyczyniającego się do procesów utleniania pozostawionych w zrobach resztek węgla. To z kolei stanowi istotną wiedzę ze względu na przygotowanie i wdrożenie odpowiedniej profilaktyki.

W monografii przedstawiono również badania, oparte na pomiarach kopalnianych, pozwalające dokonać oceny wpływu zmian ciśnienia na stan zagrożenia wyrobisk spowodowanego wzrostem stężenia metanu w powietrzu kopalnianym. Określono ponadto wpływ wielkości wydobycia na emisję metanu do wyrobisk górniczych. Zbadano cztery ściany przewietrzane systemem na „U”, ale przy zastosowaniu różnych rodzajów odmetanowania. Dokonano analizy statystycznej, na podstawie której wyznaczono wartości podstawowych estymatorów charakteryzujących model probabilistyczny wielkości stężenia metanu, ciśnienia, które mierzono na wylotach z analizowanych ścian, a także wydobycia. Następnie oszacowano ilościowo wpływ czynników, które mogą być połączone zależnością statystyczną zwaną korelacją lub zależnością funkcyjną.

Obszerna analiza danych i złożony charakter zjawisk zachodzących w trakcie eksploatacji miały na celu wykazanie jednoznacznych powiązań między zmianami ciśnienia barometrycznego a stężeniem metanu. Analiza przedstawionych badań pokazała, że tak zwane wyżki lub niżki baryczne nie wpływają na zmiany emisji metanu do wyrobisk ścianowych. Na korelację między badanymi parametrami żadnego wpływu nie miał również przyjęty sposób odmetanowania ściany, a zmiany stężenia metanu były w większym stopniu wywołane zmiennością wydobywania prowadzonego w poszczególnych ścianach.

Aby w pełni zobrazować złożoność prezentowanych zagadnień, monografię uzupełniono o aspekt środowiskowy. Przedstawiono nie tylko procesy mogące zachodzić w zrobach, między innymi rozkład stężenia metanu czy wpływ, który wywierają różne czynniki na jego emisję, ale także szkodliwe dla powietrza atmosferycznego działania związane z odprowadzaniem metanu z szybów wentylacyjnych kopalń. Ponieważ metan jest gazem cieplarnianym o zdolności do pochłaniania promieniowania podczerwonego dwudziestopięciokrotnie większej niż dwutlenek węgla, stanowi poważne zagrożenie w warunkach postępujących zmian klimatycznych. Jednocześnie – występując w pokładach węgla – wpływa niekorzystnie na stan bezpieczeństwa w podziemnych zakładach górniczych. Istotne ze względu na ochronę atmosfery oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracy w podziemnych zakładach górniczych jest ograniczenie jego emisji. W niniejszym opracowaniu skupiono się więc na analizie wydzielania metanu do powietrza wentylacyjnego, a następnie usuwania powstałej mieszaniny do atmosfery. Przeanalizowano zmiany stężeń w szybach wentylacyjnych wybranych kopalń w okresie dwudziestu miesięcy, określono ilość odprowadzanego przez nie metanu i powiązano te informacje z wysokością opłat za emisje.

JUSTYNA SWOLKIEN

The flow of gases in the goaf of caved longwalls and the assessment of the impact of changes in barometric pressure on the emission of gases to the excavations

Summary

The aim of the monograph is to study the processes occurring in the goafs of caved longwalls. The author presents a mathematical model of air filtration and of the distribution of gas concentration (nitrogen, oxygen and methane) in the goafs of caved longwalls, applying the criterion of the most frequently implemented longwall ventilation systems, such as a U-shaped ventilation system from the boundaries and a Y-shaped ventilation system. Also, she describes a simulation of the movement of substance within a porous structure left by the complete extraction of a coal seam through longwall mining in an underground mine. Inside the goaf, in a porous space, the inevitable complex processes of carbon oxidation occur and methane is released from the layers permeated with methane. The rate of methane filtration, and therefore the average capacity of its sources in the caving space, can be approximately calculated based on the prescribed control measurements conducted during the extraction of the seam. In addition, the calculations take into account the local nitrogen emission with a given volume flow rate, supplied via a pipeline to the inside of the caving along the longer edge of the area. The simulation yields two-dimensional discrete (2D) physical fields present in the space of the caving, such as the pressure increase field, the field of the apparent velocity of the mixture of the components, the field of the molar concentration of nitrogen N_2 , methane concentration field CH_4 , oxygen concentration field O_2 . The created computer programmes enable the determination of the above-mentioned fields in two variants with different boundary conditions. The calculated results make it possible to predict the explosiveness of the gas mixture in the goaf containing methane and the distribution of oxygen content causing the oxidation of the remnants of coal in the goaf. This in turn provides knowledge necessary to prepare and implement adequate preventive measures.

Furthermore, the monograph presents research based on measurements conducted in underground mines, making it possible to assess the influence of pressure changes on the level of methane hazard caused by an increase in methane release into mine air. Also, the influence of coal output on the amount of methane released into excavations has been identified. The analysis focused on four longwalls where a U-shaped ventilation system is implemented, in each case combined with a different methane drainage system. As a result of a statistical analysis, values of fundamental estimators have been determined; these estimators have contributed to a probabilistic model of methane concentration, pressure measured at the outlets of longwalls under analysis, and coal output. In the next step, a quantitative estimation was

conducted of factors that can be combined in a statistical relationship, defined as a correlation or a functional relationship.

A comprehensive analysis of data, given the complex nature of processes occurring during extraction, was intended to identify obvious relationships between changes in barometric pressure and methane concentration. However, the study of data has revealed that fluctuations of barometric pressure have no impact on methane release into excavations. Neither was the correlation between the parameters under analysis affected by the type of implemented methane drainage system, and changes in methane concentration were to a greater extent caused by the fluctuations of output in longwalls.

In order to fully demonstrate the complexity of the subject matter, the monograph has been complemented with a discussion of environmental aspects. Not only processes occurring in goafs are presented, such as distribution of methane concentration, and various factors affecting methane emissions, but also the damage to the environment caused by methane released into the atmosphere via ventilation shafts of mines. Considering the fact that methane is a greenhouse gas with a capacity to absorb infrared radiation 25 greater than carbon dioxide, its release into the atmosphere is a serious threat in the context of climate change. At the same time, the presence of methane in coal seams has a negative influence on the level of work safety in underground mining plants. Therefore, reducing methane emissions is vital not only for atmosphere protection, but also for securing work safety. The present monograph focuses on the process of methane release into ventilation air and on the procedures for removing the resulting gas mixture into the atmosphere. Changes in methane concentration in the ventilation shafts of selected mines were analyzed over a period of 20 months, the released amounts have been determined and then analysed with respect to emission penalties.

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

W przypadku polskiego górnictwa podziemnego mamy do czynienia z trudnymi warunkami geologiczno-górnictwymi i występowaniem właściwie wszystkich zagrożeń naturalnych znanych w górnictwie światowym. Wśród nich istotną rolę odgrywają zagrożenia aerologiczne: pożarowe, metanowe, wybuchem pyłu węglowego, wyrzutami gazów i skał, klimatyczne. Wpływają one bezpośrednio na bezpieczeństwo prowadzonych robót.

W większości polskich kopalń eksploatacja prowadzona jest na zawał, a eksploatowane pokłady charakteryzują się dużym zagrożeniem pożarowym. Intensywność przewietrzania zrobów ścian zawałowych stanowi główny czynnik decydujący o wielkości zagrożenia pożarowego w zrobach (Knothe 1984; Krawczyk 2007; 2009; J. Szlązak 2010). Przy małej intensywności przewietrzania zroby wypełniają się gazami obojętnymi, wpływającymi hamująco na proces samozagrzewania węgla. Z kolei bardzo duża intensywność przewietrzania powoduje odprowadzenie ciepła – powstającego na skutek procesów utleniania zachodzących w zrobach – i w ten sposób również wpływa hamująco na proces samozagrzewania węgla (Cygankiewicz 2015; J. Szlązak, N. Szlązak 1987a; 1987b; 1990; 2001; Wasilewski, Branny 2008). Najbardziej niekorzystny jest przedział, w którym przy dostatecznym dopływie tlenu brak jest skutecznego wychładzania zrobów. Akumulacja ciepła w zrobach przyspiesza proces zapłonu węgla.

W obrębie wyeksploatowanego pokładu z zawałem stropu na skutek przemieszczania się skał powstaje strefa zawału, w której w polach metanowych gromadzi się metan. Wydziela się on z węgla pozostawionego w przestrzeni zawałowej, przede wszystkim jednak dopływa z sąsiednich pokładów metanowych przez powstałe w górotworze szczeliny i spękania (N. Szlązak i in. 2015). Intensywność wydzielania się metanu do zrobów jest różna i zależy od wielu czynników, między innymi od metanonośności złoża. Zroby tworzą pewnego rodzaju „zbiornik”, w którym następuje mieszanie się powietrza z metanem oraz gromadzenie się gazu. Skład gazów w zrobach jest zmienny w różnych miejscach zrobów i zależy między innymi od systemu przewietrzania oraz intensywności wydzielania się metanu ze złoża.

W zrobach występują przestrzenie wypełnione mieszaninami metanowo-powietrznymi o składzie:

- niewybuchowym z powodu nadmiaru tlenu lub gazu inertnego,
- wybuchowym,
- niewybuchowym z powodu nadmiaru metanu.

Jeśli w wyrobiskach i w strefie zawału istnieją źródła inicjacji, może nastąpić zapłon metanu, który w sprzyjających okolicznościach spowoduje wybuch pyłu węglowego. W praktyce górniczej znane są przypadki zapłonu metanu w przestrzeni zrobów, a także zapalenia metanu wypchniętego ze zrobów do wyrobisk przyścianowych (Singh, Ray 2009; Cybulski 2005).

Rozkład metanu w zrobach nie zmienia się istotnie przy stałym dopływie metanu z górotworu i niezmiennym sposobie przewietrzania, ale ulega wolnym zmianom w czasie eksploatacji. Gwałtownym zmianom może jednak podlegać w przypadku wystąpienia zaburzeń wywołanych:

- zmianami pola potencjału aerodynamicznego,
- zawałem skał stropowych, wskutek czego mogą nastąpić gwałtowne wypchnięcia metanu,
- wzrostem metanonośności złoża.

Występowanie wybuchów w zrobach ścian zawałowych stanowi w ostatnich latach najpoważniejsze zagrożenie gazowe. Jest ono przyczyną katastrof górniczych, co potwierdzają prowadzone niedawno statystyki (WUG 2017). W praktyce uznaje się, że inicjałem zapłonu czy wybuchu w przestrzeni zrobów mogą być ogniska samozagrzewania lub rabujące się iskrzące zwięzłe skały stropowe tworzące gruzowisko (N. Szlązak 2013a; 2013b; N. Szlązak i in. 2013c; N. Szlązak i in. 2005; Cygankiewicz, Knechtel 2014; Cygankiewicz 2015; Dudzińska, Cygankiewicz 2015).

Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na migrację gazów zrobowych jest znany w praktyce górniczej, ale nie do końca wyjaśniony. Zjawiska te stały się również przedmiotem badań w Stanach Zjednoczonych, a ich wyniki zaprezentowano (Krog, Heasley 2017; Lolon i in. 2017) w ramach sympozjum (16th North American Mine Ventilation Symposium, Colorado). W warunkach polskich od wielu lat kopalnie prowadzą rejestrację zmian ciśnienia z sygnalizacją i ostrzeganiem za pomocą transparentów i komunikatów „Uwaga zniżka baryczna”. Do tej pory przyjmuje się, że jedynie zniżki ciśnienia są groźne, mogą bowiem powodować wypływ gazów zrobowych do kanału ściany czy wyrobisk przyległych. Istnieje również ryzyko dopływu gazów pożarowych z izolowanych pól pożarowych.

Badania eksperymentalne rozkładu gazów w zrobach prowadzono w kopalniach czeskich (Adamus 2011), pobierając okresowo próby powietrza, które poddawano analizie chromatograficznej w laboratorium. Znane są rozwiązania światowe w zakresie monitorowania i kontroli gazów zrobowych (Brady i in. 2009; Bell 1997; Bell i in. 1998; Belle i in. 2009; Balusu i in. 2001; Gillies, Wu 2006; 2007; Widzyk-Caperhart 2007) pod kątem zagrożenia pożarowego. Oparte są one na „systemie rurkowym”, stosowanym z powodzeniem w kopalniach w Australii, Stanach Zjednoczonych, Indiach i Chinach, a polegają na analizie chromatograficznej wykonywanej na powierzchni oraz analizie prób powietrza pobieranego ze zrobów i przestrzeni otamowanych za pomocą centralnej pompy i systemów rurkowych.

Stosowane obecnie w polskim górnictwie metody pomiaru składu gazów w zrobach opierają się na analizach chemicznych próbek gazów przeprowadzanych w laboratorium kopalnianym. Pobierane są one w celu wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych, ale nie gwarantują bezpośredniej i ciągłej kontroli składu gazów w zrobach. Skutkuje to brakiem pewności, czy zakres zastosowanych działań profilaktycznych służących do likwidacji zagrożenia zapłonu w zrobach dobrany jest właściwie. Z tego względu podjęto się opracowania nowych metod i narzędzi pomiarowych umożliwiających prowadzenie ciągłej

kontroli parametrów atmosfery w zrobach (Wasilewski i in. 2010; *Raport merytoryczny...* 2011; Wasilewski 2017; IMG PAN 2012; Wasilewski i in. 2012; *Raport końcowy...* 2013).

To nowe podejście do kontroli zrobów wymagało wielu badań i eksperymentów. Uzyskane wyniki (Wasilewski 2013a; 2013b; Wasilewski i in. 2013; Wasilewski, Araszczuk 2014) były obiecujące. Uznano jednak, że nie sprawdziłyby się w praktyce. Przyczyną były trudności w utrzymaniu czujników w ciężkich warunkach w zrobach i kłopoty z kalibracją niedostępnych czujników. Przyjęte rozwiązania pozwoliły w długookresowych obserwacjach rejestrować zmiany rozkładów stężeń gazów, występujące również wskutek zmiany ciśnienia powietrza (Wasilewski 2017).

Złożoność zjawisk zachodzących w zrobach, a także czynniki, które wpływają na zwiększoną emisję metanu do wyrobisk ścianowych, będąc tym samym przyczyną wybuchów metanu i zagrożenia pożarami, mają duże znaczenie dla bezpieczeństwa pracy (Strumiński 1986; Cybulski i in. 2001). Odpowiednio dobrana profilaktyka metanowa pozwala na zachowanie bezpiecznych stężeń metanu w wyrobiskach ścianowych na poziomie dopuszczonym przepisami prawa (*Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 czerwca 2016 roku...*). Ograniczenie wypływu metanu do wyrobisk górniczych w celu dotrzymania norm prawnych wiąże się z koniecznością stosowania środków zapobiegających powstaniu zagrożenia, tak zwanego odmetanowania górotworu (N. Szlązak i in. 2015), które przy zaliczeniu pokładu do czwartej kategorii zagrożenia metanowego jest obligatoryjne. Przy braku odmetanowania metan usuwany jest przy użyciu systemu wentylacyjnego – przez rozrzedzenie odpowiednio dobranym strumieniem powietrza. Następnie, wraz z grupowymi prądami zużytego powietrza, kierowany jest do szybów wentylacyjnych, a stamtąd bezpośrednio emitowany do atmosfery (*ventilation air methane*, VAM). Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że oprócz kwestii bezpieczeństwa załóg górniczych pracujących pod ziemią istotny jest również aspekt środowiskowy emisji metanu.

W 2014 roku światowa emisja metanu do atmosfery wynosiła 41,33 miliona megagram ekwiwalentu CO₂ i w porównaniu z rokiem bazowym (1988) była niższa o 46,1% (*Krajowy raport inwentaryzacyjny* 2016). Jednocześnie metan, podobnie jak CO₂, został uznany przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC 2013) za gaz cieplarniany, czyli substancję pochłaniającą promieniowanie podczerwone, a co za tym idzie – przyczyniającą się do globalnego ocieplenia. Znaczenie metanu jako gazu cieplarnianego, mimo jego znacznie mniejszej ilości w atmosferze w stosunku do CO₂, wynika głównie z faktu, że szacowany potencjał globalnego ocieplenia (*global warming potential*, GWP) przypadający na cząsteczkę CH₄ jest dwudziestopięciokrotnie większy od dwutlenku węgla, a czas przebywania metanu w atmosferze wynosi dwanaście lat (IPCC 2013; EPA 2006). W antropogenicznym zanieczyszczeniu atmosfery metanem w Polsce udział górnictwa wynosi 28,85% (*Krajowy raport inwentaryzacyjny...* 2016).

Niniejsza monografia składa się z trzech głównych części. W pierwszej części przedstawiono model numeryczny, pozwalający na wyznaczenie rozkładu ciśnienia, prędkości i zawartości poszczególnych składników powietrza w zrobach, łącznie z metanem i azotem. Druga część opracowania dotyczy wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu do wyrobisk górniczych. Autorka podjęła próbę oceny wpływu wywieranego przez ciśnienie barometryczne na emisję metanu do atmosfery kopalnianej. Rozważania oparto na analizie wyników pomiarów z wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego. Dodatkowo

przeprowadzono analizę statystyczną, wyznaczając wartości podstawowych estymatorów charakteryzujących model probabilistyczny wielkości stężenia metanu i ciśnienia, które mierzono na wylotach z analizowanych ścian, a także wydobywania. Następnie oszacowano ilościowo wpływ czynników, które mogą być połączone zależnością statystyczną zwaną korelacją lub zależnością funkcyjną. W trzeciej części skupiono się na analizie wydzielania metanu do powietrza wentylacyjnego, a następnie usuwania powstałej mieszaniny do atmosfery. Poruszane w tej części problemy są bardzo istotne ze względu na ochronę powietrza atmosferycznego.

1.2. Cel i zakres pracy

Podstawowym celem niniejszej monografii jest poznanie procesów zachodzących w zrobach ścian zawałowych przy różnych systemach eksploatacji i wpływu, który wywierają one na wyrobiska przyścianowe. Poznanie tych procesów pozwoli na przygotowanie i wdrożenie odpowiedniej profilaktyki. W książce przedstawiono opracowanie modelu matematycznego filtracji powietrza i rozkładu stężenia gazów (metanu, azotu i tlenu) w zrobach ścian zawałowych przy różnych sposobach ich przewietrzania. Prezentowany model uwzględnia współczynnik przepuszczalności zrobów, wyznaczony na podstawie pomiarów dokonanych w wyrobiskach ścianowych kopalń prowadzących eksploatację na zawał. Opracowany model posłużył do przygotowania programu komputerowego – symulacji rozplywu powietrza w rejonie ściany i powstających zrobów zawałowych, a także rozkładu stężenia gazów w zrobach. Rozeznanie prawidłowości w formowaniu się zbiorników metanowych w obszarze zrobów stanowi podstawę prawidłowej oceny zakresu i stopnia tego zagrożenia. W trakcie projektowania eksploatacji, w zależności od rodzaju skał stropowych, można wyznaczyć strefy o największym zagrożeniu pożarami endogenicznymi czy najwyższym stężeniu metanu. Pozwala to zastosować odpowiednie środki profilaktyki zwalczania zagrożenia pożarowego polegające na inertyzacji zrobów azotem, którego miejsce dopływu do zrobów może być zmienne (He 1991; Greuer 1974; Grag 1987; Komai, Isei 1989; Walters 1997; N. Szlązak i in. 2011a; 2011b; 2011c; 2011d; 2012).

Z bogatej literatury fachowej wynikają często sprzeczne spostrzeżenia dotyczące wpływu gazów, szczególnie metanu, do wyrobisk górniczych przy niższym ciśnieniu barometrycznego. Z tego powodu na potrzeby niniejszej monografii przeprowadzono obszerne badania, oparte na pomiarach kopalnianych, pozwalające dokonać oceny wpływu zmian ciśnienia na stan zagrożenia wyrobisk wzrostem stężenia metanu w powietrzu kopalnianym.

Analiza procesów zachodzących w zrobach ścian zawałowych, a także badanie wpływu ciśnienia barometrycznego na emisję metanu do wyrobisk ścianowych, stanowi kluczowy element niniejszej monografii. Mimo to autorka, chcąc w pełni zobrazować złożoność prezentowanych zagadnień, uzupełniła prezentowane opracowanie o aspekt środowiskowy, przedstawiając nie tylko procesy, które mogą zachodzić w zrobach, między innymi rozkład stężenia metanu czy wpływ wywierany przez różne czynniki na jego emisję, ale także szkodliwe dla powietrza atmosferycznego odprowadzanie metanu z szybów wentylacyjnych kopalń.

2. Dotychczasowe badania nad przepływem powietrza oraz rozkładem stężeń gazów w zrobach ścian zawałowych

Rejon ściany wydobywczej wraz z przyległymi zrobami jest obiektem o bardzo złożonej strukturze. Złożoność ta sprawia, że do komputerowego modelowania przepływu powietrza kopalnianego i migracji metanu w tym obszarze stosowane są uproszczone modele (Dziurzyński i in. 2005; 2009; 2012; Karacan i in. 2008). W wyrobiskach chodnikowych często korzysta się z przybliżenia jednowymiarowego przepływu. W przypadku obszaru zrobów podobny stopień uproszczenia zapewnia dwuwymiarowy opis.

Z perspektywy jednowymiarowego przybliżenia, stosowanego do opisu przepływu w sieci wentylacyjnej kopalni, obszar zrobów tworzy system bocznic równoległych do kanału ściany (J. Szlązak 2002; J. Szlązak i in. 2005). Przepływ w tej sieci jest wymuszony przez:

- oddziaływanie spiętrzenia wentylatorów,
- lokalne oddziaływanie strug powietrza dopływającego do naroży,
- naturalną wentylację, będącą efektem nagrzewania się gazów zrobowych i obecności gazów lżejszych lub cięższych niż powietrze (dotyczy nachylonych wyrobisk),
- emisję gazów ze skał zawału i z przyległego górotworu,
- wypychanie gazów wskutek zaciskania się pustek,
- wahania ciśnienia barometrycznego na powierzchni („oddychanie zrobów”),
- przecieki przez naruszony górotwór z sąsiednich wyrobisk.

Występuje również dyfuzyjny transport gazów.

Dwuwymiarowe modele przepływu powietrza w przestrzeni zrobowej przedstawili między innymi J. Szlązak (2000), N.H. Dieu (1994), J. Sułkowski i N.H. Dieu (1994) oraz W. Dziurzyński (2009), a modele trójwymiarowe – R. Balusu i in. (2002), A. Kelsey, C.J. Lea, I.S. Lowndes, D. Whittles i T.X. Ren (2003), M.A. Wala, S. Vytla, C.D. Taylor i P.G. Huang (2007). J. Szlązak (2000) wykorzystał w konstrukcji modelu zjawisko przepuszczalności zrobów, wyznaczonej na podstawie badań kopalnianych.

Uwzględniając pełny opis trójwymiarowy, należy zwrócić uwagę na lokalne ruchy konwekcyjne towarzyszące zmieniającym się wraz z wysokością stężeniom takich gazów jak metan czy dwutlenek węgla.

Korzystając z przeglądu programów symulacyjnych stosowanych w górnictwie światowym do opisu przepływu powietrza, gazów pożarowych i metanu w sieci wyrobisk, dokonanego przez W. Dziurzyńskiego i J. Krawczyka (2012), można stwierdzić, że przepływy w zrobach uwzględnia jedynie program *VentZrob*. Wyniki licznych prac eksperymentalnych

i modelowania pozwalają jednak tworzyć przybliżone modele przestrzeni zrobowej (J. Szlązak 1980; N. Szlązak 1990; Tauziède i in. 1993; Dziurzyński 1998; Balusu i in. 2002; Cimr, i in. 2006)

Obecnie zamiast autorskich programów komputerowych w coraz szerszym zakresie stosuje się wielozadaniowe pakiety programów do symulacji metodami numerycznej mechaniki płynów (*computational fluid dynamics*, CFD) (*ANSYS Fluent...* 2013; Yuan, Smith 2007; 2008b; 2009a; 2009b; Branny, Swolkień 2010a; 2010b; Branny in. 2012; 2013).

Programy oparte na numerycznej mechanice płynów umożliwiają wyznaczenie parametrów fizycznych przepływu strumienia powietrza lub płynu (rozkład pola prędkości, rozkład pola ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury), a także przemian fizykochemicznych (Ferziger, Perić 2002). W opracowywaniu modeli bardzo istotne jest określenie parametrów charakteryzujących zroby ścian.

Jedne z pierwszych prób modelowania rozkładu przepuszczalności w zrobach prowadzili T.X. Ren i J.S. Edwards (2000). Wykorzystali oni wartości przepuszczalności podane w literaturze, które następnie dopasowali do wartości naprężeń obliczonych za pomocą metody elementów skończonych.

Pełniejszy opis przepływu mieszanin gazów, uwzględniający oddziaływanie płynów z ciałami stałymi, wykonali A. Kelsey i in. (2003). Tak jak wcześniej (Ren, Edwards 2000) połączono przepuszczalność górotworu naruszonego eksploatacją górniczą z rozkładem naprężeń w górotworze. Naprężenia obliczono jednak za pomocą programu *FLAC3D* (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) firmy Itasca Consulting Group, opartego na metodzie różnic skończonych (*FLAC3D* 2014). Otrzymany w ten sposób rozkład przepuszczalności wykorzystano w modelu migracji gazów w górotworze oraz przepływu w wyrobiskach ściany i systemu odmetanowania. Podobne badania prowadzili również G. Esterhuizen i C.Ö. Karacan (2005) oraz C.Ö. Karacan, W.P. Diamond, G.S. Esterhuizen i S.J. Schatzel (2005). Ich model umożliwiał dopasowanie przepuszczalności przy zmianie naprężeń co 10 MPa. Zmiany były stosowane niezależnie w kierunku poziomym i pionowym, aby uwzględnić anizotropowość mas skalnych. W kolejnych latach model przepuszczalności ulegał jednak zmianom.

Opracowany model (Esterhuizen, Karacan 2007) pozwalał obliczyć rozkład przepuszczalności na podstawie początkowych wartości przepuszczalności i porowatości z wykorzystaniem równania Carmana–Kozeny. Równanie to zostało wyprowadzone teoretycznie przez powiązanie przepuszczalności ośrodka porowatego z jego porowatością. Równanie Carmana–Kozeny zawiera powierzchnię właściwą – parametr na ogół trudny do wyznaczenia. Poza tym problematyczne jest ustalenie wartości stałej Kozeny dla ośrodków porowatych.

Wśród badań dotyczących porowatości i przepuszczalności zrobów ścian zawałowych warto zwrócić uwagę na publikacje C.Ö. Karacana (2010a; 2010b), w których przedstawiono podejście predykcyjne, łączące skalowanie fraktali w ośrodku porowatym z zasadami przepływu płynu. Termin „fraktal”, pochodzący od łacińskiego słowa *fractus* – „złamany”, nie doczekał się jeszcze ścisłej definicji. W uproszczeniu można powiedzieć, że fraktale są figurami, których część jest podobna do całości, albo że fraktal to obiekt samopodobny o wymiarze ułamkowym (Król 2015). Teoria fraktali to dział geometrii zajmujący się opisem obiektów charakteryzujących się nieregularnością przy dowolnie dużym powiększeniu,

dłatego niemożliwych do przedstawienia za pomocą odcinków, płaszczyzn lub brył geometrycznych (Nowak 1992).

Podejście to umożliwiło obliczenie porowatości i przepuszczalności w przypadku rozdrobnionego materiału skalnego o porowatości określonej na podstawie analizy obrazu (Karacan 2010a; 2010b). Dane do analizy zaczerpnięto z publikacji D.M. Pappasa i C. Marka (1993), w której przedstawiono wyniki badań materiałów skalnych w założeniu mających symulować materiał zrobowy. W pracach C.Ö. Karacana (2010a; 2010b) określono związek między porowatością i naprężeniami, a następnie między przepuszczalnością i naprężeniami, którym były poddawane próbki. Naprężenia ściskające miały symulować uszczelnianie zrobów, a tym samym zmianę porowatości i przepuszczalności.

C.Ö. Karacan (2010a; 2010b) stwierdził, że jego model fraktalny umożliwia trafniejsze określenie przepuszczalności niż przy użyciu równania Carmana–Kozeny czy formuły Happpla (Li, Logan 2001).

E.W. Wachel (2012) kontynuował modelowanie przepuszczalności w programie *FLAC3D*, podejmując próbę płynnego dopasowania zmian przepuszczalności do naprężeń występujących w czasie eksploatacji, co miało na celu lepsze ukazanie wpływu eksploatacji na rozkład przepuszczalności. W pracy D.M. Worall (2012) można również znaleźć minimalne i maksymalne wartości przepuszczalności zrobów przyjmowane przez innych autorów (Lolon 2008; Esterhuizen, Karacan 2007; Yuan, Smith 2008a; Wachel 2012).

W grupie innych opracowań związanych z modelowaniem przepuszczalności metodami numerycznej mechaniki płynów warto zwrócić uwagę na publikację W.C. Weddinga (2014). Korzystając z oprogramowania *SC/Tetra*, autor zdefiniował własną funkcję dopasowania do zmian przepuszczalności, stwierdzając, że jego model umożliwia uwzględnienie zmian przepuszczalności nie tylko wzdłuż szerokości i długości, ale także w kierunku pionowym – w odróżnieniu od modelu z programu *FLAC3D*.

3. Numeryczne wyznaczanie pola prędkości mieszaniny gazowej oraz pól stężeń składników tej mieszaniny w przestrzeni zrobów w kopalni węgla kamiennego

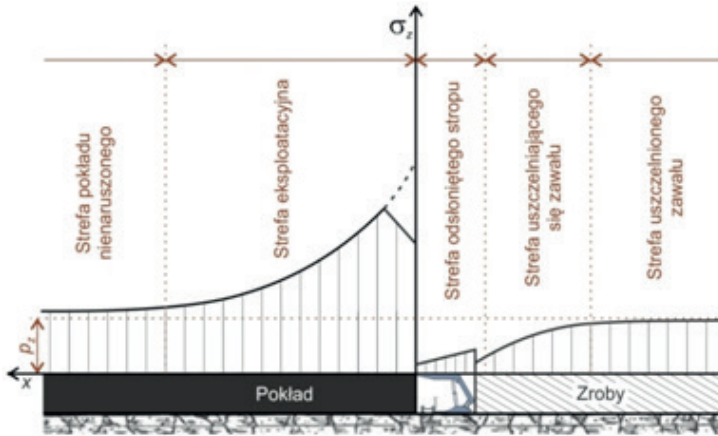
3.1. Wstęp

Wypełnioną rumowiskiem skalnym pustką powstałą po wyeksploatowaniu złoża nazywa się zrobami. Przy eksploatacji złóż systemem ścianowym w bezpośrednim sąsiedztwie czoła ściany następuje koncentracja naprężeń, wynikająca z odsłonięcia stropu w przestrzeni roboczej i jego osiadania, uwarunkowanego sztywnością zarówno stropu, jak i pokładu, podpornością obudowy oraz ściśliwością zrobów (Trutwin 2008).

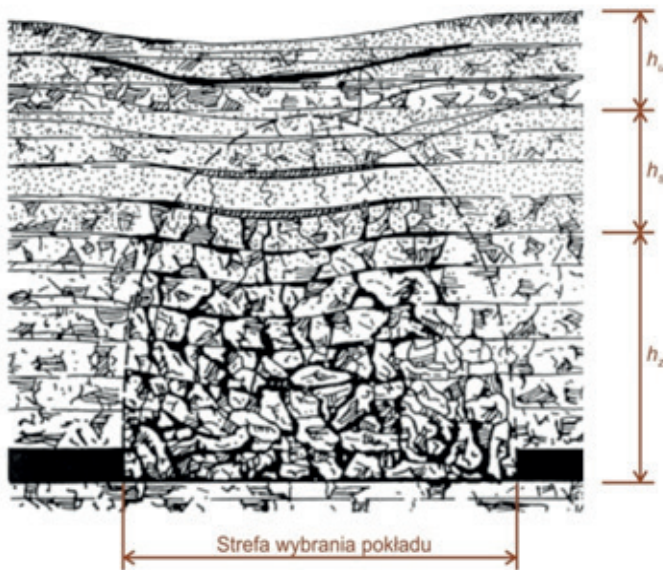
Kierując się od calizny ku zrobom, można wyróżnić pięć stref o różnych zakresach ciśnienia eksploatacyjnego (S_z), przedstawionych na rysunku 3.1 (Kłeczek 1994):

- strefę pokładu nienaruszonego, charakteryzującą się stanem naprężeń zbliżonym do stanu pierwotnego (p_z – ciśnienie nadkładu);
- strefę eksploatacyjną, cechującą się występowaniem podwyższonych naprężeń pionowych;
- strefę odsłoniętego stropu, obejmującą przestrzeń roboczą i bardzo często część zrobów, w której nie ma jeszcze oddziaływania zawału z warstwami wyżej zalegającymi;
- strefę uszczelniającego się zawału, obejmującą obszar zrobów, w którym stopniowo, w miarę oddalania się od czoła ściany, ciśnienie w obszarze zrobów wzrasta do ciśnienia pierwotnego;
- strefę uszczelnionego zawału, charakteryzującą się pełnym podparciem warstw nadległych, dzięki czemu stan naprężeń jest zbliżony do stanu pierwotnego.

W mechanice górotworu zrob to obszar obejmujący trzy strefy: zawału, spękań i ugięcia stropu (rys. 3.2). Rozważania podejmowane w niniejszym rozdziale będą dotyczyły tylko strefy zawału, przy założeniu, że jest ona pod wpływem depresji wentylatorów głównego przewietrzania. Wobec tego w tej strefie odbywa się ruch powietrza i gazów. Strefa zawału obejmuje skały, może również zawierać resztki niewybranego węgla.



Rysunek 3.1. Przejawy ciśnienia górotworu w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego (Kłeczek 1994)



Rysunek 3.2. Strefy zawalu (h_z), spękań (h_s) i ugięcia (h_u) powstałe nad wyeksploatowanym wyrobiskiem ścianowym (Mazurkiewicz i in. 1997)

Mechanizm tworzenia się zawalu za postępującą ścianą wygląda następująco: leżący nad wybranym pokładem strop bezpośredni ulega rozpadowi na niewielkie bryły, które – spiętrzając się – podpierają zalegający wyżej strop. Między nimi tworzy się pustka, przez którą

może przepływać mieszanina powietrza i gazów. Gruzowisko to stanowi strefę tak zwanego pełnego zawału stropu bezpośredniego. Wraz z postępowaniem ściany warstwy nad stropem bezpośrednim rozpadają się, ale już na dużo większe bryły, doszczelniając strefę pełnego zawału. W taki sposób tworzy się strefa wysokiego zawału. W miarę dalszego postępu ściany stropu główny ugina się, podpierając się na bryłach powstałych w strefie zawału pełnego i wysokiego. Należy zaznaczyć, że gruzowisko utworzone w bezpośrednim sąsiedztwie frontu ściany nie podpira stropu. W tym miejscu nacisk skał leżących wyżej jest równoważony przez strop główny, następuje to jednak tylko do pewnej odległości od frontu ściany, gdzie skały stropowe są podparte przez utworzone gruzowisko.

Wysokość całkowita zrobów utworzonych przez zawał, uzyskana z pomiarów S. Ropskiego (1964) (zawał pełny i wysoki), wynosi od 3,4- do 3,9-krotności grubości pokładu. Należy sądzić, że przepływ mieszaniny powietrza i gazów w pustkach między pokruszonymi skałami jest ograniczony od góry powierzchnią styku zawału wysokiego z leżącymi wyżej warstwami stropowymi.

Autorzy zajmujący się problematyką przepływu powietrza w zrobach przyjmowali, że odbywa się on w obszarze równym trzy- lub czterokrotnej grubości eksploatowanego pokładu (warstwy). Wysokość, na której następował przepływ, określano zasięgiem zawału chaotycznego. Według A. Znańskiego (1961) i A.F. Milecicza (1963) zawał chaotyczny obejmuje skały stropowe do wysokości równej trzykrotnej grubości eksploatowanej warstwy lub pokładu. Przepływ odbywa się w części podkładu wybranego ścianą. Otrzymuje się zatem wysokość czterokrotnej grubości pokładu, licząc od spągu pokładu. Uwzględniając jednak osiadanie stropu głównego o 0,5–0,6 grubości pokładu, J. Szlązak (1980; 2000) przyjmuje, że wysokość, do której odbywa się przepływ powietrza w zrobach, wynosi 3,5-krotność grubości eksploatowanej warstwy. Przyjęty w modelu współczynnik przepuszczalności jest stały wzdłuż długości frontu ściany i na wysokości strefy przepływu powietrza przez zrob.

W przestrzeni zrobów mamy do czynienia z przepływem powietrza doprowadzanego do kopalni i ze zmiennym stanem rozkładu stężenia gazów, dlatego prowadzi się badania mające na celu opisanie zjawisk występujących w tych zrobach.

Wyniki licznych prac eksperymentalnych i modelowania pozwoliły na tworzenie przybliżonych modeli przestrzeni zrobowej (J. Szlązak 1980; 2001; Tauziède i in. 1993).

Obecnie, o czym była już mowa, zamiast autorskich programów komputerowych w coraz większym zakresie stosuje się wielozadaniowe pakiety programów do symulacji metodami numerycznej mechaniki płynów (Trutwin 1972; Tauziède i in. 1997; Wala i in. 1997; Ren, Balusu 2005; 2010).

3.2. Porowatość i przepuszczalność obszaru zrobów

Porowatość zrobów wyznacza się jako stosunek objętości pustek między gruzowiskiem czy niepodpartym stropem do całkowitej objętości zrobów w wydzielonym obszarze. Porowatość tego obszaru zależy od struktury skał, ich cech fizycznych i składu granulometrycznego (Puczkow 1965). Gruzowisko zawałowe może być tworzone przez kawałki skał o różnych

rozmiarach i ułożeniu. Skały stropu głównego podpierane przez gruzowisko tworzące zawał wywierają na nie nacisk, doszczelniając je. Luźne ułożenie skał zawału uszczelnia się w miarę zwiększania się odległości od frontu ściany.

Przepuszczalność zrobów to parametr zależny od porowatości. Zależność ta jest uwarunkowana geometrycznym układem poszczególnych brył skalnych względem siebie (Malczewski, Piekarski 1992). Analizując literaturę, można stwierdzić, że charakter zmian porowatości jest podobny do rodzaju zmian przepuszczalności.

J. Szlązak (1980) przedstawił wyniki pomiarów kopalnianych służących do określenia wpływu uszczelnienia chodników przyścianowych na migrację powietrza przez zrob. Wyniki pomiarów przeanalizowano pod kątem związku między wartością strat powietrza a rodzajem skał stropowych, stwierdzając, że w jednakowych warunkach wentylacyjnych straty powietrza są tym większe, im bardziej zwarte są skały stropowe. Prowadzone badania pozwoliły na ocenę przepuszczalności zrobów w warstwie o miąższości równej 3,5-krotnej wysokości wybieranej ściany.

Badania eksperymentalne J. Szlązaka (1980) uwzględniały podział stropów ścian zawałowych na podstawie „oporu rozwarstwienia”, określonego wytrzymałością skał na rozciąganie mierzoną w kierunku prostopadłym do powierzchni uwarstwienia (warstw) stropu. Z kolei wytrzymałość skał na rozciąganie decyduje o ich skłonności do przechodzenia w stan zawału. W ten sposób wydzielono trzy klasy stropu ze względu na opór rozwarstwienia (tab. 3.1). W opisie kształtowania się wysokości strefy zawału opór rozwarstwienia ma wpływ na początkową krzywiznę wysokości strefy zawału w płaszczyźnie równoległej do frontu ściany.

Tabela 3.1

Klasy stropu wyznaczone według wartości oporu rozwarstwienia (J. Szlązak 1980; 2000; N. Szlązak, J. Szlązak 2004a; 2004b; 2005)

Klasa stropu	Wartość oporu rozwarstwienia (R_{rzs}) [MPa]	Opis stropu
Klasa I	0÷2,5	strop słaby, spękany, opadający, łatwo przechodzący w zawał (na przykład łupek ilasty)
Klasa II	2,5÷5,0	strop samonośny, bez obwałów, przechodzący w zawał bez zawisania w zrobach (na przykład łupek piaszczysty)
Klasa III	> 5,0	strop bardzo zwarty, wymaga środków łamania i zruszania stropu (na przykład piaskowiec)

W publikacjach (J. Szlązak 2000; N. Szlązak, J. Szlązak 2005) wyznaczono współczynnik przepuszczalności. Z prac tych wynika, że współczynnik przepuszczalności zrobów malał w miarę wzrostu odległości od frontu ściany, przyjmując największą wartość w pobliżu frontu ściany, najmniejszą zaś w odległości około dwóch trzecich jej wybiegu. Po osiągnięciu minimum współczynnik przepuszczalności wzrastał aż do miejsca rozpoczęcia ściany. Wraz ze wzrostem wybiegu ściany współczynnik przepuszczalności w tym miejscu malał, zawsze

jednak był znacznie większy od wartości minimalnej. Wraz ze wzrostem wybiegu ściany powiększał się również odcinek zrobów o małym współczynniku przepuszczalności.

Najniższymi wartościami współczynnika przepuszczalności charakteryzowały się zrobry, dla których opór rozwarstwienia był najmniejszy. W miarę wzrostu oporu rozwarstwienia skał stropowych współczynnik przepuszczalności zrobów wzrastał.

Na podstawie analizy statystycznej wyników zmian wartości współczynnika przepuszczalności zrobów wykazano, że współczynnik ten najlepiej aproksymuje zależność (J. Szlązak 2001):

$$k_x = \frac{\mu}{r_0 + ax^2} \quad [\text{m}^2] \quad (3.1)$$

dla $0 \leq x \leq 2/3l$,

gdzie:

μ – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza,
 r_0, a – empiryczne współczynniki zależne od górnico-geologicznych warunków zawału,

$k_0 = \frac{\mu}{r_0}$ – współczynnik przepuszczalności zawału za frontem ściany $[\text{m}^2]$,

x – odległość od frontu ściany $[\text{m}]$,

l – długość wyeksploatowanej części ściany $[\text{m}]$.

Z kolei dla wartości $x = 2/3l$ uzyskiwano najmniejszą wartość współczynnika przepuszczalności zrobów. Po osiągnięciu wartości minimalnej współczynnik ten wzrastał aż do miejsca rozpoczęcia ściany. Na odcinku, na którym zwiększał się współczynnik przepuszczalności, aproksymację można było przeprowadzić według zależności:

$$k_x = \frac{\mu}{r_0 + a(4/3l - x)^2} \quad [\text{m}^2] \quad (3.2)$$

dla $2/3l \leq x \leq l$.

Wartości występujących współczynników r_0, k_0, a i b uzależniono od oporu rozwarstwienia skał stropowych zalegających nad wybranym pokładem. Na rysunku 3.3 przedstawiono zależności zmian współczynników $k_0 = \mu / r_0$ i a od oporu rozwarstwienia skał stropowych.

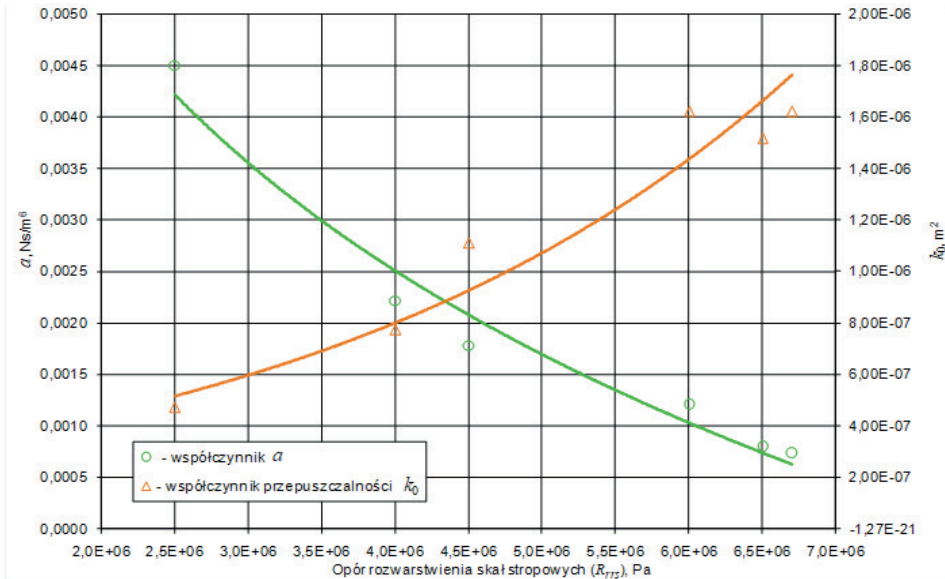
W miarę wzrostu oporu rosła wartość współczynnika k_0 . Zmianę współczynnika przepuszczalności zawału za frontem ściany aproksymowano zależnością (J. Szlązak 2000):

$$k_0 = \frac{\mu}{6} \cdot 10^{-10} R_{rs}^{1,44} \quad [\text{m}^2] \quad (3.3)$$

gdzie R_{rs} – opór rozwarstwienia skał stropowych $[\text{Pa}]$.

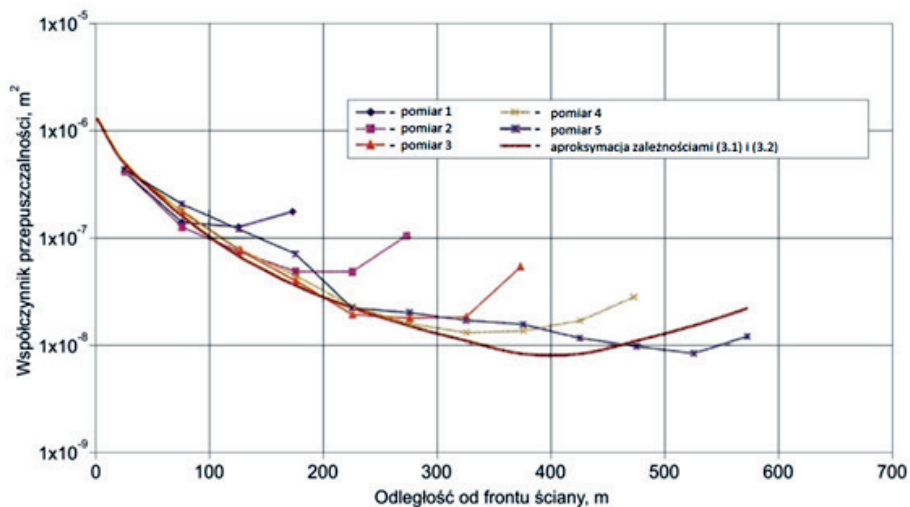
Z kolei zmianę współczynnika a aproksymowano zależnością (J. Szlązak 2000):

$$a = 6 \cdot 10^9 R_{rs}^{-1,74} \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4] \quad (3.4)$$



Rysunek 3.3. Zależność zmian współczynnika k_0 i α od oporu rozwarstwienia skał stropowych (J. Szlązak 2000; 2001; N. Szlązak, J. Szlązak 2005)

Na rysunku 3.4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika przepuszczalności zawału, które otrzymano z badań kopalnianych, oraz aproksymację zależnościami (3.1) i (3.2).



Rysunek 3.4. Zmiana współczynnika przepuszczalności strefy zawału w zależności od odległości od frontu ściany 660 (J. Szlązak, N. Szlązak 2005)

Zmiana współczynnika przepuszczalności strefy zwału opisana powyższymi zależnościami dotyczy warstwy o miąższości 3,5 razy większej niż grubość wybieranego pokładu. Oznacza to, że przepuszczalność wzdłuż osi pionowej była niezmienna na tej wysokości wyeksploatowanego pokładu. W warunkach kopalnianych nie ma możliwości wyznaczenia zmian przepuszczalności wzdłuż współrzędnej pionowej.

Porównanie wzoru Darcy'ego z równaniem Blake'a-Kozeny umożliwiło określenie przepuszczalności warstwy złożonej z brył kulistych (Pohorecki, Wroński 1979):

$$k = \frac{d_z^2 \varepsilon^3}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad [\text{m}^2] \quad (3.5)$$

gdzie:

d_z – średnica hydrauliczna [m],
 ε – porowatość.

Zmiany porowatości i przepuszczalności w przekroju prostopadłym do frontu ściany są podobne do kształtowania się zmian prędkości przepływu powietrza przez zroby ścian zawałowych (Puczkow 1965; J. Szlązak 2000; J. Szlązak, N. Szlązak 2002).

Na brzegach zrobów, które są podparte obudową ściany, chodnikiem lub niewybranymi skałami, porowatość i przepuszczalność osiągają wartość maksymalną. Wpływ takiego brzegu powoduje mniejszy nacisk skał stropowych na skały zawału niż w środkowym obszarze zrobów.

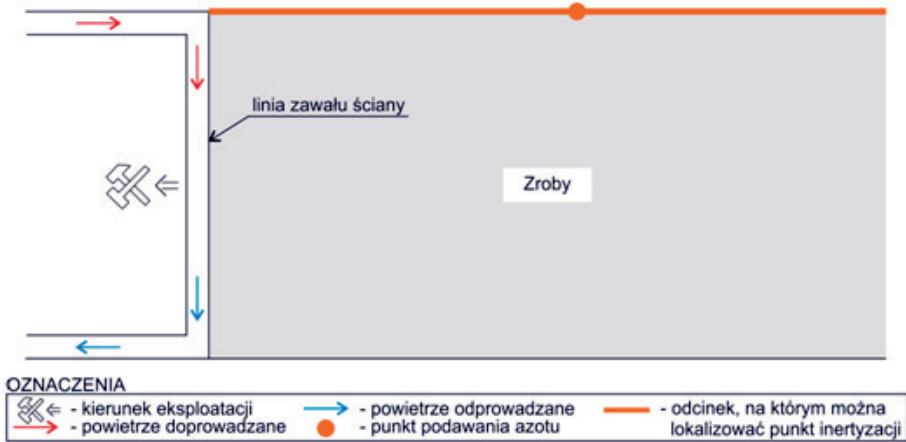
Porowatość i przepuszczalność jest istotna w obliczeniach rozptyłu powietrza w zrobach.

3.3. Numeryczne wyznaczenie pola prędkości i stężenia składników mieszaniny gazów w zrobach

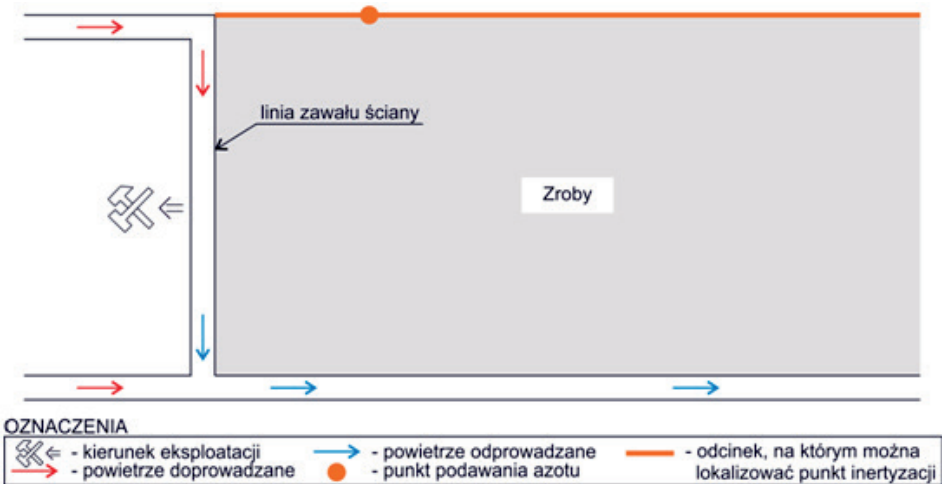
W niniejszym podrozdziale przedstawiono symulację transportu substancji wewnątrz porowatej struktury powstałej po wyeksploatowaniu pokładu węgla systemem ścianowym w kopalni podziemnej. Zroby po wyeksploatowaniu pokładu węgla można traktować jako usytuowaną poziomo prostokątną płytę o wymiarach poziomych x i y oraz o wymiarze pionowym $3,5m$, gdzie m jest miąższością eksploatowanego pokładu (rys. 3.5, 3.6). W wymienionym obszarze następuje filtracja powietrza pochodzącego z wentylacji kopalni, które przepływa chodnikami przylegającymi do poziomych brzegów płyty. Wewnątrz zrobów, w przestrzeni porowatej, występują nieuniknione złożone procesy utleniania węgla, dochodzi również do wypływu metanu z warstw nasyconych metanem (N. Szlązak i in. 2011a; 2011d; 2012; Ren i in. 2012). W połączeniu z tlenem pochodzącym z powietrza może on tworzyć groźną mieszaninę wybuchową. Szybkość filtracji metanu, a co zatem idzie – średnia wydajność jego źródeł w przestrzeni zawału, może być w przybliżeniu określona na podstawie wyników odpowiednich pomiarów kontrolnych dokonywanych w trakcie eksploatacji pokładu węgla. W obliczeniach uwzględniono dodatkowo lokalną emisję azotu o zadanym wydatku, doprowadzonego rurociągiem do wnętrza zawału wzdłuż dłuższego brzegu obszaru (Ren, Balusu 2009; Mucho i in. 2005; N. Szlązak i in. 2011a; 2011b; 2011c; 2013c). W wyniku

symulacji uzyskano następujące dyskretne dwuwymiarowe (2D) pola fizyczne występujące w przestrzeni zawalu:

- pole przyrostu ciśnienia [Pa],
- pole prędkości pozornej mieszaniny składników gazowych [m/s],
- pole koncentracji molowej azotu N_2 [mol/m³],
- pole koncentracji metanu CH_4 [mol/m³],
- pole koncentracji tlenu O_2 [mol/m³].



Rysunek 3.5. Schemat przewietrzania ściany w systemie na „U” od granic



Rysunek 3.6. Schemat przewietrzania ściany w systemie na „Y”

Opracowany algorytm obliczeniowy oparto na procedurze znanej jako metoda objętości kontrolnej (*control volume method*), którą w Polsce nazywano również metodą bilansów elementarnych. Podstawową literaturą, którą posłużono się przy formułowaniu modelu matematycznego i wymienionego algorytmu, są prace N. Szlązaka i J. Szlązaka (2005), R. Pohoreckiego i S. Wrońskiego (1979) oraz S.V. Patankara (1980).

Przygotowany program komputerowy umożliwia określanie wyżej wymienionych pól w dwóch wariantach różniących się warunkami brzegowymi (co będzie przedmiotem szczególnych rozważań).

W tej części monografii przedstawiono symulację komputerową transportu substancji wewnątrz porowatej struktury usytuowanego poziomo zawału węglowego. Obszar ten był częściowo filtrowany powietrzem pochodzącym z wentylacji kopalni, które przepływało wyrobiskami przyścianowymi. Wewnątrz zrobów dochodziło do wydzielania metanu. W obliczeniach uwzględniono dodatkowo lokalną emisję azotu o zadanym wydatku, doprowadzonego rurociągiem do wnętrza zawału.

Kierując się kryterium najczęściej stosowanych systemów przewietrzania ścian w praktyce kopalnianej, opracowany program komputerowy przygotowano w wariantach dla dwóch różnych systemów przewietrzania:

- systemu przewietrzania na „U” od granic (rys. 3.5),
- systemu przewietrzania na „Y” (rys. 3.6).

3.4. Podstawy teoretyczne zagadnienia oraz ogólne sformułowanie modelu matematycznego

W procesie filtracji płynu przez ośrodek porowaty istotna jest porowatość otwarta, która zapewnia pełną penetrację płynu do przestrzeni porów i stanowi obszar czynny w kontekście przepływu. Wielkość ta jest ściśle powiązana z przepuszczalnością ośrodka, zdefiniowaną przez prawo Darcy’ego. W inżynierii chemicznej dla takich ośrodków stosuje się założenie o ich pseudohomogeniczności, które jest jednak słuszne wyłącznie wtedy, gdy wymiary rozważanego obszaru są bardzo duże (praktycznie nieskończenie wielkie) w porównaniu z rozmiarami porów albo usypanych kawałków materiału. Można przyjąć, że w przypadku zrobów powstałych po wyeksploatowaniu pokładu węgla założenie to jest zadowalająco spełnione. Założenie o pseudohomogeniczności umożliwia przypisanie dowolnemu punktowi ośrodka porowatego wielkości intensywne dotyczące zarówno płynu, jak i ciała stałego, a więc gęstości, stężenia, współczynników dyfuzji, porowatości czy przepuszczalności. Nie ma znaczenia, czy zadany punkt dotyczy fazy płynnej, czy stałej.

Pole przekroju ośrodka porowatego prostopadłe do głównego kierunku penetracji płynu składa się z dwóch części: pola przekroju porów otwartych, przez które zachodzi przepływ, i pola przekroju ciała stałego. Stosunek pierwszego z tych pól do pola przekroju całkowitego jest z dobrym przybliżeniem równy wyżej wymienionej porowatości otwartej ośrodka. Wprowadza się pojęcia tak zwanych parametrów pozornych przepływu: liniowej prędkości pozornej,

pozornej gęstości strumienia substancji oraz pozornej gęstości źródła substancji, przy czym pod pojęciem substancji rozumie się zarówno mieszaninę składników gazowych, jak i każdy składnik osobno. Prędkość pozorna odniesiona jest do całkowitego pola przekroju ośrodka, podczas gdy prędkość rzeczywista określana jest wyłącznie przez pole przekroju czynnego. Przy założeniu o pseudohomogeniczności ośrodka prędkość pozorna może być określana również punktowo i tworzyć w jego przestrzeni pole wektorowe. W związku z powyższym można zdefiniować pozorne gęstości strumieni zarówno dla całej mieszaniny gazowej, jak i dla poszczególnych jej składników. Wielkości te tworzą pola wektorowe w całej przestrzeni ośrodka porowatego. Mamy zatem:

$$\dot{m} = \rho \bar{v} \quad (3.6)$$

oraz

$$J_i = -\varepsilon D_i \nabla c_i + \bar{v} c_i \quad (3.7)$$

gdzie:

- \dot{m} – pozorna gęstość strumienia mieszaniny [kg/(m²·s)],
- J_i – pozorna gęstość strumienia i -go składnika mieszaniny [mol/(m²·s)],
- ε – porowatość otwarta ośrodka [m³/m³],
- D_i – kinematyczny współczynnik dyfuzji molekularnej i -go składnika wewnątrz mieszaniny, którego zależność od składu chemicznego mieszaniny została zaniedbana w ramach uproszczeń modelu [m²/s],
- ρ – gęstość mieszaniny gazowej [kg/m³],
- c_i – objętościowe stężenie molowe (koncentracja) i -go składnika mieszaniny [mol/m³],
- \bar{v} – pole liniowej prędkości pozornej mieszaniny w obszarze porowatym [m/s],
- $i = 1, 2, \dots, N$ – indeks przypisany danemu składnikowi mieszaniny gazowej złożonej z N komponentów,
- ∇ – nabla (operator wektorowy Hamiltona).

Z kolei pozorne gęstości źródeł substancji odniesione są do jednostki objętości ośrodka porowatego zawierającej obie fazy i tworzą w jego przestrzeni pola skalarne.

W rozważaniach założono laminarny charakter filtracji zawalu przez ośrodek gazowy i stacjonarny charakter całego rozważanego procesu, wobec czego lokalny bilans ilości substancji można zapisać w postaci następującego uogólnionego równania ciągłości:

$$\nabla \cdot \bar{J} = \dot{S} \quad (3.8)$$

gdzie \bar{J} oraz \dot{S} – uogólnione gęstości odpowiednio strumienia substancji i jej wewnętrznego źródła w ośrodku porowatym.

Co prawda wewnętrzne źródła masy nie istnieją – ze względu na zasadę jej zachowania – ale dopuszczalne jest ich wprowadzanie jako elementu bilansowego przy formułowaniu uproszczeń w modelach matematycznych. W rozważanym przypadku wymienione źródła

powstają głównie w wyniku dopływu metanu do przestrzeni zrobów wzdłuż współrzędnej pionowej, a także w wyniku ewentualnych reakcji chemicznych zachodzących między gazem a powierzchnią ciał stałych wewnątrz porów. Podstawiając gęstości strumieni zdefiniowane wzorami (3.6) i (3.7) zamiast \vec{J} do równania (3.8), uzyskuje się następujący układ równań różniczkowych:

– równanie ciągłości ośrodka płynnego:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = \dot{s}_m \quad (3.9)$$

– równanie transportu danego składnika wchodzącego w skład płynu:

$$\nabla \cdot (\vec{v}c_i) = \epsilon D_i \nabla^2 c_i + \dot{s}_i = 0 \quad (3.10)$$

dla $i = 1, 2, \dots, N$,

gdzie:

\dot{s}_m – wydajność wewnętrznego źródła masy mieszaniny gazowej [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$],

\dot{s}_i – wydajność wewnętrznego źródła ilości moli i -go składnika [$\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$].

Medium gazowe wypełniające pory musi dodatkowo spełniać odpowiednie równanie stanu, co obniża liczbę równań różniczkowych o postaci (3.10) do wartości $N - 1$.

W rozważanym przypadku – ze względu na ściśliwość ośrodka (silna niejednorodność jego gęstości) i stosowaną procedurę numeryczną – wskazane jest poszukiwanie lokalnego składu mieszaniny w postaci udziałów masowych poszczególnych składników ω_i [kg/kg], które z polami odpowiadających im stężeń molowych wiąże następująca zależność:

$$c_i = \frac{\rho \omega_i}{M_i} \quad (3.11)$$

gdzie M_i – masa molowa i -go składnika [kg/mol].

Wielkości ω_i spełniają nierówność $0 \leq \omega_i \leq 1$ oraz oczywisty warunek:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.12)$$

Po podstawieniu wzoru (3.11) do równania (3.10) i dokonaniu odpowiednich przekształceń uzyskuje się nową postać układu równań opisujących lokalny skład mieszaniny gazowej wewnątrz zrobów:

$$\nabla \cdot (\vec{v} \rho \omega_i) = D_i \nabla (\epsilon \rho \nabla \omega_i) + D_i \nabla (\epsilon \omega_i \nabla \rho) + M_i \dot{s}_i \quad (3.13)$$

Układ równań (3.9, 3.13) jest układem nieoznaczonym, ponieważ liczba funkcji niewiadomych przewyższa liczbę zapisanych równań. Zamknięcia tego układu dokonuje się przez odpowiednie uwzględnienie równania stanu dla ośrodka płynnego, a także przez wprowadzenie

równania Darcy'ego, które w przypadku zalegającego poziomo obszaru zrobów przedstawia się następująco:

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla \pi \quad (3.14)$$

gdzie:

- k – przepuszczalność ośrodka porowatego, wyznaczona z zależności (3.1) i (3.2) [m²],
- μ – dynamiczny współczynnik lepkości mieszaniny gazowej [kg/(m·s)],
- π – pole nadciśnienia (przyrostu ciśnienia w odniesieniu do zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego p_0) w przestrzeni porów [Pa].

Ciśnienie p_0 określane jest dla przekroju chodnika, w którym następuje wylot powietrza z rozważanego obszaru, zawsze jest zatem spełniony warunek $\pi \geq 0$.

Wobec powyższego lokalne ciśnienie całkowite wewnątrz obszaru zrobów wynosi $p = p_0 + \pi$ [Pa]. Wielkość p_0 stanowi w modelu ustalony parametr i jest wczytywana jako dana wejściowa do obliczeń.

Podstawiając prędkość pozorną zdefiniowaną wzorem (3.14) do równania (3.9), uzyskuje się następujące równanie różniczkowe, na podstawie którego można wyznaczyć pole ciśnienia w przestrzeni zrobów, jeżeli zadane są odpowiednie warunki brzegowe:

$$\nabla \cdot (K \nabla \pi) + \dot{s}_m = 0 \quad (3.15)$$

gdzie:

$$K = \rho \frac{k}{\mu} \quad (3.16)$$

Ośrodek wypełniający przestrzenie porów stanowi najczęściej mieszaninę powietrza kopalnianego i metanu. Można zatem przyjąć, że w warunkach termicznych panujących w kopalni zachowuje się on jak gaz półdoskonały i w zadowalającym stopniu spełnia równanie stanu podane przez Clapeyrona. Wykorzystując dodatkowo prawo Daltona, można wyprowadzić wzór określający gęstość mieszaniny gazowej jako funkcję ciśnienia całkowitego oraz składu mieszaniny gazowej:

$$\rho = \frac{p_0 + \pi}{RT \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{M_i}} \quad (3.17)$$

gdzie:

- T – lokalna temperatura bezwzględna ($\cong 298,0 = \text{const}$) [K],
- R – uniwersalna stała gazowa ($\cong 8,315$) [J/(mol·K)].

Ze względu na konieczność spełnienia warunku (3.12) liczba równań o postaci (3.13) ulega obniżeniu z N do $N - 1$, ponieważ pole stężenia jednego odpowiednio wybranego składnika mieszaniny jest określone bezpośrednio przez równanie wyrażające wymieniony warunek. W skład zapisanego układu równań różniczkowych opisujących transport substancji

wewnątrz zrobów powstałych po wyeksploatowaniu pokładu węgla wchodzi zatem następujące równania:

- równanie ciągłości o postaci (3.15),
- $N - 1$ równań transportu konwekcyjno-dyfuzyjnego poszczególnych składników gazowych o postaci (3.13),
- równanie wyrażające warunek (3.12).

W wyniku rozwiązania powyższego układu w przypadku rozważanego obszaru uzyskuje się kolejno: pole nadciśnienia π , pola udziałów masowych ω_i dla $N - 1$ składników gazowych, pole udziału masowego N -tego składnika gazowego.

Wszystkie wielkości występujące po prawej stronie wzoru (3.16) tworzą niejednorodne pola skalarne w przestrzeni zrobów. Zmienność wielkości ρ oraz μ wynika ze zróżnicowania składu chemicznego penetrującego ośrodka gazowego, z kolei przepuszczalność k stanowi funkcję wyłącznie poziomej zmiennej przestrzennej równoległej do dłuższego boku rozważanego prostokątnego obszaru, co wynika z badań N. Szlązaka i J. Szlązaka (2005). Znając wartość k , można oszacować lokalną wartość porowatości otwartej ϵ , traktując zawał węglowy jako warstwę usypaną, złożoną z ziaren stałych o średnicy zastępczej d_z [m]. W tym celu wykorzystuje się przybliżony wzór Blake'a–Karmanna (Pohorecki, Wroński 1979).

Gęstość mieszaniny gazowej penetrującej ośrodek porowaty jako funkcja ciśnienia i składu masowego określona jest przez wzór (3.17). Lepkość dynamiczną mieszaniny jako funkcję jej składu chemicznego można z dobrą dokładnością określić, stosując algorytm Wilkego (Pohorecki, Wroński 1979). Jak wcześniej wspomniano, wymiar pionowy (grubość warstwy zawału) jest zanedbywalnie mały w porównaniu z wymiarami poziomymi, co uzasadnia słuszność założenia o dwuwymiarowości rozwiązywanego problemu.

Osobne zagadnienie stanowi określenie warunków brzegowych dla równań (3.13) i (3.15). W tym celu niezbędna jest znajomość składu chemicznego oraz ciśnienia medium gazowego przepływającego w korytarzach przylegających do obszaru węglowego. Jest to oczywiście głównie powietrze pochodzące z wentylacji, które lokalnie może zawierać metan wydostający się ze zrobów. Dane niezbędne do określenia warunków brzegowych można uzyskać za pomocą odpowiednich pomiarów strumienia powietrza wzdłuż chodnika, co jednak ogranicza możliwość uogólnienia wyników symulacji. Celowe wydaje się zatem dołączenie do układu równań (3.12, 3.13, 3.15) równań różniczkowych opisujących profile ciśnienia i stężeń wzdłuż współrzędnej przestrzennej ξ [m], poprowadzonej wewnątrz chodnika przyścianowego i skierowanej zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza. Wymieniona współrzędna jest na całej swojej długości prostopadła do przekroju poprzecznego chodnika i znajduje się na obwodzie prostokątnego obszaru zrobów, obejmując część jego brzegu. Punkt $\xi = 0$ wyznacza początek korytarza i zarazem wlot powietrza. Przepływ powietrza wzdłuż chodnika ma zawsze charakter turbulentny i może być z dobrym przybliżeniem traktowany jako w pełni rozwinięty w przypadku całej rozpatrywanej długości współrzędnej ξ . Ze względu na fluktuację turbulentną uzyskane wartości udziałów masowych i ciśnienia odpowiadające stanowi stacjonarnemu są (zgodnie z hipotezą Reynoldsa) uśrednione w czasie. Rdzeń turbulentny obejmuje właściwie całą powierzchnię przekroju poprzecznego chodnika, co oznacza, że poszukiwane wielkości, łącznie z uśrednionym w czasie wektorem prędkości powietrza, są

wyłącznie funkcją ξ , a na przekrojach poprzecznych tworzą płaskie pola jednorodne. Założenie o pełnym rozwoju przepływu wydaje się uzasadnione mimo zjawiska wymiany masy na powierzchni zawału, związanej z procesem filtracji zrobów powietrzem i wypływem metanu. Strumienie masy na tej powierzchni są bowiem znikomo małe w porównaniu z masowym wydatkiem powietrza płynącego wzdłuż chodnika. Nie występują również hydrodynamiczne warstwy przyścienne (turbulentna i laminarna) – ze względu na wymienione wyżej zjawiska oraz dużą nieregularność powierzchni.

W ramach fragmentu modelu matematycznego dotyczącego transportu masy w chodnikach przylegających do zrobów poszukiwane wielkości, a więc kolejno nadciśnienie, prędkość liniową medium gazowego i udziały masowe składników, oznaczono dużymi literami: Π , V i Ω_i . Aby określić rozkład ciśnienia wzdłuż współrzędnej ξ przy rozpatrywaniu przepływu powietrza w chodniku, posłużono się pojęciem oporu hydraulicznego. Ze względu na jednowymiarowość tego przepływu można przyjąć, że opisujące go parametry, takie jak ciśnienie całkowite oraz uśredniona w czasie i na powierzchni przekroju prędkość liniowa, spełniają z wystarczająco dobrym przybliżeniem równanie Darcy'ego–Weisbacha o następującej postaci:

$$\frac{p_1 - p_2}{L} = \gamma \frac{\rho(V_\xi)^2}{2d_z} \quad (3.18)$$

w którym V_ξ [m/s] stanowi prędkość ośrodka gazowego wzdłuż współrzędnej ξ , wielkości p_1 i p_2 [Pa] oznaczają ciśnienia całkowite (atmosferyczne) na przeciwległych końcach kanału ściany o długości L i średnicy zastępczej (hydraulicznej) d_z [m], a γ [m⁻³] stanowi tak zwany współczynnik oporu hydraulicznego. Zapisane wyżej równanie można przedstawić również w postaci różniczkowej, ponieważ lewa strona przedstawia iloraz różnicowy ciśnienia w odniesieniu do współrzędnej ξ . Biorąc dodatkowo pod uwagę, że $p = p_0 + \Pi$, otrzymujemy:

$$V_\xi = -E \frac{d\Pi}{d\xi} \quad (3.19)$$

w którym E – jako wielkość odwrotnie proporcjonalna do oporu hydraulicznego – może być traktowana jako pewna miara przepuszczalności dla gazu wewnątrz chodnika. Z równania (3.18) wynika, że wyraża się ona wzorem:

$$E = \frac{2d_z}{\gamma\rho V_\xi} \quad (3.20)$$

i stanowi odpowiednik mnożnika $\frac{k}{\mu}$ występującego we wzorze (3.11). Na podstawie przekształceń zbliżonych do zastosowanych w równaniach (3.9) i (3.11) uzyskuje się następujące równanie różniczkowe zwyczajne, określające profil ciśnienia wzdłuż długości korytarza:

$$\frac{d}{d\xi} \left(K_b \frac{d\Pi}{d\xi} \right) + \dot{s}_{bm} = 0 \quad (3.21)$$

gdzie $K_b = \rho E$, \dot{s}_{bm} – wydajność źródeł masy w przestrzeni chodnika [kg/(m³s)],
 „b” – indeks symbolizujący punkty położone na brzegu obszaru obejmującego zrob.

Obecność źródeł masy w równaniu (3.21) wynika, jak już wcześniej wspomniano, ze zjawiska filtracji zawału powietrzem oraz z wypływu metanu. Oba wymienione procesy hydrodynamiczne zachodzą równocześnie na powierzchni zewnętrznej zrobów. Wielkość \dot{s}_{bm} , która stanowi funkcję współrzędnej ξ , można określić na podstawie prawa Darcy'ego (3.14):

$$\dot{s}_{bm} = -\frac{K}{d} \frac{\partial \pi}{\partial n} \quad (3.22)$$

gdzie:

d – szerokość chodnika [m],

n – współrzędna przestrzenna normalna do powierzchni brzegowej obszaru zrobów, skierowana „od wnętrza na zewnątrz” [m],

K – wielkość wyrażająca się wzorem [3.15].

Należy zaznaczyć, że zarówno pochodna kierunkowa, jak i wielkości definiujące parametr K – czyli k , ρ i μ – są określane wyłącznie w przypadku tych fragmentów brzegu zawału, które mają bezpośredni kontakt ze strumieniem ośrodka gazowego w korytarzu.

Warunki graniczne równania (3.21) określa się dla skrajnych punktów chodnika, a więc $\xi = 0$ (wlot powietrza niezanieczyszczonego metanem) i $\xi = \xi_k$ (wylot ośrodka gazowego zawierającego mieszaninę azotu, tlenu i metanu).

Warunek graniczny odpowiadający wlotowi czystego powietrza o składzie atmosferycznym ma następującą postać:

$$-E \frac{\partial \Pi}{\partial \xi} = V_{\xi_0} \quad \text{dla } \xi = 0 \quad (3.23)$$

gdzie V_{ξ_0} – prędkość liniowa powietrza na wlotowym przekroju poprzecznym chodnika [m/s], czyli wielkość stanowiąca daną wejściową do obliczeń modelowych.

Z kolei dla punktu wylotowego ξ_k zachodzi:

$$\Pi = 0, \quad \text{dla } \xi = \xi_k \quad (3.24)$$

W wyniku rozwiązania równania (3.21), zawierającego człon źródłowy (3.22), przy warunkach granicznych (3.23) i (3.24) uzyskuje się rozkład nadciśnienia $\Pi(\xi)$ wzdłuż chodnika, co następnie umożliwia sformułowanie warunków brzegowych równania ciągłości (3.15). Dla powierzchni wymiany masy między zrobami a ośrodkiem płynącym wzdłuż chodnika występuje zatem warunek brzegowy pierwszego rodzaju o następującej postaci:

$$\pi = \Pi \quad (3.25)$$

Podobne rozumowanie przeprowadza się, aby wyznaczyć rozkłady udziałów molowych poszczególnych składników ośrodka gazowego wzdłuż długości chodnika, to znaczy funkcji $\Omega_i(\xi)$ dla $i = 1, 2, \dots, N - 1$. W tym celu należy rozwiązać układ równań o postaci (3.13),

w którym dla uproszczenia zaniedbuje się dyfuzję turbulentną komponentów wzdłuż kierunku przepływu, uwzględniając jedynie konwekcyjną formę transportu. Jednowymiarowość problemu sprawia, że uzyskuje się równania różniczkowe zwyczajne o następującej postaci:

$$\frac{d}{d\xi}(V_\xi \rho \Omega_i) + M_i \dot{s}_{bi} = 0 \quad (3.26)$$

w których obecność członu źródłowego \dot{s}_{bi} [mol/(m³·s)] wynika, podobnie jak w równaniu (3.21), z wymiany substancji między ośrodkiem gazowym w chodniku a powierzchnią zrobów. Wielkość tę, zależną wyłącznie od ξ , określa się według wzorów (3.7) i (3.11), dotyczących zawału mającego bezpośredni kontakt z chodnikiem. Po dokonaniu odpowiednich przekształceń uzyskuje się następujące wyrażenie:

$$\dot{s}_{bi} = \frac{1}{M_i d} \left(-\varepsilon_b D_{i\rho} \frac{\partial \omega_i}{\partial n} - \varepsilon_b D_i \omega_i \frac{\partial \rho}{\partial n} + v_n \rho \omega_i \right) \quad (3.27)$$

gdzie:

ε_b – porowatość otwarta zrobów w bezpośrednim sąsiedztwie korytarza,

v_n – prędkość liniowa ośrodka filtrującego zroby na powierzchni brzegowej [m/s],

$i = 1, 2, \dots, N - 1$.

Dla równań różniczkowych pierwszego rzędu o postaci (3.26) wystarczy sformułować warunek graniczny wyłącznie na wlocie ośrodka gazowego do chodnika. Mamy zatem:

$$\Omega_i = \Omega_i^0 \text{ dla } \xi = 0, i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.28)$$

gdzie Ω_i^0 – udziały masowe składników gazowych w punkcie wlotowym.

W przypadku zadanego w zbiorze danych wejściowych znanego składu molowego rozważanego ośrodka określa się ich wartości we wstępnej fazie obliczeń na podstawie znajomości poszczególnych mas molowych M_i . Gęstość lokalną ρ określa się według wzoru (3.17), w którym wielkości π i ω zastępuje się wielkościami Π i Ω . Nadciśnienie Π w punkcie wlotowym określane jest przez rozwiązanie równania (3.21).

Rozwiązanie równania (3.26) zawierającego człon źródłowy (3.27), z uwzględnieniem warunku granicznego (3.28), umożliwi (podobnie jak w przypadku pola nadciśnienia) sformułowanie warunków brzegowych pierwszego rodzaju dla równań (3.13):

$$\omega_i = \Omega_i \text{ dla } i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.29)$$

Na fragmentach brzegu zrobów, które nie mają kontaktu z przepływającym powietrzem, zakłada się brak transportu substancji przez powierzchnię brzegową, w związku z tym uzyskuje się warunki brzegowe drugiego rodzaju o następującej postaci:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (3.30)$$

oraz

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial n} = 0 \text{ dla } i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.31)$$

Pole udziału masowego N -tego składnika zarówno wewnątrz zawału ω_N , jak i w przestrzeni korytarza Ω_N oblicza się na podstawie równania (3.12).

Należy zwrócić uwagę na współzależność równań różniczkowych (3.13, 3.15) i (3.21, 3.26), są one bowiem wzajemnie ze sobą powiązane ze względu na wzór (3.17), a także na funkcje określające wymianę substancji na brzegu zawału węglowego (wzory 3.21, 3.27, 3.29). W związku z tym, wobec braku znajomości rozwiązania analitycznego do sformułowanego powyżej nieliniowego problemu brzegowego, istnieje konieczność zastosowania metody numerycznej z dostosowaniem odpowiednich procedur iteracyjnych.

3.5. Szczegółowe rozpisanie równań modelu matematycznego

Ze względu na prostokątny kształt rozważanego obszaru zastosowano kartezjański układ współrzędnych. Równania różniczkowe (3.13) i (3.15) zapisano w postaci dwuwymiarowej (2D) w zmienionej kolejności, która odpowiada przyjętej metodyce ich rozwiązywania. Mamy zatem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) + \dot{s}_m = 0 \quad (3.32)$$

$$v_x = -K \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad \text{oraz} \quad v_y = -K \frac{\partial \pi}{\partial y} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (v_x \rho \omega_i) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y \rho \omega_i) + \varepsilon \rho D_i \left(\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial y^2} \right) + \dot{s}_i^* \quad (3.34)$$

dla $0 \leq x \leq a$ oraz $0 \leq y \leq b$,

gdzie:

v_x, v_y – współrzędne wektora prędkości \vec{v} odpowiednio na osiach Ox i Oy [m/s],

a, b – wymiary prostokąta [m].

Człon źródłowy występujący w równaniach o postaci (3.30) wyraża się następującym wzorem:

$$\dot{s}_i^* = D_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \omega_i \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left(\omega_i \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \right] = M_i \dot{s}_i \quad (3.35)$$

Pozycje porowatości ε we wzorze (3.34) wynikają z tego, że wielkość ta, podobnie jak przepuszczalność k , zależy wyłącznie od współrzędnej x .

Początek układu współrzędnych ($x = 0, y = 0$) pokrywa się z lewym dolnym narożem obszaru, z kolei osie skierowane są odpowiednio: Ox na prawo, Oy prostopadle do Ox i zgodnie z kierunkiem wlotu powietrza, co dotyczy obu wariantów symulacji. Wymieniony punkt

odpowiada wlotowi głównego strumienia powietrza, co również stanowi wspólną cechę tych dwóch wariantów. W wariantcie drugim rozważa się dodatkowo przepływ powietrza chodnikiem także wzdłuż górnego boku obszaru w kierunku wzrostu współrzędnej x . Ewentualny dodatkowy strumień powietrza doprowadzony do skrzyżowania chodników ($x = 0$; $y = b$) uwzględnia się jako wydajność punktowego źródła substancji. W obu wariantach rozważa się przepływy jedynie trójskładnikowej mieszaniny gazowej ($N = 3$), w skład której wchodzi azot ($i = 1$), tlen ($i = 2$) i metan ($i = 3$). Objętościowy skład chemiczny ośrodka gazowego w punkcie wlotowym ($\xi = y = 0$) odpowiada składowi powietrza atmosferycznego niezanieczyszczonego metanem (79% N_2 , reszta O_2). W związku z tym wartości udziałów masowych Ω_i^0 wynoszą odpowiednio $\Omega_1^0 = 0,79 \cdot M_1 / M_p$, $\Omega_2^0 = 1 - \Omega_1^0$ oraz $\omega_3^0 = 0$, gdzie $M_p = 0,79 \cdot M_1 + 0,21 \cdot M_2$ [kg/mol] stanowi masę molową czystego powietrza. Poniżej, wraz ze sformulowaniem warunków brzegowych, przedstawiono powiązanie zmiennych kartezjańskich z uogólnionymi współrzędnymi przestrzennymi ξ i n :

- Wariant pierwszy – kanał ściany przebiega wzdłuż krótszego boku prostokąta, dla $x = 0$, wobec czego $\xi = y$, $\xi_k = b$, $0 \leq y \leq b$. W zapisie wzorów (3.22) i (3.27) występuje $n = x$. Na pozostałych brzegach obszaru (trzy boki prostokąta) występują warunki brzegowe o postaci (3.30) i (3.31), w których $n = x$ dla brzegu $x = b$ równoległego do osi Oy i $n = y$ dla brzegów $y = 0$ oraz $y = b$, równoległych do osi Ox .
- Wariant drugi – w tym przypadku uwzględnia się obecność kanału ściany i chodnika podścianowego, łączących się pod kątem prostym w lewym górnym narożu ($x = 0$, $y = b$) rozważanego obszaru zrobów. W tylnej części chodnika, który odpowiada brzegowi obszaru, może być dostarczany dodatkowy strumień powietrza. Jego wydatek masowy oraz związane z nim strumienie parcjale azotu i tlenu uwzględnia się w równaniach (3.20) i (3.26) w formie punktowego źródła substancji. Uogólniona zmienna przestrzenna ξ przebiega zatem początkowo wzdłuż pionowego brzegu, gdzie $\xi = y$, a następnie zmienia kierunek, w górnym punkcie narożnym pokrywając się z osią Ox . Na tym odcinku $\xi = x$. Punkt końcowy, w którym następuje odpływ powietrza zmieszanego z metanem, określony jest zatem przez współrzędne $\xi_k = a + b$ lub $x = a$, $y = b$. Warunki brzegowe dotyczące lewego brzegu są identyczne jak w wariantcie pierwszym. To samo dotyczy postępowania w punkcie wlotowym powietrza $x = 0$, $y = 0$, gdzie stosuje się warunek graniczny (3.22), zastępując ξ zmienną y . Na odcinku $y = b$, $0 \leq x \leq a$ we wzorach (3.22) i (3.27) współrzędnej normalnej do brzegu, to znaczy n , odpowiada zmienna x . Na pozostałych brzegach występują warunki (3.30) i (3.31), podobnie jak w wariantcie pierwszym.

Osobny problem stanowi identyfikacja źródeł substancji występujących w równaniach o postaci (3.34). Źródła składników powietrza tworzące skalarnie pola fizyczne występują wyłącznie w przepływach wzdłuż chodników i są związane z filtracją w zrobach (wzory 3.27 i 3.29). Pozostałe źródła są związane z dopływem powietrza i mają wyłącznie charakter punktowy (przekroje wlotowe chodników, punkt wylotowy rury doprowadzającej azot do wnętrza zrobów).

Ze względu na bezpieczeństwo załogi istotne jest zjawisko wydzielania się metanu z górotworu podczas eksploatacji pokładu węgla. Wydzielanie to nie odbywa się równomiernie

w przestrzeni zrobów; istnieje jednak konieczność założenia wymienionej jednorodności w ramach uproszczeń modelowych. Podstawową wielkością stosowaną w obliczeniach modelowych jest uśredniona gęstość molowego strumienia metanu doprowadzanego do jednostki przekroju poziomego zrobów \dot{r} [mol/m²]. Wartość tej wielkości, którą traktuje się jako stałą na całej poziomej powierzchni zawału, szacuje się na podstawie jego wymiarów i wyników pomiarów stężenia CH₄ w powietrzu opuszczającym strefę eksploatacji. Wobec założenia o dwuwymiarowości modelu wydajność źródeł metanu wewnątrz zrobów wynosi zatem:

$$\dot{s}_3 = \frac{\dot{r}}{H} \quad (3.36)$$

gdzie: H – uśredniona miąższość zrobów, czyli 3,5-krotna wysokość eksploatowanego pokładu [m].

Opierając się na znajomości wydajności źródeł poszczególnych składników mieszaniny gazowej, oblicza się wydajność całkowitego źródła masy występującej w równaniach (3.15) i (3.32), wykorzystując oczywisty związek:

$$\dot{s}_m = \sum_{i=1}^3 M_i \dot{s}_i \quad (3.37)$$

Wzór (3.37) znajduje również zastosowanie w źródłach o charakterze punktowym, które mają wymiar w molach na sekundę.

Wartości lokalnych udziałów molowych metanu w mieszaninie gazów określa się przy wykorzystaniu równania (3.12). Mamy zatem:

$$\omega_3 = 1 - \omega_1 - \omega_2 \quad (3.38)$$

Ostatnim zagadnieniem związanym z niniejszym modelem jest problem identyfikacji współczynników E występujących we wzorze (3.19) i tym samym w równaniach o postaci (3.21). Równania te odnoszą się do chodników przylegających do zrobów, co może powodować zróżnicowanie wartości E – ze względu na zmienność geometrycznych uwarunkowań wpływających na przepływ powietrza. W rozważanych wariantach liczba wymienionych chodników wynosi odpowiednio: jeden w wariantcie pierwszym, co wymaga znajomości jedynie pojedynczego współczynnika E , i dwa w wariantcie drugim, w którym muszą się pojawić dwa wymienione współczynniki: E_1 i E_2 . Współczynnik E_1 dotyczy odcinka chodnika równoległego do osi Oy , a współczynnik E_2 – do osi Ox . Wartości wymienionych współczynników nie są dostępne w zbiorach danych literaturowych i muszą być traktowane jako tak zwane stałe dobieralne modelu. Można je z pewnym przybliżeniem określić, wykorzystując punktowe pomiary ciśnienia wzdłuż długości chodników. Uzmienniając mianowicie wartości E , można optymalnie dopasować krzywą teoretyczną uzyskaną w ramach numerycznego rozwiązania równania (3.21) do zbioru punktów pomiarowych przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Fragment procedury numerycznej odpowiadający temu właśnie etapowi obliczeń zostanie omówiony w dalszej części rozważań.

3.6. Opis stosowanej metody numerycznej

Zastosowany algorytm obliczeniowy składa się z dwóch części. Pierwsza z nich dotyczy wyznaczania rozkładów ciśnienia p i udziałów masowych składników mieszaniny gazowej ω , w rozważanym obszarze, obejmującym łącznie zroby wraz z przylegającymi do nich chodnikami, którymi przepływa powietrze doprowadzane do ściany eksploatacyjnej.

Kolejny fragment procedury numerycznej dotyczy estymacji stałych dobieralnych E , których uśrednione wartości determinują rozkład ciśnienia powietrza wzdłuż chodnika, gdy zadana jest jego gęstość strumienia masy w punkcie wlotowym (3.21). Jak już wcześniej wspomniano, wykorzystuje się w tym celu wyniki pomiarów ciśnienia wzdłuż długości chodnika. Poniżej przedstawiono skrótową formę opisu stosowanych procedur numerycznych.

3.7. Wyznaczanie dyskretnych pól ciśnienia i stężeń składników mieszaniny gazowej

Metoda objętości kontrolnej (*control volume method*, CVM), którą zastosowano do opisanego wcześniej numerycznego rozwiązania problemu brzegowego, została szczegółowo omówiona w piątym rozdziale monografii S.V. Patankara (1980). W tym miejscu ograniczono się do krótkiego streszczenia przywołanego wykładu, zwracając uwagę na różnice między zapisami poszczególnych równań w tamtej pracy i w niniejszej publikacji. We wstępnej fazie S.V. Patankar posługuje się wielkościami o charakterze uogólnionym, wprowadza więc pojęcie uogólnionego pola skalarnego ϕ odpowiedzialnego za transport uogólnionej wielkości ekstensywnej (UWE), na przykład energii w formie ciepła lub ilości substancji. W najogólniejszym ujęciu zjawisko może mieć charakter niestacjonarny, w związku z czym w równaniach występuje tak zwana pochodna czasowa „ $\partial/\partial t$ ”, gdzie t – czas [s]. S.V. Patankar ogranicza się do podania równań w kartezjańskim układzie współrzędnych, przy czym w celu skrócenia ich zapisu używa konwencji sumacyjnej, wprowadzając zamiast współrzędnych x, y, z uogólnioną współrzędną x_j (w przypadku 2D – $j = 1, 2$). Używa również pojęcia uogólnionej dyfuzyjności dynamicznej Γ , którą traktuje jako wielkość zmienną. Prędkość liniową ośrodka oznacza jako \vec{u} , a jej współrzędne na poszczególnych osiach – jako u_j . Należy również zwrócić uwagę, że w niniejszej monografii $\phi \equiv p, c_p, \Gamma_i = \rho, D_i, i = 1, 2, 3$ (przy czym $D_i \equiv \text{const}$), a także podkreślić, że równania (3.32) i (3.34) odpowiadają równaniom przedstawionym w przywoływanej monografii S.V. Patankara (1980), z tym że równanie (3.32) nie uwzględnia występowania wewnętrznych źródeł ilości substancji. Przedstawione równania różniczkowe są silnie nieliniowe, w związku z czym ich rozwiązanie analityczne (dokładne) nie jest znane. Poszukuje się zatem rozwiązania przybliżonego w postaci dyskretniej, pokrywając rozważany obszar tak zwaną siecią numeryczną (*numerical grid*). Wartości poszukiwanych pól oblicza się w wybranych punktach, stanowiących węzły sieci (*grid points*). Węzły siatki numerycznej mogą być równoodległe albo odległości między nimi, tak zwane kroki całkowania, mogą być różne. Warto nadmienić, że wielkości te symulują różniczki współrzędnych przestrzennych dx i dy . Jeśli niezmiennosc wymienionych kroków dotyczy wszystkich rozpatrywanych osi układu współrzędnych, zastosowana siatka nosi nazwę sieci regularnej. Sieci numeryczne

odpowiadające równaniom zapisanym w układzie kartezjańskim określane są potocznie terminem siatek kartezjańskich.

Każdy z węzłów sieci znajduje się wewnątrz „miniobszaru” noszącego nazwę lokalnej objętości kontrolnej (*local control volume*, LCV), która w przypadku siatek kartezjańskich bywa również określana terminem prostopadłościanu elementarnego. Poszczególne lokalne objętości kontrolne stykają się ze sobą, wymieniając bilansowaną wielkość ekstensywną przez wspólne elementy powierzchniowe (*interfaces*). Transport, który w rozważanym przykładzie ma charakter konwekcyjno-dyfuzyjny, odbywa się jednowymiarowo (1D), „kanałami” poprowadzonymi wzdłuż osi między sąsiadującymi ze sobą węzłami. Długość kanałów jest równa długości danego kroku całkowania. W siatkach kartezjańskich pole przekroju poprzecznego każdego z tych kanałów jest niezmiennie wzdłuż jego długości i równe polu powierzchni wzajemnego styku sąsiadujących ze sobą lokalnych objętości kontrolnych. Elementy powierzchniowe oddzielające od siebie sąsiednie objętości kontrolne przecinają kroki całkowania w połowie ich długości.

U podstaw stosowanej aproksymacji leżą dwa podstawowe założenia:

1. Wyznaczane pole fizyczne ϕ jest jednorodne (ma wartość stałą) wewnątrz pojedynczej lokalnej objętości kontrolnej, zmienia się jednak skokowo na powierzchni wzajemnego styku z sąsiednim elementem objętościowym.
2. Wzdłuż pojedynczego kanału łączącego sąsiadujące ze sobą węzły siatki zakłada się liniową zmienność ϕ , co umożliwia obliczanie wartości parametrów zależnych od tej funkcji, takich jak ρ lub Γ , w dowolnym punkcie kroku całkowania metodą interpolacji liniowej.

Wewnątrz elementu objętościowego lokalnej objętości kontrolnej znajduje się punkt centralny oznaczony jako P (*central point*), podczas gdy węzły sąsiednie (*neighbouring points*) są oznaczane literami „N”, „W”, „S” i „E”. Odpowiednio punkty przebicia powierzchni kontaktowych przez kroki całkowania numerycznego oznacza się małymi literami „n”, „w”, „s” i „e”. W punktach tych definiuje się współrzędne gęstości strumieni (*fluxes*) bilansowanej uogólnionej wielkości ekstensywnej, przy czym pochodne pierwszego rzędu zastępowane są odpowiednimi ilorazami różnicowymi. Zostało to przedstawione w pracy S.V. Patankara (1980) jako przypadek 1D i 2D. Po dokonaniu w drugim z wymienionych przypadków pełnego zapisu bilansu, uwzględniającego salda wszystkich strumieni dopływających i odpływających oraz wewnętrzną produkcję i akumulację transportowanej uogólnionej wielkości ekstensywnej, uzyskuje się pojedyncze równanie dyskretne. Nietrudno zauważyć, że liczba takich równań dotyczących całego obszaru odpowiada dokładnie przyjętej liczbie węzłów, a tym samym liczbie lokalnych objętości kontrolnych. Równań dyskretnych nie formułuje się jedynie w przypadku węzłów położonych na brzegu, gdy wartości pola ϕ są w tych punktach bezpośrednio zadane (tak zwany warunek brzegowy pierwszego rodzaju). Po odpowiednich przekształceniach i uporządkowaniu uzyskuje się układ równań dyskretnych (*discrete equations*), których postać ogólna jest następująca:

$$a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N - a_P \phi_P + b = 0 \quad (3.39)$$

gdzie:

- a_0 – współczynniki dotyczące węzłów sąsiednich ($O \equiv W, E, S, N$),
- b – wyraz wolny.

Człon b i współczynnik a_p w przypadku 2D zdefiniowano w monografii S.V. Patankara (1980) odpowiednimi wzorami. W obu wymienionych wzorach wstępuje element a_p^0 , związany z akumulacją uogólnionej wielkości ekstensywnej (w zagadnieniach stacjonarnych jest on zawsze równy zeru), pojawiają się również człony wynikające z linearyzacji funkcji, która określa ewentualną zależność wydajności wewnętrznego źródła uogólnionej wielkości ekstensywnej od ϕ . Wymieniona linearyzacja jest wskazana, ponieważ w dużym stopniu gwarantuje ona zbieżność procesu iteracyjnego. Wielkości Δx , Δy oznaczają kroki całkowania numerycznego wzdłuż osi x i y .

Liczba równań dyskretnych w układzie jest ściśle związana z zagęszczeniem sieci, jego rozwiązanie prowadzi zaś do wyznaczenia wartości pola ϕ w poszczególnych węzłach. Prezentowana metodyka obliczeniowa ma jednak pewne ograniczenia ze względu na tak zwaną zbieżność i stabilność numeryczną. Dowodzi się, że podstawowym warunkiem zbieżności i fizycznej poprawności rozwiązania jest to, aby w przypadku każdej lokalnej objętości kontrolnej należącej do siatki numerycznej i na każdym etapie obliczeń spełniona była nierówność:

$$a_0 \geq 0 \text{ dla } O \equiv W, E, S, N \quad (3.40)$$

Łatwo sprawdzić, że gdy transport uogólnionej wielkości ekstensywnej ogranicza się w całym obszarze jedynie do dyfuzji, warunek (3.40) jest zawsze spełniony, niezależnie od stopnia zagęszczenia siatki numerycznej (Patankar 1980). Ewentualne jego niespełnienie wynika wyłącznie z pojawienia się konwekcji w otoczeniu punktu P. W pracy S.V. Patankara (1980) przedstawiono również (przypadek 1D, pole ϕ stacjonarne) aproksymację strumieni uogólnionej wielkości ekstensywnej, w wyniku której po przekształceniach uzyskuje się odpowiednie równanie dyskretne. Jak wynika z przedstawionych w monografii wzorów, współczynniki a_w i a_E mogą przyjmować wartości ujemne, niezgodnie z warunkiem (3.40), co prowadzi już na wstępie obliczeń do oscylacji wyników, a następnie zaś – do rozbieżności procedury numerycznej. Spełnienie tego warunku jest możliwe jedynie przy zastosowaniu siatki o bardzo małym kroku, co dotyczy szczególnie przypadków transportu uogólnionej wielkości ekstensywnej, silnie zdominowanego przez konwekcję, a więc o dużych lokalnych wartościach prędkości liniowej.

Podobna analiza została przedstawiona w przypadku pola ϕ dwuwymiarowego (2D) i niestacjonarnego (Patankar 1980), w którym wektor prędkości w układzie kartezjańskim został oznaczony składowymi u i v . Równanie wyrażające bilans elementarny uogólnionej wielkości ekstensywnej zawiera człon akumulacyjny, saldo strumieni uogólnionej wielkości ekstensywnej obliczane na podstawie ich gęstości, wyrażone odpowiednimi wzorami, i człon źródłowy. Równanie to odpowiada lokalnej objętości kontrolnej w postaci fragmentu nieregularnej siatki kartezjańskiej przedstawionej na rysunku zawartym w cytowanej monografii. Gęstości strumieni uogólnionej wielkości ekstensywnej definiowane są na powierzchniach lokalnych objętości kontrolnych, w związku z czym w tych samych miejscach muszą być określone wartości u i v . Zakłada się jednorodny rozkład wymienionych wielkości na powierzchniach, przez które zachodzi transport uogólnionej wielkości ekstensywnej. Prawa strona równania S.V. Patankara (1980) przedstawia wewnętrzne źródło uogólnionej wielkości

ekstensywnej w postaci zlinearyzowanej, co – jak już wcześniej wspomniano – jest wskazane wtedy, gdy S jest funkcją ϕ .

Łatwo zauważyć, że również w tym przypadku występuje możliwość wystąpienia ujemnych współczynników a_0 , jeśli gęstości strumieni konwekcyjnych na powierzchniach ograniczających lokalne objętości kontrolne będą aproksymowane w sposób opisany w cytowanej monografii S.V. Patankara (1980). Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, gdy transport uogólnionej wielkości ekstensywnej jest zdominowany przez konwekcję przy równocześnie zmiennym kierunku wektora prędkości. W celu zagwarantowania spełnienia warunków (3.36) i (3.40) człony konwekcyjne występujące w równaniach o postaci ogólnej aproksymuje się przy użyciu procedur opartych na schemacie UPWIND. Istota tego postępowania jest szczegółowo opisana w pracy S.V. Patankara (1980). Polega ono na odmiennej aproksymacji współrzędnych wektora gęstości konwekcyjnego strumienia uogólnionej wielkości ekstensywnej, które w przypadku 2D określane są wzdłuż kierunku Ox na powierzchniach bocznych lokalnych objętości kontrolnych jako $(u\phi)_w = u_w\phi_w \cap (u\phi)_e = u_e\phi_p$ dla $u_w > 0 \cap u_e > 0$ oraz odpowiednio $(u\phi)_w = u_w\phi_p \cap (u\phi)_e = u_e\phi_e$ dla $u_w < 0 \cap u_e < 0$. Dla kierunku Oy obowiązuje analogiczne postępowanie aproksymacyjne, z uwzględnieniem składowej prędkości v . Tym samym zamiast wartości ϕ_o , obliczonej na podstawie interpolacji liniowej między wartościami ϕ_p i ϕ_o , wprowadza się wyłącznie jedną z wymienionych wielkości. Wybór, którą z nich się zastosuje, zależy wyłącznie od znaku współrzędnych wektora prędkości na odpowiadających im powierzchniach bocznych lokalnej objętości kontrolnej. Wymienione współrzędne oznaczono ogólnie jako u_o dla $o \equiv w, e$ oraz v_o dla $o \equiv s, n$.

W monografii S.V. Patankara (1980) zaproponowano pewne udoskonalenia procedury UPWIND, które zostały określone terminami HYBRID i POWER LAW. Podstawę aproksymacji stanowi tutaj tak zwane rozwiązanie dokładne (*exact solution*). Jest to rozwiązanie analityczne równania transportu konwekcyjno-dyfuzyjnego bezźródłowego przypadku 1D. Dotyczy ono wyżej wymienionych kanałów, którymi zachodzi wymiana uogólnionej wielkości ekstensywnej między sąsiadującymi ze sobą lokalnymi objętościami kontrolnymi. Rozwiązanie to dotyczy przypadku z warunkami brzegowymi pierwszego rodzaju po obu stronach kanału i opiera się na założeniu o jednowymiarowości transportu oraz braku wewnętrznych źródeł uogólnionej wielkości ekstensywnej, co jest podstawą metody objętości kontrolnej. W pracy S.V. Patankara (1980) jest to przedstawione w postaci wzoru, który zawiera ważny parametr bezwymiarowy, znany jako liczba Pécleta. Liczba ta, oznaczana zwykle w literaturze inżynierii chemicznej jako Pe , a przez S.V. Patankara (1980) jako P , stanowi ważne kryterium określające stopień zdominowania transportu połączonego (konwekcyjno-dyfuzyjnego) przez konwekcję. Kryterium to jest określane przy założeniu, że zarówno konwekcja, jak i dyfuzja przebiegają wzdłuż tego samego kierunku. Ponieważ długość kanału, oznaczana w pracy S.V. Patankara (1980) jako L [m], jest w przypadku 2D równa odpowiednim krokom całkowania Δx albo Δy , w niniejszej monografii może być ogólnie zdefiniowana następująco:

$$P_\xi = \frac{v_\xi \Delta_\xi}{\varepsilon D} \quad \text{dla} \quad \xi \equiv x, y \quad (3.41)$$

W procedurach proponowanych przez S.V. Patankara (1980) zaniebduje się człony związane z dyfuzją dla $P > 10$, uwzględniając wyłącznie człony konwekcyjne. Zastosowany w prezentowanej symulacji schemat POWER LAW polega na zastąpieniu wyrażeń zawierających funkcję „ $\exp(P)$ ”, które pochodzą z rozwiązania dokładnego, funkcją w postaci „ $1-0,1|P|^5$ ”, co powoduje, że komputerowe wykonanie obliczeń nie jest już tak pracochłonne. Szczegółowy zapis wzorów definiujących współczynniki równania dyskretnego w przypadku 2D jest dla schematu POWER LAW przedstawiony w monografii S.V. Patankara (1980).

Zastosowanie procedury UPWIND pozwala zatem uniezależnić się od stopnia zagęszczenia siatki numerycznej. Jest to szczególnie istotne w zagadnieniach dwu- lub trójwymiarowych, w przypadku których zarówno czas wykonania obliczeń, jak i stopień obciążenia pamięci operacyjnej komputera silnie zależą od wielkości kroków całkowania. Ceną jest obniżenie tak zwanego rzędu aproksymacji, co skutkuje pewnym obniżeniem dokładności obliczeń i pojawieniem się niekorzystnego zjawiska tak zwanej fałszywej dyfuzji (*false diffusion*) na siatce numerycznej (Patankar 1980). Jak jednak wskazuje praktyka obliczeniowa, wymieniona dokładność jest w pełni zadowalająca w przypadku symulacji numerycznej zjawisk transportu konwekcyjno-dyfuzyjnego istotnych ze względu na potrzeby techniki. Potwierdzają to między innymi wyniki globalnego bilansu transportowanej uogólnionej wielkości ekstensywnej, dokonanego w całym rozpatrywanym obszarze na podstawie wartości uzyskanego pola ϕ i – ewentualnie – sprawdzających badań eksperymentalnych.

Poniżej przedstawiono kolejność postępowania numerycznego w przypadku zastosowanej procedury obliczeniowej. Sekwencja poszczególnych operacji przedstawia się następująco:

1. Wprowadzenie danych wejściowych (odpowiednich wartości liczbowych), liczby węzłów numerycznych wzdłuż poszczególnych osi układu współrzędnych, wymiarów geometrycznych strefy zrobów i chodników, danych dotyczących przepuszczalności zrobów, wydajności wewnętrznych źródeł metanu (jednorodnej w całym obszarze zrobów), punktowej wydajności źródła azotu w miejscu zainstalowania wylotu rury doprowadzającej, prędkości liniowej powietrza i jego składu objętościowego na wlocie do korytarza, właściwości fizycznych poszczególnych składników gazowych (masy molowe, lepkości dynamiczne, kinematyczne współczynniki dyfuzji).
2. Numeryczne generowanie siatki obliczeniowej.
3. Określenie wartości przepuszczalności wewnątrz zrobów na powierzchniach rozdzielających poszczególne objętości kontrolne.
4. Określenie pierwszego przybliżenia poszukiwanych pól fizycznych, stanowiącego podstawę rozpoczęcia obliczeń iteracyjnych.
5. Kolejne etapy procesu iteracyjnego:
 - określenie właściwości fizycznych mieszaniny gazowej, takich jak gęstość (wzór 3.17) i lepkość dynamiczna (algorytm Wilkego), zarówno w węzłach sieci, jak i na powierzchniach rozdzielających poszczególne objętości kontrolne;
 - wyznaczenie dyskretnego pola ciśnienia przez numeryczne rozwiązanie równań (3.32) i (3.21);
 - obliczenie współrzędnych wektora prędkości liniowej medium gazowego według wzorów Darcy'ego (3.33), przy wykorzystaniu pola ciśnienia określonego w ramach poprzedniego kroku;

- obliczenie dyskretnych pól udziałów masowych azotu i tlenu wewnątrz zrobów oraz w chodnikach na podstawie równań (3.34) i (3.26);
- obliczenie dyskretnego pola udziału masowego metanu wewnątrz zrobów i w chodnikach na podstawie wzoru (3.38);
- potraktowanie wyników uzyskanych w dotychczasowych krokach jako kolejnego przybliżenia i powrót do punktu początkowego.

Wartości liczbowe pola ciśnienia oraz udziałów masowych azotu i tlenu oblicza się, rozwiązując określony układ równań liniowych przy użyciu algorytmu TDMA (*tridiagonal matrix algorithm*) (Patankar 1980). Proces iteracyjny zostaje przerwany, gdy uzyskane wartości poszukiwanych pól zmieniają się w sposób zaniedbywalnie mały (poniżej wartości błędów ewentualnego pomiaru).

3.8. Określanie wartości stałych dobieralnych dotyczących przepływu powietrza wzdłuż chodnika

Przedstawiony wyżej algorytm umożliwia wyznaczenie pól ciśnienia oraz udziałów masowych składników mieszaniny gazowej w przypadku zadanych wartości E (3.19) zarówno wewnątrz zrobów, jak i wzdłuż chodników. Wielkość ta, stanowiąca pewną miarę przepuszczalności powietrza przepływającego korytarzem, determinuje (przy zadanym wydatku masowym na wlocie) wartość nadciśnienia Π w punkcie wlotowym, tym samym kształt i stopień nachylenia krzywej $\Pi(\xi)$ w kierunku wylotu. Jak już wcześniej wspomniano, wartości E powinny być określane na podstawie danych pomiarowych przedstawiających eksperymentalną postać wymienioną wyżej dystrybucji w postaci dyskretnej, to znaczy elementy ciągów Π_k^0 oraz ξ_k^0 , gdzie k stanowi indeks przyporządkowany danemu punktowi pomiarowemu ($k = 1, 2, \dots, K$), z kolei K oznacza liczbę tych punktów wzdłuż współrzędnej ξ . Wartości ξ_k^0 odpowiadające przekrojom korytarza, w przypadku których dokonano pomiaru ciśnienia, na ogół nie pokrywają się z węzłami sieci obliczeniowej. W celu optymalnego przybliżenia rozkładu $\Pi(\xi)$ uzyskanego numerycznie do odpowiadających mu danych eksperymentalnych rozważa się następującą funkcję:

$$\Phi = \sum_{k=1}^K \left[\Pi(E_1, E_2, \dots, \xi_k^0) - \Pi_k^0 \right]^2 \quad (3.42)$$

w której wielkości E_1, E_2, \dots są parametrami występującymi w równaniach (3.19), zapisanych kolejno dla korytarzy o numerach 1, 2 i tak dalej. Dla wariantu pierwszego z pojedynczym chodnikiem (kanałem ściany) występuje wyłącznie $\Pi(E)$, w przypadku wariantu drugiego, w ramach którego rozważa się dwa wzajemnie do siebie prostopadłe chodniki (kanał ściany i chodnik przyścianowy), należy uwzględnić $\Pi(E_1, E_2)$. W drugim przypadku wskaźnik „1” oznacza korytarz przebiegający zgodnie z osią Oy , a wskaźnik „2” dotyczy chodnika równoległego do osi Ox .

Funkcja $\Pi(\xi)$, której wartości są obliczane wyłącznie w węzłach sieci, również ma charakter dyskretny, a to oznacza brak jej danych liczbowych dotyczących punktów pośrednich. Wymienione dane można jednak określić z wystarczającą dokładnością, stosując interpolację

liniową i wprowadzając funkcje liniowe definiujące nadciśnienie Π także w przedziałach między węzłami. Uzyskuje się w ten sposób funkcję składaną, której graficznym obrazem jest linia „łamana”. Zapis matematyczny wymienionej funkcji przedstawia się następująco:

$$\Pi(E_1, E_2, \dots, \xi_k^0) = \Pi_i - \frac{\Pi_i - \Pi_{i+1}}{\Delta\xi} (\xi_k^0 - \xi_j) \quad (3.43)$$

dla $\xi_j \leq \xi_k^0 < \xi_{j+1}$, $\xi_{j+1} = \xi_j + \Delta\xi$
gdzie:

- $\Delta\xi$ – odległość międzywęzłowa [m],
- j – zmienna dyskretna przyporządkowana danemu węzłowi sieci na współrzędnej ξ ,
($j = 1, 2, \dots, J$), J – liczba wymienionych węzłów wzdłuż współrzędnej.

Dowodzi się, że wyrażenie o postaci (3.42), określone jako funkcja wyłącznie parametrów E dla danego zbioru danych doświadczalnych, ma tylko jedno minimum, ponieważ zależność $\Pi(\xi)$ jest zawsze monotoniczna (wartości nadciśnienia maleją w kierunku przepływu). Oznacza to, że manewrując odpowiednio wartościami E , można optymalnie „umieścić” rozkład $\Pi(\xi)$ uzyskany obliczeniowo pośród odpowiednich wartości eksperymentalnych. Wymienione postępowanie jest zatem przykładem zastosowania znanej metody najmniejszych kwadratów, w której wartości funkcji przybliżającej dane eksperymentalne określone są wyłącznie numerycznie. Wymaga to jednak wielokrotnego wyznaczania dyskretnych pól ciśnienia i udziałów molowych składników zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim podrozdziale, co, niestety, znacznie wydłuża czas wykonywania obliczeń.

Metodyka numeryczna zastosowana w przypadku wariantu pierwszego do określania wymienionego wyżej minimum również ma charakter iteracyjny. Polega ona na obliczaniu trzech kolejnych wartości funkcji Φ według wzorów (3.42) i (3.43) dla trzech – również kolejno następujących po sobie – wartości E , które różnią się od siebie o stałą, wstępnie założoną wartość kroku ΔE . Przed rozpoczęciem obliczeń ustala się wstępne wartości E i ΔE . Pierwszy etap procedury polega na zbadaniu, czy poszukiwanie minimum wymaga zwiększania, czy obniżania wartości E . Jeśli zatem dla trzech pierwszych wartości argumentu E wprowadzonych w kolejności rosnącej otrzymamy odpowiadający im trójelementowy ciąg wartości Φ o charakterze malejącym, kontynuujemy proces iteracyjny przez kolejne sukcesywne zwiększanie wartości wszystkich trzech argumentów do momentu, gdy drugi z elementów ciągu Φ osiągnie wartość niższą od dwóch pozostałych, co można zapisać w postaci następującego układu nierówności:

$$\Phi_2 < \Phi_1 \cap \Phi_2 < \Phi_3 \quad (3.44)$$

Proces iteracyjny zostaje wówczas wstrzymany, a wartość E_{\min} , odpowiadająca „min Φ ”, jest aproksymowana przez obliczanie położenia wierzchołka paraboli zawierającej wszystkie trzy punkty o współrzędnych $E_l, \Phi(E_l)$ ($l = 1, 2, 3$). Równanie wymienionej paraboli określa się na podstawie wielomianu Lagrange’a.

Przypadek odwrotny, wskazujący na wzrost wartości Φ wraz ze wzrostem E , oznacza z kolei, że wstępnie przyjęta wartość argumentu jest zawyżona, a zatem istnieje konieczność jej sukcesywnego zmniejszania o wartość ΔE , aż do uzyskania efektu zapisanego w postaci układu nierówności (3.43). W tym przypadku ciąg trójelementowy E_l dla $l = 1, 2, 3$ jest ciągiem

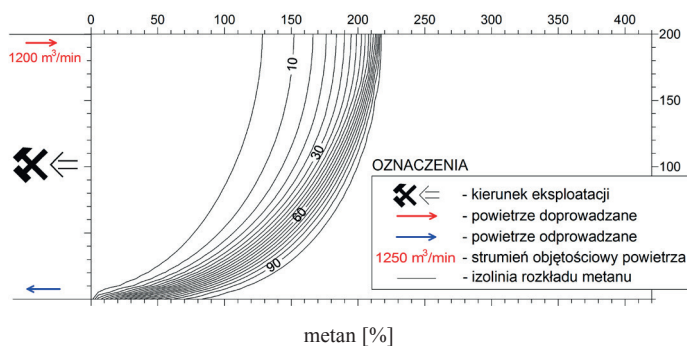
malejącym podczas etapu poszukiwania „min Φ ”. Po osiągnięciu efektu (3.40) wartość E_{\min} oblicza się analogicznie jak uprzednio.

W przypadku wariantu drugiego, dla którego $\Phi = \Phi(E_1, E_2)$, gdzie stałe dobieralne E_1 i E_2 , stanowiące argumenty funkcji Φ , odnoszą się do dwóch prostopadłych do siebie chodników, istnieje konieczność poszukiwania minimum funkcji o dwóch zmiennych niezależnych, co, niestety, wymaga o wiele dłuższego czasu wykonywania obliczeń. Ustalając wartość E_2 , określa się $E_{1\min}$, podobnie jak to było w przypadku wariantu pierwszego. Następnie oblicza się $E_{2\min}$, przyjmując jako niezmienną wartość uprzednio obliczonej stałej $E_1 = E_{1\min}$. Określanie wartości stałych $E_{1\min}$ i $E_{2\min}$ w opisany sposób powtarza się aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności przy obliczaniu min Φ . Uzyskane ostateczne wartości stałych E wraz z odpowiadającymi im dyskretnymi polami Π , π , Ω , oraz ω_i dla $i = 1, 2, 3$ stanowią ostateczny wynik obliczeń.

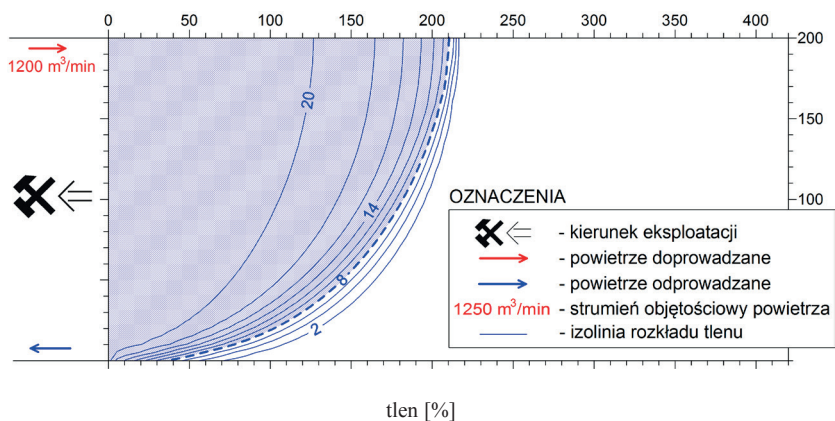
3.9. Przykład obliczeniowy

Aby zobrazować model matematyczny, wykonano przykładowe obliczenia w dwóch omawianych wariantach prowadzenia ściany eksploatacyjnej w pokładzie węgla.

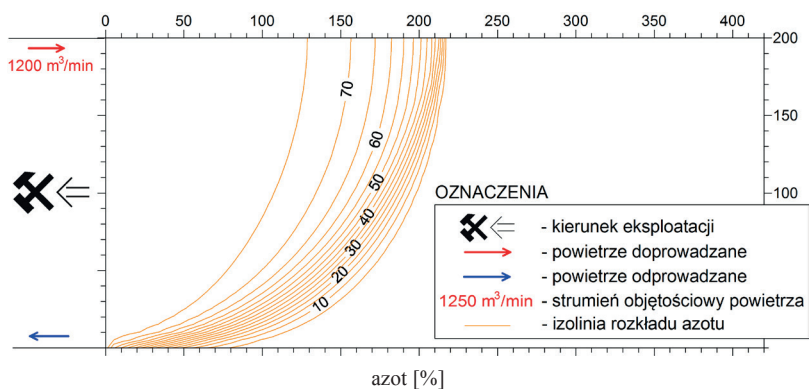
W wariantcie pierwszym (ściana przewietrzana w systemie na „U”) przyjęto następujące parametry geometryczne ściany: długość ściany – 200 m, wybieg ściany, w przypadku którego prowadzono obliczenia – 420 m, miąższość eksploatowanego pokładu – 2 m. Do kanału ściany dopływa 1200 m³/min powietrza świeżego, przy stracie naporu w ścianie wynoszącej 130 Pa. W obliczeniach przyjęto opór rozwarstwienia skał stropowych równy 2 MPa, co odpowiada stropowi słabemu, spękanemu, opadającemu, łatwo przechodzącemu w zawał. Takie stropy są tworzone przez skały zbudowane na przykład z łupków ilastych. Do rozpatrywanych zrobów wydziela się 10 m³/min CH₄. Na rysunkach przedstawiono: mapy izolinii rozkładu stężenia metanu w zrobach (rys. 3.7), mapy izolinii rozkładu stężenia tlenu w zrobach (rys. 3.8), mapy izolinii rozkładu stężenia azotu w zrobach (rys. 3.9), mapy izolinii rozkładu prędkości powietrza w zrobach (rys. 3.10), rozkład wektorowy prędkości powietrza w zrobach (rys. 3.11), uzyskane na podstawie obliczeń w opracowanych programach komputerowych.



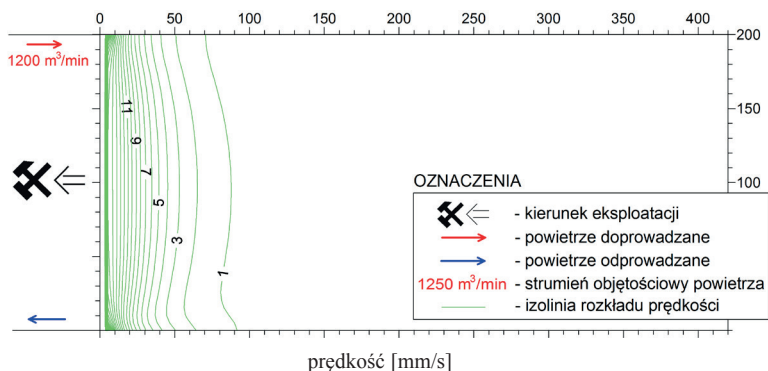
Rysunek 3.7. Mapa izolinii rozkładu stężenia metanu w zrobach przy systemie wentylacji na „U”



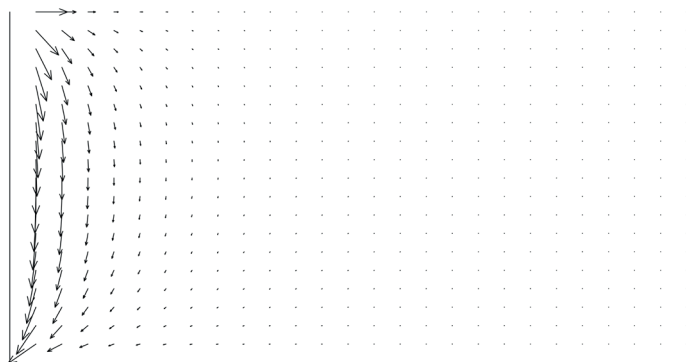
Rysunek 3.8. Mapa izolinii rozkładu stężenia tlenu w zrobach przy systemie wentylacji na „U”



Rysunek 3.9. Mapa izolinii rozkładu stężenia azotu w zrobach przy systemie wentylacji na „U”



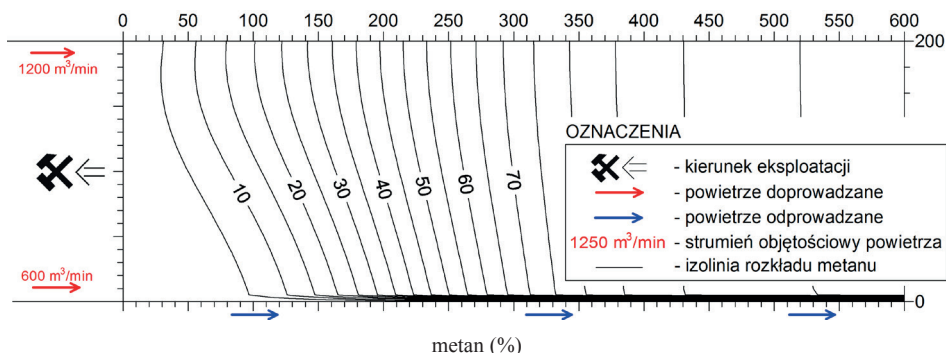
Rysunek 3.10. Mapa izolinii rozkładu prędkości powietrza w zrobach przy systemie wentylacji na „U”



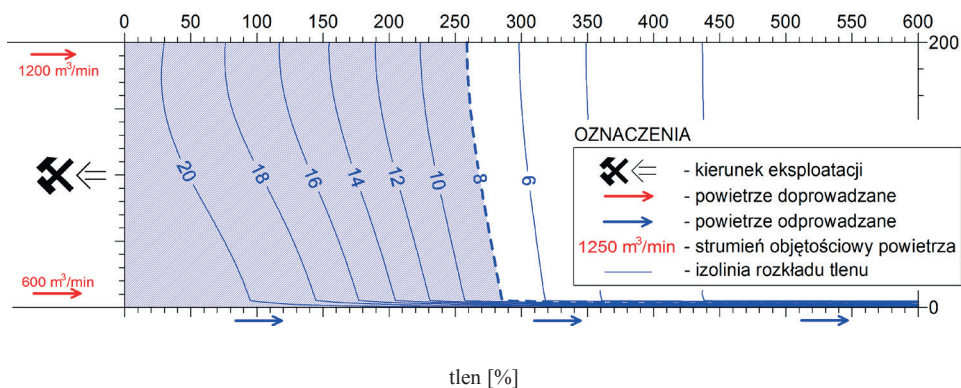
prędkość – wektory (długość wektora odniesienia 10 mm/s)

Rysunek 3.11. Rozkład wektorowy prędkości powietrza w zrobach przy systemie wentylacji na „U”

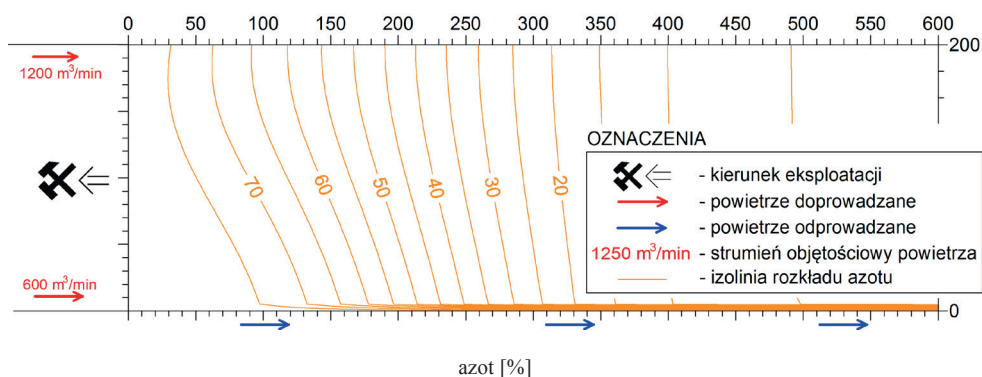
W wariantcie drugim (ściana przewietrzana na „Y”) przyjęto następujące parametry geometryczne ściany: długość ściany – 200 m, wybieg ściany, w przypadku którego prowadzono obliczenia – 600 m, miąższość eksploatowanego pokładu – 2 m. Do kanału ściany dopływa 1200 m³/min powietrza świeżego, przy stracie naporu w ścianie wynoszącej 130 Pa. Wylot powietrza ze ściany jest doświeżany strumieniem powietrza świeżego w ilości 600 m³/min. Strata naporu w chodniku podścianowym wynosi 30 Pa. W obliczeniach przyjęto opór rozwarstwienia skał stropowych równy 2 MPa, co odpowiada stropowi słabemu, spękanemu, opadającemu, łatwo przechodzącemu w zawal. Takie stropy są tworzone przez skały zbudowane na przykład z łupków ilastych. Do rozpatrywanych zrobów wydziela się 10 m³/min CH₄. Na rysunkach przedstawiono: mapy izolinii rozkładu stężenia metanu w zrobach (rys. 3.12), mapy izolinii rozkładu stężenia tlenu w zrobach (rys. 3.13), mapy izolinii rozkładu stężenia azotu w zrobach (rys. 3.14), mapy izolinii rozkładu prędkości powietrza w zrobach (rys. 3.15), rozkład wektorowy prędkości powietrza w zrobach (rys. 3.16), uzyskane na podstawie obliczeń w opracowanych programach komputerowych.



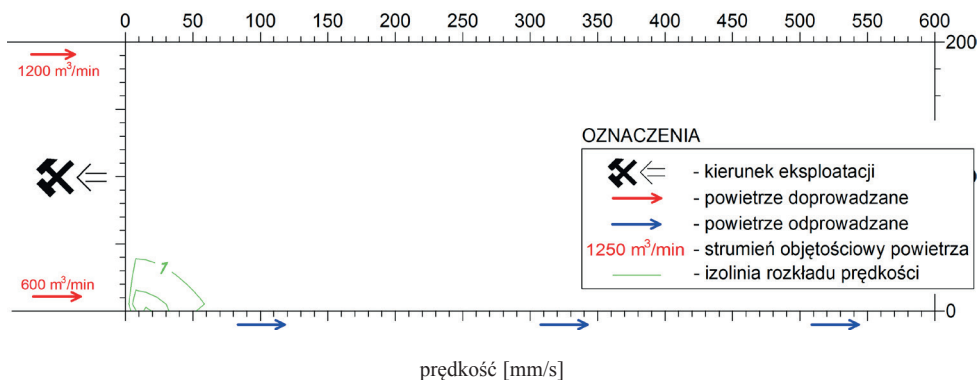
Rysunek 3.12. Mapa izolinii rozkładu stężenia metanu w zrobach przy systemie wentylacji na „Y”



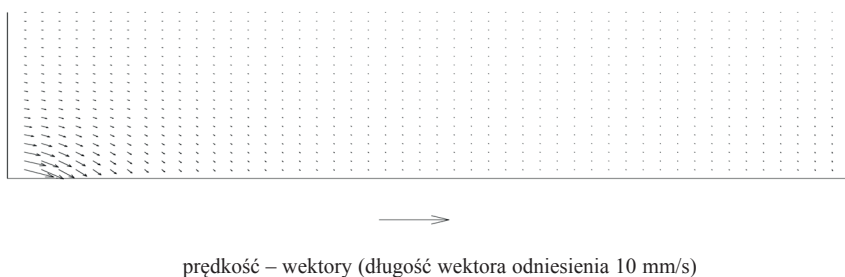
Rysunek 3.13. Mapa izolinii rozkładu stężenia tlenu w zrobach przy systemie wentylacji na „Y”



Rysunek 3.14. Mapa izolinii rozkładu stężenia azotu w zrobach przy systemie wentylacji na „Y”



Rysunek 3.15. Mapa izolinii rozkładu prędkości powietrza w zrobach przy systemie wentylacji na „Y”



Rysunek 3.16. Rozkład wektorowy prędkości powietrza w zrobach przy systemie wentylacji na „Y”

3.10. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono symulację transportu substancji wewnątrz porowatej struktury powstałej po wyeksploatowaniu pokładu węgla systemem ścianowym w kopalni podziemnej. Zroby po wyeksploatowaniu pokładu węgla traktowane są jako pozioma prostokątna płyta o wymiarach poziomych x i y oraz o wymiarze pionowym $3,5m$, gdzie m jest miąższością eksploatowanego pokładu.

W wymienionym obszarze następuje filtracja powietrza pochodzącego z chodników przylegających do poziomych brzegów płyty. Wewnątrz zrobów, w przestrzeni porów, występują nieuniknione złożone procesy utleniania węgla i wypływ metanu z warstw nasyconych tym gazem.

W obliczeniach uwzględniono dodatkowo lokalną emisję azotu o zadanym wydatku, doprowadzonego rurociągiem do wnętrza zawału wzdłuż dłuższego brzegu obszaru. W wyniku symulacji uzyskano następujące dyskretne dwuwymiarowe (2D) pola fizyczne występujące w przestrzeni zawału:

- pole przyrostu ciśnienia,
- pole prędkości pozornej mieszaniny składników gazowych,
- pole koncentracji molowej azotu N_2 ,
- pole koncentracji metanu CH_4 ,
- pole koncentracji tlenu O_2 .

Opracowany algorytm obliczeniowy oparty jest na procedurze znanej pod nazwą metoda objętości kontrolnej, którą w Polsce nazywano również metodą bilansów elementarnych.

Programy komputerowe użyte w omawianych badaniach umożliwiają określanie wyżej wymienionych pól w dwóch wariantach różniących się warunkami brzegowymi. Wyniki tych obliczeń pozwalają na ocenę wybuchowości mieszaniny metanu w zrobach oraz rozkładu zawartości tlenu przyczyniającego się do procesów utleniania pozostawionych w zrobach resztek węgla.

4. Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu do wyrobisk

4.1. Kształtowanie się stężenia gazów w zrobach ścian zawałowych – analiza problematyki w literaturze

Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na migrację gazów zrobowych jest w praktyce górniczej znany jako „oddychanie zrobów”. Zjawiska te, o czym była już mowa, stały się również przedmiotem badań w Stanach Zjednoczonych, a ich wyniki zaprezentowano (Krog, Heasley 2017; Lolon i in. 2017) w ramach sympozjum (16th North American Mine Ventilation Symposium, Colorado). W warunkach polskich od wielu lat kopalnie prowadzą rejestrację zmian ciśnienia, z sygnalizacją i ostrzeganiem za pomocą transparentów i komunikatów „Uwaga zniżka baryczna”. Dotychczas przyjmuje się, że jedynie zniżki ciśnienia są groźne, mogą bowiem powodować wypływ gazów zrobowych do kanału ściany czy wyrobisk przyległych albo wypływ gazów pożarowych z izolowanych pól pożarowych. Jeśli przyjąć, że zainicjowanie wybuchu może odbywać się gdzieś w zrobach, to nie można wykluczyć, że również szybki lub długotrwały wzrost ciśnienia może stanowić niebezpieczeństwo, powodując migrację gazów w zrobach (*Raport merytoryczny...* 2011; Wasilewski 2017; Wasilewski i in. 2012; *Raport końcowy...* 2013) i powstanie wybuchowej atmosfery w pobliżu ogniska pożarowego, na przykład szczelinowego zagrzenia, co w konsekwencji może doprowadzić do zapalenia albo wybuchu w zrobach.

Badania eksperymentalne rozkładu gazów w zrobach prowadzono w kopalniach czeskich (Adamus 2011), pobierając okresowo próby powietrza, które poddawano analizie chromatograficznej w laboratorium. Znane są rozwiązania światowe w zakresie monitorowania i kontroli gazów zrobowych (Brady i in. 2009) pod kątem zagrożenia pożarowego, oparte na „systemie rurkowym” (*tube bundle system*), które są z powodzeniem stosowane w kopalniach w Australii, Stanach Zjednoczonych, Indiach i Chinach. Systemy te polegają na analizie chromatograficznej na powierzchni prób powietrza pobieranych ze zrobów i przestrzeni otamowanych za pomocą centralnej pompy i systemów rurkowych. Ze względu jednak na rozległość i strukturę polskich sieci wentylacyjnych przeniesienie tego rozwiązania wprost do krajowych kopalń jest technicznie niemożliwe.

Stosowane obecnie w polskim górnictwie metody pomiaru – oparte na analizach chemicznych próbek gazów w laboratorium kopalnianym, pobieranych w celu wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych – nie gwarantują bezpośredniej i ciągłej kontroli procesów zachodzących w zrobach przy ocenie zagrożenia. Powoduje to, że na bieżąco nie ma pewności, czy zakres zastosowanych działań profilaktycznych służących do likwidacji zagrożenia zapłonu w zrobach dobrany jest właściwie. Stało się to podstawą podjęcia prób opracowania nowych metod i narzędzi pomiarowych umożliwiających prowadzenie ciągłej kontroli parametrów atmosfery w zrobach.

W latach 2006–2007 opracowano zintegrowany czujnik zrobowy ZCZ (pomiar koncentracji gazów CH₄, O₂), za pomocą którego rejestrowano parametry powietrza zrobowego w systemie gazometrii automatycznej (Cimr i in. 2006). Kontynuując ten kierunek badań w ramach projektu badawczego rozwojowego „Badania rozkładu stężeń gazów w zrobach ścian zawałowych w aspekcie zagrożeń zapaleniami i wybuchami metanu w zrobach”, realizowanego w latach 2008–2011 w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, rozszerzono zakres czujnika zrobowego o pomiar koncentracji gazów CH₄, O₂, CO, CO₂ (Wasilewski i in. 2010; *Raport merytoryczny...* 2011; Wasilewski 2017; IMG PAN 2012; Wasilewski i in. 2012; *Raport końcowy...* 2013). Nowe podejście do kontroli zrobów wymagało wielu badań i eksperymentów. Uzyskane wyniki (Wasilewski 2013a; 2013b; Wasilewski i in. 2013; Wasilewski, Araszczyk 2014) były obiecujące, uznano jednak, że metoda nie sprawdziłaby się w praktyce. Przyczyną były trudności w utrzymaniu czujników w ciężkich warunkach w zrobach i kłopoty z kalibracją niedostępnych czujników.

Wykorzystując uzyskane doświadczenia, opracowano rozwiązanie (*Raport końcowy...* 2013) oparte na automatycznym poborze prób powietrza ze zrobów zamiast zanurzenia zintegrowanego czujnika zrobowego w przestrzeni zrobów. Zgodnie z tą koncepcją powstał zintegrowany czujnik zrobowy ZCZ-MP, z automatycznym układem poboru prób powietrza ze zrobów oraz pomiaru koncentracji gazów zrobowych CH₄, O₂, CO, CO₂ i rejestracją w systemie gazometrii automatycznej. Układ automatycznie zasysa próbę powietrza ze zrobów węzami w układzie pneumatycznym, a pomiar stężenia gazów zrobowych wykonywany jest za pomocą czujników w stacji pomiarowej zabudowanej w wyrobisku na zewnątrz zrobów.

Przyjęte rozwiązania pozwoliły w długookresowych obserwacjach rejestrować zmiany rozkładów stężeń gazów powstające również na skutek zmiany ciśnienia powietrza.

W pracy doktorskiej A. Przystolik (2016) przeprowadził badania szczelności izolacji zrobów i nieczynnych wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego. Z analizowanych przypadków wynika, że zmiany ciśnienia barometrycznego przenoszą się w wyrobiskach zamkniętych tamami wentylacyjnymi oddzielającymi w taki sposób i z taką prędkością, że nie mają one wpływu na wartość wskazań różnicy ciśnień czujnika pracującego w służbie wentylacyjnej, która wynika z dyssypacji energii otrzymanywanej na tym oporze lokalnym. Mimo że opory aerodynamiczne śluz są wyraźnie różne, nie uwidaczniały się jednak zmiany ciśnienia w tamach wskutek zmiany ciśnienia barometrycznego.

Analiza zebranych pomiarów Δp_T (różnica ciśnień w tamie) uzyskanych z czujnika MRC na tamach izolacyjnych daje inne spojrzenie na uzyskane zmiany ciśnienia w tamie izolacyjnej odczytywane na „U” rurce. Okresowe zmiany różnicy ciśnień na tamach nie są dowodem zmian przebiegających w sposób ciągły.

Analizując wzajemne zmiany Δp_b (różnica ciśnienia barometrycznego) i Δp_T , A. Przy-stolik (2016) doszedł do wniosku, że mimo trwającej ogólnie zniżki barycznej występują krótkotrwałe okresy stabilizacji ciśnienia. W okresach tych wyraźnie widać wyhamowanie, a następnie zmianę trendu różnicy ciśnień w tamie.

Podjęte w pracy badania miały na celu opracowanie nowej metody. Aby osiągnąć założony cel, przeprowadzono szczegółową analizę dziewięciu sposobów oceny ilościowej lub jakościowej stanu izolacji wyrobisk górniczych zaproponowanych przez różnych autorów. Przeanalizowano także uwarunkowania stosowania tam izolacyjnych, uwzględniając obowiązujące przepisy górnicze, funkcje, które spełniają tamy izolacyjne w kopalniach węgla kamiennego, i czynniki wpływające na intensywność łącznego przepływu gazów przez tamę i górotwór stanowiący otoczenie tej tamy.

Przeprowadzono długotrwałe obserwacje i analizy zmian różnicy ciśnień w tamach izolacyjnych w czynnej kopalni węgla kamiennego, badano korelację zachodzącą między zmianami ciśnienia atmosferycznego a zmianami różnicy ciśnień w tamach izolacyjnych oraz przeprowadzono obszerne badania na modelu fizycznym.

W dalszej części rozdziału skupiono się na określeniu zależności między wzrostem stężenia metanu w wyrobiskach a zmianami ciśnienia barometrycznego i wydobycia.

4.2. Zależność wydzielania metanu do wyrobisk od zmian ciśnienia barometrycznego

Poniżej podjęto próbę określenia wpływu wywieranego przez ciśnienie barometryczne – mierzone w wyrobiskach w rejonach prowadzonych ścian eksploatacyjnych – na wydzielanie się metanu. Dodatkowo spróbowano określić wpływ wielkości wydobywania na emisję metanu do wyrobisk górniczych. Analizie poddano cztery ściany przewietrzane systemem na „U”, ale przy zastosowaniu różnych rodzajów odmetanowania. Przyjęte do analizy ściany to:

- dwie ściany z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U”:
 - D-2 w pokładzie 412łg+łd i 412łg KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”;
 - D-2 w pokładzie 410 KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”;
- jedna ściana z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „Y”, a następnie na „U”:
 - F-3 w pokładzie 406/1 KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”;
- jedna ściana z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U” z nadległym chodnikiem drenażowym:
 - B-11 w pokładzie 348 KWK „Krupiński”.

Uzyskane wyniki badań parametrów prowadzonych ścian eksploatacyjnych stanowią podstawę ich oceny jakościowej i określenia zależności z nich wynikających (N. Szlązak, Zasadni 2004). Każdy wynik pomiarowy obciążony jest błędem, który ogranicza zasób informacji o mierzonym parametrze. Podjęto próbę ustalenia rzeczywistej zależności między zadanymi wielkościami fizycznymi. W tym celu dokonano oceny statystycznej otrzymanych wyników. Należy jednak pamiętać, że wielkość błędów popełnianych przy wyciąganiu wniosków

z analizy umożliwia jedynie wnioskowanie statystyczne (*ibidem*). Uzyskane wyniki traktuje się jako próbę losową prostą, a parametry mierzone – jako zmienne zależne.

Aby ustalić wpływ ciśnienia barometrycznego na wydzielanie się metanu do ścian eksploatacyjnych z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U” i na „U” z chodnikiem nadległym, na podstawie analizy statystycznej wyznaczono wartości podstawowych estymatorów charakteryzujących model probabilistyczny wielkości stężenia metanu, ciśnienia, które mierzono na wylotach z analizowanych ścian, a także wydobywania. Następnie dokonano oszacowania ilościowego wpływu czynników, które mogą być połączone zależnością statystyczną zwaną korelacją lub zależnością funkcyjną. Liczbowo natężenie współzależności zmiennych wyraża się najczęściej przez współczynnik korelacji liniowej Pearsona r_{xy} (Brandt 1998; Klonecki 1999). W określaniu współzależności na podstawie losowych prób dwóch zmiennych x, y współczynnik ten wylicza się z wzoru:

$$r^{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{S_x S_y} \quad (4.1)$$

gdzie:

S_x, S_y – odchylenia standardowe zmiennych x i y ,
 $\text{cov}(x, y)$ – kowariancja wyrażona wzorem:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \quad (4.2)$$

gdzie \bar{x}, \bar{y} – średnia arytmetyczna z próby o licznosci n ,

Współczynnik ten może przyjmować wartości dodatnie i ujemne. Znak współczynnika korelacji mówi o kierunku zależności. W analizie statystycznej zwykle przyjmuje się następującą skalę korelacji między zmiennymi (Klonecki 1999):

$r(x, y) = 0$	brak korelacji,
$0 < r(x, y) < 0,1$	korelacja nikła,
$0,1 < r(x, y) < 0,3$	korelacja słaba,
$0,3 < r(x, y) < 0,5$	korelacja przeciętna,
$0,5 < r(x, y) < 0,7$	korelacja wysoka,
$0,7 < r(x, y) < 0,9$	korelacja bardzo wysoka,
$0,9 < r(x, y) < 1$	korelacja pełna.

Występowanie korelacji na podstawie analizy wyników pomiarowych nie uogólnia wnioskowania statystycznego o identycznej zależności w całej populacji (rzeczywistości). W celu potwierdzenia tego faktu stosuje się test istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona. Wówczas weryfikuje się hipotezę zerową ze współczynnikiem korelacji, który jest równy zero. Należy nadmienić, że istotność zależy przede wszystkim od liczebności próbki. Na podstawie bardzo licznej próbki nawet bardzo słaba zależność może być uznana za istotną, podczas gdy małe próbki nie pozwalają na ocenę wiarygodności nawet niezwykle silnych zależności. W związku z tym określa się funkcję, która podaje wartość poziomu istotności, informującego o prawdopodobieństwie popełnienia błędu

polegającego właśnie na odrzuceniu hipotezy o tym, że badana zależność nie występuje w populacji generalnej. Ta właśnie hipoteza (brak zależności w populacji generalnej) nosi nazwę hipotezy zerowej.

Wspomnianą wcześniej weryfikację przeprowadza się na podstawie statystyki t (Brandt 1998; Klonecki 1999) przedstawionej wzorem:

$$t = \frac{r(x, y)}{\sqrt{1 - r^2(x, y)}} \sqrt{n - 2} \quad (4.3)$$

Wartość statystyki nie powinna się różnić od zera, obszar krytyczny wyznacza się więc z relacji prawdopodobieństwa:

$$P(|t| \geq t_{krytyczne}) = \alpha \quad (4.4)$$

Jeżeli wartość statystyki t jest większa od obszaru krytycznego na przyjętym poziomie istotności α , to hipotezę zerową odrzuca się na korzyść takiej hipotezy, według której współczynnik korelacji jest różny od zera.

Chcąc ustalić wpływ ciśnienia barometrycznego i wydobywania na stężenie metanu w przypadku poszczególnych ścian, wyznaczono wartości współczynników korelacji. Następnie podano współczynnik determinacji, który stanowi miarę dokładności dopasowania zależności liniowej i informuje o zależności między zmiennymi za pomocą korelacji liniowej. Wartość tego współczynnika obliczana jest z zależności:

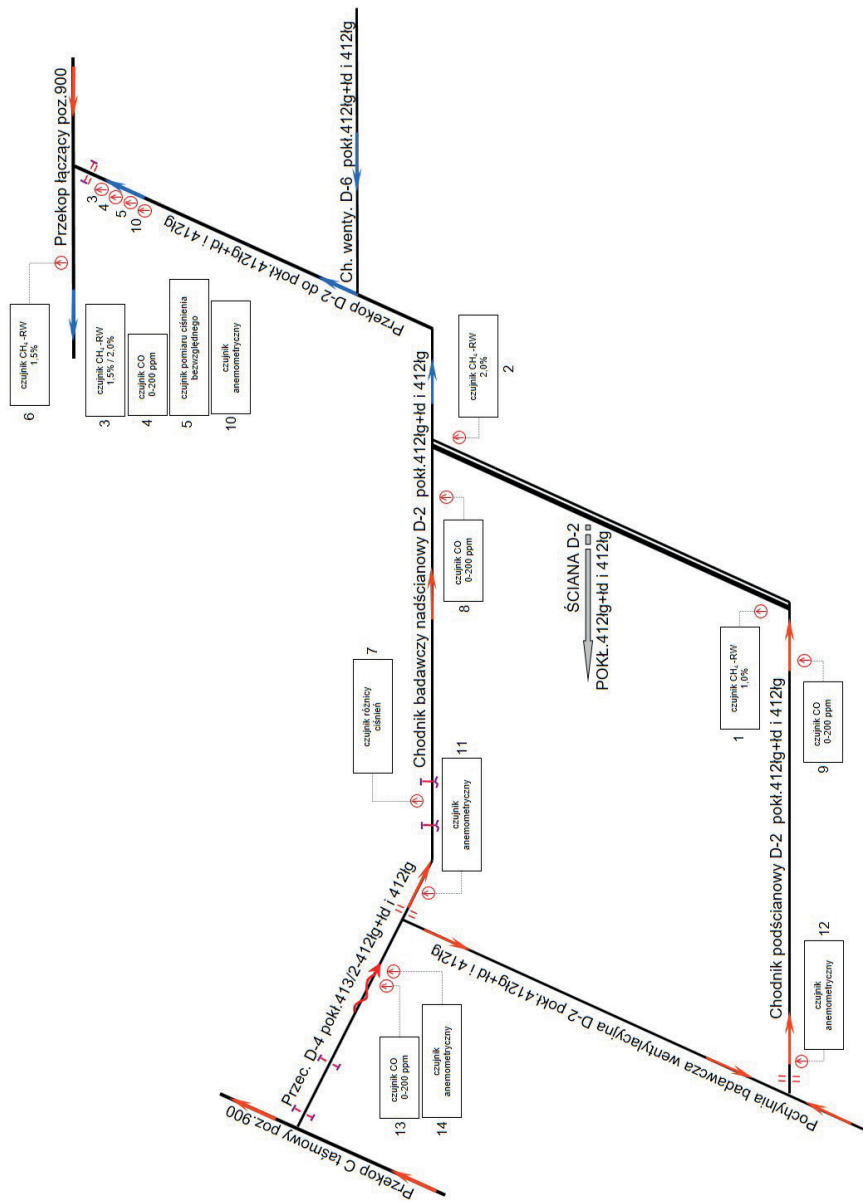
$$R_d = (r(x, y))^2 \quad (4.5)$$

Kolejnym krokiem było podanie wartości statystyki t oraz prawdopodobieństwa i określenie istotności statystycznej badanego parametru.

4.3. Ocena wpływu ciśnienia barometrycznego i wydobywania na wydzielanie metanu w ścianach z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U”

4.3.1. Ściana D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”

Ściana D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg przewietrzana była systemem na „U”. Schemat systemu przewietrzania wraz z zabezpieczeniami telemetrycznym przedstawiono na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Schemat przewietrzania ściany D-2 w pokładzie 412lg+hd i 412lg wraz z rozmieszczeniem czujników gazometryjnych i czujników anemometrycznych

Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie istniejącej zależności między zmianami ciśnienia barometrycznego a emisją metanu do wyrobiska. Badania wykonywano w okresie od marca do maja 2016 roku. Analizie poddano wyniki z czujnika pomiaru ciśnienia bezwzględ- nego, zabudowanego w przekopie D-2 do pokładu 412łg+łd i 412łg, w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przekopem łączącym poziom 900 (czujnik nr 5, rys. 4.1). Pomiary stężenia metanu wykonano za pomocą czujnika CH₄-RW, zabudowanego pod stropem (nie niżej niż 10 cm) w przekopie D-2 do pokładu 412łg+łd i 412łg, w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przekopem łączącym poziom 900 (czujnik nr 3, rys. 4.1). Z zebranych wyników wyznaczono średnie godzinowe ciśnienia i stężenia. Uzyskane wyniki porównano z wydobyciem osiągniętym w analizowanym okresie. W przypadku wybranych do analizy obszarów dokonano analizy statystycznej. Na rysunku 4.2 przedstawiono wyniki z całego badanego okresu.

Dzięki analizie pomiarów zamieszczonych na rysunku 4.2 pokazano duże fluktuacje stężenia metanu, ciśnienia i wydobycia. Z przedstawionych danych można jednak wywnioskować, że w marcu nastąpił dosyć znaczny spadek stężenia metanu. W związku z dużym zagęszczeniem wyników i utrudnioną ich interpretacją postanowiono wykreślić zmiany miesięczne (rys. 4.3, 4.5, 4.7), a następnie obszarowe (rys. 4.4, 4.6, 4.8).

Marzec 2016 roku

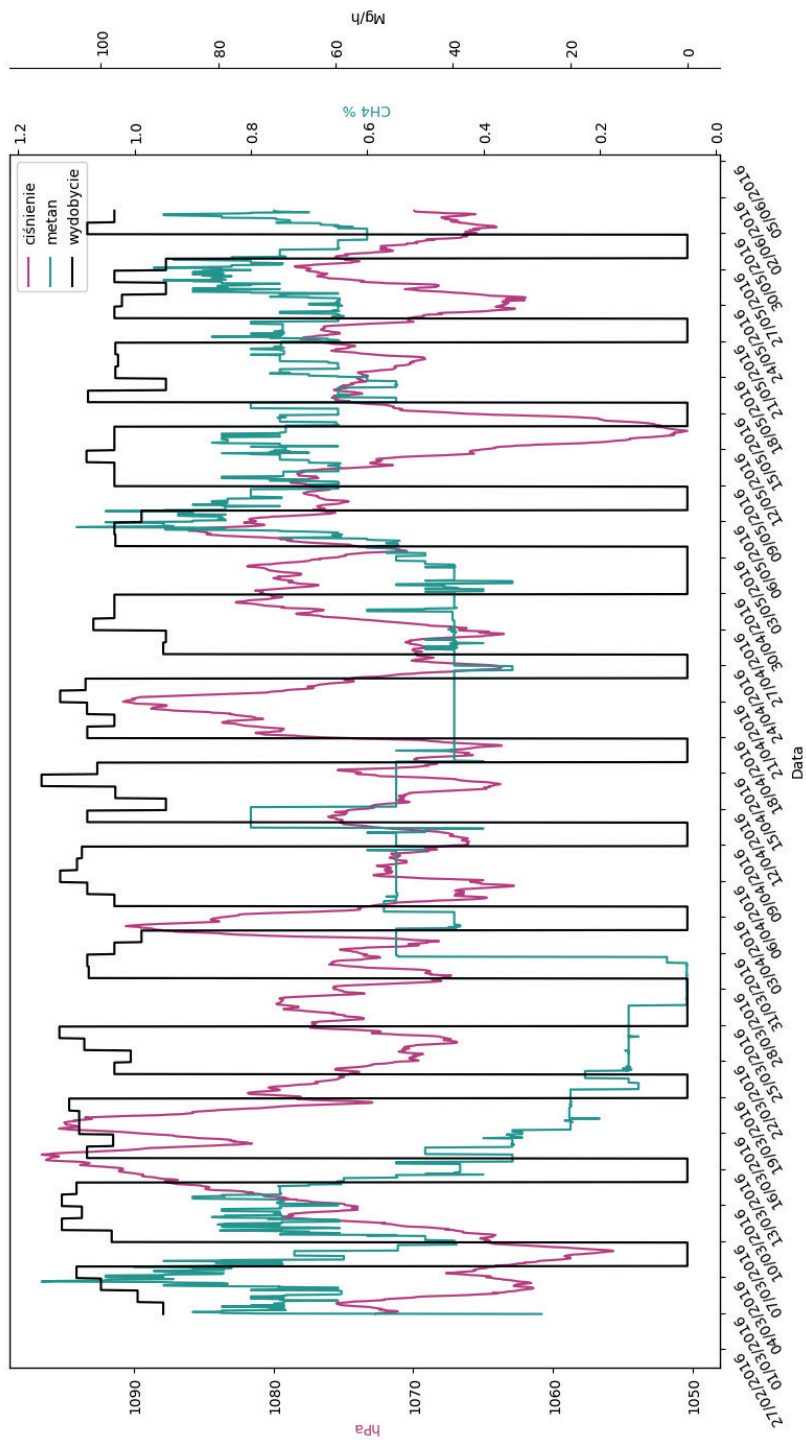
Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.3 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.1:

- w okresie od 4 do 14 marca (obszar I) – ciśnienie 6 marca osiągnęło minimalną wartość 1055,69 hPa i w ciągu następných ośmiu dni wzrosło o 38,59 hPa, do wartości 1094,28 hPa,
- w okresie od 14 do 20 marca (obszar II) – spadek ciśnienia (14 hPa), jego wzrost (13 hPa) i kolejny spadek (22 hPa),
- w okresie od 20 do 25 marca (obszar III) – spadek ciśnienia (14 hPa) i jego wzrost o 10 hPa,
- w okresie od 27 do 31 marca (obszar IV) – spadek ciśnienia (12 hPa) i jego wzrost o 9 hPa.

Łącznie w okresie od 14 do 24 marca zanotowano spadek ciśnienia o 29,5 hPa.

W celu dokładnego przeanalizowania wyników wykreślono zmiany ciśnienia, stężenia i wydobycia w poszczególnych obszarach. Rezultaty przedstawiono na rysunku 4.4. Przeprowadzono również analizę statystyczną, aby określić korelację między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane zamieszczono w tabeli 4.2.

Zmiany ciśnienia zobrazowane w poszczególnych obszarach nie powodowały gwałtownych wahań stężenia metanu (rys. 4.4). Wartość jego zaczęła spadać dopiero po 11 marca (0,9% – rys. 4.4a) i tendencja ta utrzymywała się właściwie do końca miesiąca (poniżej 0,1% – rys. 4.4d).



Rysunek 4.2. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg w okresie od marca do maja 2016 roku

Tabela 4.1

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie w wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg i wydobytcie

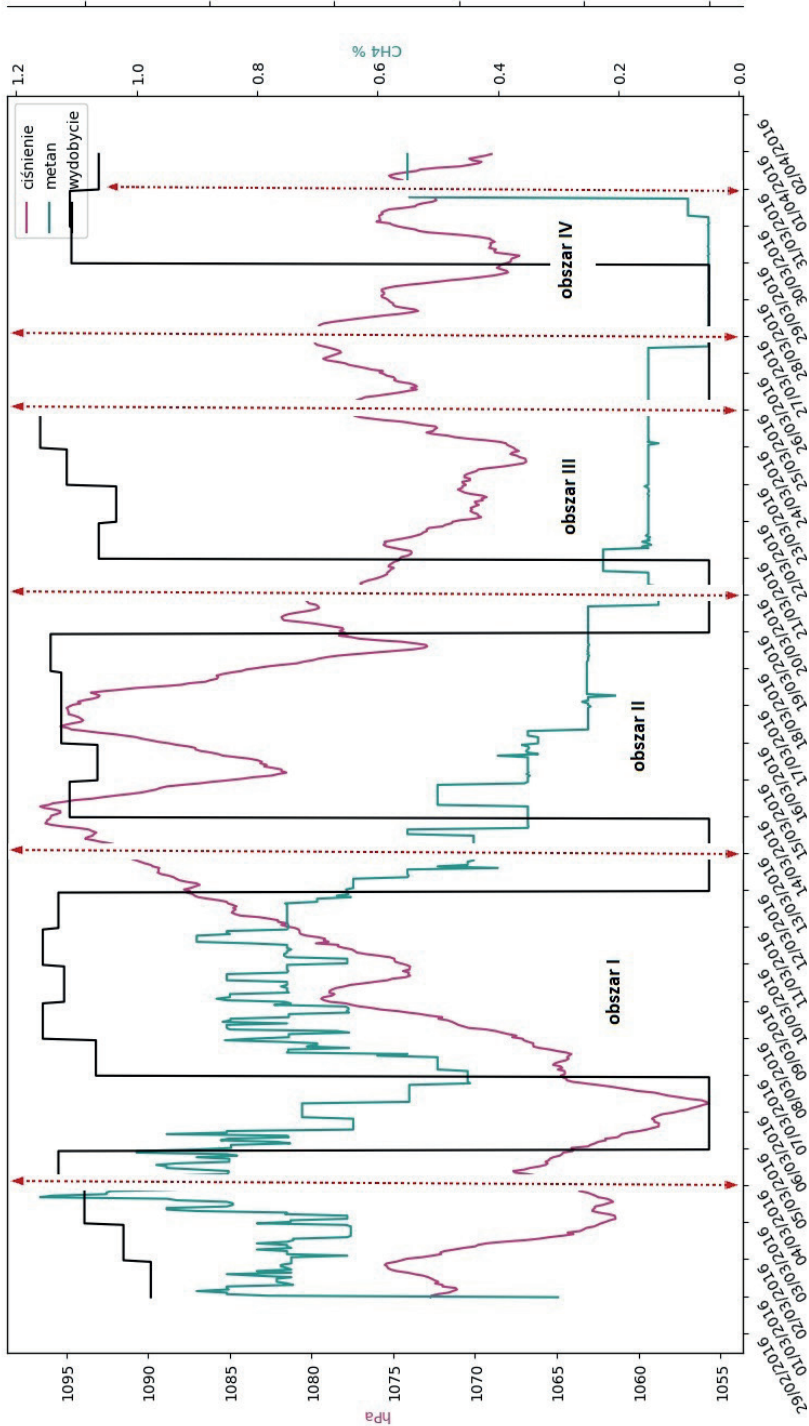
Obszar	Marzec	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	234	1073,84	1072,41	1075,27	1074,02	1055,69	1094,28	11,09082	0,725029
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	234	0,70	0,68	0,72	0,75	0,35	1,05	0,15638	0,010223
Obszar II	wydobytcie	234	63,91	57,38	70,43	103,25	0,00	106,67	50,67996	3,313053
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	144	1086,36	1085,26	1087,46	1085,92	1072,92	1096,58	6,69243	0,557702
Obszar III	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	144	0,30	0,28	0,31	0,25	0,13	0,50	0,08533	0,007111
	wydobytcie	144	85,53	79,20	91,87	103,04	0,00	105,42	38,45620	3,204684
Obszar IV	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	120	1072,35	1071,77	1072,93	1072,15	1066,87	1079,26	3,19830	0,291963
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	120	0,16	0,15	0,16	0,15	0,13	0,23	0,02566	0,002343
Obszar IV	wydobytcie	120	80,51	73,16	87,85	97,71	0,00	107,08	40,64108	3,710006
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	95	1073,24	1072,51	1073,97	1073,66	1067,29	1079,57	3,56534	0,365796
Obszar IV	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	95	0,08	0,06	0,10	0,05	0,05	0,55	0,11145	0,011434
	wydobytcie	95	51,64	41,18	62,11	102,08	0,00	102,33	51,37251	5,270708

W obszarze I (rys. 4.4a) początkowo stężenie metanu spadło z 1,05% do poniżej 0,5%, mimo spadku ciśnienia o ponad 10 hPa, a następnie jego wzrostu. Na uwagę zasługuje fakt, że między 5 a 7 marca nie prowadzono w ścianie wydobywania. Ponowne uruchomienie wydobywania (rys. 4.4a) spowodowało wzrost stężenia metanu do około 0,9%. Notowany między 6 a 14 marca wzrost ciśnienia (o prawie 40 hPa) nie wpłynął istotnie na zmiany stężenia metanu. Utrzymywało się ono na stabilnym poziomie (od 0,65% do 0,9%) aż do 11 marca, a następnie zaczęło spadać.

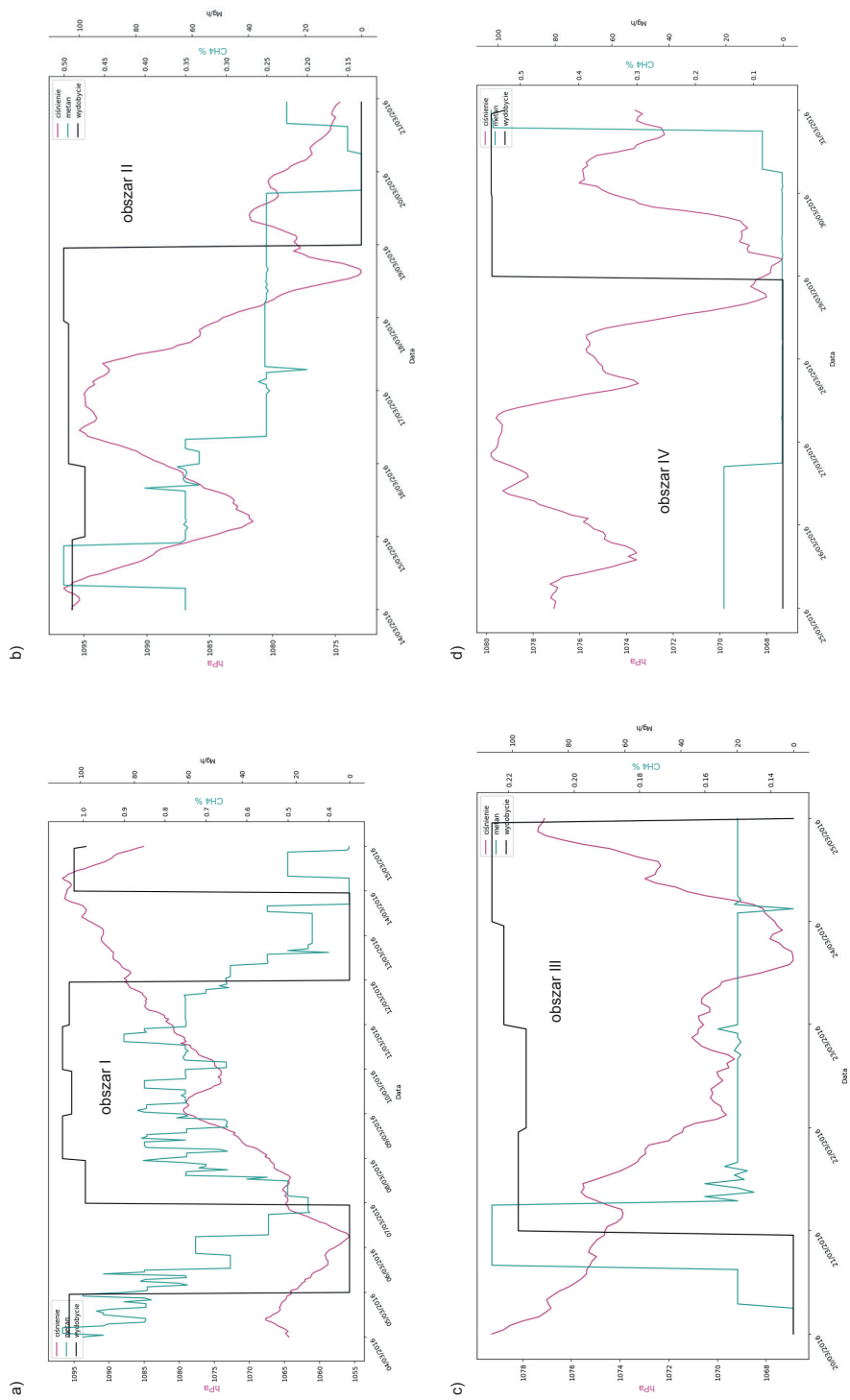
Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 4.2 (obszar I), należy zauważyć, że korelacja między stężeniem a wydobywaniem była wysoka i zgodnie skierowana. Na podstawie analizy współczynnika determinacji można stwierdzić, że w rozważanym przypadku nie więcej niż 30% wyników stężenia metanu można było wytłumaczyć liniowym wpływem wydobywania, przy czym da się to określić ze stuprocentowym prawdopodobieństwem. W przypadku ciśnienia korelacja była słaba, ale przeciwnie skierowana. Oznacza to, że wraz ze wzrostem ciśnienia następował spadek stężenia metanu. Na korelację tę miał prawdopodobnie wpływ wspomniany wyżej spadek stężenia, rozpoczynający się właśnie 11 marca. Należy zaznaczyć, że korelacja ta była statystycznie nieistotna i wyjaśniona zależnością liniową w maksymalnie 10% przypadków.

Analiza wyników w obszarze II (rys. 4.4b) pokazuje, że mimo wzrostów i spadków ciśnienia przebieg zmian stężenia metanu miał charakter malejący. W obszarze tym korelacja między stężeniem a wydobywaniem była zgodnie skierowana (tab. 4.2), ale przeciętna i statystycznie nieistotna. Jedynie około 15% wyników stężeń metanu można było wytłumaczyć liniową zależnością od wydobywania. Zależność stężenia metanu od ciśnienia była również zgodnie skierowana, co sugeruje, że wzrost ciśnienia pociągał za sobą wzrost stężenia metanu.

Postępujący po 11 marca spadek stężenia, najlepiej widoczny na rysunku 4.3, ale także na rysunku 4.4, można z dużym prawdopodobieństwem tłumaczyć zmiennym zakresem robót górniczych. Z analizy wykresów na rysunkach 4.4c (obszar III) i 4.4d (obszar IV) wynika, że od 21 marca do końca miesiąca stężenie metanu, mimo zmian ciśnienia o około 12 hPa (tab. 4.1), nie ulegało większym wahaniom, co więcej – utrzymywało się właściwie na stałym poziomie. Dzięki analizie statystycznej (tab. 4.2) można stwierdzić, że w obszarze III stężenie metanu było zgodnie skorelowane z ciśnieniem i przeciwnie z wydobywaniem. Obie te korelacje są słabe i statystycznie nieistotne. W obszarze IV stężenie metanu było zgodnie skorelowane liniowo z wydobywaniem, ale w niespełna 8% przypadków, z kolei korelacja z ciśnieniem była nikła. Słaba i przeciwna korelacja z wydobywaniem w obszarze III wynikała prawdopodobnie z faktu, że w całym badanym okresie (od 21 do 25 marca) wydobywanie było właściwie stałe, to zaś powodowało w miarę stałą emisję metanu. Początkowy skok stężenia metanu przed wzrostem wydobywania był konsekwencją jego zmian w obszarze II. W obszarze IV korelacja była słaba, ale zgodna, co wynika z tego, że od 25 do 29 marca w ogóle nie prowadzono robót górniczych. Wznowienie wydobywania 29 marca spowodowało wzrost stężenia metanu (30 marca), co niewątpliwie wpłynęło na wielkość korelacji.



Rysunek 4.3. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+ld 1412lg w marcu 2016 roku



Rysunek 4.4. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobycia w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+ld i 412lg w marcu 2016 roku:
a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III; d) obszar IV

Tabela 4.2

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg

Marzec	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,296715	0,540695
	R_d	0,088040	0,292351
	T	-4,73256	9,790102
	Prawdopodobieństwo	0,000004	0,000000
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,367671	0,385041
	R_d	0,135182	0,148257
	T	4,711310	4,971606
	Prawdopodobieństwo	0,000006	0,000002
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja przeciętna
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,209983	-0,241783
	R_d	0,044093	0,058459
	T	2,333011	-2,70674
	Prawdopodobieństwo	0,021341	0,007803
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar IV	$r(x, y)$	0,008007	0,273280
	R_d	0,000064	0,074682
	T	0,077223	2,739701
	Prawdopodobieństwo	0,938612	0,007372
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Kwiecień 2016 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.5 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.3:

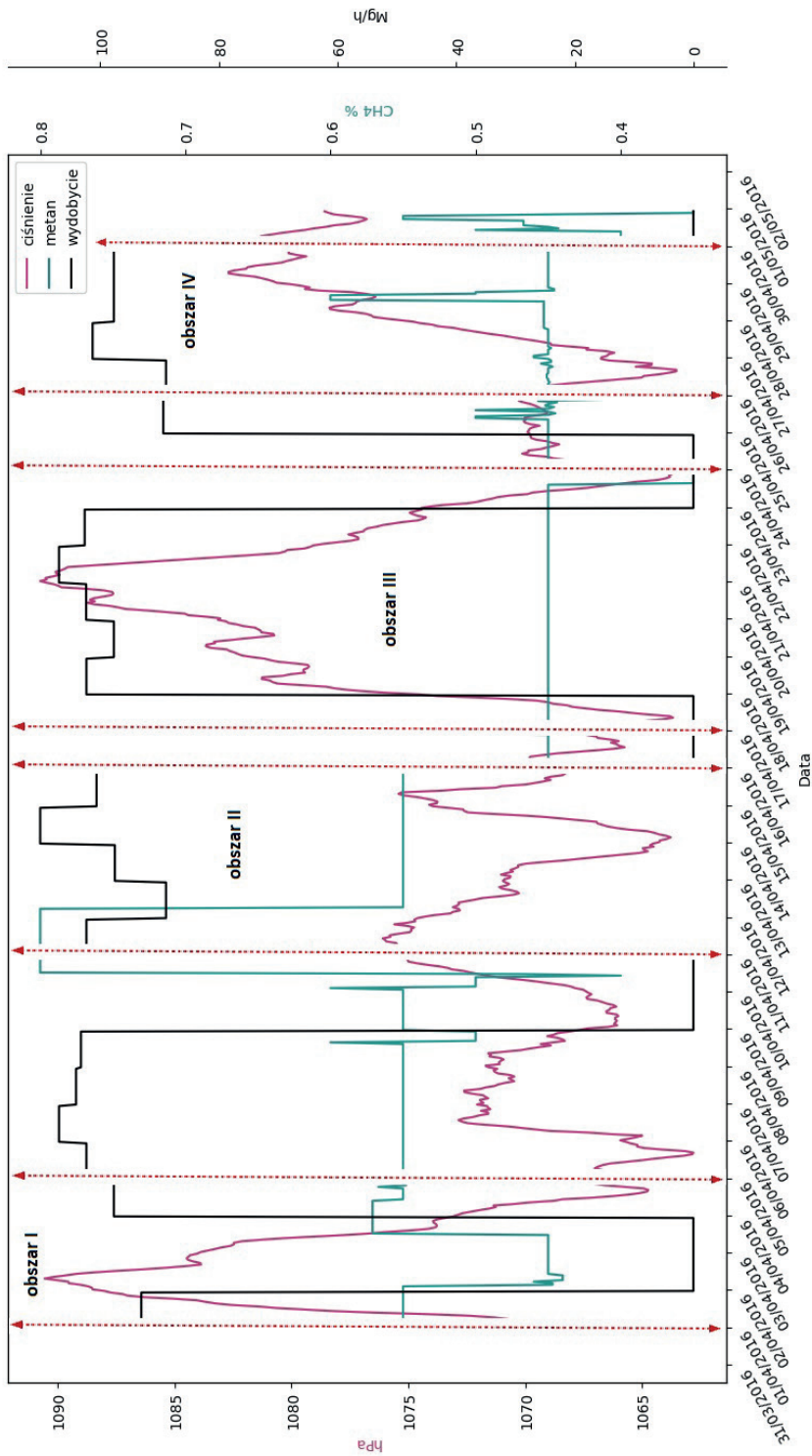
- w okresie od 1 do 6 kwietnia (obszar I) – ciśnienie między 1 a 3 kwietnia wzrosło z wartości 1068 hPa do 1090,56 hPa (22,56 hPa), aby w piątej dobie spaść do wartości 1062,80 hPa (27,76 hPa);
- w okresie od 11 do 16 kwietnia (obszar II) – spadek ciśnienia o 12 hPa, a następnie jego wzrost o 11 hPa, do wartości 1075 hPa zanotowanej 15 kwietnia;

- w okresie od 17 kwietnia do 24 kwietnia (obszar III) – między 17 a 21 kwietnia nastąpił wzrost ciśnienia z wartości 1063,64 hPa do 1090,75 hPa (27,11 hPa), a następnie spadek do wartości 1064 hPa (26,75 hPa) zanotowanej 24 kwietnia;
- w okresie od 26 kwietnia do 1 maja (obszar IV) – ciśnienie między 26 a 30 kwietnia wzrosło z wartości 1063,53 hPa do 1082,69 hPa (19,16 hPa), a następnie zaczęło spadać, osiągając 1 maja wartość 1077 hPa (5,69 hPa).

Podobnie jak w marcu, w celu dokładnego przeanalizowania wyników z kwietnia wykreślono zmiany ciśnienia, stężenia i wydobycia w poszczególnych obszarach. W kontekście badania wpływu zmian ciśnienia na zmiany stężenia metanu najbardziej interesujące wydają się obszary I i III, tam bowiem zanotowano największe zmiany ciśnień. W wybranych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu określenia korelacji między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.4.

Analiza obszaru I (rys. 4.6a) pokazała, że przy wzroście ciśnienia stężenie metanu było stałe, a jego spadek zanotowano dopiero 2 kwietnia. Podobna sytuacja wystąpiła zresztą 16 kwietnia (spadek stężenia z 0,55% do 0,40%) w obszarze II (rys. 4.6b) i 23 kwietnia (spadek stężenia z 1,1% do 0,35%) w obszarze III (rys. 4.6c). Z rysunku 4.6a–c wyraźnie wynika, że zmiany te były spowodowane spadkiem wydobycia. Między 3 a 4 kwietnia (rys. 4.6a) stężenie metanu wzrosło (wzrost wydobycia), aby utrzymywać się później na stałym poziomie do 7 kwietnia (obszar I) mimo zmian ciśnienia. Dwunastego kwietnia nastąpił spadek stężenia metanu z wartości 0,8% do 0,55% (rys. 4.6b) przy równoczesnym spadku wydobycia. W zakresie największej zmiany ciśnienia, w obszarze III, wartość stężenia metanu była stała (rys. 4.6c). Podobna sytuacja dotyczyła wydobycia – jego wzrost 18 kwietnia nie zmienił wartości stężenia metanu. Dopiero po 23 kwietnia spadek wydobycia spowodował duży spadek stężenia metanu (rys. 4.6c), a następnie jego gwałtowny wzrost (rys. 4.5). W obszarze IV (rys. 4.6d) w okresie od 26 do 30 kwietnia stężenie metanu utrzymywało się na stałym poziomie mimo sumarycznej zmiany ciśnienia o 18 hPa. Zanotowano jednak dwa gwałtowne wzrosty stężenia: 26 i 28 kwietnia. Ich pojawienie się mogło być opóźnioną reakcją na zmiany wydobycia, najpierw po 25 kwietnia (rys. 4.5), następnie między dwudziestą siódmą a dwudziestą ósmą dobą tego miesiąca (rys. 4.6d). Mimo że pik z 28 kwietnia przypadał na spadek ciśnienia, nie należy zakładać, że skok ten wywołała zmiana ciśnienia rzędu 1 hPa. Dowodem na to może być fakt, że następująca tuż po tym wydarzeniu zmiana ciśnienia o około 5,5 hPa nie wpłynęła w ogóle na zmianę stężenia metanu. W trzydziestej dobie kwietnia stężenie metanu podlegało dużym zmianom, co było konsekwencją wstrzymania wydobycia.

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 4.4 (obszar I), należy zauważyć, że korelacja między stężeniem a wydobyciem była wysoka i zgodnie skierowana. Na podstawie współczynnika determinacji można stwierdzić, że w rozważanym przypadku nie więcej niż 50% wyników stężenia metanu można wytłumaczyć liniowym wpływem wydobycia, przy czym dało się to określić ze stuprocentowym prawdopodobieństwem. W przypadku ciśnienia korelacja była wysoka, ale przeciwnie skierowana. Oznacza to, że wraz ze wzrostem ciśnienia następował spadek stężenia metanu. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że korelacja z wydobyciem była wyższa, a dane przedstawione na rysunku 4.6a wyraźnie pokazują, że zmiany stężenia były wywołane zmiennością wydobycia. Na zmiany te nałożył się występujący w tym okresie wzrost, później zaś spadek ciśnienia. W obu przypadkach korelacja była jednak statystycznie istotna.

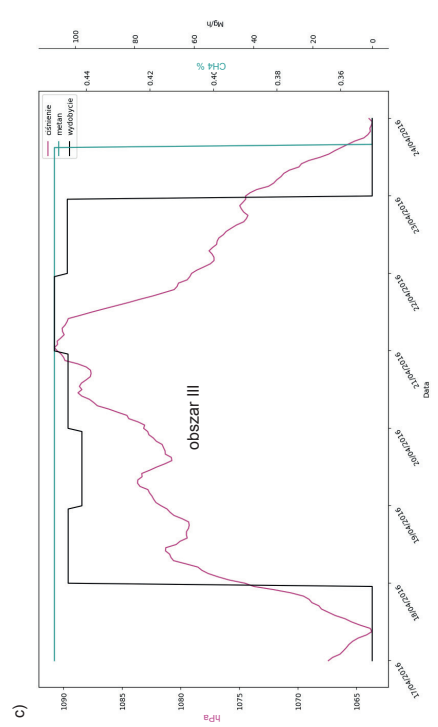
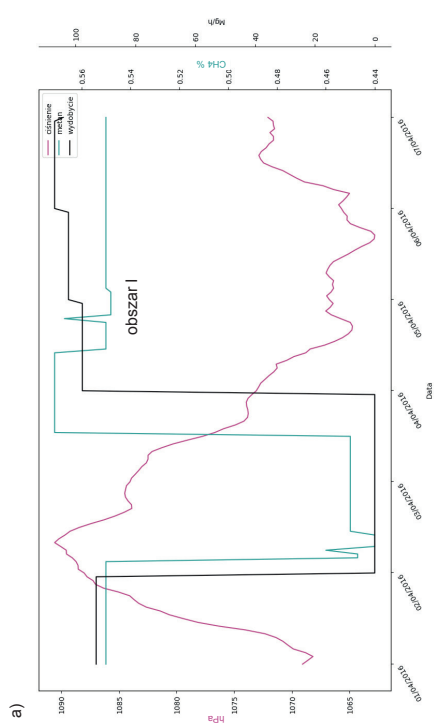
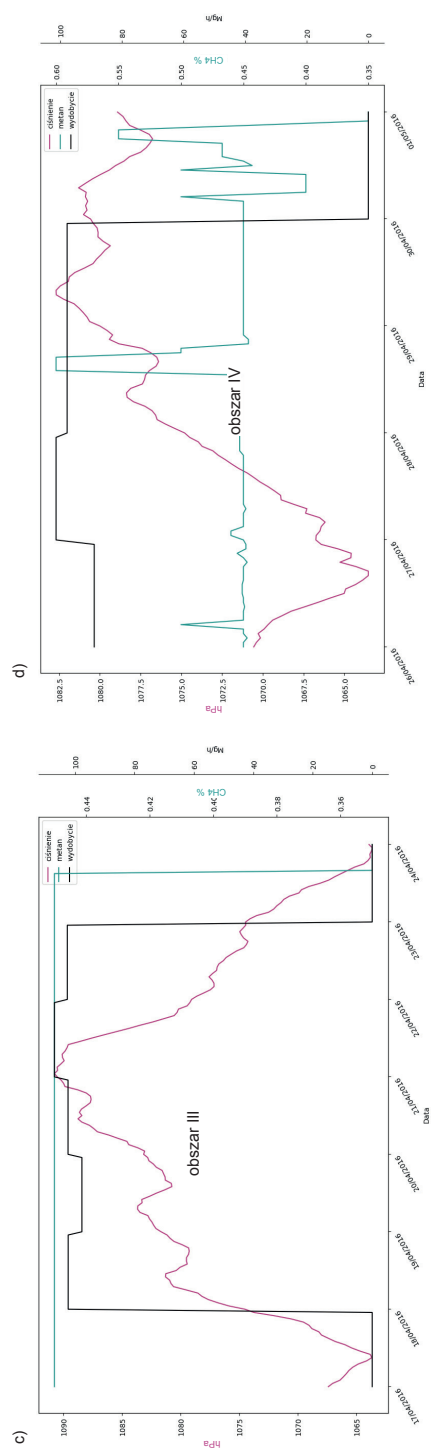
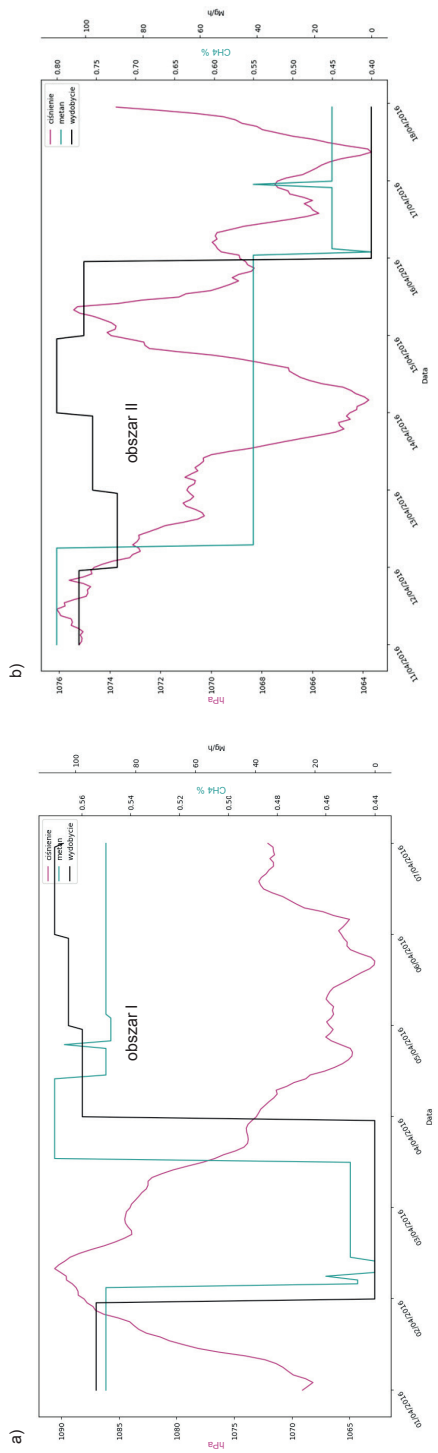


Rysunek 4.5. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg w kwietniu 2016 roku

Tabela 4.3

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 412lg+ld i 412lg i wydobywania

Kwiecień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1075,48	1073,90	1077,07	1073,80	1062,80	1090,56	8,77197	0,800768
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,53	0,52	0,53	0,55	0,44	0,57	0,04848	0,004426
Obszar II	wydobywanie	58,63	49,92	67,33	93,08	0,00	102,33	48,15748	4,396156
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1070,95	1070,30	1071,61	1070,98	1063,77	1076,09	3,64123	0,332397
Obszar III	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,61	0,59	0,63	0,55	0,55	0,80	0,10989	0,010031
	wydobywanie	99,91	98,66	101,16	100,63	88,92	110,13	6,91644	0,631382
Obszar IV	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1078,13	1076,93	1079,33	1079,45	1063,64	1090,75	7,89423	0,609053
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,45	0,44	0,45	0,45	0,35	0,45	0,02136	0,001648
Obszar IV	wydobywanie	73,14	66,07	80,22	102,33	0,00	106,96	46,46421	3,584791
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1074,80	1073,74	1075,86	1076,95	1063,53	1082,69	5,87106	0,535952
Obszar IV	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,46	0,45	0,46	0,45	0,35	0,60	0,03678	0,003358
	wydobywanie	77,13	70,09	84,16	97,71	0,00	101,29	38,94064	3,554778



Rysunek 4.6. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywcia w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+Id i 412lg w kwietniu 2016 roku:
a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III; d) obszar IV

Dzięki analizie wyników w obszarze II (rys. 4.6b) można stwierdzić, że mimo wzrostów i spadków ciśnienia przebieg zmian stężenia metanu miał charakter malejący. W obszarze tym korelacja między stężeniem a wydobyciem była zgodnie skierowana (tab. 4.4), wysoka i statystycznie istotna. Maksymalnie 40% wyników stężenia metanu można było wytłumaczyć liniową zależnością od wydobywania. Zależność stężeń metanu od ciśnienia była również zgodnie skorelowana, co sugeruje, że wzrost ciśnienia powodował wzrost stężenia metanu. Widać to na wykresie zamieszczonym na rysunku 4.6b, na którym wspomniane wcześniej spadki stężenia (12 i 16 kwietnia) przypadają właśnie na spadki ciśnienia.

W wyniku analizy statystycznej (tab. 4.4) udowodniono, że w obszarze III stężenie metanu było zgodnie skorelowane z wydobyciem i z ciśnieniem. Obie te korelacje były przeciętne i statystycznie nieistotne. Warto nadmienić, że w obszarze tym wystąpiła najwyższa zmiana ciśnienia (wzrost i spadek), a mimo to stężenie metanu było właściwie stałe. Nawet początkowy wzrost wydobywania nie miał na niego wpływu, co objawiło się zmniejszeniem korelacji tych dwóch wielkości. W obszarze IV nie zaobserwowano korelacji między badanymi wielkościami. Wynika to z tego, że mimo dwóch znacznych skoków stężenie metanu do 30 kwietnia było właściwie stałe.

Tabela 4.4

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg

Kwiecień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,655359	0,687281
	R_d	0,429495	0,472355
	T	-9,42520	10,27791
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja wysoka
	Statystycznie	istotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,690080	0,599973
	R_d	0,476211	0,359967
	T	12,28500	9,662389
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja niska
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,393743	0,353049
	R_d	0,155033	0,124643
	T	5,518824	4,861792
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000003
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja przeciętna
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar IV	$r(x, y)$	0,004137	0,094241
	R_d	0,000017	0,008881
	T	0,044945	1,028296
	Prawdopodobieństwo	0,964227	0,305914
	Skala korelacji	korelacja niska	korelacja niska
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Maj 2016 roku

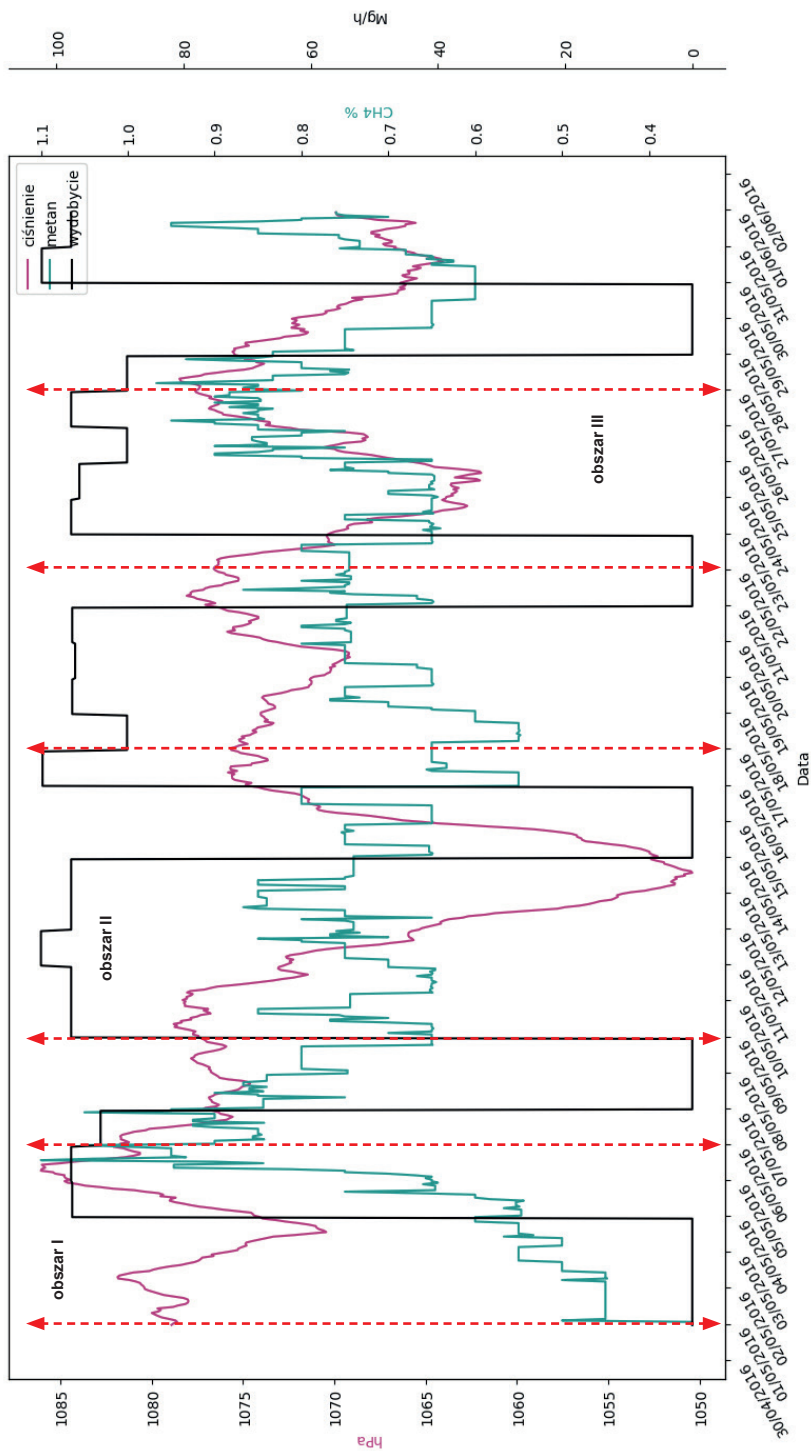
Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.7 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.5:

- w okresie od 1 do 6 maja (obszar I) – ciśnienie między 2 a 3 maja spadło z wartości 1082 hPa do około 1070,5 hPa (11,5 hPa), aby w czwartej dobie wzrosnąć do wartości 1086 hPa (15,5 hPa);
- w okresie od 9 do 17 maja (obszar II) – ciśnienie między 9 a 14 maja spadło z wartości 1078 hPa do 1050 hPa (28 hPa), aby w szesnastej dobie wzrosnąć do wartości 1075,5 hPa (25,5 hPa);
- w okresie od 22 maja do 27 maja (obszar III) – ciśnienie między 22 a 24 maja spadło z wartości 1077 hPa do 1062 hPa (15 hPa), aby w dwudziestej szóstej dobie wzrosnąć do wartości 1077,5 hPa (15,5 hPa).

W kontekście badania wpływu zmian ciśnienia na zmiany stężenia metanu najbardziej interesujący wydaje się obszar II (rys. 4.8b), tam bowiem zanotowano największe zmiany ciśnienia. Dodatkowo przeprowadzono analizę statystyczną w celu określenia korelacji między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.6.

W wyniku analizy obszaru I (rys. 4.8a) stwierdzono, że przy początkowym spadku ciśnienia stężenie metanu nie ulegało większym zmianom, zaobserwowano jednak jego postępujący wzrost od wartości 0,4% do 1,1% między czwartą a piątą dobą (tab. 4.5). W tym czasie zaobserwowano również wzrost ciśnienia i wydobywania. Obserwacje te potwierdziła przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 4.6). Korelacja między stężeniem a wydobyciem była bardzo wysoka i zgodnie skierowana. Na podstawie współczynnika determinacji można zauważyć, że w rozważanym przypadku więcej niż 50% wyników stężeń metanu da się wytłumaczyć liniowym wpływem wydobywania, przy czym da się to stwierdzić ze stuprocentowym prawdopodobieństwem. W przypadku ciśnienia korelacja była przeciętna i zgodnie skierowana. Oznacza to, że wraz ze wzrostem ciśnienia następował wzrost stężenia metanu. Widać to szczególnie wyraźnie na rysunku 4.8a po 4 maja.

W obszarze II (rys. 4.8b) zanotowano największy spadek ciśnienia. Mógłby on potencjalnie spowodować wzrost stężenia metanu, ale analiza danych pokazała jedynie chwilowy wzrost stężenia metanu (około 0,2%), między jedenastą a dwunastą dobą, a następnie jego spadek do wyjściowej wartości 0,65% i kolejny wzrost między dwunastą a trzynastą dobą. Ogólnie w omawianym obszarze stężenia metanu podlegały dosyć sporym fluktuacjom. Analiza statystyczna wykazała istnienie korelacji między ciśnieniem a stężeniem (tab. 4.6). Była ona przeciwnie skierowana, ale zaznaczyć należy, że była przeciętna (tylko około 17% wyników miało zależność liniową), więc statystycznie nieistotna. Jednocześnie ta sama analiza wykazała brak jakiegokolwiek korelacji stężeń metanu z wydobyciem. Na rysunku 4.8b wyraźnie widać, że między czternastą a szesnastą dobą nie prowadzono wydobywania, a stężenie metanu podlegało wahaniom. Spadek zanotowano dopiero 16 maja po ponownym uruchomieniu wydobywania. Można przypuszczać, że spadek ten był opóźnioną reakcją na zmiany wydobywania, ale statystycznie korelacja między stężeniem metanu a wydobyciem w tym obszarze nie występowała. Podobna sytuacja nastąpiła zresztą w obszarze III, gdzie statystycznie nie zanotowano zależności między stężeniem metanu a wydobyciem. Ciekawe jest to, że od 23 maja wydobywanie utrzymywało się na prawie stałym poziomie, a stężenie metanu wzrastało.

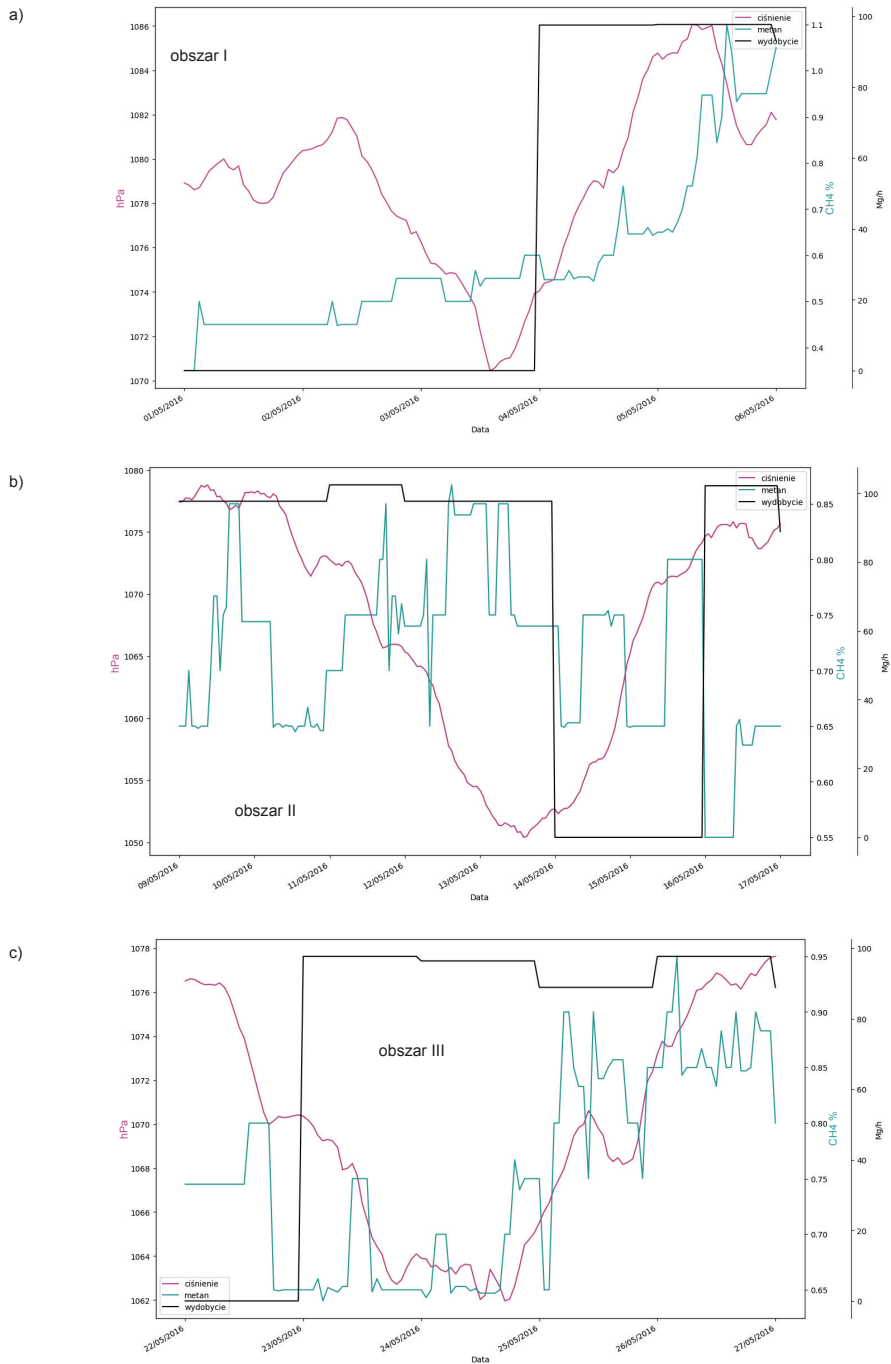


Rysunek 4.7. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2 w pokładzie 412Ig+Id i 412Ig w maju 2016 roku

Tabela 4.5

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg i wydobyćcia

Maj	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1078,893	1078,189	1079,598	1079,205	1070,447	1086,072	3,89500	0,355563
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,586	0,556	0,615	0,550	0,350	1,100	0,16419	0,014989
	wydobyćcie	39,050	30,369	47,731	0,000	0,000	97,708	48,02685	4,384231
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1066,994	1065,650	1068,337	1070,939	1050,399	1078,799	9,43753	0,681095
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,719	0,708	0,730	0,740	0,550	0,867	0,07641	0,005514
	wydobyćcie	74,438	68,298	80,577	97,708	0,000	102,458	43,13048	3,112674
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1069,624	1068,722	1070,526	1069,483	1061,959	1077,579	4,98799	0,455339
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,753	0,736	0,769	0,745	0,640	0,950	0,09068	0,008278
	wydobyćcie	76,150	69,213	83,087	96,417	0,000	97,708	38,37560	3,503197



Rysunek 4.8. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg w maju 2016 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

W związku z wystąpieniem korelacji między ciśnieniem a stężeniem metanu w obszarze II należałoby przypuszczać, że mogła się ona pojawić również w obszarze III. Obserwując jednak zmiany parametrów przedstawionych na rysunku 4.8c, można zauważyć, że stężenie metanu spadało wraz z ciśnieniem i rosło, gdy zwiększało się ciśnienie. Analiza statystyczna (tab. 4.6) wykazała jednoznacznie korelację wysoką, ale zgodnie skierowaną. Jest to niezgodne z założeniem, według którego przy spadku ciśnienia następuje wzrost emisji metanu.

Tabela 4.6

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 412lg+ld i 412lg

Maj	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,430394	0,715925
	R_d	0,185239	0,512548
	T	5,179552	11,13890
	Prawdopodobieństwo	0,000001	0,000000
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja bardzo wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,418183	-0,025397
	R_d	0,174877	0,000645
	T	-6,34577	-0,350191
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,726583
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja nikła
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,631199	0,086140
	R_d	0,398413	0,007420
	T	8,840122	0,939210
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,349541
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja nikła
	Statystycznie	istotne	nieistotne

Z analizy ciśnień, stężenia metanu i wydobywania w okresie od marca do maja 2016 roku w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+ld i 412lg KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka” połączonej z analizą statystyczną wynika, że zmiany ciśnienia w niewielkim zakresie były skorelowane ze zmianami stężenia wydzielającego się do ściany metanu. Na jedenaście badanych obszarów zanotowano tylko jeden przypadek korelacji wysokiej, przeciwnie skierowanej, ale należy zaznaczyć, że w tym samym obszarze wystąpiła wysoka korelacja z wydobywaniem. Ponadto zanotowano jeden przypadek korelacji przeciętnej przeciwnie skierowanej i jeden słabej. Z pozostałych ośmiu przypadków sześć odpowiadało korelacji dodatniej i dwa nikłej. Biorąc pod uwagę powyższe, można raczej wnioskować, że wraz ze wzrostem ciśnienia wzrastało stężenie metanu. W przypadku zależności stężenia

metanu od wydobycia przeprowadzona analiza pokazała, że na jedenaście badanych obszarów w trzech wystąpiła korelacja wysoka, a w jednym bardzo wysoka. Zanotowano również po dwa przypadki korelacji przeciętnej i słabej. W trzech przypadkach nie zaobserwowano żadnej korelacji między stężeniem metanu a wydobyciem. Istotne jest jednak to, że brak bardzo silnych korelacji oznacza, że badane parametry nie w pełni pokazują zależność liniową, niemniej mogą istnieć inne powiązania funkcyjne.

Należy nadmienić, że założony charakter zjawisk zachodzących w trakcie prowadzenia ściany nie pozwala na wykazanie jednoznacznych powiązań. Interpretując wyniki, można stwierdzić, że spadek (lub wzrost) ciśnienia wpływał na wzrost (lub spadek) stężenia metanu jedynie od 8% do 17%, a w obszarze wysokiej ujemnej korelacji – do 42%. W przypadku wpływu wydobycia wartości te wahały się w zależności od obszaru od 12% do 51%, ale występowały przeważnie w każdym badanym obszarze. Można zatem wnioskować, że zmiany aktywności górniczej w przypadku badanej ściany miały zdecydowanie większy wpływ na emisję metanu do wyrobiska.

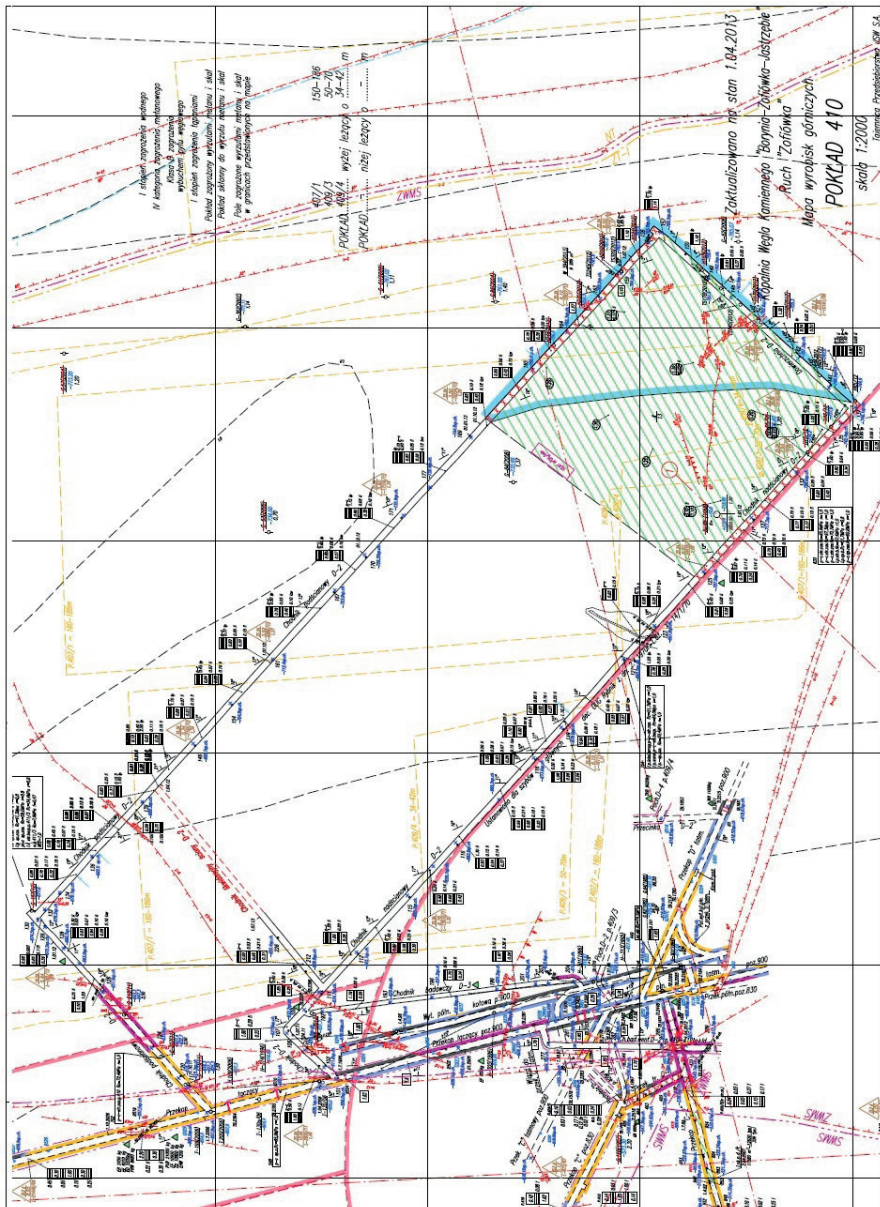
4.3.2. Ściana D-2 w pokładzie 410 KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”

Eksploracja ściany D-2 prowadzona była w rozpoznanej partii złoża na głębokości od 888 m do 1047 m, w pokładzie 410 o miąższości od 1,2 m do 2,2 m. Pokład 410 udostępniony został na poziomie 900 z przekopu łączącego chodnikiem podścianowym D-2 oraz chodnikiem D-2 prowadzonym w pokładzie 410. Najpierw wykonano chodnik D-2, następnie chodnik nadścianowy D-2, chodnik podścianowy D-2, chodnik wentylacyjny D-2 i dowieznięcie D-2. Mapę pokładu 410 wraz z lokalizacją ściany D-2 pokazano na rysunku 4.9. Ściana eksploatowana była systemem przekątnym od pola na zawał. Pokład 410 w partii D został zaliczony do czwartej kategorii zagrożenia metanowego. Maksymalna zmierzona metanowość pokładu 410 wynosiła 9,508 m³ CH₄/Mg csw. Prognoza metanowości bezwzględnej ściany D-2 w pokładzie 410 przewidywała maksymalne wydzielanie się metanu w ilości 36,78 m³/min przy postępie 7,25 m/dobę (wydobycie 3000 Mg/dobę).

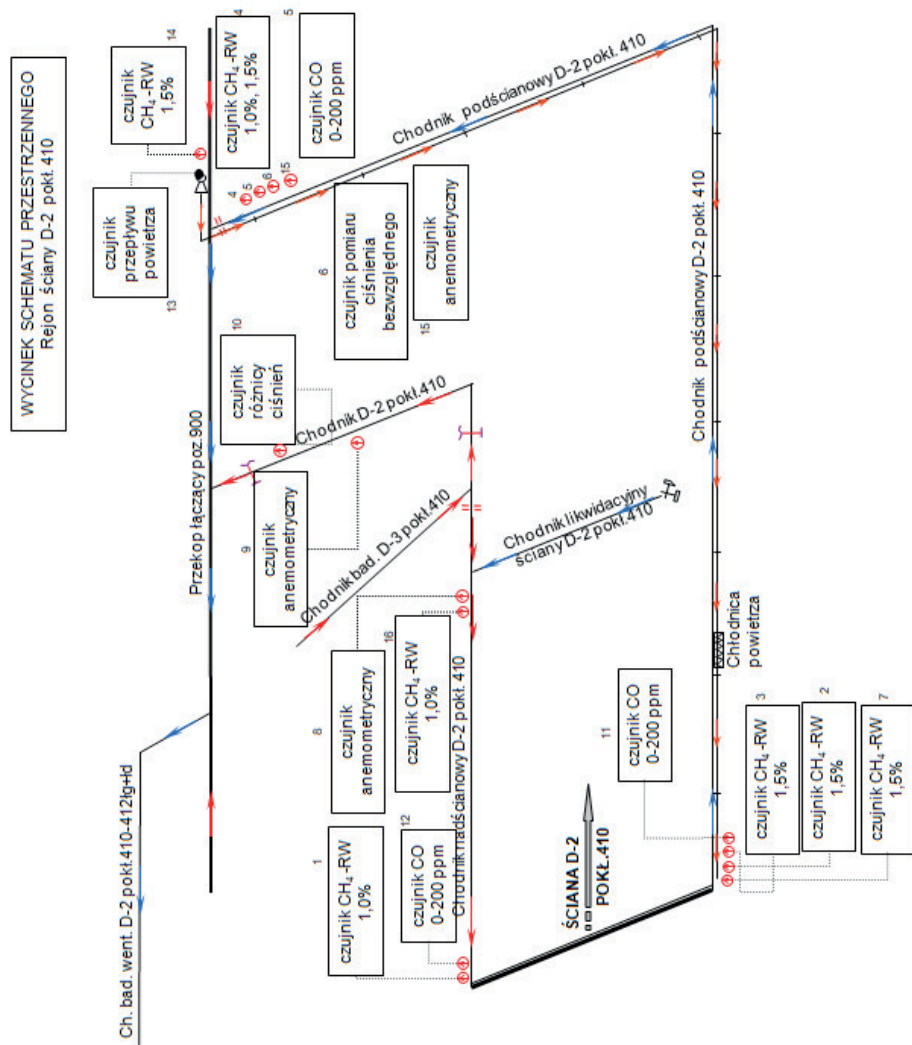
Ściana D-2 w pokładzie 410 przewietrzana była systemem na „U” z doświeżaniem za pomocą wentylatora i lutniociągu.

W ramach zabezpieczenia przed zagrożeniem metanowym podejmowano następujące działania:

- wykonywano systematyczne pomiary metanu zgodnie z obowiązującymi przepisami;
- do ściany doprowadzano wystarczającą ilość powietrza, wynikającą z prognoz dotyczących metanu;
- rejon ściany był zabezpieczony metanomierzami systemu „SMP” polegającego na pomiarze ciągłym zawartości metanu oraz rozmieszczone były pomocnicze urządzenia wentylacyjne, zgodnie z zatwierdzonym schematem zabezpieczeń metanometrycznych, dostosowanym do panujących warunków (rys. 4.10);
- dozór oddziałowy przeprowadzał na każdej zmianie kontrolę stanu wyrobisk doprowadzających i odprowadzających powietrze ze ściany, kierunków przepływu powietrza i stanu tam wentylacyjnych w rejonie ściany.



Rysunek 4.9. Mapa pokładu 410 w rejonie ściany D-2



Rysunek 4.10. Schemat przewietrzania ściany D-2 w pokładzie 410 wraz z rozmieszczeniem czujników gazometrii automatycznej i czujników anemometrycznych

Z obliczeń wynikało, że maksymalna ilość metanu, która mogła być odprowadzona z powietrzem wentylacyjnym, wynosiła około 27 m³/min. Ze względu na wydzielanie metanu konieczne było zastosowanie odmetanowania. Odmetanowanie prowadzono z efektywnością na poziomie 40%.

Przeprowadzone badania, podobnie jak w przypadku opisanej wcześniej ściany, miały na celu wykazanie istniejącej zależności między zmianami ciśnienia barometrycznego a emisją metanu do wyrobiska. Badania wykonywano w okresie od kwietnia do października 2013 roku. Analizie poddano wyniki z czujnika pomiaru ciśnienia bezwzględnego nr 621, zabudowanego w chodniku podścianowym D-2 pokładu 410 w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przekopem łączącym poziom 900 (czujnik nr 5 – rys. 4.10). Stężenie metanu mierzono za pomocą czujnika metanometrycznego MM-100 (czujnik nr 4 – rys. 4.10), zabudowanego pod stropem (nie niżej niż 10 cm) w chodniku podścianowym D-2 w pokładzie 410, w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przekopem łączącym poziom 900 (wylot z rejonu). Uzyskane wyniki porównano z wydobywaniem przypadającym na badany okres.

Ze względu na długi, sześciomiesięczny okres badań, zebrane dane przeanalizowano w okresach trzymiesięcznych i przedstawiono na rysunkach 4.11 i 4.12.

Analiza danych przedstawionych na rysunkach 4.11 i 4.12 wykazała dużą fluktuację parametrów, dlatego dokonano takiego samego przeglądu, biorąc pod uwagę jedynie cykle miesięczne. Większa przejrzystość wyników pozwoliła wyodrębnić do dalszej obserwacji cztery miesiące, w których zaobserwowano zmiany ciśnień mogące potencjalnie wpływać na zmiany stężenia metanu. W przypadku wybranych miesięcy i wyodrębnionych w nich obszarów przeprowadzono analizę statystyczną.

Kwiecień 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.13 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.7:

- w okresie od 5 do 11 kwietnia (obszar I) – ciśnienie między 5 a 6 kwietnia wzrosło z wartości 1070 hPa do około 1084 hPa (14 hPa), aby w siódmej dobie spaść do wartości 1069 hPa (15 hPa);
- w okresie od 12 do 19 kwietnia (obszar II) – ciśnienie między 12 a 15 kwietnia wzrosło z wartości około 1064 hPa do 1092 hPa (28 hPa), aby następnie spaść do wartości 1076 hPa (16 hPa) zanotowanej 19 kwietnia;
- w okresie od 24 kwietnia do 30 kwietnia (obszar III) – ciśnienie między 24 a 27 kwietnia spadło z wartości 1088,76 hPa do 1059,83 hPa (28,93 hPa), aby w dwudziestej dziewiątej dobie wzrosnąć do wartości 1080 hPa (20,17 hPa).

W celu dokładnego przeanalizowania wyników wykreślono zmiany ciśnienia, stężenia metanu i wydobywania w poszczególnych obszarach. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.14.

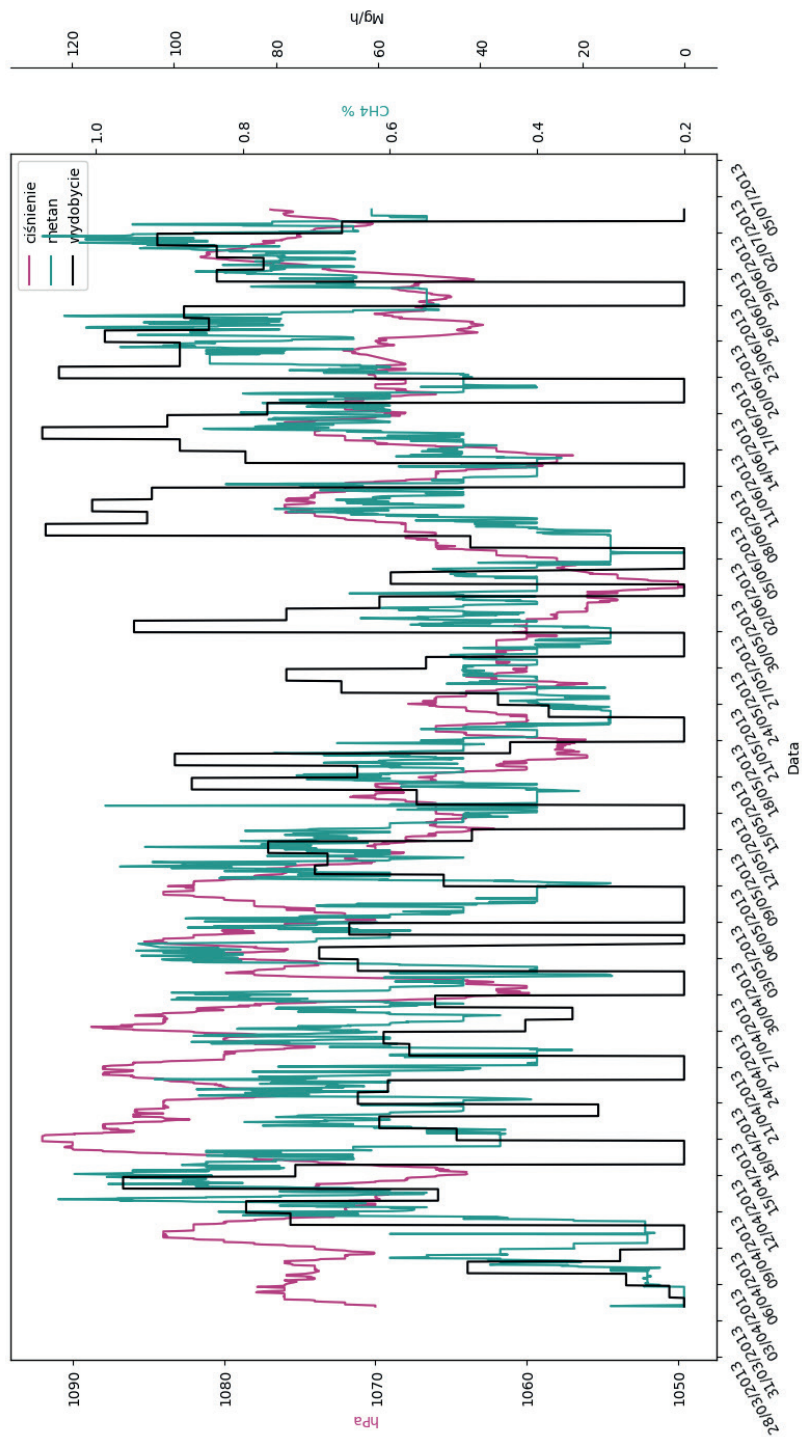
W kontekście badania wpływu zmian ciśnienia na zmiany stężenia metanu najbardziej interesujące wydają się obszary II i III, tam bowiem zanotowano największe zmiany ciśnień. Wszystkie dane przedstawione na rysunku 4.13 wykazały dużą fluktuację, czego przyczyną jest

to, że kwiecień 2013 roku był pierwszym miesiącem ruchu ściany D-2. W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono również analizę statystyczną w celu określenia korelacji między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.8.

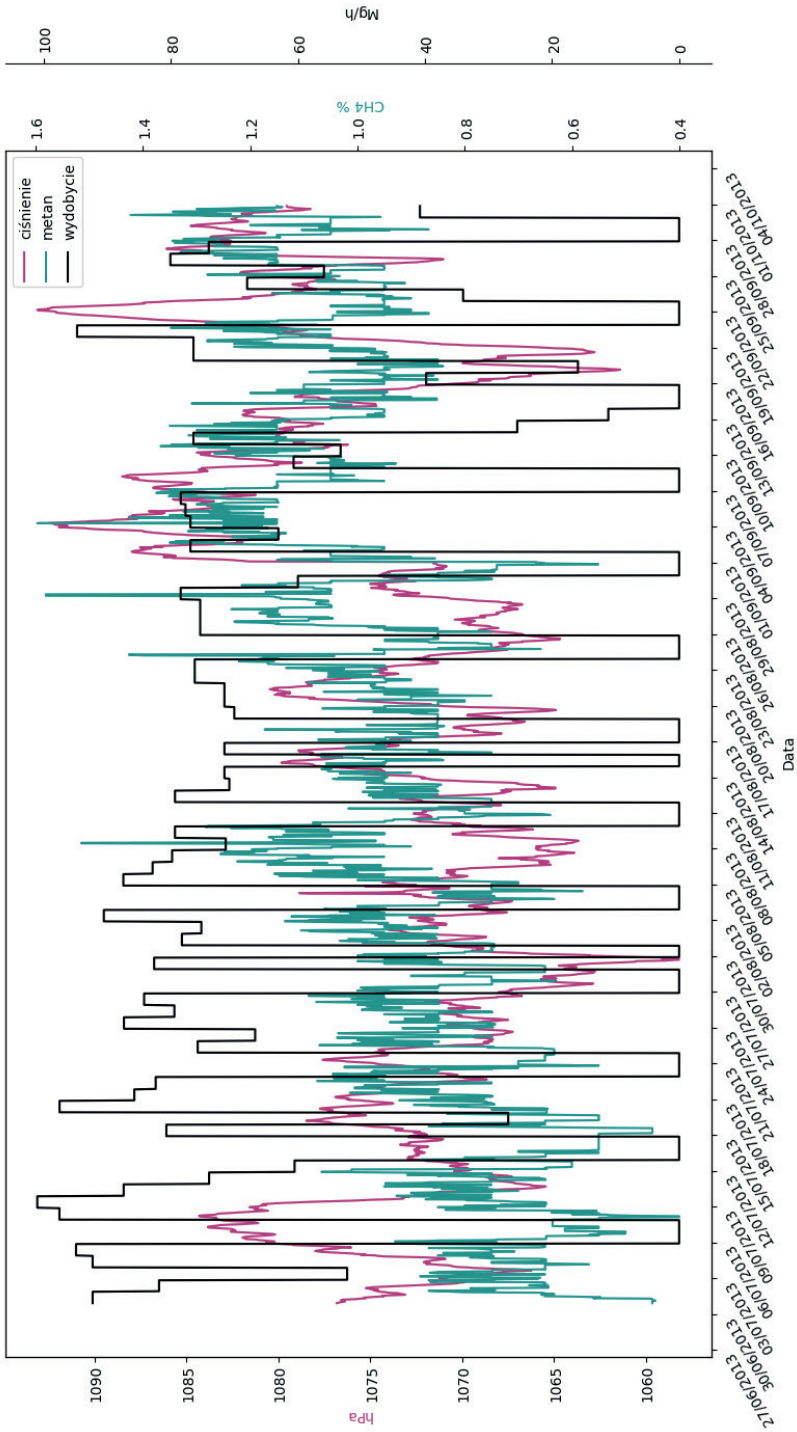
Analiza obszaru I (rys. 4.14a) pokazała przebieg wzrostu i spadku ciśnienia przy jednoczesnym spadku i wzroście stężenia metanu. Między siódmą a ósmą dobą zaobserwowano chwilowy wzrost stężenia metanu z wartości 0,25% do 0,6%. Wzrost ten można przypisać nagłemu dopływowi metanu do wyrobiska (początek ruchu ściany), przy czym poziom stężenia nie stanowił potencjalnego zagrożenia (poniżej 1%). Krzywa przebiegu zmian stężenia metanu miała bardzo podobny przebieg jak krzywa odpowiadająca zmianom wydobywania. Analiza statystyczna (tab. 4.8) wykazała z kolei, że między stężeniem metanu a ciśnieniem wystąpiła korelacja bardzo wysoka przeciwnie skierowana. Świadczy to o tym, że niemal 63% wyników stężeń można interpretować liniową zależnością od ciśnienia. Ogólnie obserwowany między szóstą a dziewiątą dobą spadek, później zaś wzrost, stężenia metanu można byłoby przypisać zwyżce, a następnie zniżce ciśnienia, gdyby nie fakt, że na początku analizowanego obszaru nastąpił wyraźny spadek wydobywania (rys. 4.13 i 4.14a). Między stężeniem metanu a wydobyciem statystycznie zaistniała jednak korelacja słaba zgodnie skierowana, ale nieistotna.

Przedstawione wyniki pokazały jednoznacznie złożoność zjawisk zachodzących podczas eksploatacji ściany. Analizując rysunek 4.14a, można dostrzec, że emisja metanu w dużym stopniu zależna była od aktywności prowadzenia robót górniczych. W tym samym czasie nastąpiły jednak zwyżka i zniżka ciśnienia, które istotnie wpłynęły na wyniki analizy statystycznej. Nie bez znaczenia pozostawał również fakt, że kwiecień był początkowym miesiącem ruchu ściany. Wydobywanie i zakres robót przygotowawczych mogły mieć bardzo duży wpływ na fluktuację stężenia metanu, co zresztą było widoczne w całym miesiącu kwietniu.

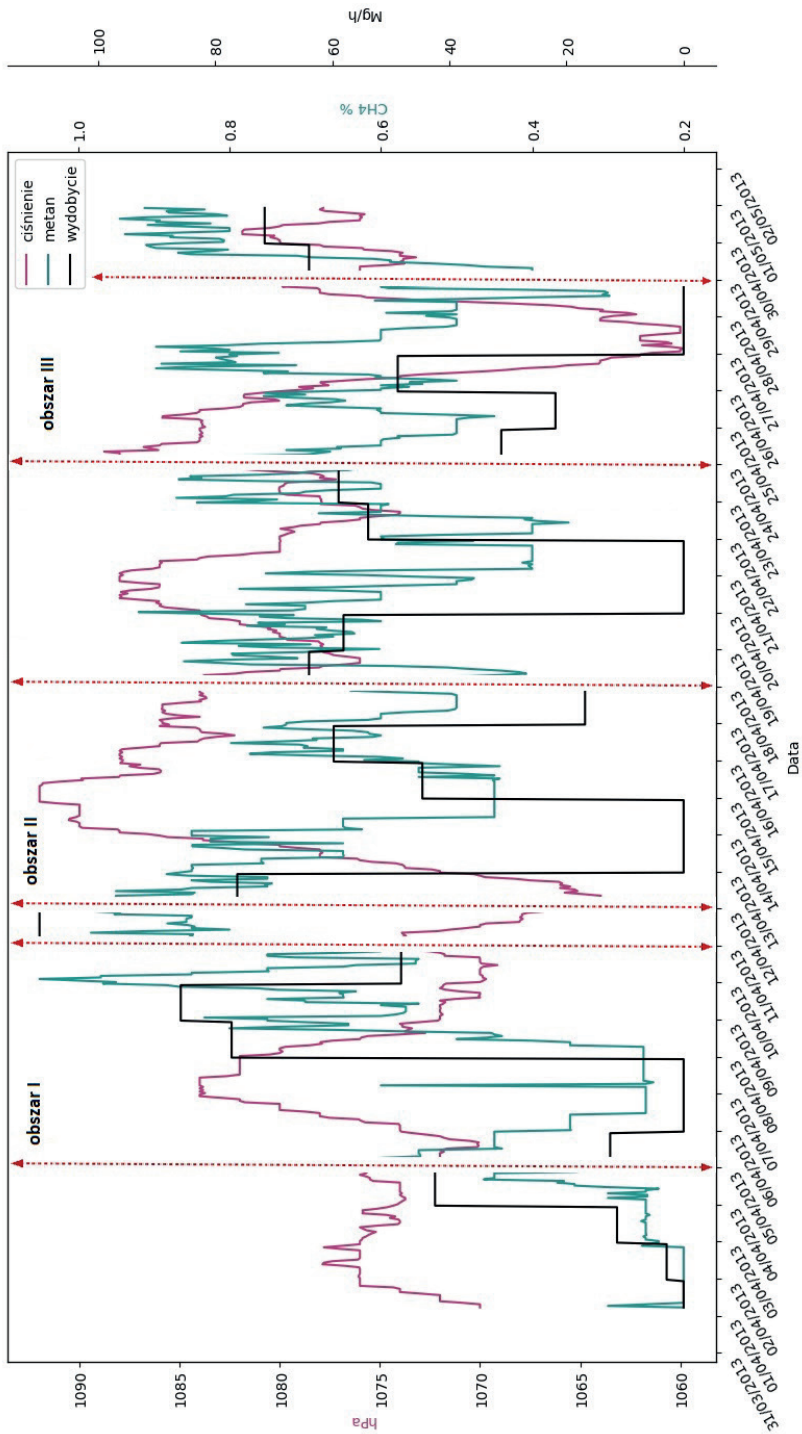
W obszarze II (rys. 4.14b) dość znaczny wzrost ciśnienia mógłby wywołać spadek stężenia metanu. Potwierdziła to analiza statystyczna (tab. 4.8), w ramach której między ciśnieniem a stężeniem stwierdzono korelację bardzo wysoką przeciwnie skierowaną. Podobnie jak w obszarze I, prawie 60% wyników stężeń metanu można było interpretować liniową zależnością od ciśnienia. Największy spadek stężenia metanu (z 0,9% do 0,45%) nastąpił między czternastą a piętnastą dobą (rys. 4.14b). Patrząc na dane zamieszczone na rysunku 4.13, można zauważyć, że spadek ten był wywołany spadkiem wydobywania. Z analizy statystycznej (tab. 4.8) wynika jednak, że tylko 3% rezultatów można interpretować zależnością liniową od wydobywania. Korelacja była słaba i statystycznie nieistotna. Inny obraz wyłania się z analizy obszaru III (rys. 4.14c). Obserwacja zmian badanych parametrów potwierdziła zwiększony wpływ wydobywania na charakter przebiegu zmienności stężeń metanu. Między dwudziestą siódmą a dwudziestą dziewiątą dobą nastąpił spadek stężenia metanu z 0,9% do 0,3%. W obszarach spadku wydobywania następował opóźniony spadek stężenia metanu. Po 29 kwietnia (wznowienie wydobywania) stężenie metanu wzrosło z wartości 0,4% do 0,9%. Analiza statystyczna (tab. 4.8) wykazała w obszarze III słabe korelacje stężenia metanu zarówno z ciśnieniem (przeciwnie skierowana), jak i z wydobyciem (zgodnie skierowana). Z tego wynika, że w badanym obszarze zmiany stężenia metanu można było tłumaczyć zmianami wydobywania w około 4%, a ciśnienia w około 3%.



Rysunek 4.11. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie D-2, w pokładzie 410, w okresie od kwietnia do lipca 2013 roku



Rysunek 4.12. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2, w pokładzie 410, w okresie od lipca do października 2013 roku

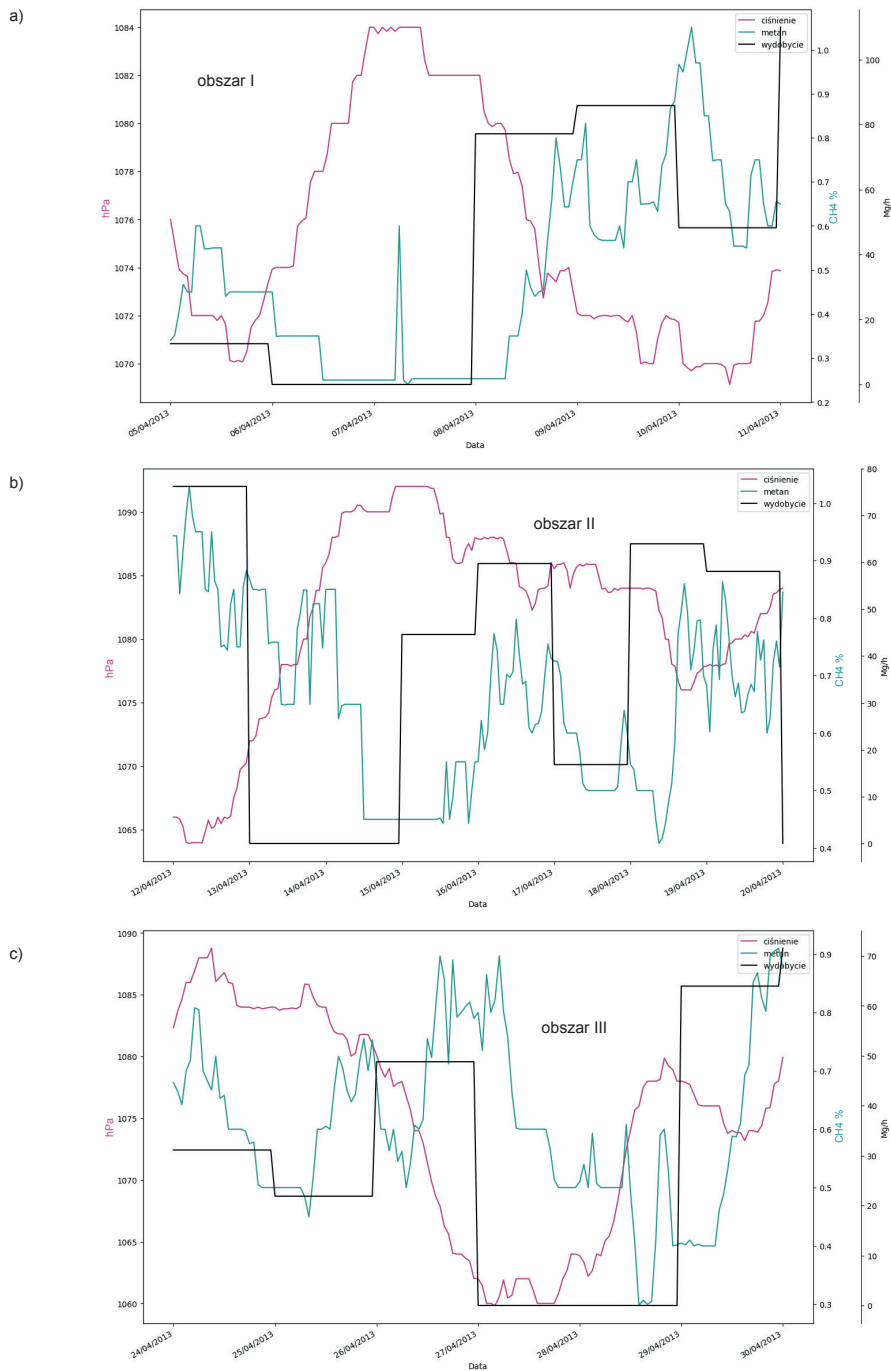


Rysunek 4.13. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2, w pokładzie 410, w kwietniu 2013 roku

Tabela 4.7

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 410 i wydobytcie

Kwiecień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1075,398	1074,601	1076,195	1073,800	1069,133	1084,000	4,83991	0,403325
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,485	0,450	0,519	0,450	0,240	1,051	0,21205	0,017671
Obszar II	wydobytcie	37,298	31,469	43,127	30,385	0,000	85,850	35,38746	2,948955
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1081,994	1080,753	1083,234	1084,000	1063,933	1092,000	8,14396	0,628320
Obszar III	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,649	0,625	0,674	0,649	0,408	1,029	0,16009	0,012351
	wydobytcie	37,33155	32,86542	41,79768	44,59583	0,00	76,20417	29,32104	2,262167
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1074,712	1073,243	1076,180	1076,050	1059,833	1088,767	8,91445	0,742871
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,607	0,584	0,631	0,600	0,298	0,910	0,14360	0,011967
	wydobytcie	27,628	23,728	31,528	26,506	0,000	63,950	23,67496	1,972913



Rysunek 4.14. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie D-2, w pokładzie 410, w kwietniu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Tabela 4.8

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 410

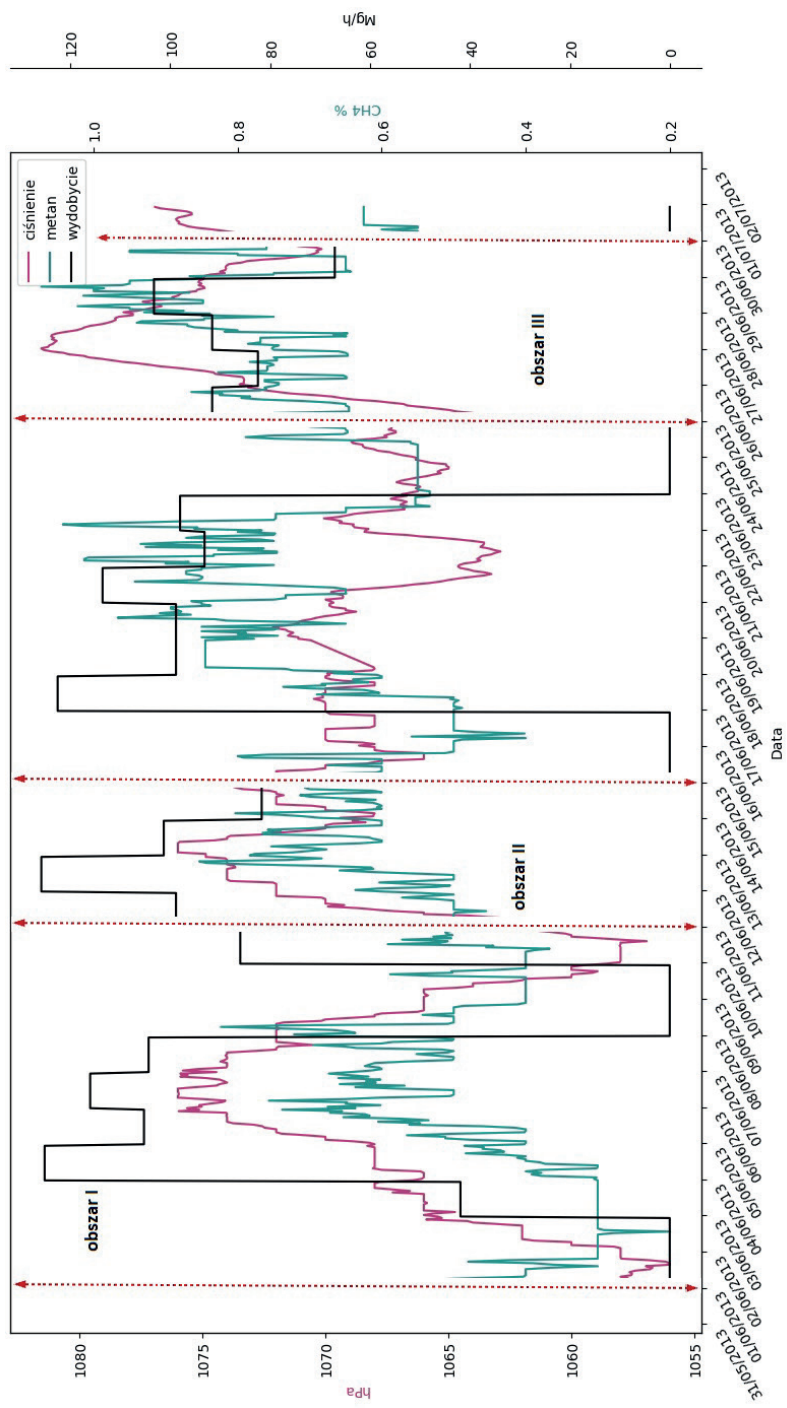
Kwiecień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,797248	0,214506
	R_d	0,635604	0,046013
	T	-15,7380	2,617057
	Prawdopodobieństwo	0,00	0,009830
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,751106	0,193106
	R_d	0,564160	0,037290
	T	-14,6586	2,535726
	Prawdopodobieństwo	0,00	0,012145
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	-0,163077	0,214506
	R_d	0,026594	0,046013
	T	-1,96965	2,617057
	Prawdopodobieństwo	0,050825	0,009830
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

W badanym okresie stwierdzono jednoznacznie złożoność zjawisk zachodzących podczas uruchamiania ściany. Czas rozruchu spowodował, że w kwietniu (rys. 4.13) fluktuacja stężeń metanu była bardzo duża, ale we wszystkich zadanych obszarach zależność między stężeniami a wydobywaniem była słaba, mimo to jednak występowała. Pojawiająca się w dwóch obszarach silna korelacja z ciśnieniem nie daje podstaw, aby zakładać, że jego wahania miały wpływ na zmiany stężenia metanu. Chcąc to jednoznacznie stwierdzić, należy przeanalizować kolejne miesiące ruchu ściany.

Czerwiec 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.15 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.9:

- w okresie od 1 do 11 czerwca (obszar I) – ciśnienie między 2 a 6 czerwca wzrosło z wartości 1056 hPa do 1076 hPa (20 hPa), aby w dziesiątej dobie spaść do wartości około 1056 hPa (20 hPa),
- w okresie od 11 do 15 czerwca (obszar II) – ciśnienie między 11 a 13 wzrosło z wartości 1062 hPa do 1076 hPa (14 hPa), aby następnie spaść do wartości 1067 hPa (9 hPa) zanotowanej 14 czerwca,
- w okresie od 25 czerwca do 1 lipca (obszar III) – ciśnienie między 25 a 27 czerwca wzrosło z wartości 1063,5 hPa do 1081,5 hPa (18 hPa), aby w dwudziestej dziewiątej dobie spaść do wartości 1070 hPa (11,5 hPa).

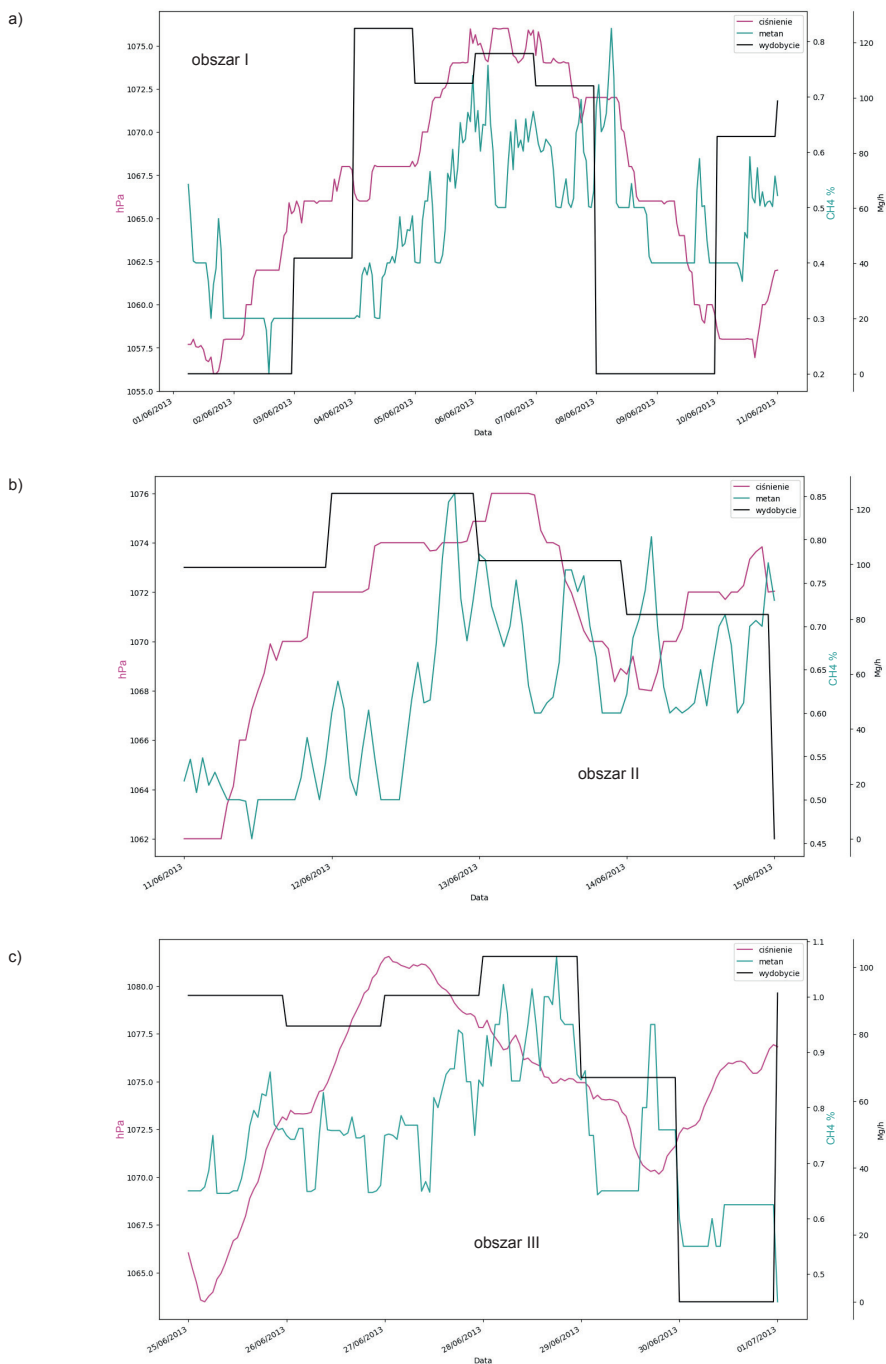


Rysunek 4.15. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie D-2, w pokładzie 410, w czerwcu 2013 roku

Tabela 4.9

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 410 i wydobytcie

	Czerwiec	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	234	1066,640	1065,861	1067,420	1066,050	1056,000	1076,00	6,052	0,3956
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	234	0,453	0,437	0,469	0,412	0,200	0,82	0,127	0,0083
	wydobytcie	234	59,345	52,694	65,997	85,979	0,000	125,14	51,644	3,3761
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	96	1071,108	1070,363	1071,853	1072,000	1062,000	1076,00	3,678	0,3753
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	96	0,621	0,601	0,640	0,610	0,455	0,85	0,096	0,0098
	wydobytcie	96	101,905	98,702	105,109	100,067	81,688	125,80	15,811	1,6137
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	144	1074,603	1073,878	1075,328	1075,087	1063,471	1081,55	4,401	0,3668
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	144	298,354	-289,921	886,630	0,750	0,550	42856,00	3571,271	297,6059
	wydobytcie	144	72,658	66,987	78,328	87,019	0,000	103,25	34,422	2,8685



Rysunek 4.16. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie D-2, w pokładzie 410, w czerwcu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Analiza parametrów przedstawiona na rysunku 4.15 doskonale zobrazowała okresy wzrostu i spadku ciśnienia. Zmiany te dochodziły do 20 hPa i w każdym z wyodrębnionych obszarów nie było widać wyraźnej ich ujemnej korelacji ze zmianami stężenia. W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu określenia korelacji między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.10.

Krzywa przebiegu stężenia metanu miała charakter rosnący, z wyraźnie zaznaczonymi spadkami w obszarach, kiedy nie prowadzono wydobywania w ścianie. Dany obszar analizowano w trzecim miesiącu ruchu ściany, zaobserwowana tendencja wzrostowa stężenia metanu była więc uzasadniona. W celu dokonania dokładniejszej analizy wykreślono zmiany parametrów w zadanych obszarach. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.16a–c. W żadnym z przyjętych do obserwacji obszarów nie zauważono zależności między zmianami stężenia metanu a ciśnieniem. Przy wzrostach ciśnienia następował wzrost stężenia metanu, a przy jego spadkach stężenie malało (obszary I i II). W obszarze III do 30 czerwca stężenie utrzymywało się na miarę stabilnym poziomie. W obszarach I i III widoczna była zależność zmian stężenia od wydobywania, a jego ewentualna fluktuacja mogła być wynikiem prowadzonych w tym czasie robót górniczych.

Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 4.10) potwierdziła obserwacje o braku przeciwnie skierowanej korelacji stężenia metanu z ciśnieniem. W każdym z przyjętych do badań obszarów zanotowano korelację zgodnie skierowaną, w obszarze I wysoką statystycznie istotną, w obszarze II przeciętną, a w obszarze III słabą. W obu przypadkach korelacje te były statystycznie nieistotne. Przedstawione wyniki wydają się niezgodne z teorią zakładającą spadek emisji metanu przy wzroście ciśnienia.

W przypadku zależności stężenia metanu od wydobywania tylko w dwóch badanych obszarach (I i III) zanotowano korelację zgodnie skierowaną, przy czym w obszarze I była ona przeciętna i statystycznie nieistotna, a w obszarze III wysoka i istotna. W pierwszym przypadku około 14% wyników stężeń można było opisać liniowym wpływem wydobywania, w drugim – około 45%. W obszarze II nie zaobserwowano korelacji stężenia z wydobywaniem.

Tabela 4.10

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 410

Czerwiec	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,594108	0,373466
	R_d	0,352964	0,139477
	T	11,24981	6,132166
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja przeciętna
	Statystycznie	istotne	nieistotne

Tabela 4.10 cd.

Obszar II	$r(x, y)$	0,457230	-0,101331
	R_d	0,209060	0,010268
	T	4,984562	-0,987521
	Prawdopodobieństwo	0,000003	0,325923
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja nikła
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,238755	0,670870
	R_d	0,057004	0,450066
	T	2,929827	10,78021
	Prawdopodobieństwo	0,003953	0,000000
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja nikła
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Sierpień 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.17 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.11:

- w okresie od 3 do 7 sierpnia (obszar I) – ciśnienie między 3 a 5 sierpnia wzrosło z wartości 1067,5 hPa do około 1079 hPa (11,5 hPa), spadło do wartości 1071 hPa (8 hPa) i ponownie wzrosło w szóstej dobie do wartości 1074 hPa; na koniec ponownie spadło, ale tylko o wartość 4 hPa;
- w okresie od 13 do 18 sierpnia (obszar II) – ciśnienie między 13 a 16 sierpnia wzrosło z wartości 1065 hPa do 1080 hPa (15 hPa), a następnie spadło do wartości 1068 hPa (12 hPa) zanotowanej 18 sierpnia;
- w okresie od 19 do 26 sierpnia (obszar III) – ciśnienie między 19 a 22 sierpnia wzrosło z wartości 1065 hPa do 1080,5 hPa (15,5 hPa), aby w dwudziestej szóstej dobie spaść do wartości poniżej 1065 hPa (15,5 hPa).

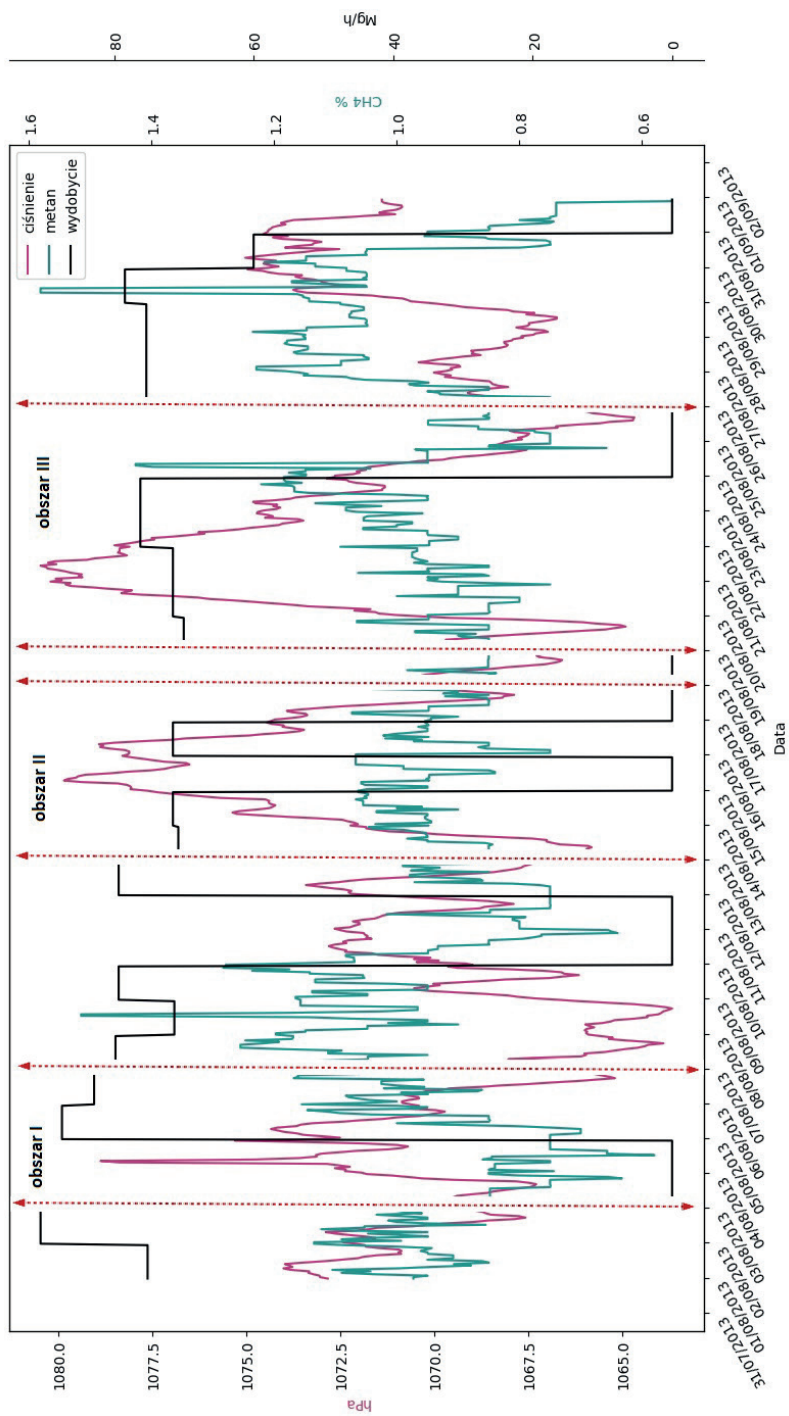
Przedstawiony na rysunku 4.17 charakter przebiegu zmian zadanych parametrów pozwolił wyodrębnić trzy obszary zmian ciśnienia. W wyznaczonych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu określenia korelacji między stężeniem, ciśnieniem i wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.12.

Analizując dane przedstawione na rysunku 4.18a–c, można zauważyć, że stężenie metanu, z wyjątkiem kilku momentów, nie podlegało bardzo dużej fluktuacji. W całym badanym miesiącu (rys. 4.17) nie wykazywało ani tendencji rosnącej, ani tendencji malejącej, choć pojawiały się chwilowe jego wzrosty (8, 24 i 29 sierpnia) oraz spadki (15 i 16 sierpnia – rys. 4.18b).

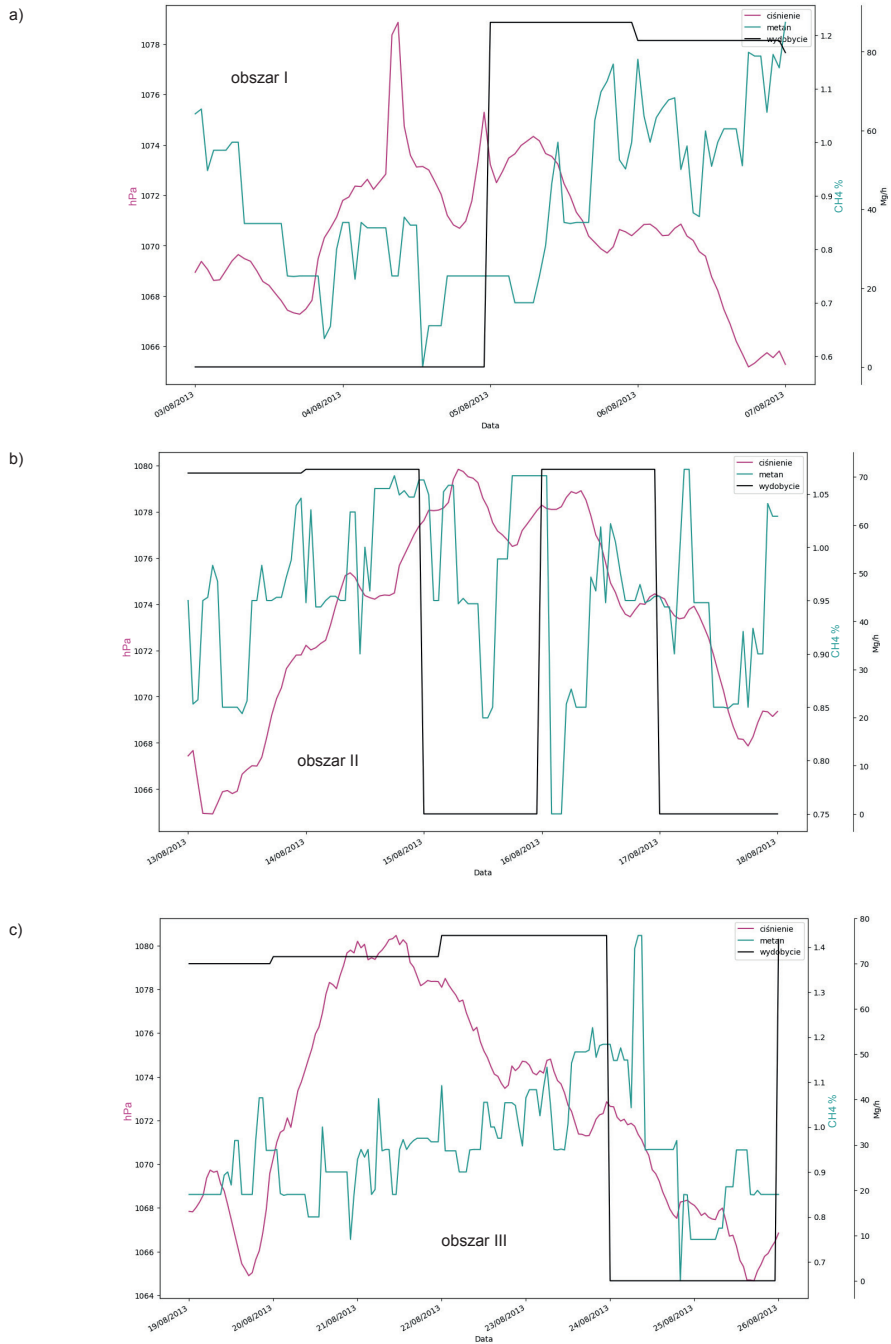
Tabela 4.11

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 410 i wydobyćcia

Sierpień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2, pokład 410	96	1070,601	1070,058	1071,144	1070,628	1065,186	1078,866	2,68184	0,273714
	96	0,884	0,855	0,914	0,850	0,580	1,168	0,14680	0,014983
	96	42,584	33,904	51,264	41,433	0,000	87,471	42,83918	4,372256
Obszar II ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	120	1073,562	1072,803	1074,320	1074,226	1064,924	1079,842	4,19673	0,383107
	120	0,957	0,943	0,971	0,950	0,750	1,073	0,07877	0,007191
	120	42,785	36,444	49,126	70,792	0,000	71,567	35,08143	3,202482
Obszar III ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	168	1072,561	1071,844	1073,277	1072,290	1064,669	1080,466	4,70613	0,363086
	168	0,951	0,931	0,971	0,949	0,658	1,426	0,12894	0,009948
	168	52,232	47,174	57,289	71,567	0,000	76,238	33,20637	2,561927



Rysunek 4.17. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie D-2, w pokładzie 410, w sierpniu 2013 roku



Rysunek 4.18. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobyćia w ścianie D-2, w pokładzie 410, w sierpniu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Tabela 4.12

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 410

Sierpień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,547236	0,468207
	R_d	0,299467	0,219217
	T	-6,33904	5,137317
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000002
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja przeciętna
	Statystycznie	istotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,248487	-0,047610
	R_d	0,061746	0,002267
	T	2,786660	-0,517766
	Prawdopodobieństwo	0,006208	0,605591
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja niska
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,164227	0,108592
	R_d	0,026971	0,011792
	T	2,145041	1,407430
	Prawdopodobieństwo	0,033404	0,161170
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja niska
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała istnienie korelacji wysokiej i przeciwnie skierowanej między stężeniem metanu a ciśnieniem tylko w przypadku obszaru I. W obszarze tym wystąpiła również korelacja – co prawda przeciętna, ale zgodna – z wydobyciem. Porównanie wyników wskazuje, że około 30% z nich wykazało liniowo odwrotną zależność z ciśnieniem, a 21% liniową zależność z wydobyciem. Mimo to korelacja z wydobyciem była statystycznie nieistotna. W pozostałych dwóch obszarach nie wystąpiła korelacja z wydobyciem, a z ciśnieniem była zgodnie skierowana, lecz słaba. Patrząc jednak na dane przedstawione na rysunku 4.18c, można zauważyć, że wydobycie w obszarze III w całym okresie utrzymywało się właściwie na stałym poziomie, a jego wstrzymanie nastąpiło dopiero 24 sierpnia. Stężenie metanu podlegało jednak zmianom, co mogło istotnie wpłynąć na wyniki analizy statystycznej. W obszarze II (rys. 4.18b) zanotowano dwie przerwy w wydobyciu (15 i 17 sierpnia). W tym czasie zaobserwowano także gwałtowne zmiany stężenia metanu. Uwzględniając poprzednie analizowane miesiące, należy stwierdzić, że zmiany parametrów w sierpniu wykazały się najmniejszą fluktuacją, co może świadczyć o tym, że ściana D-2 prowadzona była w miarę stabilnie, jeżeli wziąć pod uwagę prognozowane wydzielanie metanu. Stężenia wydzielającego się do wyrobiska metanu były jednak w sierpniu znacznie większe niż w poprzednich analizowanych okresach.

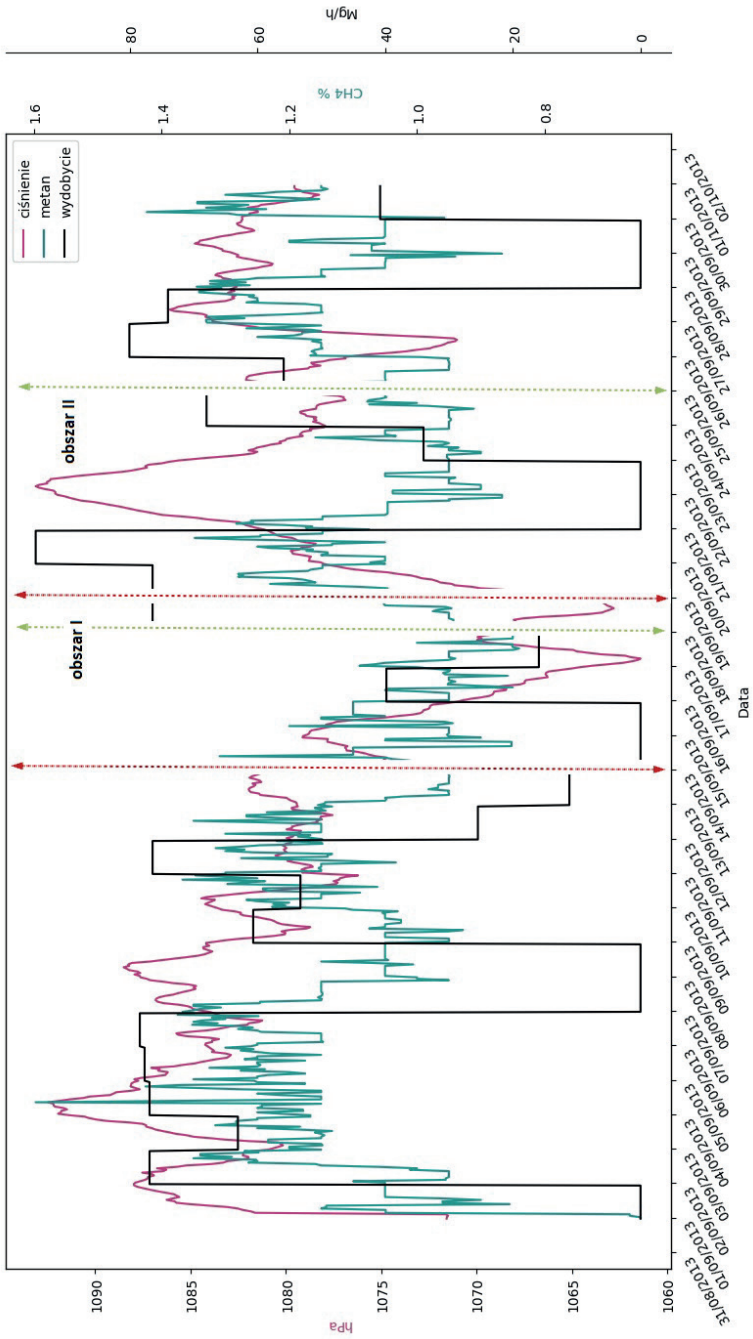
Wrzesień 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.19 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone kolorową przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.13:

- w okresie od 14 do 19 września (obszar I) – ciśnienie między 15 a 17 września spadło z wartości 1079 hPa do około 1061 hPa (18 hPa), a następnie wzrosło do wartości 1070 hPa (9 hPa) – kolor czerwony na rysunku 4.19;
- w okresie od 18 do 25 września (obszar II) – ciśnienie między 18 a 22 września wzrosło z wartości 1062,8 hPa do 1093 hPa (30,2 hPa), aby następnie spaść do wartości 1077,5 hPa (15,5 hPa) zanotowanej 25 września – kolor zielony na rysunku 4.19.

Obserwując zmiany parametrów wykreślonych na rysunku 4.19, można zauważyć wyraźnie postępujący w okresie od 4 do 18 września spadek ciśnienia. W ciągu dwóch tygodni ciśnienie spadło z wartości 1092,5 hPa do 1062,5 hPa (30 hPa), a następnie przez sześć dni ponownie wzrosło o 30,5 hPa. W tym czasie stężenie metanu podlegało fluktuacji, ale również uległo spadkowi. W okresie najniższego ciśnienia 17 września (obszar I) osiągnęło jedną z najniższych wartości – 0,84%. Jedynym niższym było to zaobserwowane 1 września (rys. 4.19), o wartości 0,55% (brak wydobycia). Ponieważ analizowany spadek i wzrost ciśnienia przypadł na okres od 4 do 23 września, zdecydowano się wyrysować zmiany omawianych parametrów (rys. 4.20a–b) w obszarze widocznego na rysunku 4.19 leja. Wykonana analiza pokazała wyraźnie, że postępujący spadek ciśnienia nie wpływał na wzrost wydzielania się metanu, wręcz przeciwnie – obserwowane były spore wahania stężenia metanu (rys. 4.20a), z tendencją malejącą, a następnie jego wzrost przy jednoczesnym wzroście ciśnienia (rys. 4.20b). Spadki i ewentualne wzrosty stężenia metanu przypadły ewidentnie na obszary zmian w wielkości wydobycia (rys. 4.20b). Na przykład między 22 a 23 września (obszar II, rys. 4.20b) najwyższe zanotowane ciśnienie (1093 hPa) odpowiadało wartości 0,86% stężenia metanu. Należy jednak zaznaczyć, że 21 września wydobycie spadło do zera, co prawdopodobnie było przyczyną spadku stężenia metanu. Z rysunku 4.19 wynika, że od 12 do 22 września zmiany w wydobyciu także utworzyły swoistego rodzaju lej, którego konsekwencją był spadek stężenia metanu.

W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między ciśnieniem a stężeniem oraz między stężeniem a wydobyciem. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.14. Analiza danych potwierdziła powyższe rozważania. Mimo że w obszarze I korelacja stężenia metanu z wydobyciem była przeciwnie skierowana, słaba i statystycznie nieistotna, to taką samą korelację, tyle że zgodnie skierowaną, zanotowano w przypadku ciśnienia. Oznacza to, że wzrost ciśnienia powodował wzrost stężenia metanu. W obszarze II korelacja była przeciwnie skierowana, ale również słaba i statystycznie nieistotna – jedynie 1,4% wyników można tłumaczyć liniową zależnością od ciśnienia. Pewna odwrotna zależność od ciśnienia powstała na odcinku między 21 a 25 września (rys. 4.20b). Jednocześnie obszar ten przypadł na czas spadku wydobycia, co również pokazała analiza statystyczna. W obszarze II istniała korelacja zgodnie skierowana z wydobyciem, ale również słaba i statystycznie nieistotna – zaledwie 8% wyników stężenia metanu można było tłumaczyć liniową zależnością od wydobycia.



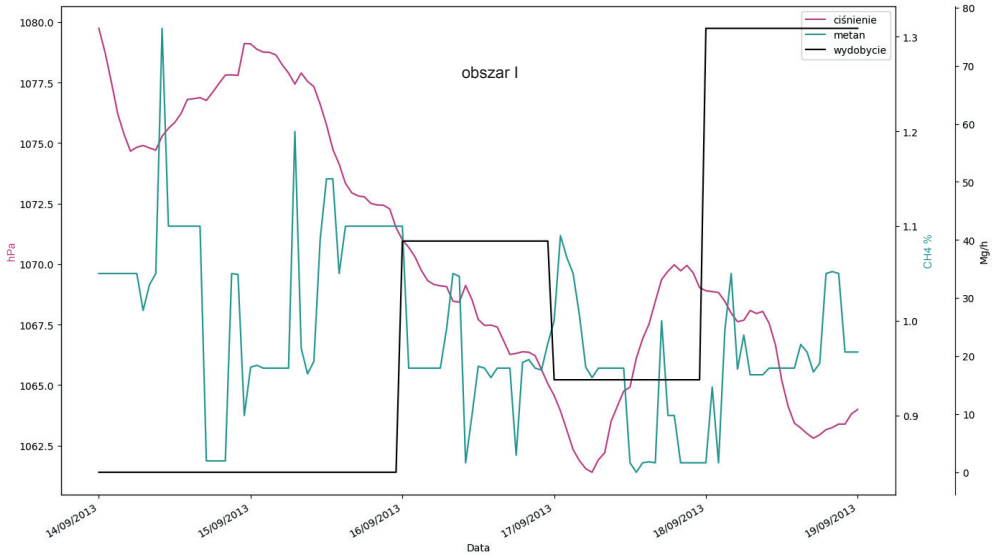
Rysunek 4.19. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie D-2 w pokładzie 410 we wrześniu 2013 roku

Tabela 4.13

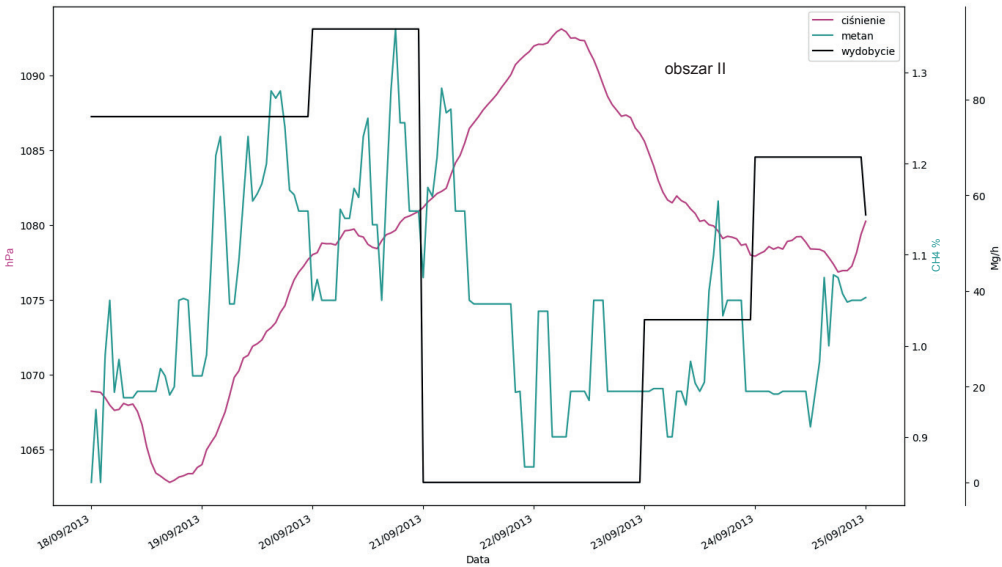
Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2 w pokładzie 410 i wydobytcie

Wrzesień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1070,34	1069,37	1071,31	1069,14	1061,40	1079,74	5,35288	0,488648
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	0,99	0,97	1,00	0,95	0,84	1,31	0,08799	0,008032
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	26,44	21,18	31,69	15,93	0,00	76,44	29,06164	2,652952
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany D-2	1078,95	1077,70	1080,20	1079,11	1062,81	1093,11	8,20257	0,632842
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany D-2	1,04	1,02	1,06	1,05	0,85	1,35	0,10916	0,008422
	wydobytcie	49,95	44,47	55,42	67,99	0,00	94,75	35,92592	2,771745

a)



b)



Rysunek 4.20. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie D-2 w pokładzie 410 we wrześniu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II

Tabela 4.14

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany D-2 w pokładzie 410

Wrzesień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,277873	-0,290993
	R_d	0,077214	0,084677
	T	3,142226	-3,30397
	Prawdopodobieństwo	0,002120	0,001262
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,121177	0,284987
	R_d	0,014684	0,081217
	T	-1,57285	3,830646
	Prawdopodobieństwo	0,117657	0,000181
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Analiza zmian ciśnienia, stężenia metanu i wydobywania w okresie ruchu ściany D-2 w pokładzie 410 pokazała, że największe fluktuacje parametrów przypadały na okres rozruchu ściany (kwiecień). Wtedy także zaobserwowano przeciwnie skierowane, wysokie korelacje stężenia metanu z ciśnieniem. Warto jednak zaznaczyć, że w każdym z badanych obszarów tego miesiąca występowała – co prawda słaba, ale jednak zgodna – korelacja z wydobywaniem. W kolejnych miesiącach obserwowana była tendencja wzrostowa przebiegu zmian stężenia metanu (czerwiec) i jego stabilizacja (sierpień). W czerwcu zanotowano zgodnie skierowaną, wysoką korelację stężenia metanu z wydobywaniem (obszar III), podobnie jak w obszarze I w sierpniu. W przypadku ciśnienia w czerwcu i sierpniu korelacja ze stężeniem metanu była zgodnie skierowana. Jedynym wyjątkiem był obszar I w sierpniu. Duże fluktuacje badanych parametrów i słabe zależności statystyczne zaobserwowano we wrześniu. Należy zaznaczyć, że w tym czasie kończono eksploatację ściany. Ostatecznie nastąpiło to w październiku. Spośród przebadanych czterech miesięcy (jedenaście obszarów) zaledwie w przypadku trzech wykazano statystycznie wysoką zależność od ciśnienia, w sześciu wystąpiła korelacja zgodna, a w dwóch przeciwna, ale słaba. W przypadku wydobywania wysoka korelacja wystąpiła tylko raz, ale w ośmiu badanych obszarach, bez względu na to, czy słaba, czy przeciwna, była zgodnie skierowana. Tylko w dwóch obszarach zanotowano korelację przeciwną. Wszelkie zmiany stężenia metanu z dużą dozą prawdopodobieństwa należy przypisywać zmianom wydobywania.

Przeprowadzona analiza statystyczna w ścianie D-2 pokładu 410 pokazała wysoką korelację stężenia metanu z ciśnieniem, ale tylko w pierwszym miesiącu ruchu ściany. W tych dwóch przypadkach odpowiednio 63% i 56% wyników stężeń można tłumaczyć odwrotną, liniową zależnością od ciśnienia. W obszarze I w sierpniu wartość ta wynosiła jedynie 30%. Biorąc pod uwagę liczbę przebadanych obszarów i fakt, że okresy wysokiej korelacji od ciśnienia występowały na początku biegu ściany, nie można jednoznacznie stwierdzić występowania zależności stężenia metanu od ciśnienia.

4.3.3. Ściana F-3 w pokładzie 406/1

KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch „Zofiówka”

Ściana F-3 w pokładzie 406/1 przewietrzana była początkowo systemem na „Y”, ale w połowie ruchu ściany system został zmieniony na „U”. Schemat systemu przewietrzania wraz z zabezpieczeniami telemetrycznym przedstawiono na rysunku 4.21. Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie istniejącej zależności między zmianami ciśnienia barometrycznego a emisją metanu do wyrobiska.

Badania wykonywano w okresie od marca do maja 2016 roku, w czasie przewietrzania ściany systemem na „U”. Analizie poddano wyniki pokazane przez czujnik pomiaru ciśnienia bezwzględnego 621 (czujnik nr 13 – rys. 4.21), zabudowanego w chodniku podścianowym F-3 w pokładzie 406/1, w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przecinką wentylacyjną. Stężenie metanu mierzono za pomocą czujnika CH₄ MM-130, również zabudowanego w chodniku podścianowym F-3 w pokładzie 406/1, w odległości 10–15 m przed skrzyżowaniem z przecinką wentylacyjną (czujnik nr 11 – rys. 4.21). Na podstawie zebranych wyników wyznaczono średnie ciśnienia i stężenia charakterystyczne dla danej godziny. Uzyskane wyniki porównano z wydobyciem osiągniętym w analizowanym czasie. Na rysunku 4.22 przedstawiono wyniki z całego badanego okresu.

Na podstawie analizy pomiarów zamieszczonej na rysunku 4.22 stwierdzono dużą fluktuację stężenia metanu, ciśnienia i wydobycia. Z przedstawionych danych można jednak wywnioskować, że na przełomie kwietnia i maja nastąpił dość znaczny spadek stężenia metanu. W związku z dużą liczbą wyników i utrudnioną ich interpretacją postanowiono wykreślić zmiany miesięczne (rys. 4.23, 4.25, 4.27), a następnie obszarowe (rys. 4.24, 4.26, 4.28). W wyodrębnionych obszarach dokonano analizy statystycznej w celu określenia korelacji między stężeniem a ciśnieniem i wydobyciem.

Marzec 2016 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.23 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone przerywaną czerwoną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki, które można opisać następująco, zamieszczono w tabeli 4.15:

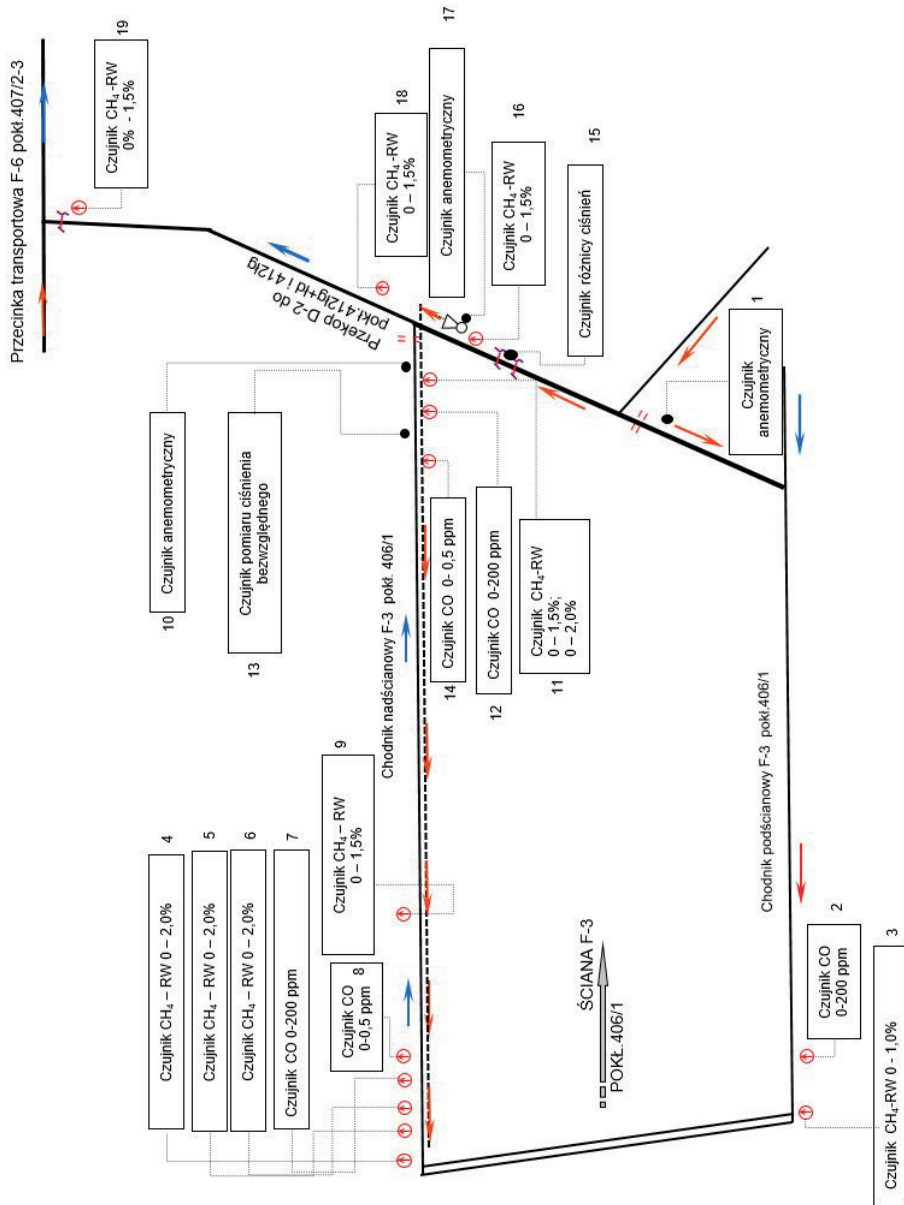
- w okresie od 6 do 15 marca (obszar I) – ciśnienie 6 marca osiągnęło minimalną wartość 1045,5 hPa i w ciągu następnych trzynastu dni wzrosło prawie o 39,5 hPa do wartości 1085 hPa, a następnie spadło do wartości 1071 hPa (14 hPa);
- w okresie od 17 do 25 marca (obszar II) – zanotowano spadek ciśnienia z wartości 1084,24 hPa do 1062 hPa (22,24 hPa), jego wzrost o 9 hPa i kolejny spadek do wartości 1055,98 hPa (15,02 hPa);
- ponieważ na końcu miesiąca wystąpił dość duży spadek stężenia metanu (rys. 4.23), wykreślono dodatkowo ostatni tydzień miesiąca (obszar III).

Obserwując zmiany parametrów wykreślonych na rysunku 4.23, można zauważyć, że z początkiem miesiąca nastąpił spadek ciśnienia, później jego delikatny wzrost i ponowny

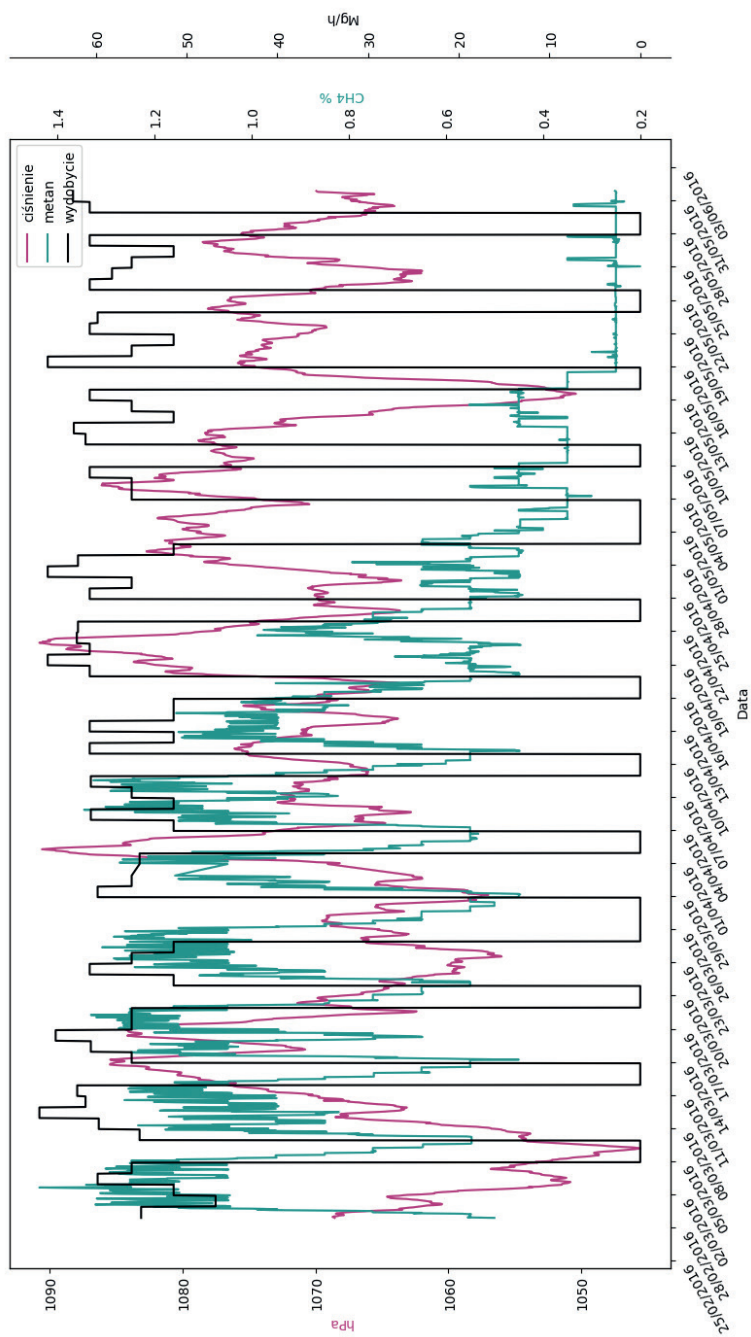
spadek do wartości 1045,5 hPa (tab. 4.15). W kolejnych trzynastu dniach ciśnienie wzrosło, osiągając 15 marca najwyższą wartość 1085,45 hPa. Na rysunku 4.23 doskonale widać omawianąwyżkę i niżkę ciśnienia w obszarach I i II. Dodatkowo zauważalna jest duża fluktuacja stężenia metanu, czego przyczyną były prawdopodobnie widoczne na rysunku 4.23 zmiany wydobywania. Podobnie jak w przypadku pozostałych ścian, także tutaj dokonano szczegółowej obserwacji wybranych obszarów (rys. 4.24a–c). W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.16. W obszarze I (rys. 4.24a) wyraźnie zauważalne były zmiany stężenia metanu – od wartości około 0,5% (7 marca) do 1,26% (między 10 a 11 marca – tab. 4.15), czemu towarzyszył wzrost ciśnienia. Dwunastego marca stężenie metanu zaczęło spadać, osiągając 14 marca najniższą wartość 0,45% (tab. 4.15). Można by ten spadek uzasadnić wzrostem ciśnienia, 14 marca zanotowano bowiem jego najwyższą wartość, ale zaobserwowane na rysunkach 4.23 i 4.24a zmiany wydobywania wyraźnie pokazały, że w dniu tym nie prowadzono eksploatacji. Po ponownym uruchomieniu ściany stężenie metanu wzrosło. Pewną zależność zmian stężenia od ciśnienia można zaobserwować między szesnastą a siedemnastą dobą, między obszarami (rys. 4.23), w których nastąpił spadek stężenia metanu (około 0,65%) przy wzroście ciśnienia (1084,5 hPa). Podobna sytuacja w badanym okresie już nie wystąpiła, zaobserwowano jednak gwałtowny spadek stężenia metanu po 18 marca – z równoczesnym wstrzymaniem wydobywania (rys. 4.24b).

Analiza statystyczna przedstawiona w tabeli 4.16 potwierdziła powyższe rozważania. W obszarach I i II zanotowano zgodnie skierowaną, wysoką i istotną statystycznie korelację stężenia metanu z wydobywaniem. W obszarze I około 30% wyników stężeń metanu, a w obszarze II około 35% można było tłumaczyć liniową zależnością z wydobywaniem. W przypadku ciśnienia w obu obszarach korelacja była zgodnie skierowana, ale nikła. Potwierdza to fakt, że spadek stężenia metanu po 12 marca można było jednoznacznie powiązać ze spadkiem wydobywania. Podobnie wzrost stężenia metanu po 21 marca (rys. 4.24b) przy obniżeniu ciśnienia wynikał ze zmian wydobywania.

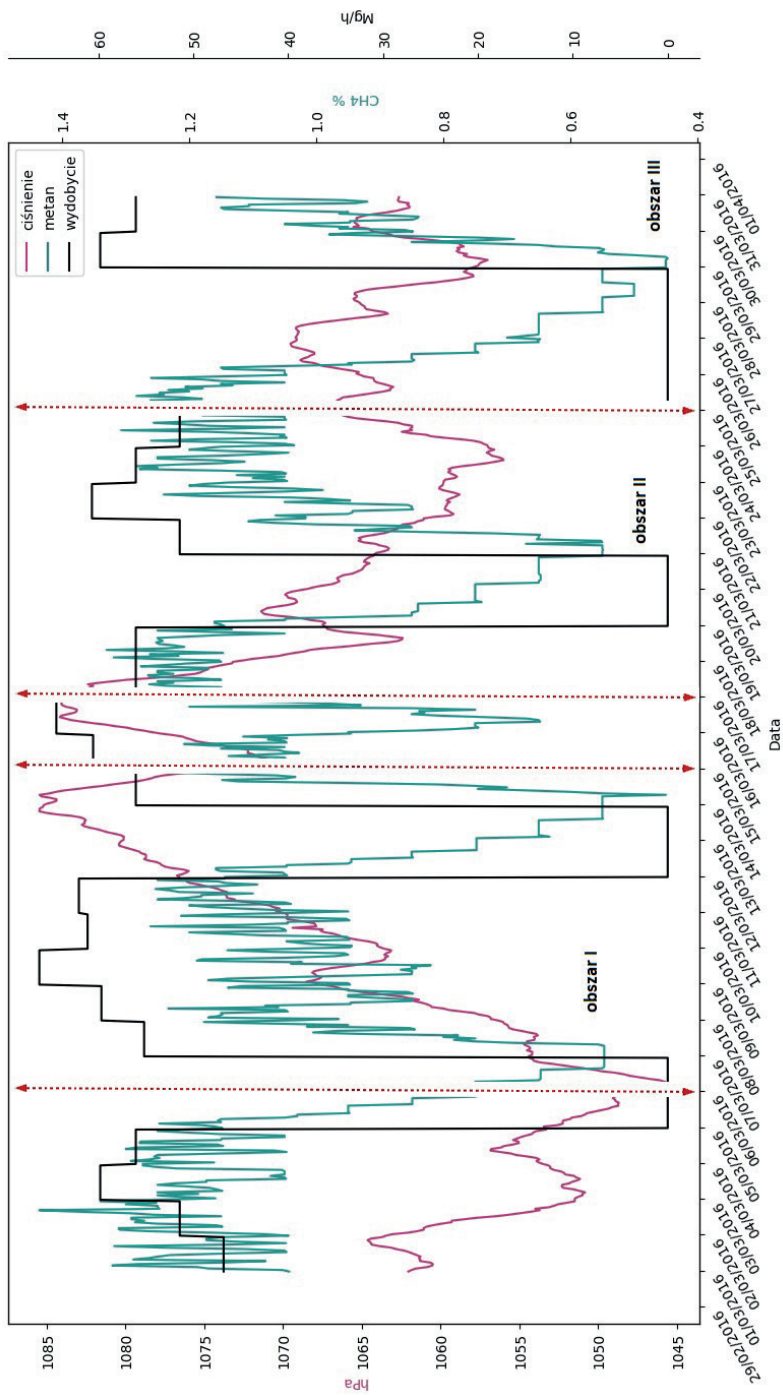
Wpływ wydobywania na zmiany stężenia metanu jest bardzo dobrze widoczny w obszarze III (rys. 4.24c), w którym między dwudziestą czwartą a dwudziestą dziewiątą dobą nie prowadzono eksploatacji. Spowodowało to wyraźny spadek stężenia metanu. Wznowienie wydobywania wywołało wzrost stężenia mimo wzrostu ciśnienia. Obserwacji tych nie potwierdziła jednak analiza statystyczna. W obszarze tym wystąpiła – zarówno w przypadku wydobywania, jak i ciśnienia – korelacja zgodnie skierowana, ale słaba i statystycznie nieistotna. Potwierdziło to brak zależności stężenia metanu od ciśnienia, ponieważ mimo gwałtownego obniżenia stężenia metanu przy wzroście ciśnienia (między 24 a 29 marca) jedynie 2% wyników można tłumaczyć liniową zależnością tych dwóch parametrów. W przypadku korelacji stężeń metanu z wydobywaniem była ona również słaba, ale na ten wynik niewątpliwie wpływ miał fakt, że przez cztery doby z siedmiu badanych w obszarze nie prowadzono wydobywania.



Rysunek 4.21. Schemat lokalizacji czujników zabezpieczających w rejonie ściany F-3 w pokładzie 406/1



Rysunek 4.22. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w okresie od marca do maja 2016 roku

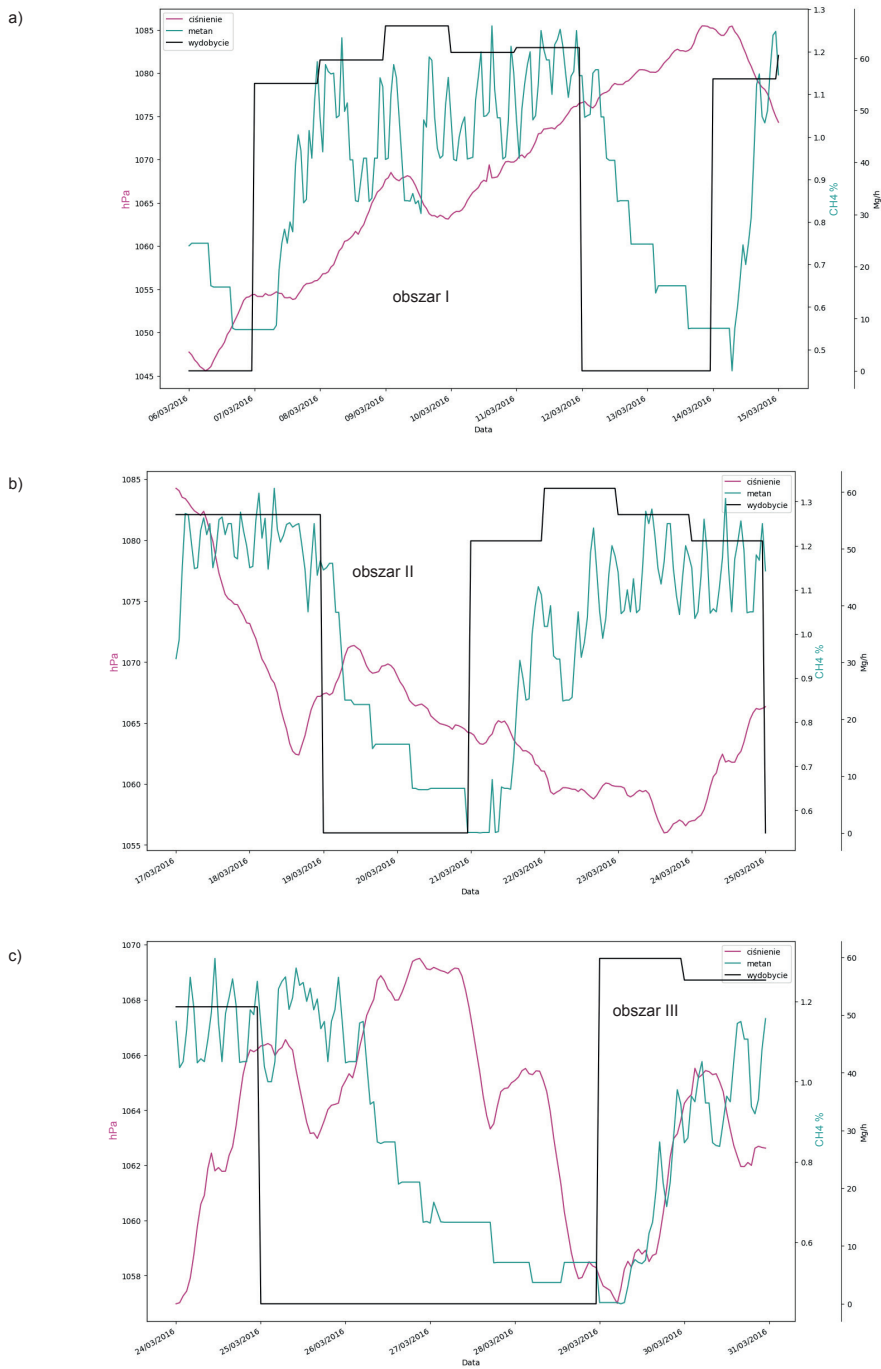


Rysunek 4.23. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania metanu w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w marcu 2016 roku

Tabela 4.15

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3 w pokładzie 406/1 i wydobyćcie

Marzec	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1068,167	1066,640	1069,694	1067,964	1045,563	1085,445	11,38500	0,774651
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	0,885	0,855	0,916	0,946	0,450	1,261	0,22513	0,015318
	wydobyćcie	40,028	36,201	43,854	56,042	0,000	66,208	28,53270	1,941404
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1065,549	1064,597	1066,500	1064,582	1055,988	1084,246	6,68729	0,482614
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	1,000	0,967	1,032	1,050	0,549	1,330	0,22894	0,016522
	wydobyćcie	41,453	38,015	44,891	53,729	0,000	60,667	24,15371	1,743144
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1063,745	1063,204	1064,286	1064,256	1056,978	1069,505	3,53874	0,273836
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	0,849	0,808	0,889	0,850	0,447	1,307	0,26473	0,020486
	wydobyćcie	24,036	19,791	28,281	0,000	0,000	59,792	27,78413	2,150001



Rysunek 4.24. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w marcu 2016 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Tabela 4.16

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany F-3 w pokładzie 406/1

Marzec	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,013041	0,510589
	R_d	0,000170	0,260701
	T	0,190793	8,686972
	Prawdopodobieństwo	0,848869	0,000000
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,071122	0,586012
	R_d	0,005058	0,343409
	T	0,982840	9,968634
	Prawdopodobieństwo	0,326936	0,000000
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,147590	0,157725
	R_d	0,021783	0,024877
	T	1,916822	0,024877
	Prawdopodobieństwo	0,056989	0,041780
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Kwiecień 2016 roku

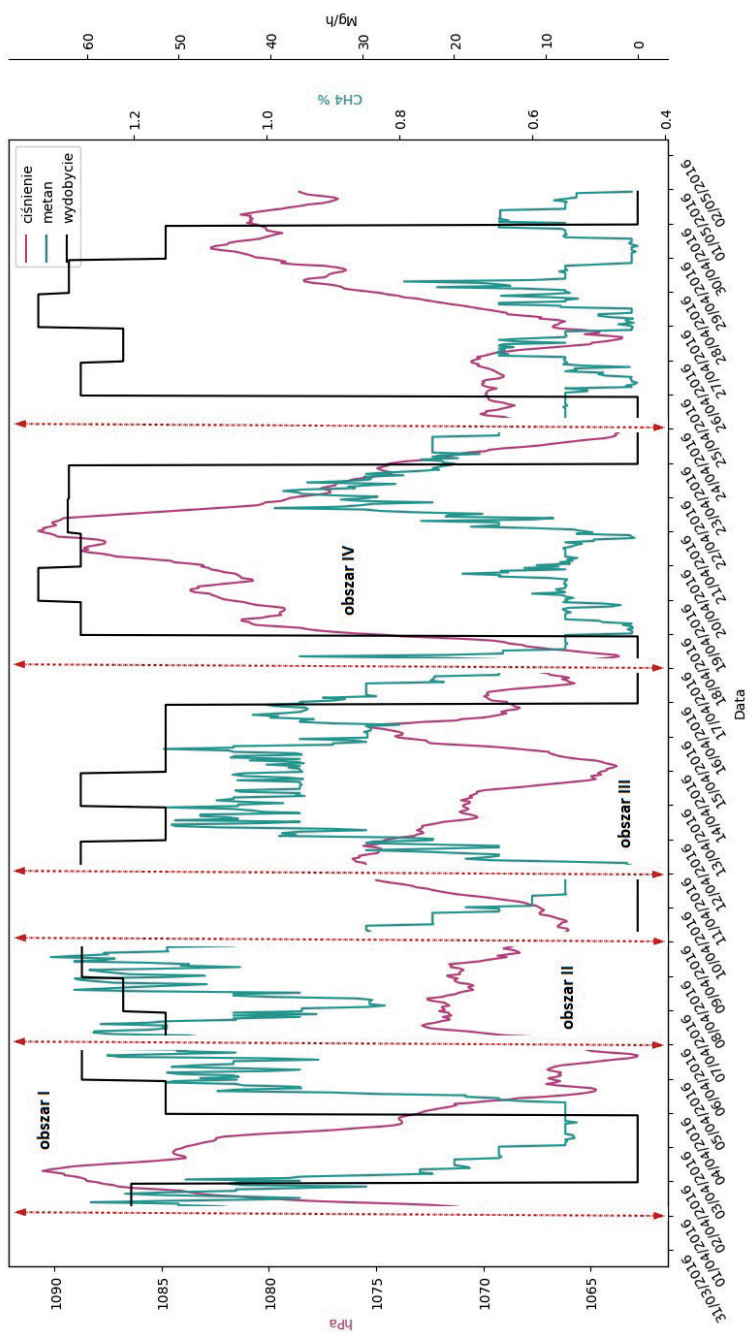
Podobnie jak w marcu także w kwietniu w celu dokładnego przeanalizowania wyników wykreślono zmiany ciśnienia, stężenia i wydobycia w poszczególnych obszarach (rys. 4.25). Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia. W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.17:

- w okresie od 1 do 6 kwietnia (obszar I) – ciśnienie między 1 a 2 kwietnia wzrosło z wartości 1068 hPa do około 1090,55 hPa (22,5 hPa), aby w czwartej dobie spaść do wartości 1062,79 hPa (27,76 hPa);
- w okresie od 5 do 9 kwietnia (obszar II) – wzrost ciśnienia (10 hPa), jego spadek (6,5 hPa) i kolejny wzrost (10 hPa);
- w okresie od 11 do 17 kwietnia (obszar III) – spadek ciśnienia (12,5 hPa) i jego wzrost o 11,5 hPa;
- w okresie od 17 do 24 kwietnia (obszar IV) – ciśnienie między 17 a 21 kwietnia wzrosło z wartości 1063 hPa do 1090,75 hPa (27,75 hPa), a następnie zaczęło spadać, osiągając 24 kwietnia wartość 1063 hPa (27,75 hPa).

W kwietniu zaobserwowano duże wahania ciśnienia (rys. 4.25), przy czym w kontekście prowadzonych analiz najbardziej interesujące wydają się obszary I i IV, tam bowiem zmiany te były największe. W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.18.

Na podstawie analizy obszaru I (rys. 4.26a) stwierdzono, że przy wzroście ciśnienia stężenie metanu było stałe, a jego spadek nastąpił dopiero 2 kwietnia. Podobna sytuacja wystąpiła 17 kwietnia (spadek stężenia z 0,95% na 0,45%) w obszarze IV (rys. 26d). Z rysunku 4.26a i 4.26c–d wyraźnie jednak wynika, że zmiany te były spowodowane spadkiem wydobywania. Między 4 a 6 kwietnia (rys. 4.26a) stężenie metanu znacznie wzrosło (wzrost wydobywania) i wahało się do 6 kwietnia. Analiza statystyczna wykazała w obszarze I wysoką i zgodnie skierowaną korelację stężenia metanu z wydobywaniem. Prawie 45% wyników wykazuje liniową zależność tych parametrów (tab. 4.18). Jednocześnie w obszarze tym wystąpiła przeciętna, przeciwnie skierowana korelacja stężeń metanu z ciśnieniem. Niespełna 13% wyników stężeń jest efektem zmian ciśnienia. Najprawdopodobniej za tę korelację odpowiadało obniżenie ciśnienia między 4 a 6 kwietnia, które wiązało się ze wznowieniem wydobywania 4 kwietnia. Po chwilowych wahaniami od 6 do 7 kwietnia nastąpił spadek stężenia metanu (rys. 4.26b) z wartości 1,26% do 0,82% (tab. 4.17), a następnie jego wzrost do 1,3%. Zmiany te odpowiadały niewielkim wahaniami ciśnienia. Analiza statystyczna wykazała, że w obszarze II wystąpiła słaba, przeciwnie skierowana korelacja stężenia metanu z ciśnieniem i była ona statystycznie nieistotna. Ponieważ w obszarze II wydobywanie do 8 kwietnia nie podlegało wielkim zmianom, analiza statystyczna wykazała nikłą jego korelację ze stężeniem metanu. Po zanotowanym wzroście tego stężenia (7 kwietnia) podlegało ono delikatnej fluktuacji, a następnie zaczęło spadać między 8 a 11 kwietnia (rys. 4.25) – od wartości 1,3% do 0,45% (obszar III). Wtedy także zanotowano przestój (rys. 4.25), którego nie uwzględniono w analizie obszarowej. Wzrost stężenia metanu od 11 do 13 kwietnia (rys. 4.26c) do wartości 1,15% (tab. 4.17) należy przypisać wznowieniu wydobywania. Ponieważ wzrostowi stężenia odpowiadało obniżenie ciśnienia, analiza statystyczna wykazała między tymi parametrami korelację przeciwnie skierowaną, ale przeciętną i nieistotną (tab. 4.18). W dalszej części obszaru, gdzie ciśnienie osiągnęło najniższą wartość 1063,77 hPa (tab. 4.17), między 12 a 15 kwietnia stężenie metanu, mimo że podlegało fluktuacji, utrzymywało się jednak na w miarę stałym poziomie.

W obszarze III do 16 kwietnia wydobywanie nie podlegało dużym zmianom, co wpłynęło istotnie na wynik analizy statystycznej, wykazała ona bowiem korelację stężenia metanu z wydobywaniem zgodnie skierowaną, słabą i statystycznie nieistotną (tab. 4.18). W przypadku największej zmiany ciśnienia (między 18 a 24 kwietnia – rys. 4.26d) stężenie metanu podlegało najpierw fluktuacji, a przy maksymalnej wartości 1090,75 hPa (tab. 4.17) spadło (21 kwietnia) do 0,45%, a następnie wzrosło do 0,98% (tab. 4.17). Zmiana ta współwystępowała ze spadkiem ciśnienia, co wykazała analiza statystyczna. Korelacja ciśnienia ze stężeniem metanu była przeciwnie skierowana, ale podobnie jak w poprzednim obszarze – przeciętna i statystycznie nieistotna. Ponieważ wydobywanie w obszarze IV – poza jednym wzrostem (18 kwietnia) i spadkiem (23 kwietnia) – było właściwie stałe, analiza statystyczna wykazała jego nikłą korelację ze stężeniem metanu.



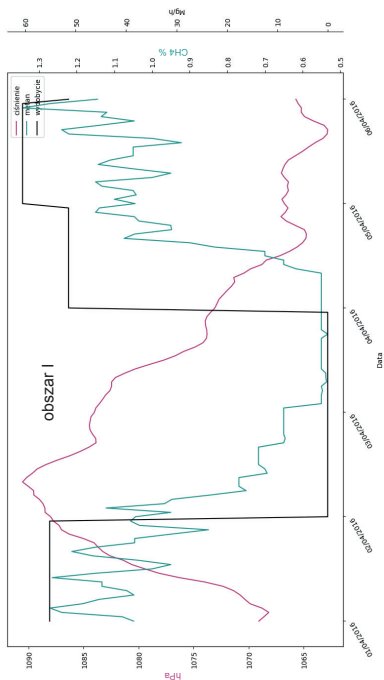
Rysunek 4.25. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w kwietniu 2016 roku

Tabela 4.17

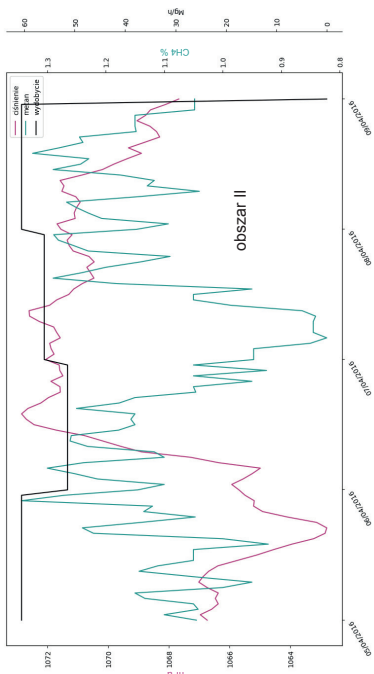
Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3 w pokładzie 406/1 i wydobytcie

Kwiecień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1075,483	1073,897	1077,068	1073,800	1062,799	1090,556	8,77197	0,800768
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	0,857	0,812	0,902	0,911	0,533	1,344	0,24959	0,022784
	wydobytcie	33,425	28,443	38,407	51,417	0,000	60,542	27,56020	2,515891
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1069,181	1068,604	1069,757	1070,465	1062,799	1072,854	2,84613	0,290482
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	1,117	1,091	1,142	1,140	0,822	1,344	0,12708	0,012970
	wydobytcie	57,135	56,366	57,905	58,292	51,417	60,542	3,79824	0,387656
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1070,450	1069,863	1071,037	1070,518	1063,774	1076,090	3,56355	0,296963
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	0,889	0,863	0,915	0,945	0,448	1,155	0,15663	0,013053
	wydobytcie	45,931	42,467	49,394	51,417	0,000	60,667	21,02631	1,752193
Obszar IV	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	1078,132	1076,930	1079,335	1079,452	1063,636	1090,751	7,89423	0,609053
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	0,651	0,630	0,672	0,640	0,446	0,988	0,13649	0,010530
	wydobytcie	44,381	40,087	48,675	60,667	0,000	65,292	28,18939	2,174859

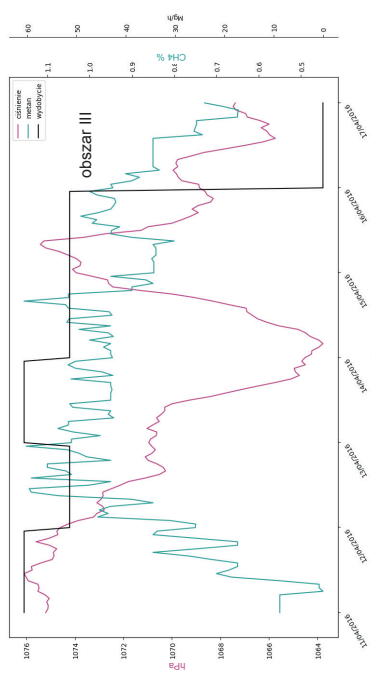
a)



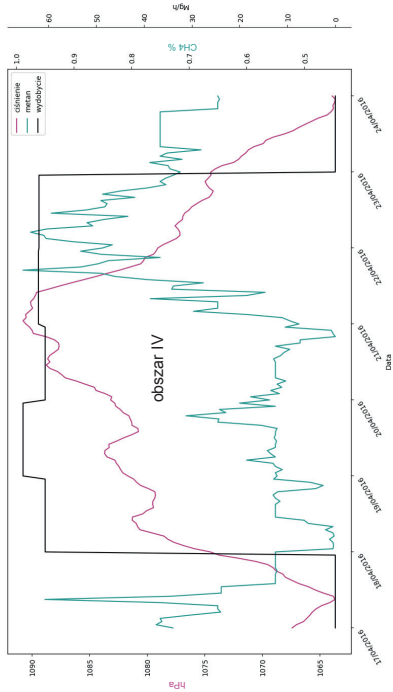
b)



c)



d)



Rysunek 4.26. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobycia w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w kwietniu 2016 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III; d) obszar IV

Tabela 4.18

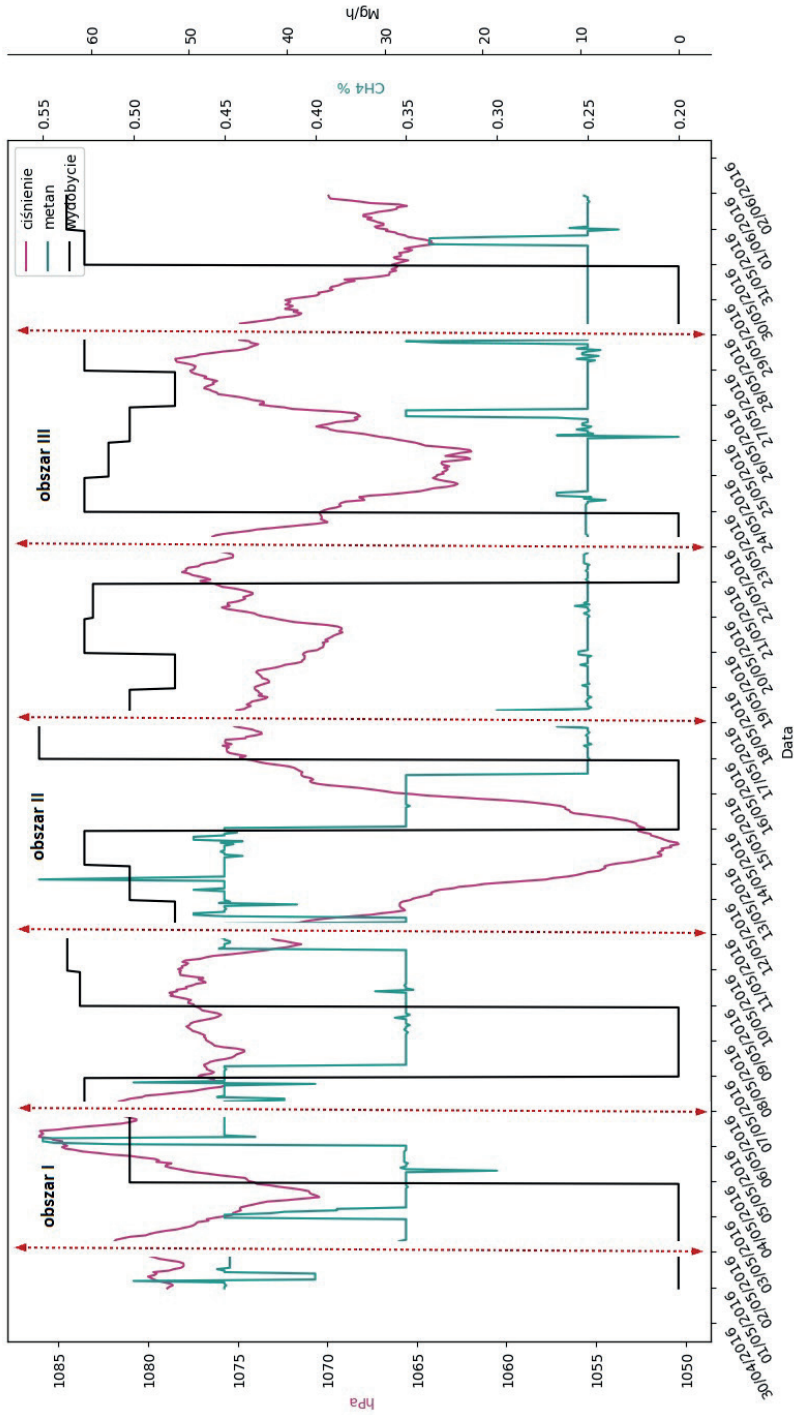
Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany F-3 w pokładzie 406/1

Kwiecień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,360605	0,676340
	R_d	0,130036	0,457435
	T	-4,19973	9,974244
	Prawdopodobieństwo	0,000052	0,000000
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,173038	0,038194
	R_d	0,029942	0,001459
	T	-1,70336	0,370574
	Prawdopodobieństwo	0,091805	0,711789
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja nikła
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	-0,464522	0,141259
	R_d	0,215781	0,019954
	T	-6,25075	1,700348
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,091255
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar IV	$r(x, y)$	-0,339105	-0,155559
	R_d	0,114992	0,024198
	T	-4,64424	-2,02893
	Prawdopodobieństwo	0,000007	0,044063
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja nikła
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Maj 2016 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.27 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone przerywaną czerwoną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.19:

- w okresie od 2 do 6 maja (obszar I) – ciśnienie między 2 a 3 maja spadło z wartości 1082 hPa do około 1070,45 hPa (11,55 hPa), aby w czwartej dobie wzrosnąć do wartości 1086 hPa (15,55 hPa);
- w okresie od 11 do 17 maja (obszar II) – ciśnienie między 11 a 13 maja spadło z wartości 1072 hPa do 1050,40 hPa (21,60 hPa), aby w szesnastej dobie wzrosnąć do wartości 1075,83 hPa (25,43 hPa);
- w okresie od 22 maja do 28 maja (obszar III) – ciśnienie między 22 a 25 maja spadło z wartości 1075,5 hPa do 1061,98 hPa (13,52 hPa), aby w dwudziestej siódmej dobie wzrosnąć do wartości 1078,48 hPa (16,5 hPa).



Rysunek 4.27. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w maju 2016 roku

Tabela 4.19

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3 w pokładzie 406/1 i wydobyćcie

Maj		Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	96	1078,85	1077,97	1079,73	1079,46	1070,45	1086,07	4,34521	0,443481
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	96	0,39	0,38	0,40	0,35	0,30	0,55	0,05788	0,005907
Obszar II	wydobyćcie	96	28,02	22,31	33,73	28,02	0,00	56,04	28,16793	2,874877
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	144	1063,83	1062,38	1065,27	1065,29	1050,40	1075,83	8,76980	0,730816
Obszar III	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	144	0,38	0,36	0,39	0,35	0,25	0,55	0,08327	0,006939
	wydobyćcie	144	38,90	34,30	43,50	53,73	0,00	65,29	27,92767	2,327306
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany F-3	144	1070,73	1069,87	1071,59	1070,36	1061,96	1078,48	5,22441	0,435368
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany F-3	144	0,26	0,25	0,26	0,25	0,20	0,35	0,02165	0,001804
	wydobyćcie	144	47,83	44,26	51,41	57,13	0,00	60,67	21,69828	1,808190

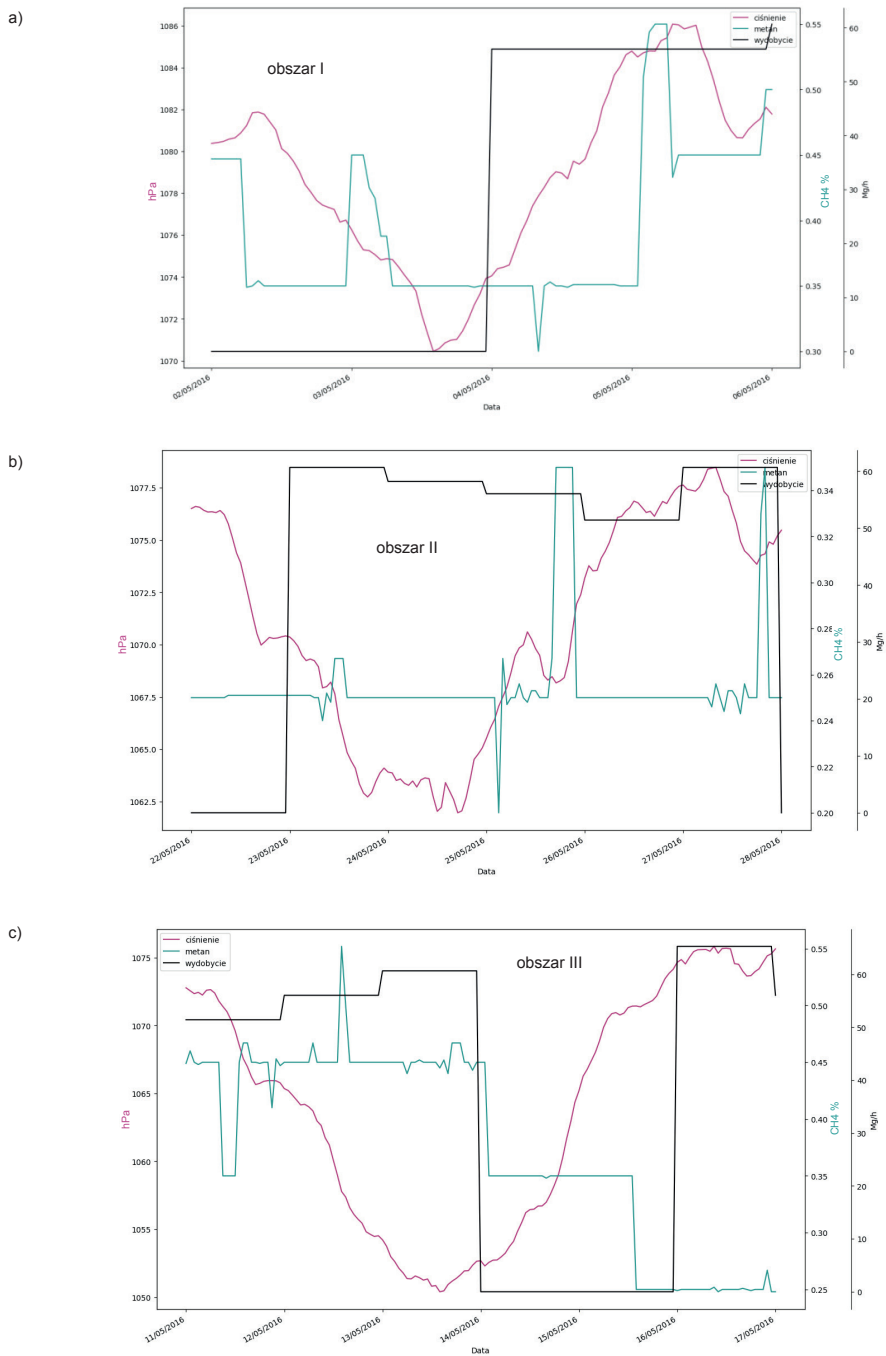
W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.20. W obszarze I (rys. 4.28a) w okresie od 2 do 5 maja zauważalny był początkowo spadek stężenia metanu (konsekwencja braku wydobywania), następnie jego chwilowy wzrost i w czwartej dobie krótkotrwały spadek.

Poza wspomnianymi chwilowymi wahaniami stężenie metanu utrzymywało się na stałym poziomie. W piątej dobie nastąpił gwałtowny wzrost stężenia, który przypadł na moment najwyższego ciśnienia (1086 hPa), a następnie odnotowano spadek stężenia. Analiza statystyczna wykazała wysoką korelację z ciśnieniem, ale zgodnie skierowaną (tab. 4.20). Oznacza to, że wzrost ciśnienia powodował wzrost stężenia metanu. Jednocześnie jednak korelacja z wydobywaniem była słaba, zgodnie skierowana. Należy zwrócić uwagę na fakt, że podobnie jak w poprzednich miesiącach do 4 maja nie prowadzono w ścianie wydobywania, a po jego wznowieniu, do szóstego maja, stężenie utrzymywało się na stałym poziomie.

Z danych statystycznych wynika, że istniała korelacja między stężeniem metanu a wydobywaniem, ale była ona statystycznie nieistotna. Badanie przebiegu zmian parametrów przedstawione na rysunkach 4.27 i 4.28b uwidocznilo spadek stężenia metanu w połowie miesiąca (obszar II). Moment ten przypadł na okres wzrostu ciśnienia, ale ważne jest to, że w tym czasie nastąpił również spadek wydobywania. Co istotne, w okresie spadku ciśnienia, który nastąpił między 11 a 14 maja, stężenie metanu utrzymywało się na w miarę stałym poziomie (zanotowano dwa skoki stężenia). Analiza statystyczna (tab. 4.20) wykazała jednak istnienie korelacji przeciwnie skierowanej i wysokiej z ciśnieniem. Prawie 40% wyników stężenia metanu można było w tym obszarze tłumaczyć liniową korelacją z ciśnieniem. Korelacja zgodnie skierowana z wydobywaniem również istniała, ale podobnie jak w poprzednim obszarze była ona słaba i statystycznie nieistotna (tab. 4.20). Po zanotowanym 14 maja spadku stężenia do końca badanego okresu (obszar III) utrzymywało się na niskim, ale stałym poziomie (około 0,25%), mimo dwóch przerw w wydobywaniu (rys. 4.27).

W maju zanotowano pięć chwilowych skoków stężenia metanu. Pierwsze dwa wystąpiły w obszarze I (3 maja) oraz w obszarze II (12 maja) i mogły być wywołane nagłym dopływem metanu, na przykład z uskoku występującego w górotworze.

Zmiany, które zarejestrowano między 25 a 26 i 27 (rys. 28c) oraz 30 (rys. 4.27) maja, można przypisać spadkom ciśnienia. Obserwowane w wymienionych dniach niżki ciśnienia wahały się od 1,5 hPa do 4 hPa, z kolei w okresie od 18 do 25 maja (rys. 4.27) – od 5 hPa do 14 hPa. W drugim przypadku nie zanotowano gwałtownych zmian stężenia metanu, co więcej, utrzymywało się ono właściwie na stałym poziomie. Potwierdziła to analiza statystyczna, która w obszarze III wykazała nikłą korelację z ciśnieniem (tab. 4.20). Podobnie w badanym obszarze korelacja z wydobywaniem była nikła. Przyczyną braku korelacji było to, że w obszarze III stężenia metanu niewiele się zmieniały. Można zatem przyjąć, że występujące we wspomnianych dniach wahania stężeń miały charakter przypadkowy i były związane z zakresem robót górniczych prowadzonych w ścianie.



Rysunek 4.28. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie F-3, w pokładzie 406/1, w maju 2016 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Tabela 4.20

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany F-3 w pokładzie 406/1

Maj	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,530864	0,280386
	R_d	0,281816	0,078616
	T	6,073359	2,832044
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,005658
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,631990	0,270635
	R_d	0,399411	0,073243
	T	-9,71775	3,350008
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,001035
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	-0,020104	0,096238
	R_d	0,000404	0,009262
	T	-0,239619	1,152155
	Prawdopodobieństwo	0,810971	0,251193
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja nikła
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Analiza danych dotyczących ściany F-3 w pokładzie 406/1 pokazała dużą zmienność ciśnień, stężenia metanu i wydobycia. Podobnie jak w przypadku dwóch omówionych wcześniej ścian widoczna była korelacja zmian stężenia metanu z wydobywaniem. Na dziesięć badanych obszarów w trzech wystąpiła wysoka korelacja zgodnie skierowana, w czterech korelacja była słaba, ale zgodna, a tylko w trzech nikła. W obszarach z nikłą korelacją albo nie zaobserwowano wielkich zmiany wydobywania (kwiecień), albo stężenie metanu było w miarę stałe (maj). W przypadku tej ściany pojawiły się jednak momenty, w których zmiany stężenia metanu można było przypisać zmianom ciśnienia. Wystąpiły one w marcu i w maju. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że w ciągu trzech miesięcy prowadzenia analizy zaobserwowano tylko cztery takie sytuacje, co nie daje podstaw łączenia ich wystąpienia ze zmianą lub zwyżką ciśnienia. Analiza statystyczna wykazała jednoznacznie wystąpienie jednej wysokiej odwrotnej korelacji z ciśnieniem (maj). W pozostałych przypadkach wystąpiły trzy korelacje przeciętne, dwie słabe i trzy nikłe. Zanotowano jeszcze jedną wysoką, ale zgodną korelację. Przedstawione powyżej obserwacje nie pozwalają stwierdzić występowania zależności między stężeniem metanu a zmianami ciśnienia.

4.4. Ocena wpływu ciśnienia barometrycznego na wydzielanie metanu w ścianach z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U” z nadległym chodnikiem drenażowym

4.4.1. Charakterystyka ściany B-11 w pokładzie 348 KWK „Krupiński”

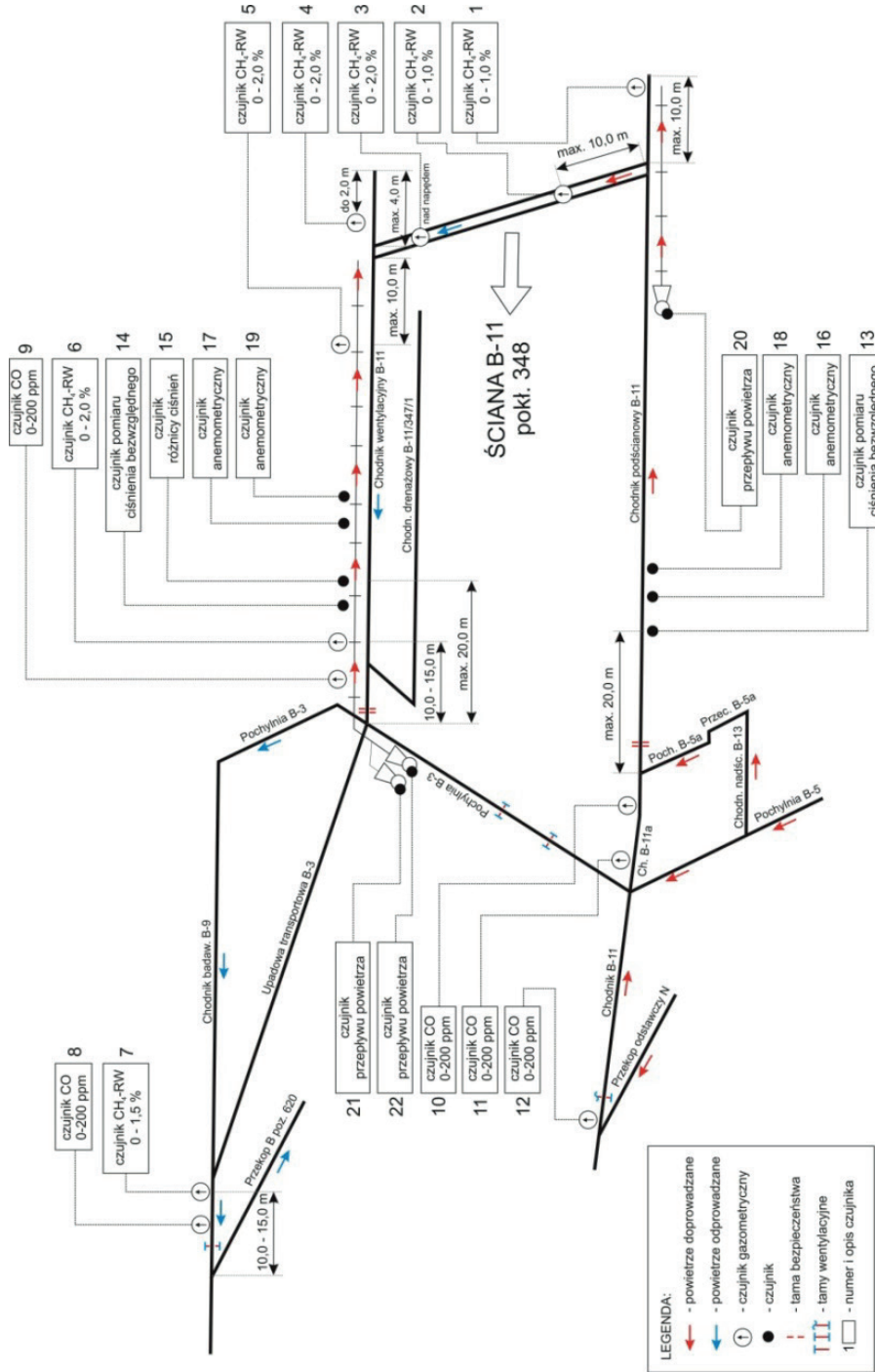
Ściana B-11 w pokładzie 348 prowadzona była w kopalni Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA KWK „Krupiński” w warunkach specjalnych – czwarta kategoria zagrożenia metanowego, zagrożenie wyrzutami gazów i skał oraz związane z eksploatacją prowadzoną poniżej poziomu udostępniania (głębokość od około 750 m do około 860 m). Powyżej ściany B-11 prowadzono wcześniej eksploatację, ale w odległości nie mniejszej niż 200 m. Poniżej ściany eksploatacji nie prowadzono.

Prognoza metanowości przewidywała, że wydzielanie metanu do ściany B-11, przy uwzględnieniu współczynnika postępu, w przypadku planowanego wydobycia od 2000 Mg/dobę do 3600 Mg/dobę miało wynosić od 60,35 m³/min do 66,15 m³/min. Z powodu bardzo dużego zagrożenia metanowego ściana B-11 była przewietrzana systemem na „U” z nadległym chodnikiem drenażowym. W rejonie zabudowano czujniki metanometrii automatycznej, czujniki CO-metrii automatycznej i czujniki anemometryczne. Schemat przewietrzania ściany wraz z rozmieszczeniem czujników przedstawiono na rysunku 4.29.

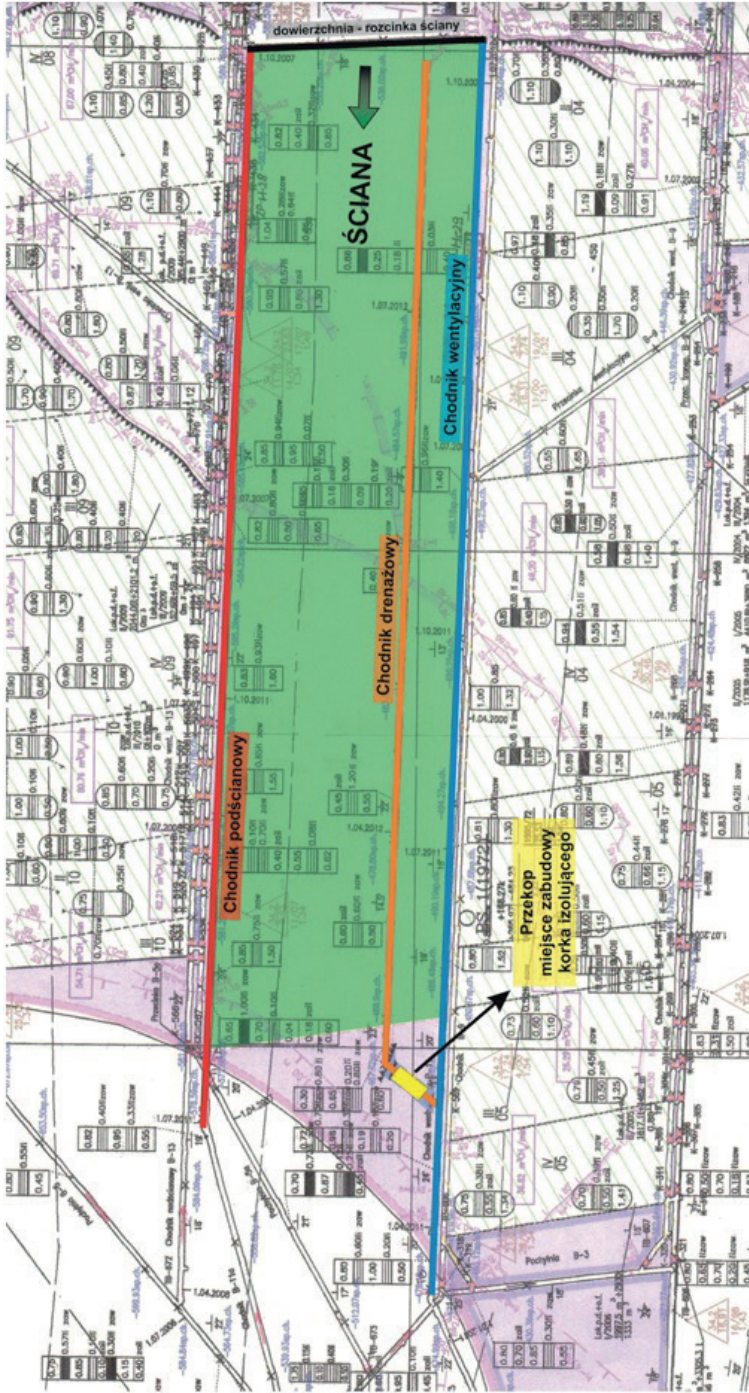
Ze względu na wysoką prognozowaną metanowość ściany i wysokie wymagania dotyczące ujęcia metanu odmetanowanie ściany prowadzono z wykorzystaniem chodnika drenażowego wydrążonego nad polem eksploatacyjnym ściany i otworów metanowych odwierconych z tego chodnika (rys. 4.30). Metan ujmowany był z otamowanego chodnika drenażowego B-11 w pokładzie 347/1 dwoma rurociągami DN400, po czym odprowadzany na poziom 620 i na poziom 820.

Kontrolę zawartości metanu w rejonie ściany B-11 prowadzono zgodnie z obowiązującymi przepisami i instrukcjami, dokonywali jej bowiem między innymi przodowi, kombajniści, strzałowi, konserwatorzy urządzeń metanometrii, elektrycy, pracownicy dozoru oddziału górniczego, metanarze i inni pracownicy zobowiązani do jej wykonywania.

Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie zależności między zmianami ciśnienia barometrycznego a emisją metanu do wyrobiska. Analizie poddano wyniki pomiarów metanu i ciśnienia bezwzględnego wykonane od połowy grudnia 2012 do października 2013 roku. Dane metanometryczne uzyskano z czujnika zabudowanego w chodniku wentylacyjnym B-11/348, w odległości 10–15 m od skrzyżowania z pochylnią B-3 (rys. 4.29, czujnik nr 6), a pomiaru ciśnienia bezwzględnego dokonywano za pomocą czujnika umieszczonego w chodniku wentylacyjnym B-11/348, maksymalnie 20 m od skrzyżowania z pochylnią B-3 (rys. 4.29, czujnik nr 14). Uzyskane wyniki porównano z wydobyciem przypadającym na badany okres.



Rysunek 4.29. Schemat przewietrzania ściany B-11 w pokładzie 348 wraz z rozmieszczeniem czujników gazometrii automatycznej i czujników anemometrycznych – z wentylatorem odświeżającym



Rysunek 4.30. Położenie chodnika drenazowego B-11 w pokładzie 347/1

Ze względu na długi, dziewięć i półmiesięczny czas pomiarów, zebrane dane godzinowe wykreślono w okresach trzymiesięcznych na rysunkach 4.31, 4.32 i 4.33 (na wklejce). Bardzo duża fluktuacja wyników nie pozwoliła na dogłębną analizę, dlatego zdecydowano o wykreśleniu danych w cyklach miesięcznych. Większa przejrzystość wyników pozwoliła wyodrębnić do dalszej obserwacji pięć z dziewięciu miesięcy, w których zaobserwowano największe zmiany ciśnień, mogące potencjalnie wpływać na stężenie metanu. W wyodrębnionych obszarach dokonano analizy statystycznej w celu określenia korelacji między stężeniem a ciśnieniem i wydobyciem.

Grudzień 2012 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.34 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia. W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.21:

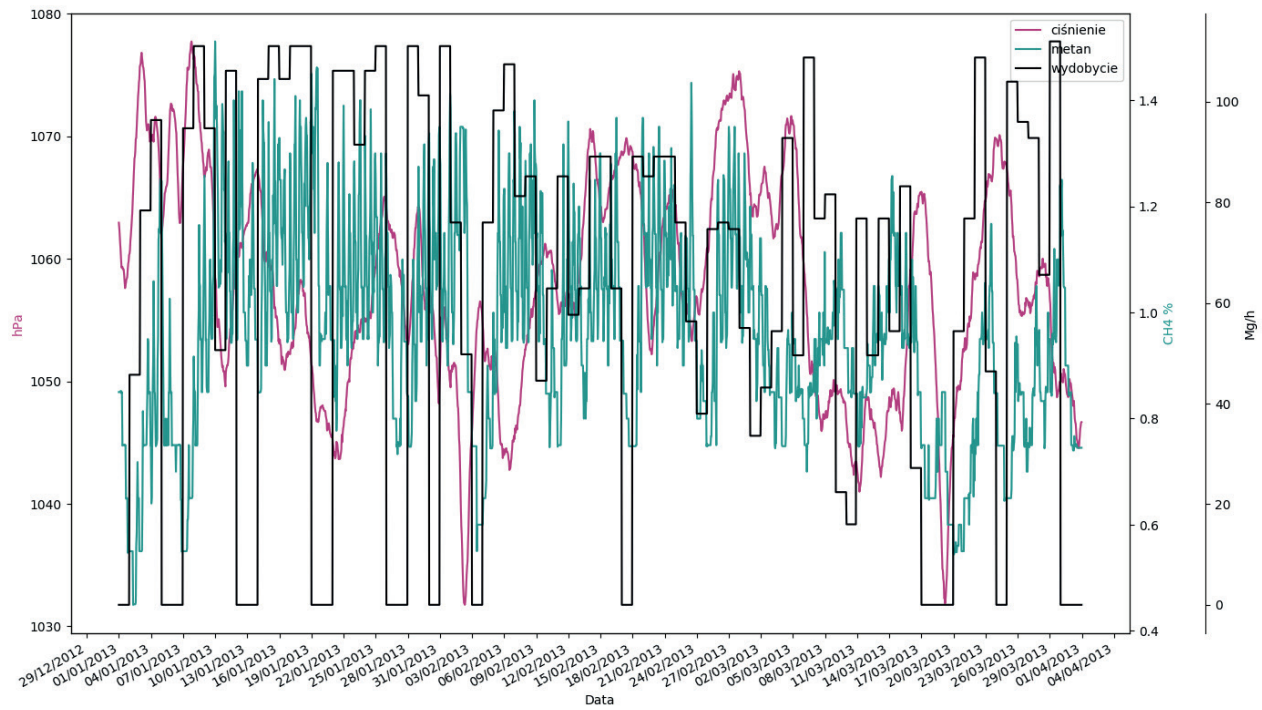
- w okresie od 13 do 21 grudnia (obszar I) – ciśnienie 13 grudnia zaczęło spadać, osiągając w piętnastej dobie wartość 1054,32 hPa (spadek o 14 hPa), a następnie w ciągu kolejnych siedmiu dni wzrosło o 19,94 hPa (1074,26 hPa);
- w okresie od 22 do 29 grudnia (obszar II) – zanotowano spadek ciśnienia z wartości 1072 hPa do 1054,07 hPa (17,93 hPa), jego wzrost o 6 hPa i kolejny spadek do wartości 1054,07 hPa. Między dwudziestą siódmą a dwudziestą dziewiątą dobą nastąpił gwałtowny wzrost ciśnienia do wartości 1080,49 hPa (26,42 hPa).

W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.22.

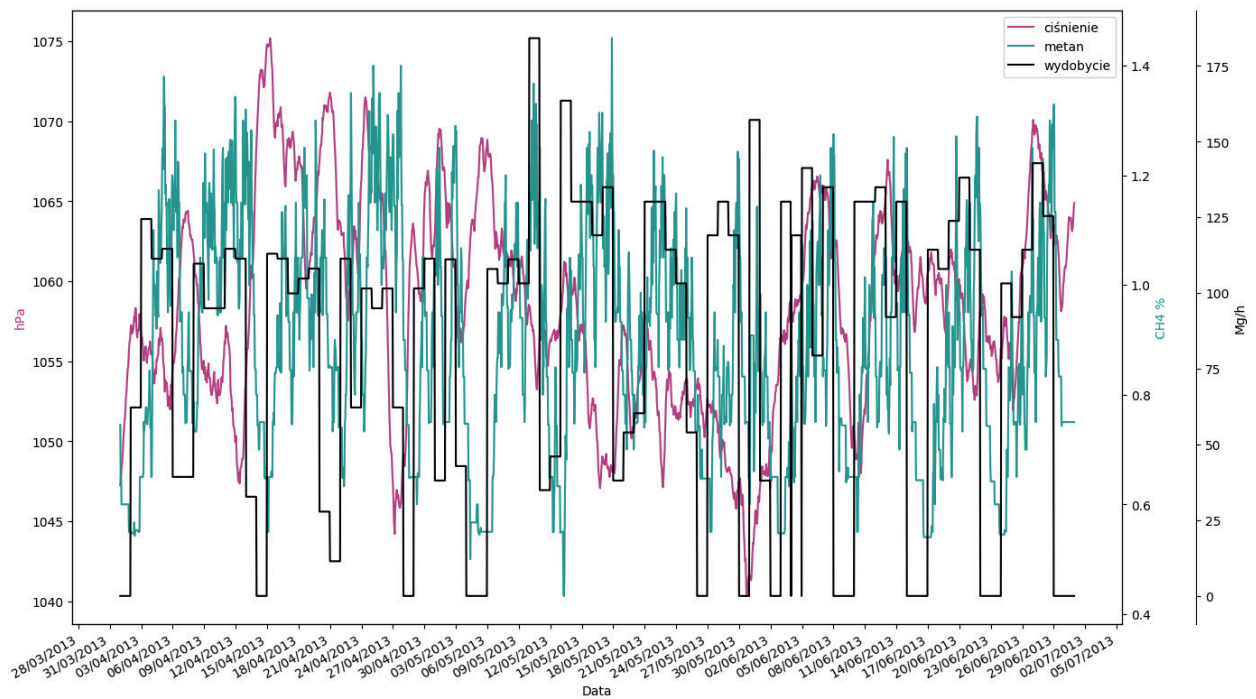
Analiza obszaru I (rys. 4.34 i 4.35a) pokazuje, że między dwunastą a trzynastą dobą (rys. 4.34) nastąpił wzrost emisji metanu (przy jednoczesnym wzroście ciśnienia), a następnie jej postępujący spadek. Najniższa notowana wartość stężenia w obszarze I to poniżej 0,75% (tab. 4.21). W zakresie niskiego ciśnienia zaobserwowano spadek stężenia metanu między piętnastą a szesnastą dobą, a następnie jego wzrost i kolejny spadek do wspomnianej wartości 0,75%. Od siedemnastej doby następował wzrost stężenia metanu mimo wzrostu ciśnienia, a w obszarze najwyższej zwyżki (od osiemnastej do dwudziestej doby) stężenie podlegało fluktuacji od 0,9% do 1,2%.

W omawianym obszarze analiza statystyczna wykazała słabą i zgodnie skierowaną korelację stężenia metanu z wydobyciem. Potwierdza to w pewnym stopniu sytuację przedstawioną na rysunku 4.35a, na którym niewielki spadek stężenia metanu nastąpił z jednoczesnym spadkiem wydobywania (między szesnastą a osiemnastą dobą). W przypadku tej korelacji zaledwie 4% wyników można tłumaczyć zależnością liniową. Korelacja stężenia metanu z ciśnieniem również była zgodnie skierowana i słaba. Obie korelacje były statystycznie nieistotne. Należy jednak pamiętać, że grudzień był pierwszym miesiącem rozruchu ściany i należało się spodziewać dużej fluktuacji stężenia metanu. Potwierdziły to wyniki pomiarów między dwunastą a czternastą dobą (rys. 4.34), gdy nastąpił gwałtowny wzrost stężenia metanu. Było to związane z uruchamianiem wydobywania w ścianie.

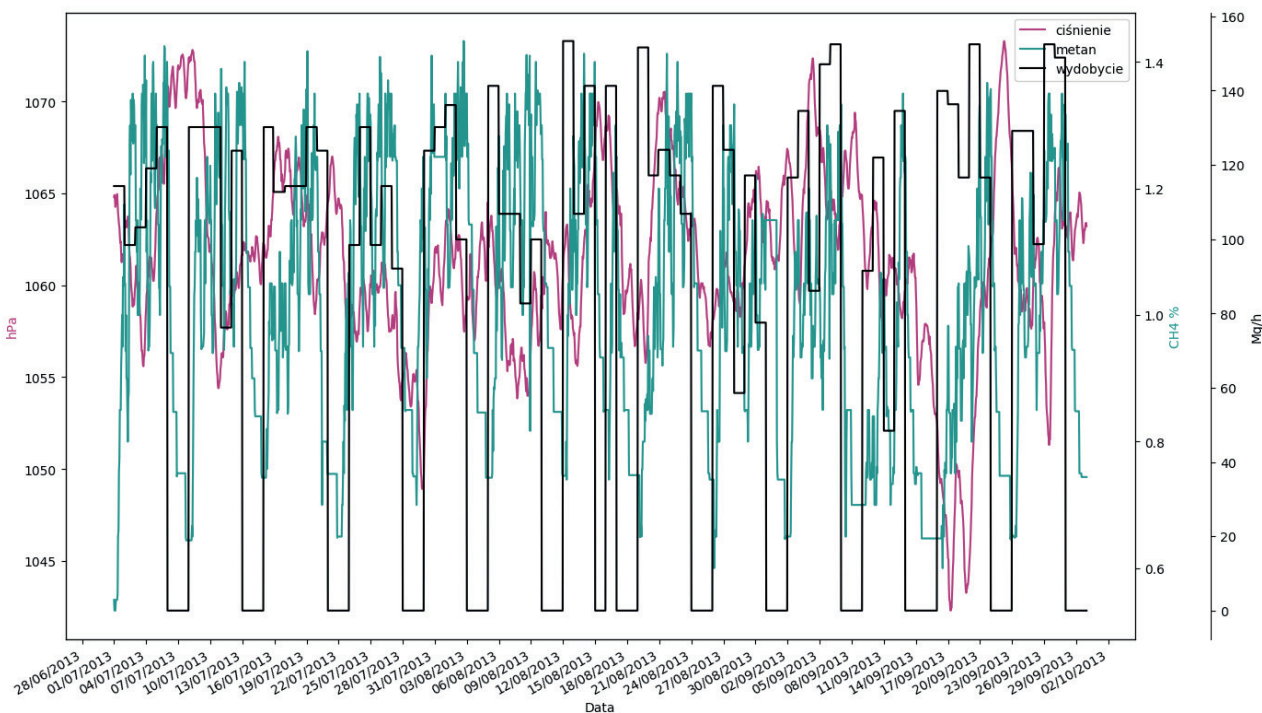
Z przeprowadzonych obserwacji zmian parametrów ujętych na rysunku 4.34 interesujący do dalszej analizy wydaje się obszar II (rys. 4.35b), gdzie zaobserwowano spadek stężenia metanu z jednoczesnym spadkiem ciśnienia. Zjawisku temu towarzyszył również spadek wydobywania.



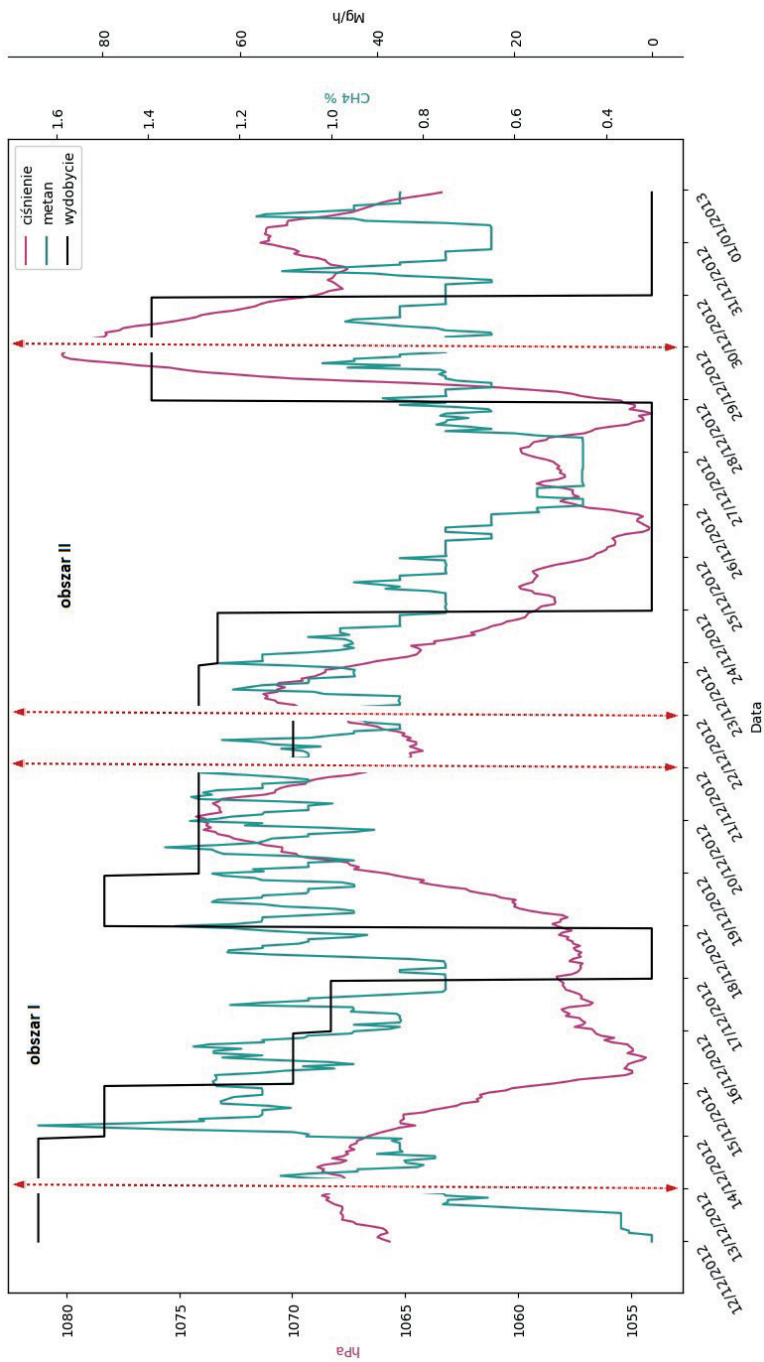
Rysunek 4.31. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania na ścianie B-11, w pokładzie 348, w okresie od stycznia do kwietnia 2013 roku



Rysunek 4.32. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania na ścianie B-11, w pokładzie 348, od kwietnia do lipca 2013 roku



Rysunek 4.33. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania na ścianie B-11, w pokładzie 348, od lipca do października 2013 roku

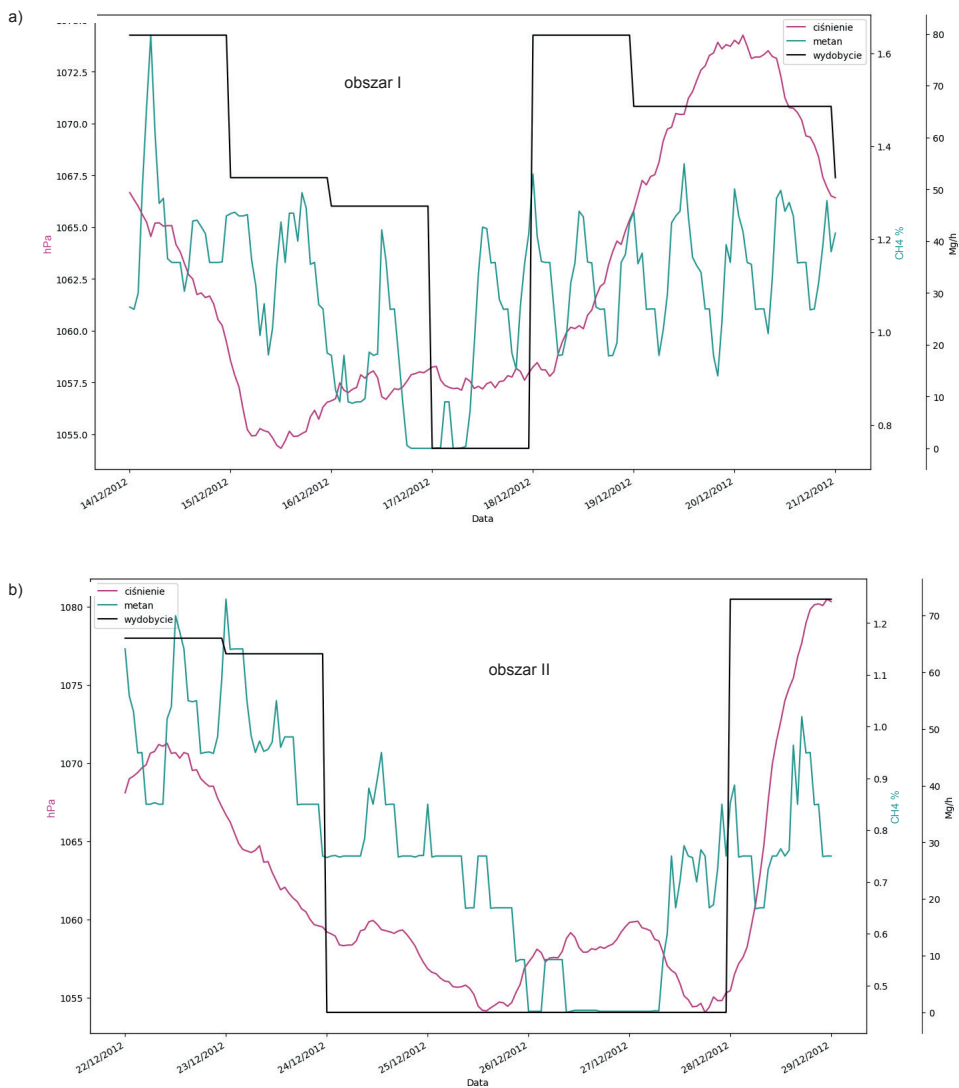


Rysunek 4.34. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie B-11, w pokładzie 348, w grudniu 2012 roku

Tabela 4.21

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II w pokładzie 348 i wydobytcie

Grudzień		Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	192	1063,094	1062,231	1063,957	1061,979	1054,327	1074,266	6,06375	0,437613
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	192	1,063	1,038	1,087	1,065	0,750	1,639	0,17272	0,012465
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	168	59,984	56,225	63,744	66,000	0,000	89,375	26,40951	1,905943
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	168	0,764	0,734	0,795	0,750	0,448	1,246	0,20038	0,015460
	wydobytcie	168	28,875	23,765	33,985	0,000	0,000	72,875	33,54711	2,588216



Rysunek 4.35. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania na ścianie B-11 w pokładzie 348 w grudniu 2012 roku: a) – obszar I; b) – obszar II

Obserwacja obszaru pokazała postępujący spadek stężenia metanu do wartości 0,45% w miarę spadku ciśnienia, a następnie jego wzrost z jednoczesnym wzrostem ciśnienia (powyżej 1%). Analiza statystyczna w badanym obszarze (tab. 4.22) wykazała wystąpienie wysokiej zgodnej korelacji stężenia metanu z wydobywaniem. Około 50% wyników można interpretować liniową zależnością z wydobywaniem. W przypadku ciśnienia, podobnie jak w obszarze I, wystąpiła korelacja zgodnie skierowana, ale wysoka.

Tabela 4.22

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany B-11 w pokładzie 348

Grudzień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,127345	0,192451
	R_d	0,016217	0,037037
	T	1,769736	2,703281
	Prawdopodobieństwo	0,078375	0,007488
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,524118	0,673017
	R_d	0,274700	0,452953
	T	7,929107	11,72379
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja wysoka
	Statystycznie	istotne	istotne

Analiza obszarowa pokazała, że stężenie metanu podlegało dużym zmianom, które w żaden sposób nie były zależne od fluktuacji ciśnienia. W obu obszarach analiza statystyczna wykazała korelacje zgodne. Spadek ciśnienia powodował spadek stężenia metanu. Zgodnie z założeniami przedstawionymi na początku niniejszego rozdziału powinno być na odwrót. Wprowadzając do analizy zmiany wydobycia, można zauważyć, że zmienność stężenia należy przypisać zakresowi wykonywanych robót górniczych. Zależność tę dobrze widać w obszarze II (rys. 4.35b), gdzie zanotowano spadek stężenia (do 0,45%) przy braku wydobycia, choć w obszarze I (rys. 4.35a) również była ona wyraźnie zauważalna. Najniższe stężenie metanu (poniżej 0,75%) przypadło właśnie na okres braku wydobycia. Obserwacje powyższe potwierdziła analiza statystyczna, szczególnie w obszarze II. Słaba korelacja stężenia metanu z wydobywaniem w obszarze I wynikała z faktu, że grudzień 2012 roku był miesiącem, w którym uruchamiano wydobywanie w ścianie B-11. Z tego powodu w okresie tym zarówno stężenie metanu, jak i wydobywanie podlegały dużej zmienności.

Marzec 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.36 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia. Ze względu na intensywność zmian przyjęte do analizy obszary nachodzą na siebie, dlatego w tym przypadku oznaczono je innymi kolorami. W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.23.

W okresie od 5 do 12 marca (obszar I) zmiany przebiegały następująco. Ciśnienie 5 marca osiągnęło maksymalną wartość 1071 hPa, następnie 7 marca spadło do 1046 hPa (25 hPa), po czym wzrosło o 4 hPa i spadło, aby 11 marca osiągnąć najniższą wartość 1040,99 hPa – kolor czerwony na rysunku 4.36.

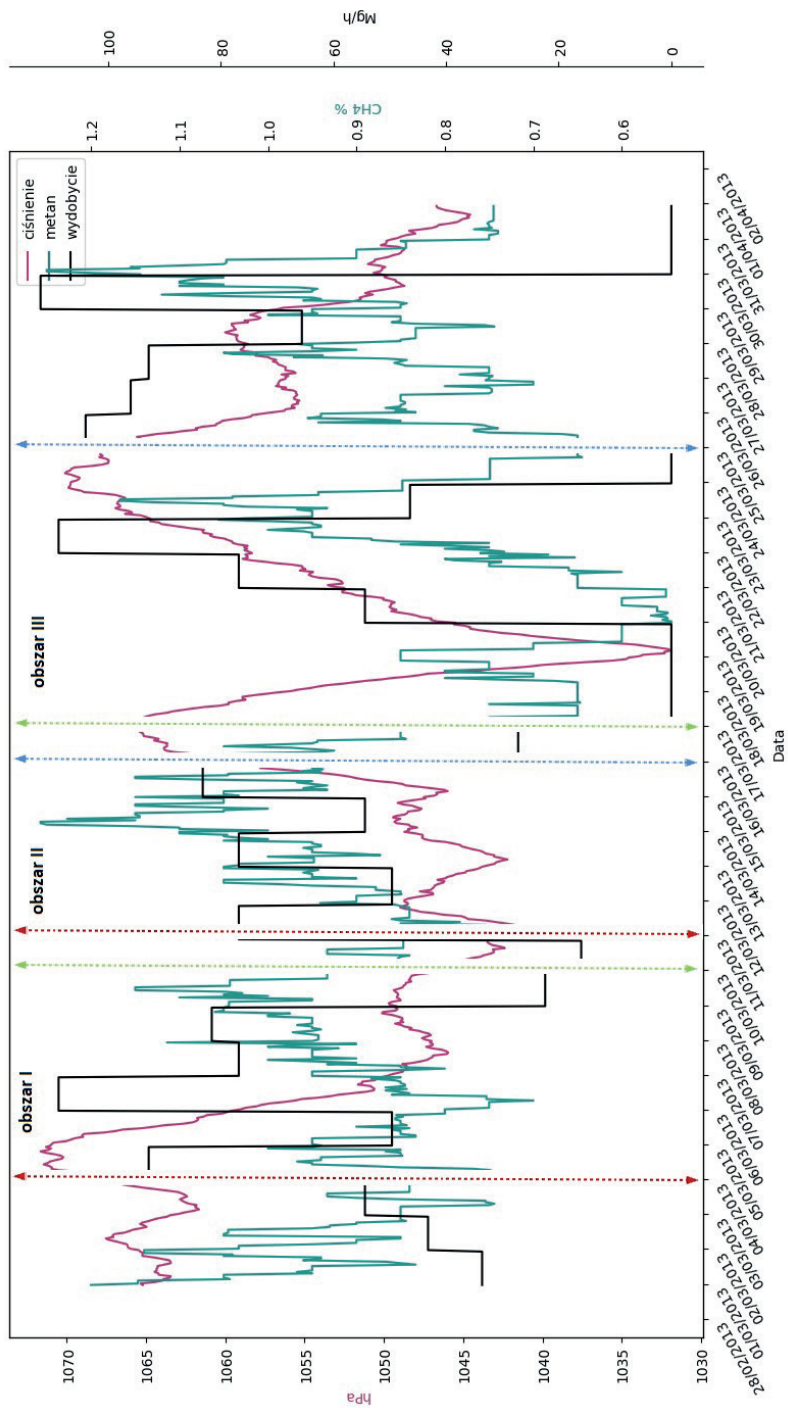
W okresie od 11 do 18 marca (obszar II) odnotowano następujące zmiany. Wzrost ciśnienia nastąpił 11 marca do wartości 1049 hPa, następnie jego spadek do wartości 1042,5 hPa. W późniejszym okresie zanotowano jeszcze dwa wzrosty i dwa spadki ciśnienia. Między piętnastą a siedemnastą dobą ciśnienie wzrosło do wartości 1065,47 hPa (o około 20 hPa) – kolor zielony na rysunku 4.36.

W okresie od 17 do 25 marca (obszar III) zanotowano spadek ciśnienia z wartości 1065,47 hPa do wartości 1031,86 hPa (33,61 hPa), a następnie w ciągu siedmiu dni jego wzrost do wartości 1070,10 hPa (o 38,24 hPa) – kolor niebieski na rysunku 4.36.

Obserwacja wyników zamieszczonych na rysunku 4.36 pokazała wyraźnie wystąpienie dużego spadku (o 33,61 hPa) i wzrostu ciśnienia (o 38,24 hPa). Do tej pory najwyższą notowaną zwyżką była ta, która wystąpiła w marcu (39,5 hPa) w przypadku ściany F-3 w pokładzie 406/1. Wtedy wzrost ciśnienia trwał około trzynastu dni. Krócej – osiem dni – utrzymywał się wzrost ciśnienia w ścianie D-2 w pokładzie 412lg+hd i 412lg, gdzie również w marcu zanotowano zmianę ciśnienia wynoszącą 38,58 hPa. W przypadku ściany B-11 ciśnienie rosło jeszcze krócej – około siedmiu dni. W wyniku tego obszar ten doskonale się nadawał do prowadzenia obserwacji wpływu ciśnienia na wartości stężenia metanu. Zmiany parametrów w poszczególnych obszarach przedstawione na rysunku 4.37a–c pokazują dużą fluktuację stężenia metanu. Obserwacje zmian obszarowych nie dały podstaw jednoznacznego stwierdzenia zależności między stężeniem metanu a ciśnieniem czy wydobyciem. W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono więc analizę statystyczną, aby potwierdzić korelację między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.24.

Stężenie metanu w obszarze I (rys. 4.37a) malało wraz ze spadkiem ciśnienia, osiągając wartość minimalną 0,7% między szóstą a siódmą dobą. Później zaczęło wzrastać i przy zmianie ciśnienia rzędu 3 hPa osiągnęło wartość maksymalną 1,15%. Kolejne doby przyniosły spadek stężenia i przy najniższej notowanej w obszarze I wartości ciśnienia stężenie osiągnęło wartość 0,75%. W obserwowanym obszarze trudno się doszukać korelacji stężenia metanu z ciśnieniem. Analiza statystyczna (tab. 4.24) wykazała jego brak (korelacja nikła). W przypadku wydobywania korelacja była jednak przeciętna, ale przeciwnie skierowana. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wydobywania spadało stężenie metanu. Analizując zmiany tych dwóch parametrów, przedstawione na rysunku 4.37a, można dostrzec, że w okresie od 6 do 7 marca nastąpił wzrost wydobywania, a stężenie metanu osiągnęło wartość minimalną. Podobna sytuacja wystąpiła 9 marca – spadek wydobywania i wzrost stężenia metanu. Jeśli jednak spojrzeć na późniejsze zmiany stężenia metanu, widać, że następowała opóźniona ich reakcja na zmiany wydobywania.

We wszystkich analizowanych obszarach widoczna była jednak zależność zmian stężenia metanu od wydobywania. Od 9 do 11 marca zanotowano spadek wydobywania, któremu odpowiadał spadek stężenia metanu (rys. 4.37a.). Podobna sytuacja wystąpiła w obszarze II (między 16 a 18 marca) i w obszarze III (między 23 a 25 marca). Analiza wyników pomiarów w marcu uwidoczniła bardzo dużą zmienność ciśnienia i stężenia metanu, wskazała również nierównomierność prowadzenia wydobywania w ścianie. Wynikało to prawdopodobnie z faktu, że ściana B-11 w pokładzie 348 prowadzona była w bardzo trudnych warunkach, co znalazło odzwierciedlenie w wykonanych pomiarach.

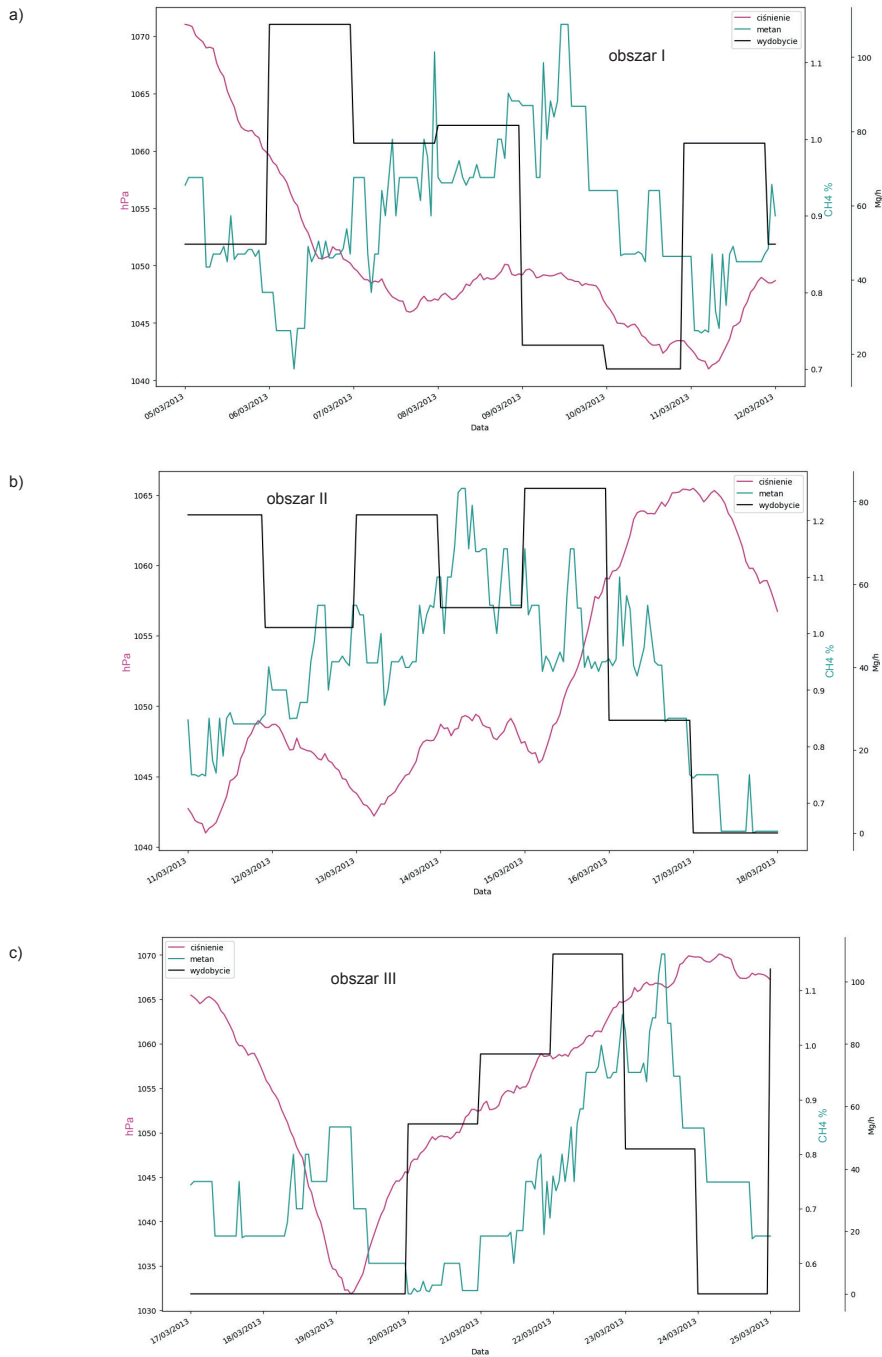


Rysunek 4.36. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie B-II, w pokładzie 348, w marcu 2013 roku

Tabela 4.23

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II w pokładzie 348 i wydobytcie

Obszar	Marzec	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	168	1050,442	1049,334	1051,549	1048,730	1040,994	1071,025	7,27097	0,560968
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	168	0,902	0,888	0,915	0,892	0,700	1,150	0,09093	0,007016
	wydobytcie	168	62,114	57,392	66,836	76,800	16,000	108,800	30,99961	2,391672
Obszar II	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	168	1051,616	1050,430	1052,802	1048,476	1040,994	1065,476	7,78613	0,600713
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	168	0,925	0,904	0,947	0,948	0,647	1,257	0,14389	0,011101
	wydobytcie	168	52,248	47,972	56,523	54,400	0,000	83,200	28,07060	2,165694
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	192	1056,108	1054,605	1057,611	1058,552	1031,868	1070,105	10,55570	0,761792
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	192	0,743	0,723	0,763	0,747	0,544	1,167	0,14179	0,010233
	wydobytcie	192	35,800	30,137	41,463	23,200	0,000	108,800	39,78194	2,871014



Rysunek 4.37. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania na ścianie B-11, w pokładzie 348, w marcu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

W obszarze II (rys. 4.37b) stężenie metanu wykazywało tendencję wzrostową (do piętnastej doby), a następnie malejącą (druga połowa obszaru). Między czternastą a piętnastą dobą, mimo zwyżki ciśnienia, nastąpił wzrost emisji metanu (stężenie powyżej 1,25% – tab. 4.23). Taka sama sytuacja wystąpiła również w obszarze III (rys. 4.37c), przy najwyższej notowanej dotychczas zwyżce ciśnienia. Po 16 marca nastąpił gwałtowny spadek stężenia metanu, któremu towarzyszył wzrost ciśnienia i gwałtowny spadek wydobywania. W całym omawianym okresie wydobywanie podlegało dosyć dużym zmianom. Analiza statystyczna przeprowadzona w obszarze II (tab. 4.24) wykazała istnienie zgodnie skierowanej, ale przeciętnej korelacji stężeń metanu z wydobywaniem i przeciwnie skierowanej, również przeciętnej, z ciśnieniem. Około 25% wyników stężeń można przypisać liniowej zależności z wydobywaniem, a około 12% – odwrotnej, ale również liniowej zależności z ciśnieniem.

W obszarze III (rys. 4.37c) zanotowano najwyższą zniżkę i zwyżkę ciśnienia. Jednocześnie wzrostowi ciśnienia od 19 do 23 marca odpowiadał stopniowy wzrost wydobywania, a po 23 marca jego spadek. Analiza statystyczna (tab. 4.24) obszaru wykazała istnienie korelacji stężenia metanu zgodnie skierowanej z wydobywaniem, ale słabej i statystycznie nieistotnej. Jedynie około 8% wyników można przypisać ich liniowej zależności z wydobywaniem. Należy zaznaczyć, że między 17 a 20 marca i 24 marca nie prowadzono w ścianie wydobywania. Mogło to istotnie zaważyć na wynikach analizy. Jednocześnie w badanym obszarze wystąpiła przeciętna i zgodnie skierowana korelacja stężenia metanu z ciśnieniem.

Tabela 4.24

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany B-11 w pokładzie 348

Marzec	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobywanie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,094447	-0,374019
	R_d	0,008920	0,139890
	T	-1,22233	-5,19602
	Prawdopodobieństwo	0,223317	0,000001
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja przeciętna
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,350011	0,492975
	R_d	0,122508	0,243024
	T	-4,81409	7,300255
	Prawdopodobieństwo	0,000003	0,000000
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja przeciętna
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,409191	0,280212
	R_d	0,167437	0,078519
	T	6,181507	4,023648
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000083
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Kwiecień 2013 roku

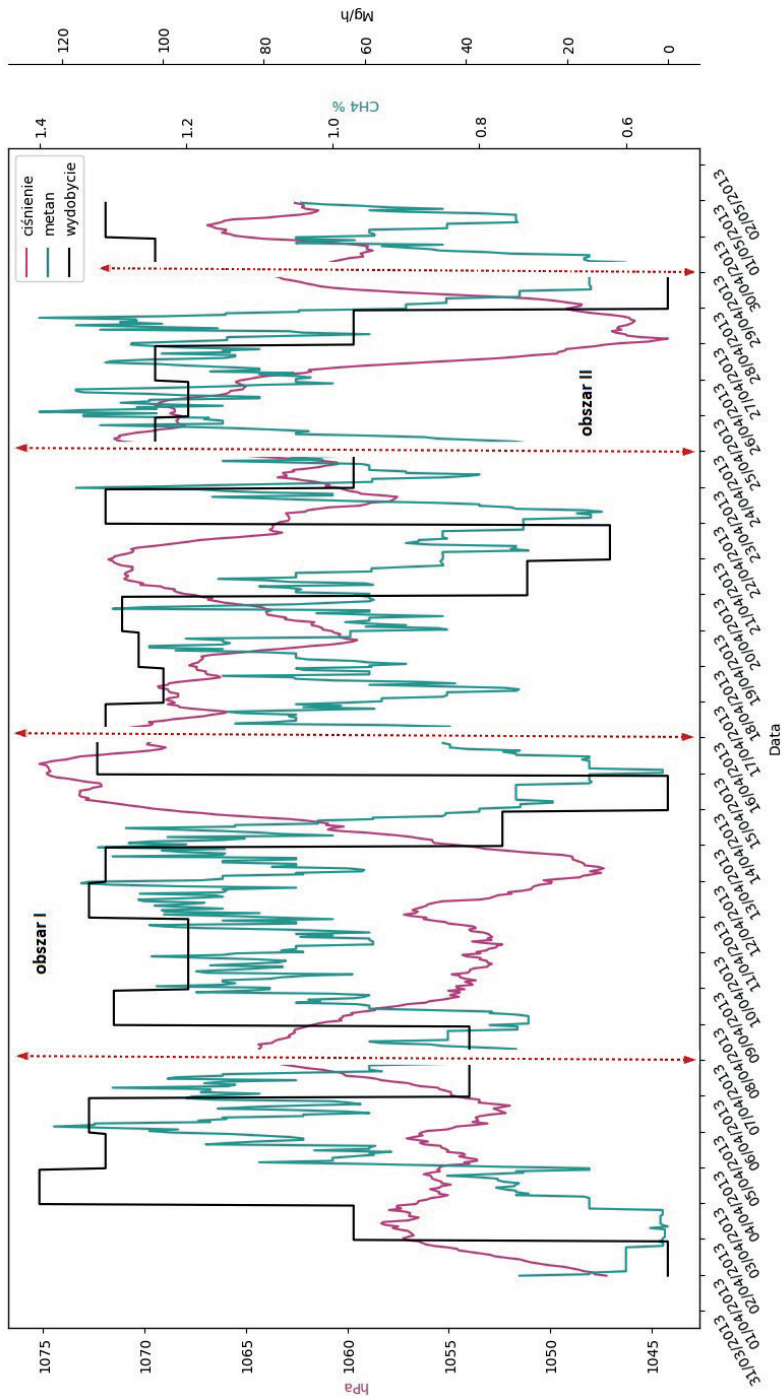
Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów w kwietniu, ujętych na rysunku 4.38, pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.25:

- w okresie od 7 do 16 kwietnia (obszar I) – między 8 a 10 kwietnia ciśnienie spadło z wartości 1064,5 hPa do około 1052,5 hPa (12 hPa), a następnie wzrosło do 1056 hPa i ponownie spadło do 1047,36 hPa; od dwunastej do szesnastej doby zanotowano znaczny wzrost ciśnienia (o 27,82 hPa) – do najwyższej wartości notowanej w kwietniu (1075,18 hPa);
- w okresie od 24 do 29 kwietnia (obszar II) – między 24 a 27 kwietnia zaobserwowano spadek ciśnienia (o 27,29 hPa), a następnie jego wzrost (o 21,5 hPa).

Wykreślone na rysunku 4.38 zmiany parametrów w kwietniu pokazały, jak bardzo niestabilna była ściana B-11. Do pogłębionej analizy wybrano dwa obszary o największych wahaniach ciśnienia. W wyodrębnionych obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.26.

W okresie od 8 do 14 kwietnia (rys. 4.39a) stężenie metanu podlegało fluktuacji (od 0,9% do powyżej 1,3%), ale nie zaobserwowano wyraźnych tendencji zwyżkowych czy zniżkowych. Znaczny spadek stężenia, z wartości 1,3% do 0,55% (tab. 4.25), nastąpił dopiero między trzynastą a szesnastą dobą. Z rysunku 4.39a wyraźnie wynika, że na zmianę tę miało wpływ obniżenie wydobywania (między dwunastą a trzynastą dobą), a następnie jego wstrzymanie (czternasta doba). Gdyby na rysunku 4.39a nie zamieszczono zmian wydobywania, ten silny spadek stężenia 15 kwietnia można by przypisać zwyżce ciśnienia (1075 hPa). Potwierdziła to analiza statystyczna (tab. 4.26), która wykazała bardzo wysoką i przeciwnie skierowaną korelację stężenia metanu z ciśnieniem. Około 70% wyników stężenia metanu można tłumaczyć w tym obszarze odwrotną liniową zależnością od ciśnienia. Wartość ta była najwyższą otrzymaną w przypadku korelacji stężenia metanu z ciśnieniem spośród wszystkich wartości dotyczących badanych ścian eksploatacyjnych. Ta sama analiza statystyczna wykazała w badanym obszarze zgodnie skierowaną korelację stężenia metanu z wydobywaniem. Była ona jednak przeciętna i sprawdzała się w przypadku niespełna 13% wyników.

W obszarze II (rys. 4.39b) stężenie metanu, po wzroście 24 kwietnia (z 0,75% do 1,3%), do 28 kwietnia utrzymywało się na stabilnym poziomie (między 1% a 1,4%). Warto wspomnieć, że w tym czasie zanotowano spadek ciśnienia o 28 hPa. Gwałtowny spadek stężenia metanu nastąpił dopiero w dwudziestej ósmej dobie – z wartości 1,4% do 0,648% (tab. 4.25). Należy zaznaczyć, że tym ostrym zmianom stężenia 24 i 28 kwietnia towarzyszyły zmiany dotyczące wydobywania. Analiza statystyczna tego obszaru wykazała wysoką, zgodnie skierowaną korelację stężenia metanu z wydobywaniem. Około 40% wyników stężenia można tłumaczyć liniową zależnością z wydobywaniem. Korelacja z ciśnieniem w badanym obszarze była przeciwnie skierowana, ale słaba i statystycznie nieistotna.



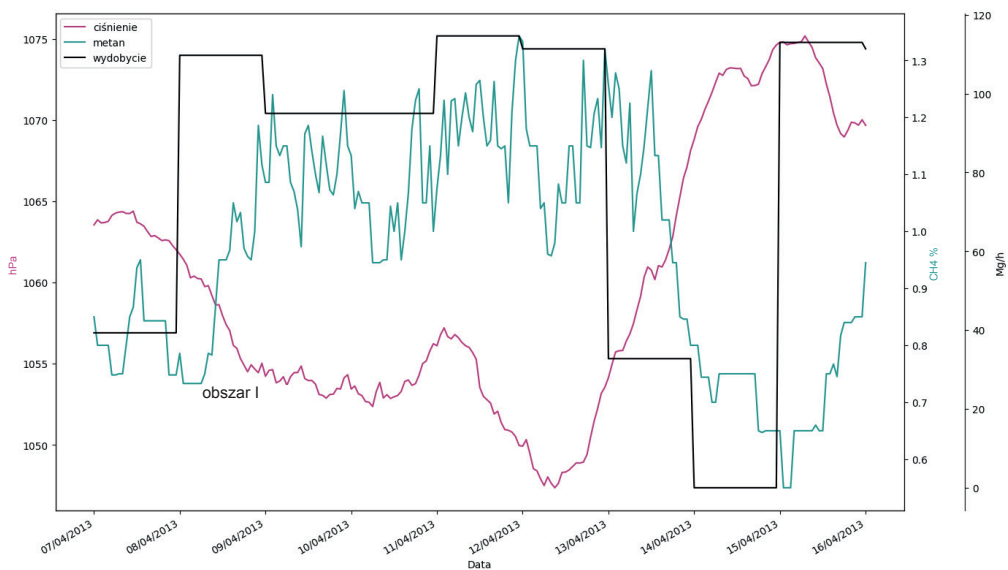
Rysunek 4.38. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie B-11, w pokładzie 348, w kwietniu 2013 roku

Tabela 4.25

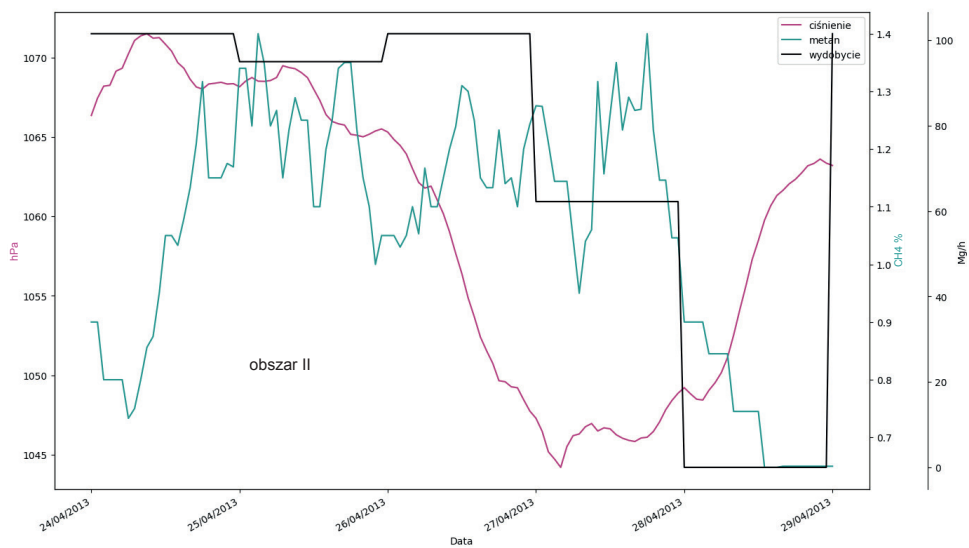
Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11 w pokładzie 348 i wydobyście

Kwiecień		Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11	216	1059,703	1058,614	1060,791	1056,728	1047,361	1075,187	8,11766	0,552337
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-11	215	0,969	0,942	0,996	1,000	0,550	1,343	0,19830	0,013524
Obszar II	wydobyście	216	78,964	73,498	84,430	94,975	0,000	114,625	40,75649	2,773128
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11	120	1059,237	1057,574	1060,900	1062,093	1044,204	1071,499	9,20088	0,839921
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-11	120	1,059	1,021	1,098	1,117	0,648	1,400	0,21425	0,019559
	wydobyście	120	72,050	64,996	79,104	94,975	0,000	101,525	39,02382	3,562371

a)



b)



Rysunek 4.39. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania na ścianie B-11, w pokładzie 348, w kwietniu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II

Tabela 4.26

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany B-11 w pokładzie 348

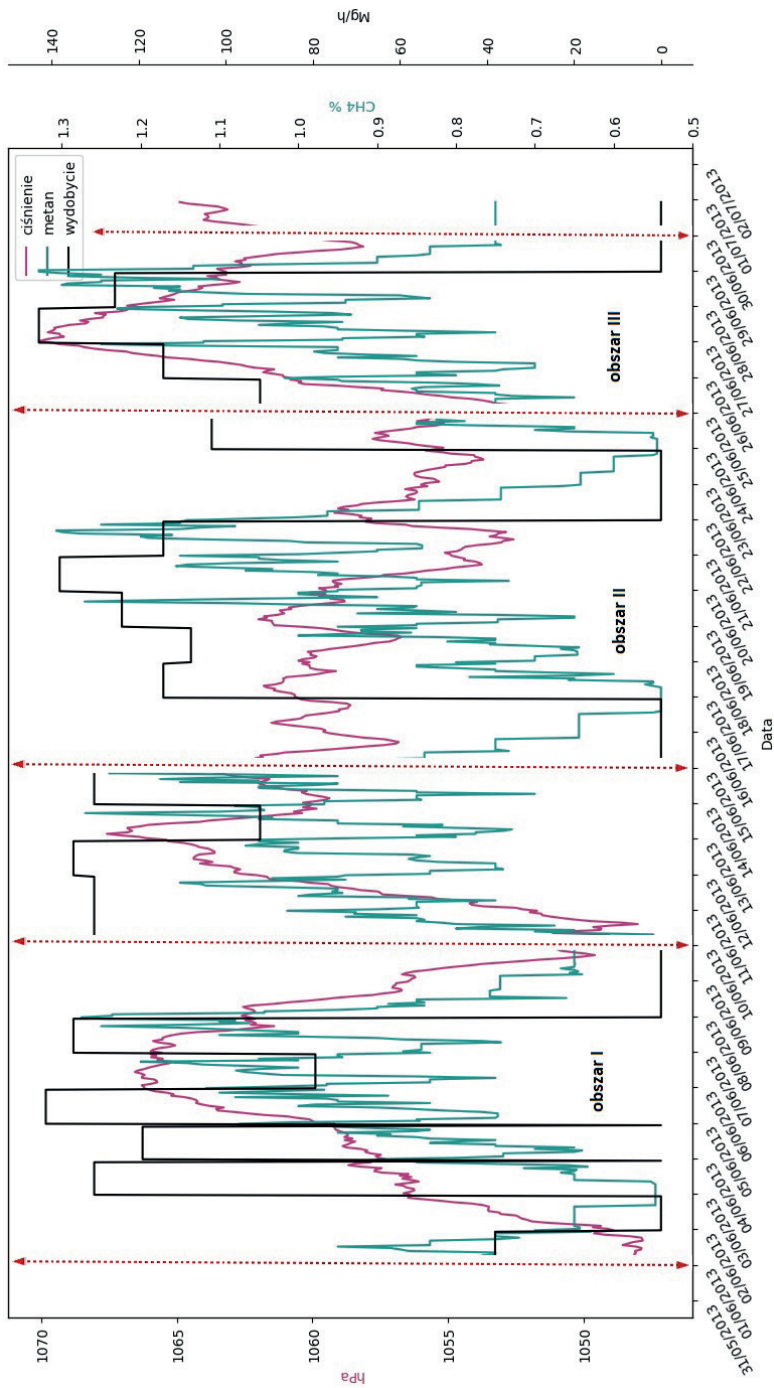
Kwiecień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	-0,828442	0,356669
	R_d	0,686317	0,127213
	T	-21,5877	5,571866
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja przeciętna
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,126778	0,626093
	R_d	0,016073	0,391992
	T	-1,38837	8,722185
	Prawdopodobieństwo	0,167641	0,000000
	Skala korelacji	korelacja słaba	korelacja wysoka
	Statystycznie	nieistotne	istotne

Czerwiec 2013 roku

Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.40 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia (zaznaczone czerwoną przerywaną linią). W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.27:

- w okresie od 1 do 10 czerwca (obszar I) – ciśnienie między 2 a 7 czerwca wzrosło z wartości 1047,15 hPa do wartości około 1066,54 hPa (19,39 hPa), a następnie spadło do wartości wyjściowej;
- w okresie od 10 do 15 czerwca (obszar II) – ciśnienie między dziesiątą a trzynastą dobą wzrosło z wartości 1048 hPa do wartości 1067,58 hPa (19,58 hPa), aby następnie (14 czerwca) spaść do wartości 1059,5 hPa (8 hPa);
- w okresie od 25 do 30 czerwca (obszar III) – ciśnienie między 25 a 27 czerwca wzrosło z wartości 1051,92 hPa do wartości 1070,08 hPa (18,16 hPa), aby w dwudziestej dziewiętej dobie spaść do wartości 1058 hPa (12,08 hPa).

Podobnie jak w przypadku dwóch omówionych wcześniej miesięcy, także na podstawie analizy rysunku 4.40 można wnioskować o dużych wahaniami parametrów, szczególnie wydobywania. Analizując przedstawione tam dane, w pewnych obszarach można dostrzec tendencję wzrostową stężenia metanu, przy jednoczesnych wzrostach ciśnienia. Wahania ciśnień w całym miesiącu nie przekraczały 20 hPa. W wyodrębnionych do obserwacji obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.28. Rozkład obszarowy (rys. 4.41a–c) potwierdził wcześniejsze przypuszczenia. W obszarze I (rys. 4.41a) stężenie metanu wyraźnie wzrastało przy wzroście ciśnienia. Widoczna fluktuacja (obszaru spadku) wywołana została prawdopodobnie zmianami wydobywania, co potwierdził spadek stężenia między drugą a trzecią (spadek do 0,547%) i między ósmą a dziesiątą dobą (spadek z 1,275% do 0,65% – tab. 4.27).

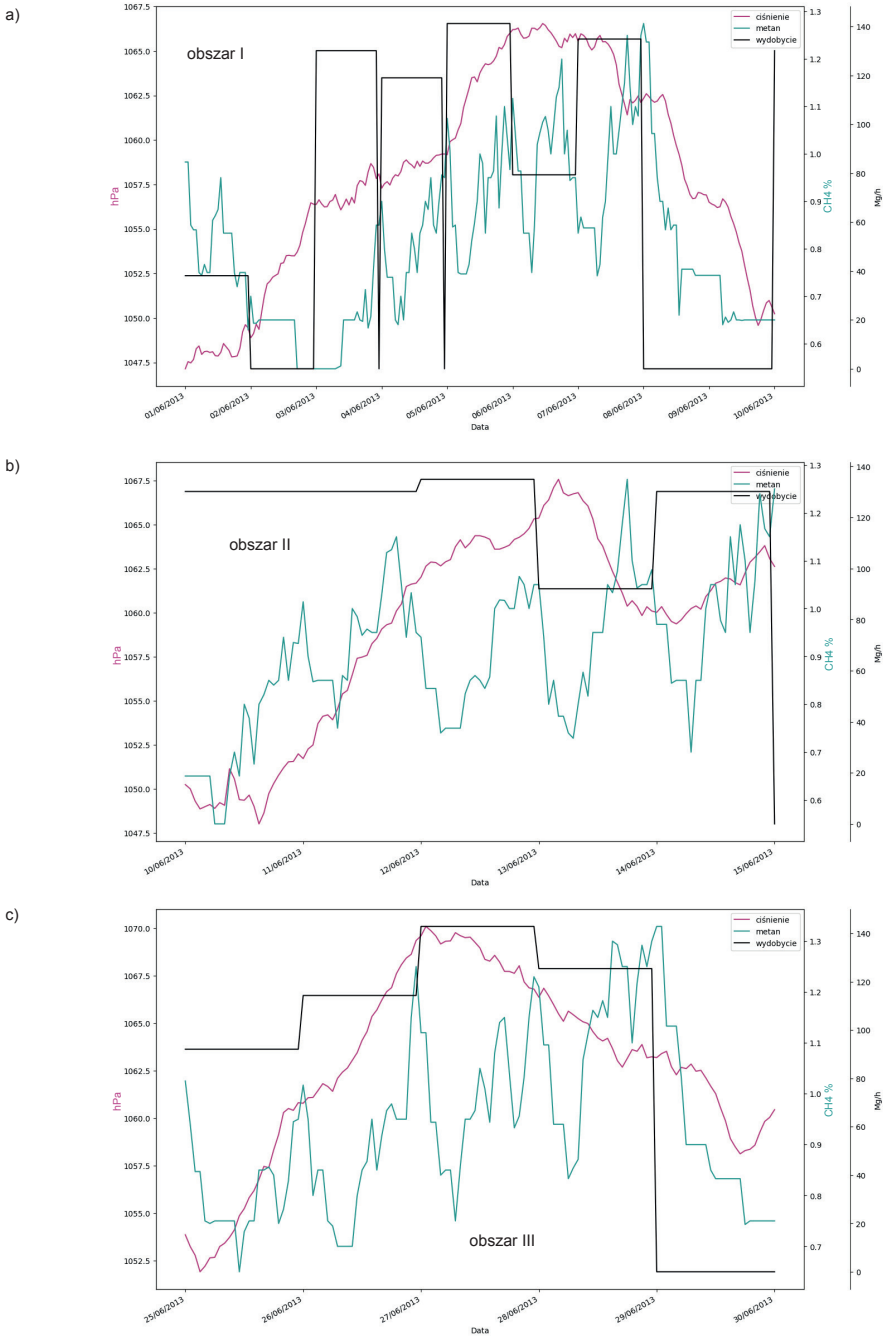


Rysunek 4.40. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobycia metanu w ścianie B-11, w pokładzie 3-48, w czerwcu 2013 roku

Tabela 4.27

Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II w pokładzie 348 i wydobyćcie

	Czerwiec	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	216	1058,121	1057,343	1058,899	1058,073	1047,149	1066,545	5,79965	0,394616
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	216	0,811	0,788	0,834	0,767	0,547	1,275	0,17235	0,011727
Obszar II	wydobyćcie	213	71,274	63,316	79,231	79,375	0,000	141,288	58,91732	4,036948
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	120	1059,161	1058,133	1060,188	1060,592	1048,009	1067,580	5,68439	0,518912
Obszar III	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	120	0,904	0,877	0,932	0,914	0,550	1,270	0,15296	0,013963
	wydobyćcie	120	123,508	120,635	126,380	130,175	92,075	134,938	15,89047	1,450595
Obszar III	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-II	120	1062,862	1061,989	1063,734	1063,182	1051,921	1070,085	4,82454	0,440418
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-II	120	0,944	0,913	0,975	0,925	0,650	1,329	0,17249	0,015746
	wydobyćcie	120	94,933	85,812	104,053	114,300	0,000	142,875	50,45599	4,605981



Rysunek 4.41. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania na ścianie B-11 w pokładzie 348 w czerwcu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II; c) obszar III

Analiza statystyczna wykazała istnienie zgodnej i wysokiej korelacji z ciśnieniem oraz słabej i zgodnej korelacji z wydobyciem (tab. 4.28). Tylko 8% wyników stężeń metanu można tłumaczyć liniową zależnością od wydobywania. Na tak niską wartość korelacji miały prawdopodobnie wpływ wahania wydobywania w całym omawianym obszarze.

W obszarze II i obszarze III (rys. 4.41b–c) charakter zmian stężenia metanu był bardzo podobny. Zaobserwowano wzrost stężenia metanu do 15 czerwca (obszar II) i do 29 czerwca (obszar III). W obu przypadkach wydobywanie podlegało znacznie mniejszym wahanom. Podobieństwo polegało również na tym, że w każdym okresie zaobserwowano dwa wyraźniejsze spadki stężenia z jednoczesnym wzrostem ciśnienia i po jednym pikie z jednoczesnym spadkiem ciśnienia. Zmiany te nie wskazały istnienia zależności stężenia metanu od ciśnienia, co zresztą potwierdziła analiza statystyczna (tab. 4.28). W obu przypadkach korelacja stężenia metanu z ciśnieniem była zgodnie skierowana i przeciętna. Nie można więc mówić o wpływie zwykłego ciśnienia na zaobserwowane spadki stężenia metanu.

Biorąc pod uwagę korelację stężenia metanu z wydobyciem, nie należało się spodziewać – ze względu na niewielkie wahania wydobywania w omawianych obszarach – wysokiej jej wartości. W obszarze II korelacja była słaba i przeciwnie skierowana, z kolei w obszarze III – zgodna, ale również słaba. Jedynie 5% wyników można tłumaczyć liniową zależnością od wydobywania. Niewątpliwie jednak istniała zależność stężenia metanu od wydobywania, co dobrze pokazuje ich wspólny spadek między dwudziestą dziewiątą a trzydziestą dobą (rys. 4.41c).

Tabela 4.28

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany B-11 w pokładzie 348

Czerwiec	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobywanie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,568460	0,290413
	R_d	0,323147	0,084340
	T	10,10788	4,408493
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000017
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	0,455525	-0,164510
	R_d	0,207503	0,027063
	T	5,558464	-1,81171
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,072574
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar III	$r(x, y)$	0,462394	0,227239
	R_d	0,213808	0,051638
	T	5,664860	2,534762
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,012561
	Skala korelacji	korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne

Wrzesień 2013 roku

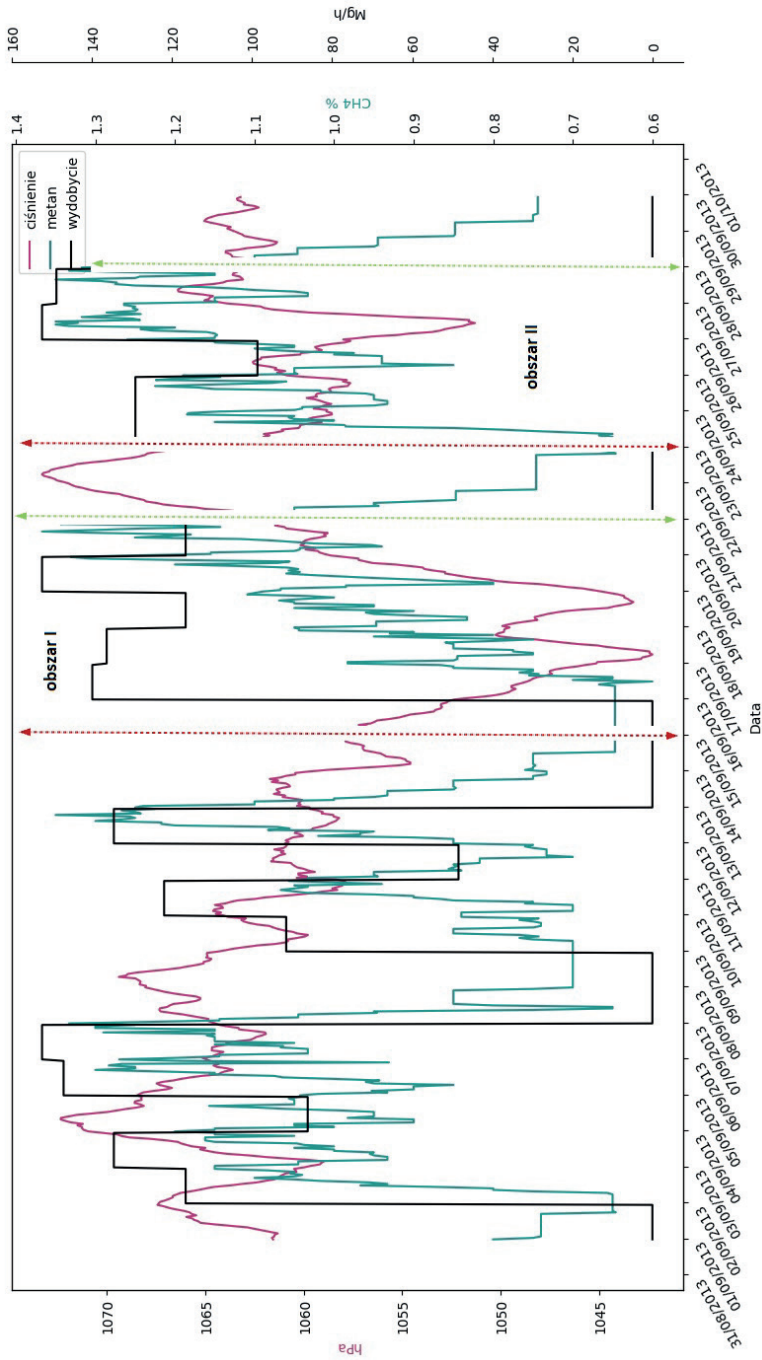
Obserwacja wyników zmian poszczególnych parametrów ujętych na rysunku 4.42 pozwoliła na wyodrębnienie obszarów spadku i wzrostu ciśnienia. Ze względu na intensywność zmian przyjęte do analizy obszary nachodzą na siebie, dlatego w tym przypadku oznaczono je innymi kolorami. W poszczególnych obszarach wyznaczono wartości podstawowych estymatorów, a wyniki zamieszczono w tabeli 4.29:

- w okresie od 15 do 23 września (obszar I) – ciśnienie między 15 a 18 września spadło z wartości 1057,5 hPa do około 1042,30 hPa (15,2 hPa), a następnie wzrosło do wartości 1050 hPa, ponownie spadło (do 1043 hPa), aby między dwudziestą drugą a dwudziestą trzecią dobą wzrosnąć, osiągając najwyższą wartość w miesiącu (1073,29 hPa – wzrost o 30,29 hPa) – kolor czerwony na rysunku 4.42;
- w okresie od 22 do 28 września (obszar II) – ciśnienie między 22 a 25 września spadło o 15 hPa, następnie wzrosło o 4,5 hPa i ponownie spadło, ale tym razem o 11 hPa; łączna różnica ciśnienia między 22 a 26 września wynosiła 21,98 hPa; między 26 a 28 września zanotowano wzrost ciśnienia o 14 hPa – kolor zielony na rysunku 4.42.

Przedstawione na rysunku 4.42 wartości parametrów pokazały, podobnie jak w przypadku opisanych wcześniej miesięcy, bardzo dużą ich zmienność. Wrzesień był ostatnim miesiącem prowadzenia wydobywania w ścianie B-11. W wyodrębnionych do obserwacji obszarach przeprowadzono analizę statystyczną w celu potwierdzenia korelacji między badanymi parametrami. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.30. Analiza obszaru I i obszaru II (rys. 4.43a–b) potwierdziła wnioski wysunięte na podstawie obserwacji procesów zachodzących we wcześniejszych miesiącach prowadzenia ściany. W obszarze I (rys. 4.43a) wraz ze wzrostem ciśnienia następował wzrost stężenia metanu, obserwowany od 16 września, a następnie spadek, postępujący od 23 września. Na obie te zmiany miało wpływ najpierw wzniesienie eksploatacji, później zaś jej zatrzymanie. Potwierdziła to analiza statystyczna (tab. 4.30), która wykazała, co prawda przeciętną, ale zgodnie skierowaną, korelację stężenia metanu z wydobywaniem. Bardzo wyraźnie wpływ wydobywania na zmiany stężenia metanu był widoczny między dwudziestą pierwszą a dwudziestą trzecią dobą. Korelacja z ciśnieniem w omawianym obszarze była nikła.

Na końcowym etapie prowadzenia ściany (obszar II, rys. 4.43b), zarówno wraz ze spadkiem, jak i wraz ze wzrostem ciśnienia stężenie podlegało fluktuacji w zakresie od 1,35% do 0,85%. Analiza statystyczna potwierdziła wystąpienie wysokiej, zgodnie skierowanej korelacji stężenia metanu z wydobywaniem i wysokiej, przeciwnie skierowanej korelacji z ciśnieniem. Prawie 50% wyników można tłumaczyć liniową zależnością stężenia metanu od wydobywania, około 40% – odwrotną, liniową zależnością od ciśnienia. Występujący w tym obszarze spadek (między dwudziestą drugą a dwudziestą szóstą dobą), a następnie wzrost (po dwudziestej szóstej dobie) ciśnienia nastąpił wraz ze wzrostem i spadkiem wydobywania.

Ponieważ eksploatacja ściany B-11 w pokładzie 348 prowadzona była w warunkach specjalnych – czwarta kategoria zagrożenia metanowego, zagrożenie wyrzutami gazów i skał oraz eksploatacja poniżej poziomu udostępniania – można było przypuszczać, że wahania przyjętych do analizy parametrów będą bardzo duże. Ściana ta nie wykazywała się taką stabilnością jak choćby ściana D-2 w pokładzie 410, która po okresie rozruchu utrzymała stabilność do końca prowadzenia eksploatacji.



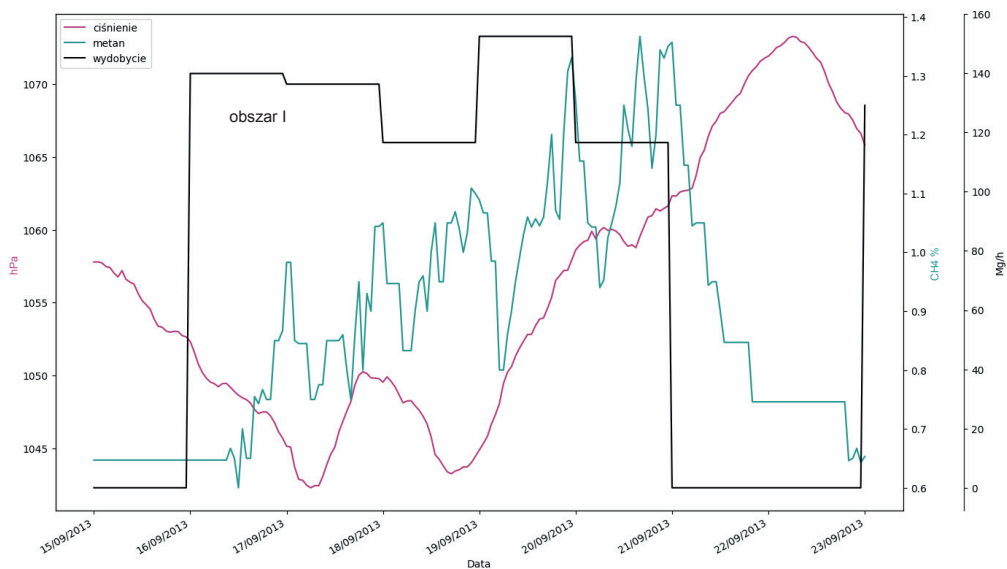
Rysunek 4.42. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w ścianie B-I, w pokładzie 348, we wrześniu 2013 roku

Tabela 4.29

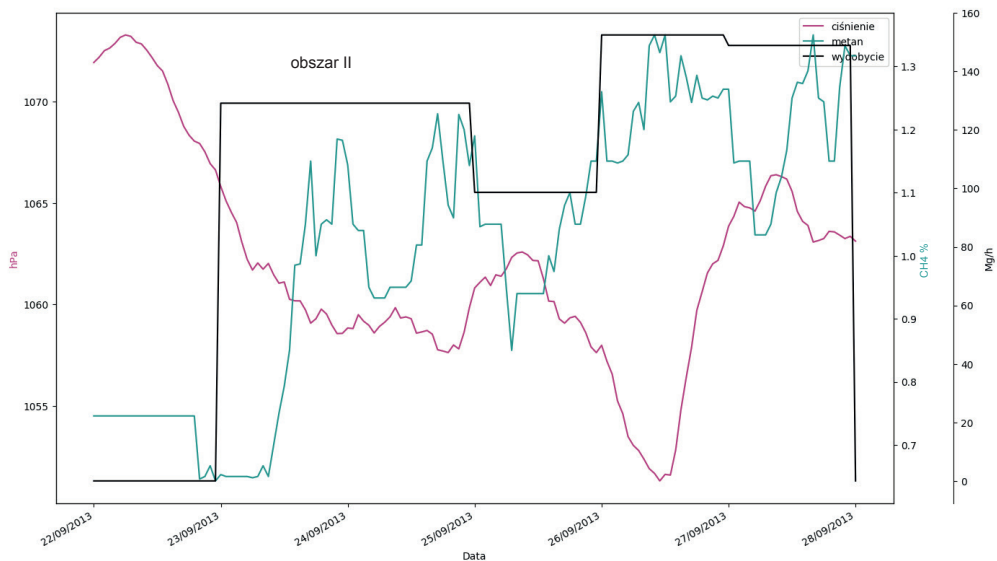
Statystyki charakteryzujące stężenie metanu, ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11 w pokładzie 348 i wydobywie

Wrzesień	Liczność próby	Średnia arytmetyczna	-95% przedział ufności	+95% przedział ufności	Mediana (wartość środkowa)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odczylenie standardowe	Błąd standardowy średniej
Obszar I	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11	1055,503	1054,330	1056,676	1053,880	1042,302	1073,289	8,74872	0,595275
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-11	0,862	0,835	0,889	0,833	0,600	1,367	0,20100	0,013676
Obszar II	wydobywie	73,544	64,591	82,496	116,594	0,000	152,469	66,75199	4,541897
	ciśnienie na wylocie z rejonu ściany B-11	1062,000	1061,143	1062,857	1061,376	1051,312	1073,289	5,20145	0,433454
	stężenie metanu na wylocie z rejonu ściany B-11	1,015	0,980	1,049	1,050	0,643	1,350	0,21148	0,017624
	wydobywie	109,718	101,108	118,327	129,150	0,000	152,469	52,26665	4,355555

a)



b)



Rysunek 4.43. Zmiany stężenia metanu, ciśnienia i wydobywania w ścianie B-11, w pokładzie 348, we wrześniu 2013 roku: a) obszar I; b) obszar II

Tabela 4.30

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji ściany B-11 w pokładzie 348

Wrzesień	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
Obszar I	$r(x, y)$	0,004853	0,451779
	R_d	0,000024	0,204105
	T	0,070999	7,408076
	Prawdopodobieństwo	0,943465	0,000000
	Skala korelacji	korelacja nikła	korelacja przeciętna
	Statystycznie	nieistotne	nieistotne
Obszar II	$r(x, y)$	-0,611746	0,688161
	R_d	0,374233	0,473566
	T	-9,21528	11,30218
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja wysoka
	Statystycznie	istotne	istotne

W przypadku zależności między zmianami stężenia metanu a wydobyciem na dwanaście przyjętych do analizy obszarów w trzech wystąpiła korelacja wysoka zgodnie skierowana, w trzech przeciętna zgodnie skierowana i jedna przeciwnie skierowana, z kolei w czterech wystąpiła słaba korelacja zgodnie skierowana i jedna przeciwnie skierowana. Biorąc pod uwagę fakt, że w dziesięciu obszarach na dwanaście badanych wystąpiła korelacja zgodnie skierowana stężenia metanu z wydobyciem, należy uznać, że zakres wykonywanych robót górniczych miał decydujący wpływ na emisję metanu do wyrobiska eksploatacyjnego. Zmiany ciśnienia nie wpływały istotnie na zmiany stężenia metanu. Tylko w dwóch obszarach wystąpiła wysoka, przeciwnie skierowana ich korelacja. Należy jednak zaznaczyć, że w kwietniu notowany współczynnik korelacji (tab. 4.26) był najwyższy spośród otrzymanych w przypadku wszystkich ścian przyjętych do analizy. W pozostałych obszarach zanotowano jedną korelację przeciętną i jedną słabą przeciwnie skierowaną. Pozostałe korelacje były zgodnie skierowane (dwie wysokie, trzy przeciętne i jedna słaba) lub nikłe (jedna korelacja). Mimo wystąpienia w jednym z obszarów tak wysokiej, przeciwnie skierowanej korelacji stężenia metanu z ciśnieniem nie można jednoznacznie stwierdzić, że ta zależność istnieje. Wysoka korelacja wystąpiła jedynie w dwóch spośród dwunastu obszarów i w obu przypadkach zanotowano jednocześnie korelację zgodną stężenia metanu z wydobyciem.

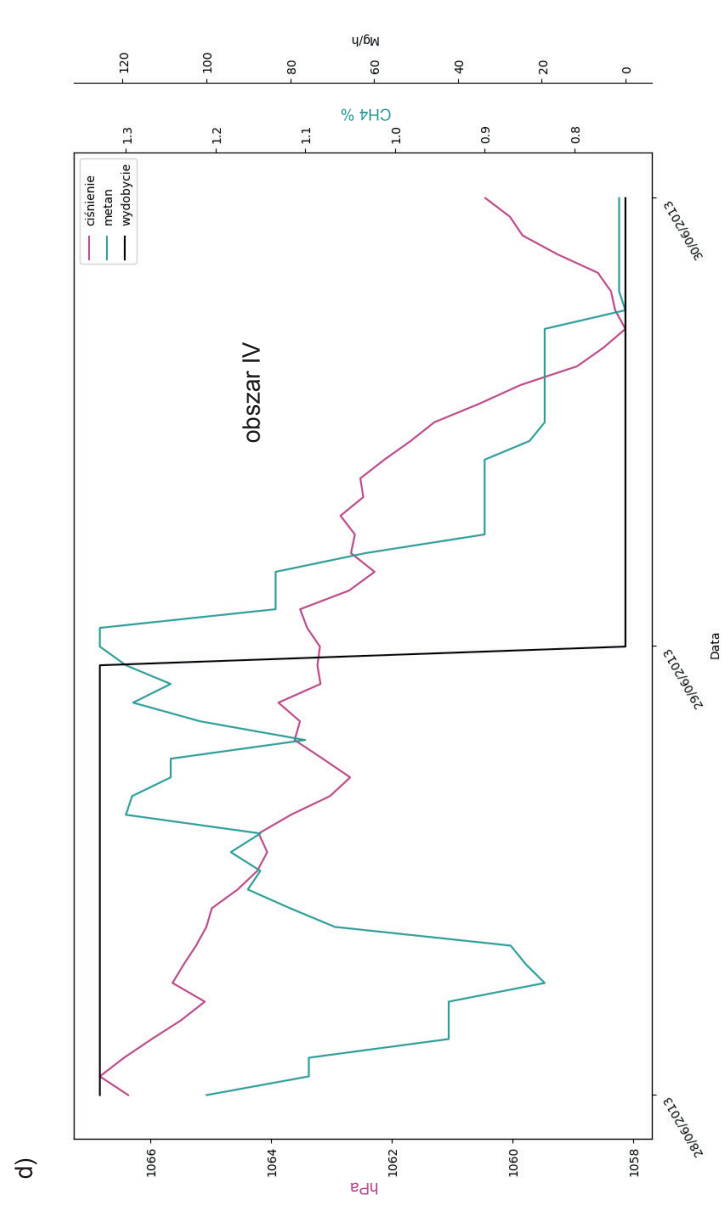
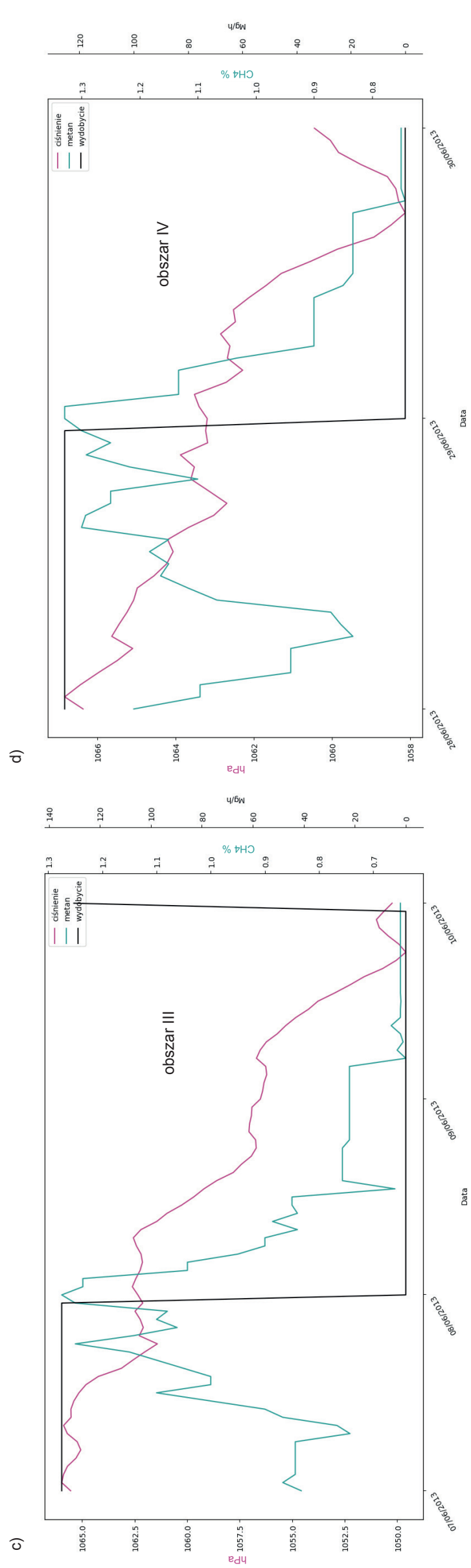
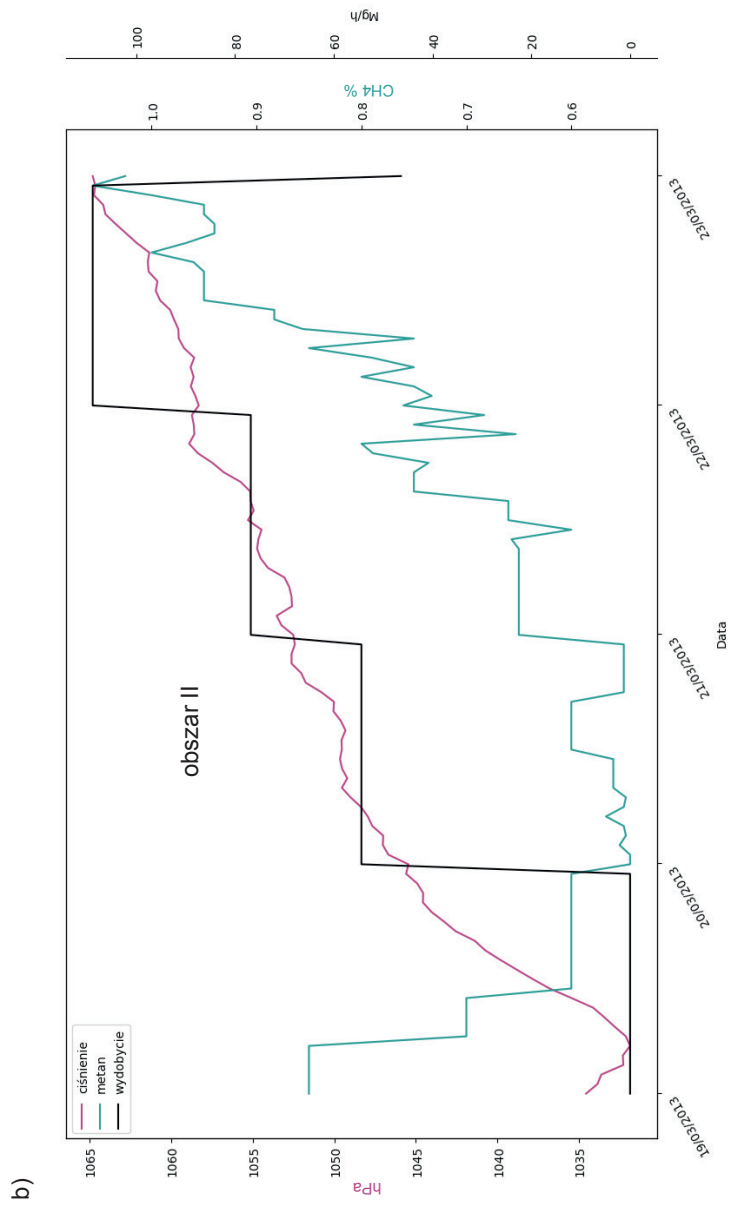
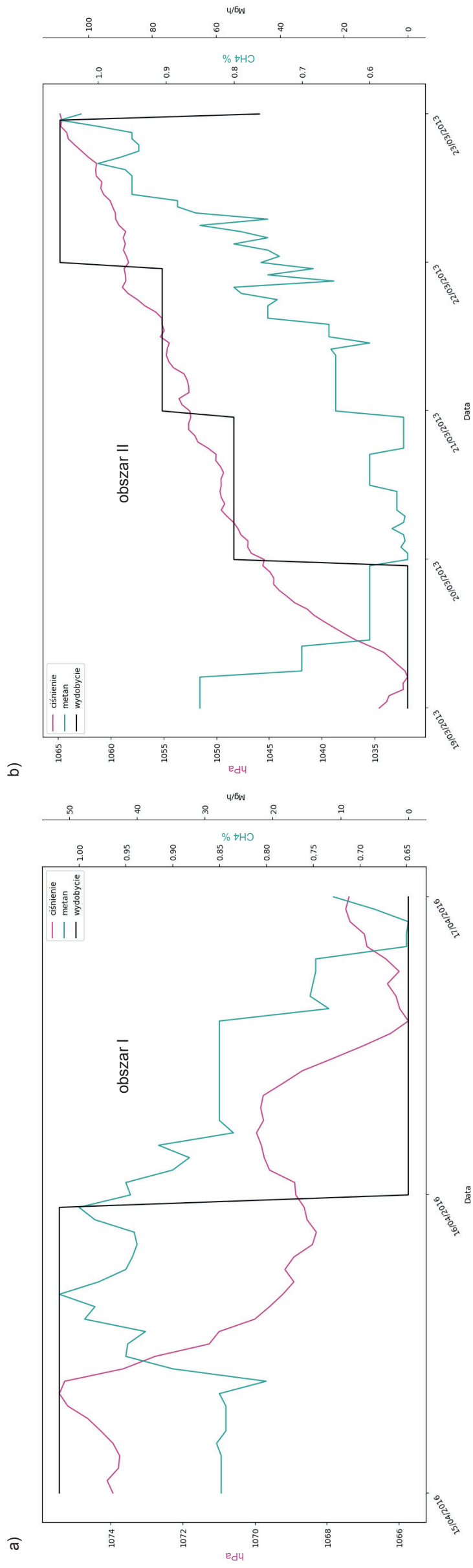
4.5. Ocena wyników badania wpływu ciśnienia barometrycznego i wydobycia na emisję metanu do ścian eksploatacyjnych

W analizie skupiano się na ocenie wpływu wywieranego przez zmiany ciśnienia barometrycznego i wydobycia na emisję metanu do wyrobisk ścianowych prowadzonych przy różnych systemach odmetanowania. Obserwacjom poddano cztery ściany, z czego w trzech

odmetanowanie było prowadzone systemem na „U”, a w jednej – systemem na „U” z nadległym chodnikiem drenażowym. W przypadku ścian D-2 w pokładzie 412łg+łd i 412łg oraz F-3 w pokładzie 406/1 analiza obejmowała trzy miesiące ich biegu, a w przypadku ścian D-2 w pokładzie 410 i B-11 w pokładzie 348 – cały okres biegu. Przyjęte do obserwacji miesiące podzielono na obszary, w których zanotowano największe spadki i wzrosty ciśnienia barometrycznego. W przypadku każdego z nich dokonano analizy statystycznej, wyznaczając wartości podstawowych estymatorów, oraz określono, jak kształtowało się stężenie metanu w zależności od ciśnienia barometrycznego i wydobywania.

Analiza danych dotyczących wszystkich ścian pokazała dużą fluktuację stężenia metanu i ciśnienia. Dwie ściany, mianowicie D-2 w pokładzie 410 i B-11 w pokładzie 348, prowadzone były w warunkach czwartej kategorii zagrożenia metanowego – obserwacja wyników w przypadku ściany D-2 w pokładzie 410 pokazała większą jej stabilność w trakcie eksploatacji. Początkowo stężenia metanu podlegały dużym zmianom, później rosły, utrzymywały się na w miarę stabilnym poziomie, aby pod koniec eksploatacji wyraźnie spaść. Ściana B-11 charakteryzowała się bardzo dużą zmiennością przyjętych do badań parametrów. O trudnych warunkach, w których ta ściana była prowadzona, świadczą przede wszystkim znaczne zmiany wydobywania. Na uwagę zasługuje fakt, że w ścianach D-2 i B-11 zanotowano największe zmiany ciśnienia. W przypadku ściany D-2 zmiana dochodziła do 30 hPa w ciągu sześciu dni, w przypadku ściany B-11 – do 39 hPa w ciągu siedmiu dni. Dotycząca ściany F-3 najwyższa notowana zmiana ciśnienia dochodziła do 39,5 hPa, ale postępowała przez trzynaście dni. Dotycząca ściany D-2 w pokładzie 412łg+łd i 412łg zmiana ciśnienia rzędu 38,59 hPa trwała z kolei osiem dni. Analiza danych w przypadku ściany F-3 i D-2 w pokładzie 412łg+łd i 412łg pokazuje również dużą zmienność ciśnienia i stężenia metanu.

Biorąc pod uwagę czterdzieści cztery obszary przyjęte do analizy, należy zauważyć, że tylko w siedmiu stwierdzono występowanie korelacji stężeń metanu z ciśnieniem przeciwnie skierowanej wysokiej (cztery przypadki) i bardzo wysokiej (trzy przypadki). Zanotowano również dziewięć przypadków korelacji przeciwnie skierowanej przeciętnej lub słabej. W sześciu przypadkach wystąpiła korelacja wysoka, w czternastu – przeciętna lub słaba, ale zgodnie skierowana. W pozostałych obszarach korelacja była nikła. Przykładem bardzo wysokiej korelacji była ściana D-2 w pokładzie 410, gdzie w kwietniu w dwóch obszarach (na trzy badane obszary) prawie 64% (obszar I) i 56% (obszar II) wyników stężenia metanu można tłumaczyć odwrotną liniową zależnością od ciśnienia. Uwzględniając jednak to, że kwiecień był miesiącem, w którym uruchamiano wydobywanie w ścianie, i fakt, że wysoka korelacja pojawiła się tylko w jeszcze jednym obszarze (sierpień), nie można jednoznacznie stwierdzić zależności między spadkiem czy wzrostem ciśnienia a wzrostem czy spadkiem stężenia metanu. W pozostałych analizowanych miesiącach korelacja stężenia metanu z ciśnieniem była wysoka lub przeciętna, ale zgodnie skierowana. Zdecydowanie najwyższą wartość współczynnika korelacji stężenia metanu z ciśnieniem przeciwnie skierowanej stwierdzono w przypadku ściany B-11, gdzie w kwietniu prawie 70% wyników stężenia metanu można tłumaczyć odwrotną liniową zależnością od ciśnienia. W przypadku tej ściany wysoka korelacja wystąpiła jedynie w dwóch obszarach spośród dwunastu badanych obszarów (drugi przypadek stwierdzono we wrześniu) i w obu sytuacjach zanotowano jednocześnie korelację zgodną stężeń metanu z wydobywaniem.



Rysunek 4.44. Wyniki pomiarów ciśnienia barometrycznego, stężenia metanu i wydobywania w wybranych do analizy okresach w przypadku: a) ściany F-3 w pokładzie 406/1; b-d) ściany B-11 w pokładzie 348

Spośród analizowanych obszarów wysoką i zgodnie skierowaną korelację stężenia metanu z wydobyciem stwierdzono w jedenastu przypadkach, w tym w jednym była ona bardzo wysoka (ściana D-2 w pokładzie 412lg+1d i 412lg – maj). W dwudziestu trzech analizowanych obszarach stwierdzono korelację przeciętną lub słabą. W pozostałych dziesięciu była ona nikła, zgodnie lub przeciwnie skierowana. Duży wpływ na wynik współczynnika korelacji miał fakt, że w wielu obszarach wydobyć albo było w miarę stabilne, albo go nie prowadzono.

Porównując statystyki, można stwierdzić, że w trzydziestu czterech przypadkach wystąpiła korelacja zgodna stężenia metanu z wydobyciem, w szesnastu przeciwnie skierowana z ciśnieniem. Można więc uznać, że zakres robót górniczych miał niewątpliwie olbrzymi wpływ na emisję metanu do wyrobisk ścianowych. Ponieważ stałość lub małe wahania wydobywania mogły oddziaływać na pozostałe dziesięć przypadków, wykonano dodatkowe analizy statystyczne. Spośród czterech ścian wybrano dwie – F-3 w pokładzie 406/1 oraz B-11 w pokładzie 348 – i poddano analizie krótsze odcinki czasu, w których zaobserwowano gwałtowne zmiany wydobywania. W tych obszarach pierwsza analiza statystyczna wykazywała słabą zgodną korelację między stężeniem metanu a wydobyciem. Przyjęte do analizy okresy przedstawiono na rysunku 4.44 (na wklejce), a uzyskane wyniki analizy statystycznej zamieszczono w tabeli 4.31.

Analizując dane przedstawione w tabeli 4.31 i na rysunku 4.44, można zauważyć, że przyjęcie do badań statystycznych krótszego odcinka pomiarowego spowodowało zmiany w wartościach współczynników korelacji. We wszystkich wyodrębnionych okresach korelacja stężenia metanu z wydobyciem była wysoka lub bardzo wysoka i zgodnie skierowana. Od 49% do 55% wyników stężeń metanu można tłumaczyć liniową zależnością od wydobywania. Ogólnie można stwierdzić, że wzrost wydobywania powodował wzrost emisji metanu. Jednocześnie w każdym obszarze korelacja z ciśnieniem była bardzo wysoka lub wysoka, ale zgodnie skierowana. Oznacza to, że wzrost ciśnienia powodował wzrost stężenia metanu.

Podsumowując, można stwierdzić, że złożony charakter zjawisk zachodzących w trakcie prowadzonej eksploatacji nie pozwala na wykazanie jednoznacznych powiązań między zmianami ciśnienia barometrycznego a stężeniem metanu. Analiza badań przedstawiona w niniejszym rozdziale pokazała, że tak zwane zwyżki lub zniżki baryczne nie mają wpływu na zmiany emisji metanu do wyrobisk ścianowych. Na związki między badanymi parametrami żadnego wpływu nie miał również przyjęty sposób odmetanowania ściany.

Obserwacja miesięczna i obszarowa wykazała, że zmiany stężenia metanu były w większym stopniu wywołane zmiennością wydobywania prowadzonego w poszczególnych ścianach. Pojawienie się w pewnych obszarach korelacji przeciwnie skierowanej stężeń metanu z ciśnieniem wywołane było jednoczesnym wystąpieniem jego wzrostu albo spadku oraz zmian wydobywania. Ponieważ w przypadku zarówno wydobywania, jak i ciśnienia nie wykazano pełnej korelacji ze zmianami stężenia metanu, należy przypuszczać, że inne czynniki naturalne, nieuwzględnione w powyższych rozważaniach, mają pewien udział w emisji metanu do wyrobisk ścianowych.

Tabela 4.31

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji w wybranych okresach eksploatacyjnych przyjętych do analizy

Ściana	Metan, wylot z rejonu ściany [%]	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]	Obszar	Ciśnienie [hPa]	Wydobycie [Mg/h]
F-3 15.04.2016– 17.04.2016	$r(x, y)$	0,639948	0,704453	III	-0,464522	0,141259
	R_d	0,409534	0,496254		0,215781	0,019954
	T	4,856090	5,787429		-6,25075	1,700348
	Prawdopodobieństwo	0,000026	0,000002		0,000000	0,091255
	Skala korelacji	korelacja wysoka	korelacja bardzo wysoka		korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	istotne		nieistotne	nieistotne
B-11 19.03.2013– 23.03.2013	$r(x, y)$	0,825733	0,737581	III	0,409191	0,280212
	R_d	0,681835	0,544025		0,167437	0,078519
	T	13,25623	9,891136		6,181507	4,023648
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000		0,000000	0,000083
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja bardzo wysoka		korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	istotne		nieistotne	nieistotne
B-11 07.06.2013– 10.06.2013	$r(x, y)$	0,828435	0,671486	I	0,568460	0,290413
	R_d	0,686305	0,450894		0,323147	0,084340
	T	11,26468	6,901177		10,10788	4,408493
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000000		0,000000	0,000017
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja wysoka		korelacja wysoka	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	istotne		istotne	nieistotne
B-11 28.06.2013– 30.06.2013	$r(x, y)$	0,823489	0,713454	III	0,462394	0,227239
	R_d	0,678135	0,509016		0,213808	0,051638
	T	8,463703	5,937063		5,664860	2,534762
	Prawdopodobieństwo	0,000000	0,000001		0,000000	0,012561
	Skala korelacji	korelacja bardzo wysoka	korelacja bardzo wysoka		korelacja przeciętna	korelacja słaba
	Statystycznie	istotne	istotne		nieistotne	nieistotne

5. Wpływ wydzielania metanu z szybów wentylacyjnych kopalń węgla kamiennego na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego

5.1. Wstęp

Gazy, które wydzielają się do wyrobisk górniczych, przemieszczają się wraz z powietrzem kopalnianym do atmosfery. Głównym takim gazem jest metan. W rozdziale czwartym podjęto próbę określenia czynników wpływających na zwiększenie lub zmniejszenie emisji metanu. Wykazano, że zakres prowadzonych robót górniczych ma bardzo duży wpływ na uwalnianie metanu do wyrobisk górniczych. Część gazu, która nie została ujęta systemem odmetanowania, wraz ze zużyтыми prądami powietrza wyprowadzana jest szybami wentylacyjnymi do atmosfery. To z kolei stanowi poważne zagrożenie ze względu na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego.

Metan (CH_4) jest gazem, który pierwotnie powstaje wskutek beztlenowego rozkładu materii organicznej w układach biologicznych, a także uwalnia się ze źródeł antropogenicznych. W 2014 roku emisja metanu wyniosła 41,33 miliona ton ekwiwalentu CO_2 i w porównaniu z rokiem bazowym (1988) była niższa o 46,1% (*Krajowy raport inwentaryzacyjny...* 2016). Jednocześnie metan, podobnie jak CO_2 , został uznany przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC, 2013) za gaz cieplarniany, czyli substancję pochłaniającą promieniowanie podczerwone, a co za tym idzie – przyczyniającą się do globalnego ocieplenia. Zgodnie z ustaleniami Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu stężenie metanu w atmosferze przez ostatnie 250 lat wzrosło o około 162%, a obecnie połowa jego bieżącego strumienia emitowana do atmosfery pochodzi ze źródeł antropogenicznych, na które największy wpływ ma działalność człowieka (IPCC 2013; EPA 2006). Usunięcie metanu z atmosfery następuje przez reakcję z rodnikiem hydroksylowym, w wyniku czego zostaje on przekształcony do CO_2 . Znaczenie metanu jako gazu cieplarnianego, mimo jego wyraźnie mniejszej ilości w atmosferze w stosunku do CO_2 , wynika głównie z faktu, że szacowany potencjał globalnego ocieplenia przypadający na cząsteczkę CH_4 jest dwudziestopięciokrotnie większy od dwutlenku węgla, a czas przebywania metanu w atmosferze wynosi dwanaście lat (tab. 5.1) (IPCC 2013; EPA 2006).

Zgodnie z *Krajowym raportem inwentaryzacyjnym* z 2016 roku udział metanu w całkowitej krajowej emisji gazów cieplarnianych w 2014 roku wyniósł 10,9% (*Krajowy raport inwentaryzacyjny...* 2016). Trzy główne źródła emisji metanu występują w następujących kategoriach: emisja lotna z paliw, rolnictwo oraz odpady. Ich udziały w krajowej emisji metanu w 2014 roku wyniosły odpowiednio 34,6%, 33,7% i 22,6% (*Krajowy raport inwentaryzacyjny...* 2016). Na

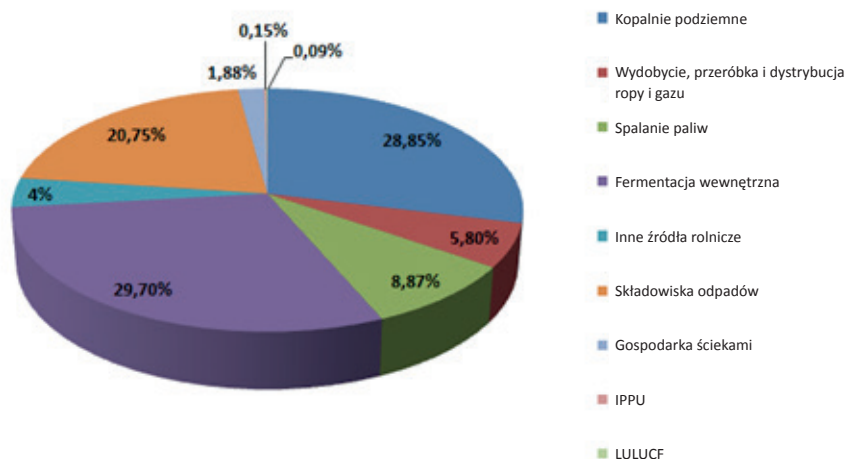
rysunku 5.1 przedstawiono źródła emisji metanu tworzące wymienione wyżej kategorie. Na pierwszą z wymienionych składa się emisja z kopalń podziemnych (około 28,8% całkowitej emisji CH₄) oraz z wydobycia, przerobu i dystrybucji ropy naftowej i gazu (łącznie około 5,8% emisji). Fermentacja wewnętrzna była dominującym źródłem emisji w kategorii „rolnictwo” – z udziałem około 29,7%. Emisja ze składowisk odpadów stanowiła około 20,7% krajowej emisji metanu, a związana z gospodarką ściekami – 1,8%.

Tabela 5.1

Charakterystyka wybranych gazów, uznawanych za powodujące efekt cieplarniany
(N. Szlązak i in. 2008; 2015)

Wyszczególnienie	CO ₂	CH ₄
Okres życia w atmosferze	50–200 lat	12 lat
Zdolność pochłaniania promieniowania podczerwonego Ziemi*	1	25
Stężenie w atmosferze około 1800 roku	280 ppm	0,8 ppm
Stężenie w atmosferze w 1990 roku	353 ppm	1,72 ppm
Stężenie w atmosferze w 1998 roku	365 ppm	1,745 ppm
Roczny przyrost stężenia w latach dziewięćdziesiątych XX wieku	1,5 ppm	0,007 ppm
Procentowy roczny przyrost stężenia w latach dziewięćdziesiątych XX wieku	0,50%	0,90%
Szacunkowy wpływ na efekt cieplarniany	50,00%	19,00%
Udział emisji antropogennej w całej emisji do atmosfery	–	–

* W stuletnim horyzoncie czasowym – dane z 1996 roku (IPCC 2013)



Rysunek 5.1. Struktura emisji metanu w Polsce w 2014 roku (*Krajowy raport inwentaryacyjny... 2016*).

Biorąc pod uwagę rozliczne źródła emisji metanu, można stwierdzić, że oszacowanie jego ilości z poszczególnych źródeł obarczone jest bardzo dużą niepewnością, co z kolei utrudnia dokładne prognozowanie zmian klimatycznych. Aby rzetelnie przewidzieć zmiany klimatu i pomagać w egzekwowaniu konwencji politycznych w zakresie unikania emisji gazów cieplarnianych, konieczna jest odpowiednia wiedza na temat źródeł i pochłaniania gazów cieplarnianych. Ze względu na znaczenie kwestii nasze aktualne poznanie źródeł i procesów towarzyszących przedostawaniu się metanu do atmosfery jest nadal niewystarczające (IPCC 2013; EPA 2006). Na przykład niepewność w zakresie emisji paliw kopalnych wzrosła w ciągu ostatniego półwiecza głównie z powodu nieprecyzyjnych i niespójnych krajowych raportów i inwentaryzacji energetycznych (IPCC 2013).

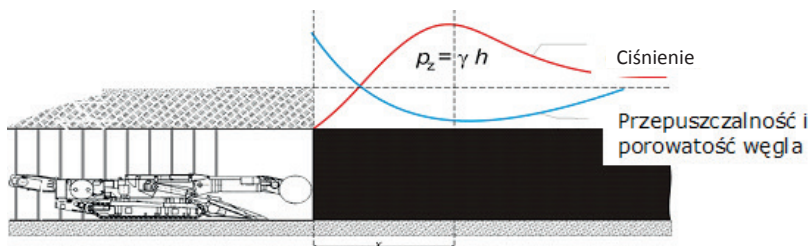
Polska, z udziałem około 2,7%, należy – obok Chin, Stanów Zjednoczonych, Ukrainy, Rosji i Australii – do największych emiterów metanu w sektorze górnictwa węglowego, który w 2010 roku był odpowiedzialny za blisko 8% jego światowej antropogenicznej produkcji (EPA 2006). W niniejszym rozdziale dokonano próby określenia przyczyn wydzielania się metanu z pokładów węgla kamiennego, a także zobrazowano jego ilości uwalniane z szybów wentylacyjnych. Analizy dokonano na przykładzie kopalni zespolonej KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”.

5.2. Źródła emisji metanu z kopalń węgla kamiennego

Węgiel kamienny jest skałą osadową pochodzenia roślinnego zawierającą w swoim składzie od 75% do 90% pierwiastka węgla. Pokłady węgla znajdują się w Polsce głównie na terenie Górnego i Dolnego Śląska oraz w Zagłębiu Lubelskim. Duże ilości metanu występują jednak w południowej części obszaru Rybnickiego Okręgu Węglowego. Wzmoczonej eksploatacji występujących na tych obszarach złóż towarzyszą zjawiska emisji gazów kopalnianych, między innymi metanu, dwutlenku węgla, wyższych węglowodorów czy azotu, oraz pary wodnej. Uwalniane tam gazy składają się w 86–99,6% z metanu.

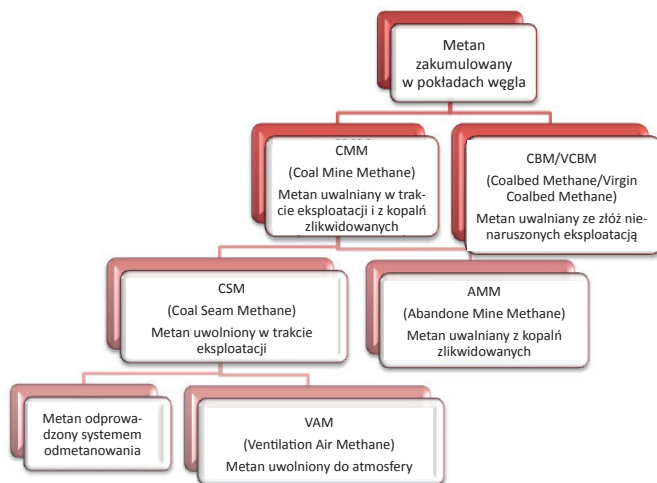
Węgiel powstawał głównie w karbonie ze szczątków roślinnych, które przy braku tlenu uległy uwęgleniu (N. Szlązak i in. 2015). Procesowi temu towarzyszyło wydzielanie metanu, który może występować w pokładach węgla w stanie wolnym lub zasorbowanym. W naturalnej postaci – w pokładzie – węgiel zawiera znaczne ilości zaadsorbowanego metanu, który łatwo ulega dyfuzji podczas wydobywania. W stanie wolnym występuje w szczelinach i spękaniach węgla oraz w jego makroporach. Znaczne głębokości zalegania złóż substancji roślinnej utrudniają przenikanie metanu do atmosfery. Możliwość migracji zależy również od przepuszczalności tworzącego się złoża. Na rysunku 5.2 zobrazowano zmiany przepuszczalności i ciśnienia gazu w pokładzie węgla przed frontem wyrobiska ścianowego. Zagadnienia związane z przepuszczalnością górotworu i filtracją metanu zostały bardzo szczegółowo opisane w literaturze (N. Szlązak i in. 2015). Przepuszczalność węgla zależy od ciśnienia górotworu związanego z eksploatacją, a jego zmiany następują w czasie i w przestrzeni pokładu (N. Szlązak i in. 2014; 2015). Największa przepuszczalność węgla występuje w czole wyrobiska ścianowego i wraz z odległością od niej maleje do stałej wartości, która odpowiada warunkom nienaruszonego eksploatacją pokładu węgla kamiennego. Ciśnienie gazu jest zaś najmniejsze w czole wyrobiska i rośnie w głąb pokładu. Z przedstawionych rozważań wynika jednoznacznie, że wydzielanie metanu z pokładu nieodprężonego eksploatacją będzie niewielkie.

Bardzo rozbudowana struktura porowata węgla i wynikające z niej zdolności sorpcyjne, szczególnie gazów, mają olbrzymie znaczenie podczas wydobywania i przeróbki węgla. Różnorodny skład i budowa skał wpływają na zmienność występowania metanu w złożach węgla kamiennego. W obszarach zaburzeń tektonicznych mogą występować odprężone strefy o podwyższonej przepuszczalności i szczelinowości, z których wydzielanie metanu będzie bardzo intensywne. Obecność w pokładach metanu stwarza duże problemy podczas eksploatacji, gdyż może powodować zagrożenie, a w konsekwencji prowadzić do wybuchów i nagłych wyrzutów skał. Z tego właśnie powodu istotne jest dokładne określenie ilości wydzielającego się metanu, gdyż wiedza ta pozwala zapewnić odpowiednie warunki wentylacyjne w kopalni.



Rysunek 5.2. Zależność przepuszczalności i porowatości węgla od ciśnienia górotworu w eksploатовanym pokładzie (N. Szlązak i in. 2015)

Właściwości gazu są zależne od złoża i sposobu jego pozyskania, zmieniając się w miarę upływu czasu i warunków eksploatacji złoża. Na rysunku 5.3 przedstawiono schemat możliwych źródeł emisji i sposobów pozyskiwania metanu zakumulowanego w pokładach węgla.

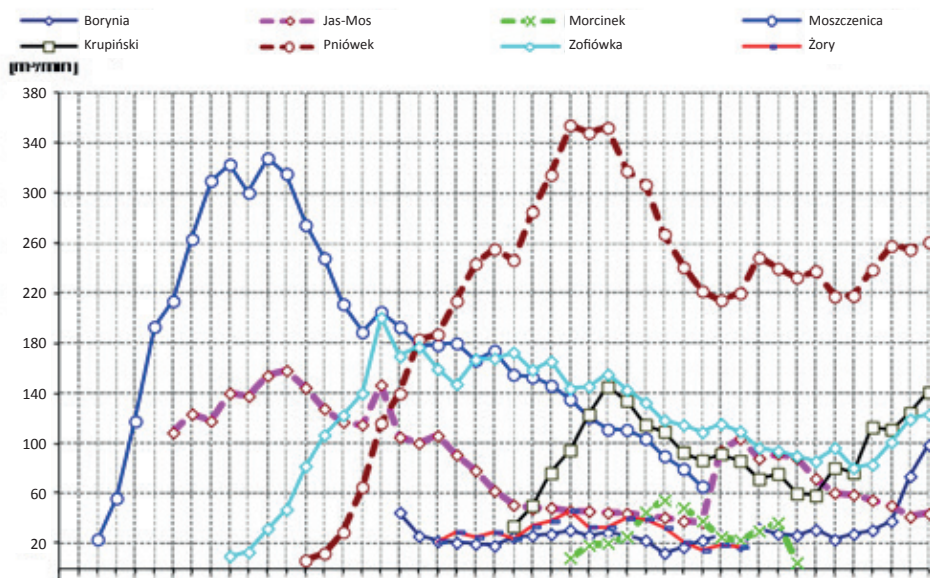


Rysunek 5.3. Schemat możliwych źródeł emisji i sposobów pozyskiwania metanu zakumulowanego w pokładach węgla (Swolkień 2017)

Najpowszechniej stosowana metoda pozyskiwania metanu polega na ujmowaniu go w trakcie bieżącej eksploatacji węgla (*Coal Seam Methane*, CSM), z kopalni, w których zaprzestano wydobywania (*Abandoned Mine Methane*, AMM) i z pokładów nienaruszonych eksploatacją (*Coalbed Methane/Virgin Coalbed Methane*, CBM/VCBM).

Określenie *Coal Mine Methane* stosuje się jako ogólnie związane z odzyskiwaniem metanu z kopalni czynnych i zlikwidowanych, z podziałem na metan ujmowany w kopalniach czynnych i w kopalniach zlikwidowanych (N. Szlązak i in. 2015).

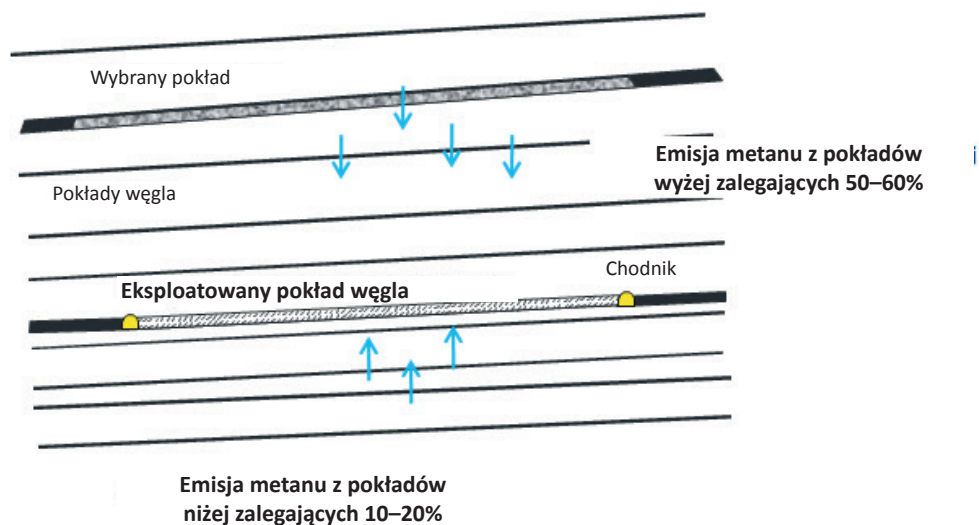
Na rysunku 5.4 przedstawiono zmienność wydzielania metanu w czasie funkcjonowania kilku wybranych kopalń (N. Szlązak i in. 2002). Porównując wykresy, można wyraźnie dostrzec, że charakter zmian wydzielania metanu jest zbliżony w poszczególnych kopalniach przez lata, różna jest tylko intensywność jego wydzielania. Dobrze obrazuje to przykład zlikwidowanej kopalni „Moszczenica” i czynnej kopalni „Pniówek”. W momencie rozpoczęcia eksploatacji i odprężenia górotworu nastąpił gwałtowny wzrost emisji metanu, a w miarę kończenia eksploatacji emisja powoli zanikała, tak jak w kopalni „Moszczenica”. W kopalni „Pniówek” po spadku nastąpił ponowny wzrost emisji metanu, co spowodowane było otwarciem nowego złoża. Zakończenie eksploatacji prowadzi do wyrównania ciśnień w górotworze, co objawia się zwiększeniem naprężeń i zmniejszeniem przepuszczalności górotworu, a w konsekwencji zanikiem emisji metanu w czasie. Biorąc pod uwagę powyższe, z dużym prawdopodobieństwem można uznać, że pozyskiwanie metanu z pokładów zlikwidowanych kopalń (*Abandoned Mine Methane*) jest wysoce nieefektywne.



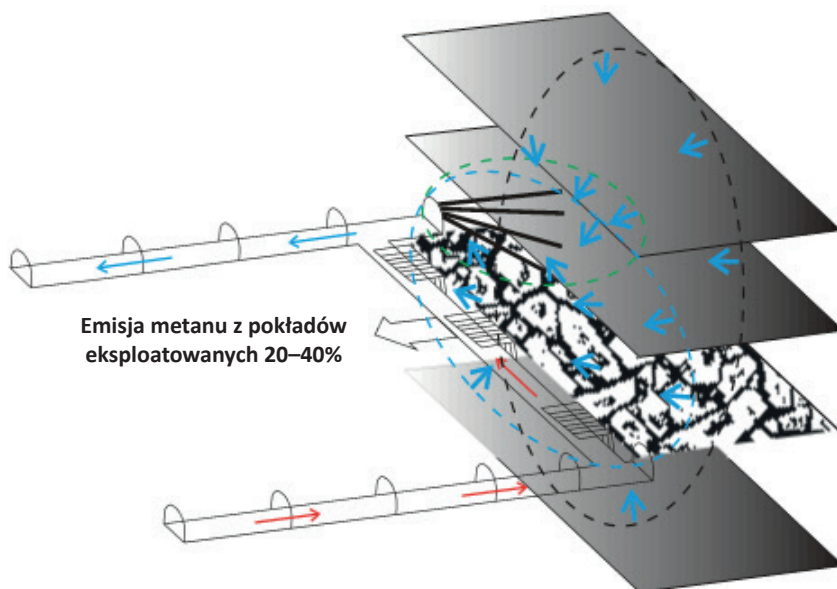
Rysunek 5.4. Przebieg zmian emisji metanu w okresie funkcjonowania wybranych kopalń (N. Szlązak i in. 2002)

Ze względu na ochronę powietrza atmosferycznego przed zwiększoną emisją metanu najbardziej interesujące wydaje się pozyskiwanie metanu z czynnych kopalń, czyli podczas prowadzenia eksploatacji (*Coal Seam Methane*). Polskie przepisy górnicze jednoznacznie stwierdzają, że w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy załóg górniczych metan musi być ujmowany przez odmetanowanie przy zaliczeniu pokładu do czwartej kategorii zagrożenia metanowego. Jeśli wielkość wydzielania metanu nie pozwala na jego ujęcie instalacją odmetanowania, to metan jest usuwany do powietrza wentylacyjnego. Jest on rozrzedzany powietrzem o odpowiednim strumieniu i wraz z grupowymi prądami zużytego powietrza kierowany do szybów wentylacyjnych, a stamtąd bezpośrednio emitowany do atmosfery (*Ventilation Air Methane*).

Proces wydzielania gazu ze złoża do wyrobiska ścianowego rozpoczyna się w chwili odprężenia skał. Wydzielanie gazu ze złoża następuje przede wszystkim z pokładów węgla i trwa tak długo, jak długo obszar górotworu jest odprężony eksploatacją. W związku z tym, że w polskim górnictwie prowadzi się eksploatację wielopokładową, metan może być emitowany z warstw sąsiednich, znajdujących się w zasięgu strefy odprężenia (N. Szlązak i in. 2015). Na rysunkach 5.5 i 5.6 zobrazowano kierunki przepływu metanu z warstw sąsiadujących. Ocenia się (N. Szlązak i in. 2015), że emisja metanu jest największa (około 50–60%) z warstw nadległych, 10–20% pochodzi z warstw podległych, a z eksploatowanego pokładu – jedynie 20–40%. Należy zaznaczyć, że wartości te mogą być zmienne w zależności od budowy geologicznej eksploatowanego pokładu, a także warstw sąsiadujących i stopnia ich odgazowania wywołanego wcześniej prowadzoną eksploatacją. Dlatego bardzo istotne jest, aby przed rozpoczęciem eksploatacji dokładnie określić strefę desorpcji wywołanej eksploatacją.



Rysunek 5.5. Kierunki dopływu metanu z warstw nadległych i podległych eksploatowanego pokładu (Swolkień 2017)



Rysunek 5.6. Kierunki dopływu metanu z warstw nadległych i podległych eksploatowanego pokładu (Swolkień 2017)

Występujący w pokładach węgla metan wpływa niekorzystnie na stan bezpieczeństwa w podziemnych zakładach górniczych ze względu na jego uwalnianie podczas prowadzonych robót górniczych.

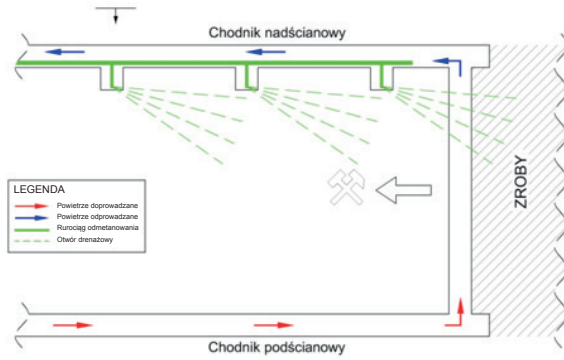
5.3. Źródła ujmowania metanu

Ograniczenie wypływu metanu do przestrzeni wyrobisk górniczych, aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnych przepisami górniczymi stężeń metanu w powietrzu przepływającym przez wyrobiska, narzuca stosowanie środków zapobiegających powstaniu zagrożenia, głównie odpowiednio zaprojektowanego w przypadku danej ściany eksploatacyjnej systemu wentylacji lub – w przypadku dużej ilości wydzielającego się metanu – wsparcie skutecznej wentylacji odmetanowaniem. Metoda pierwsza polega na doprowadzeniu do każdego wyrobiska kopalni takiego strumienia powietrza, który zagwarantuje odpowiednie wartości stężeń metanu w powietrzu kopalnianym. Nie zawsze jednak zapewnia to zlikwidowanie czy ograniczenie zagrożenia metanowego. Z tego powodu stosuje się drugą metodę, mianowicie odmetanowanie. Obie te metody są zależne od siebie. Odmetanowanie może być realizowane zarówno jako wyprzedzające, czyli przed rozpoczęciem eksploatacji w górotworze lub polu eksploatacyjnym, jak i w trakcie prowadzenia robót (w wyrobiskach korytarzowych, eksploatacyjnych, zrobach) (N. Szlązak i in. 2008a; Berger i in. 2010; Filipecki i in. 2006; Roszkowski i in. 1997a; 1997b; Tor i in. 2012).

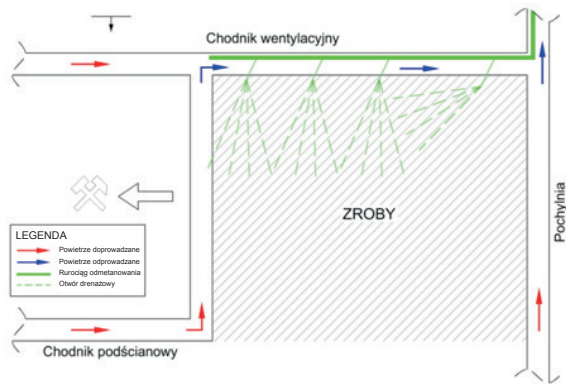
Odmetanowanie górotworu jest najskuteczniejszą metodą zwalczania zagrożenia metanowego, zapewniającą zmniejszenie wypływów metanu do przestrzeni roboczych i zapobieganie zjawiskom takim jak wydmuchy czy nagłe wyrzuty metanu i węgla lub ograniczenie ich. Najskuteczniejszym rozwiązaniem jest drenowanie metanu z górotworu i otamowanych zrobów oraz odprowadzanie go osobnymi rurociągami na powierzchnię z wykorzystaniem depresji wytwarzanej w stacji odmetanowania (N. Szlązak i in. 2015). Metoda ta pomaga w utrzymaniu żądanych parametrów wentylacyjnych, stawia jednak określone wymagania odnośnie do sposobów rozcinania metanonośnych pokładów węgla (N. Szlązak i in. 2015). W polskich kopalniach węgla kamiennego odmetanowanie wyprzedzające, czyli prowadzone ze złóż nienaruszonych eksploatacją, właściwie nie jest prowadzone, głównie z powodu niskiej przepuszczalności węgla, wyraźnie ograniczającej skuteczność tej metody. Wydatek uwalnianego metanu jest ściśle związany z zakresem prowadzonych robót górniczych – udostępniających i podczas właściwej eksploatacji pokładów węgla, stąd też ogranicza się emisje metanu (prowadzi odmetanowanie) ze złóż naruszonych eksploatacją (Berger i in. 2010; Krause, Łukowicz 2004). W dotychczas stosowanej technologii wyróżnia się dwa sposoby odmetanowania w trakcie eksploatacji. Pierwszy z nich związany jest z wierceniem otworów z chodników wentylacyjnych do strefy odprężonej w stropie lub spągu pokładu eksploatowanego. Jest to podstawowy rodzaj odmetanowania stosowany w polskim górnictwie, przy czym zarówno miejsce wykonywania otworów, jak i ich parametry zależą od systemu eksploatacji i technologii przewietrzania ściany (rys. 5.7). Drugi sposób związany jest z wykonywaniem chodników drenażowych w pokładach znajdujących się nad lub pod eksploatowanym pokładem (N. Szlązak i in. 2015) (rys. 5.8). Metan ujęty przez system odmetanowania jest odprowadzany rurociągami na powierzchnię i wykorzystywany do celów gospodarczych przy wytwarzaniu energii elektrycznej lub ciepłej albo zostaje wypuszczony do atmosfery. Największa ilość metanu – aż 55,97% – jest pozyskiwana przez odmetanowanie wyrobisk eksploatacyjnych, 42,23% pochodzi z odmetanowania zrobów, a jedynie 1,8% z wyrobisk korytarzowych (N. Szlązak i in. 2015).

Metan w czynnych kopalniach węgla kamiennego jest pozyskiwany z odmetanowania prowadzonego w związku z obowiązkami wynikającymi z przepisów z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy. Stosowane technologie pozwalają na uzyskanie efektywności odmetanowania poszczególnych ścian – w zależności od prognozowanej metanowości bezwzględnej – na poziomie nawet do 75% (N. Szlązak i in. 2002; 2015). Należy jednak pamiętać, że nie wszystkie kopalnie prowadzą aktywne odmetanowanie – ze względu na zmienną emisję metanu z różnych wyrobisk (Swolkień 2015). Często z powodu niskiej emisji metanu prowadzenie odmetanowania jest technicznie trudne i ekonomicznie nieopłacalne (N. Szlązak i in. 2015). W takich przypadkach stosuje się aktywną wentylację i usuwa metan za pośrednictwem szybów wentylacyjnych. Biorąc pod uwagę, że w Polsce działa aktywnie dwadzieścia kopalń, średnia efektywność odmetanowania wynosi około 36,6% (tab. 5.2). Uwzględniając powyższe, można przyjąć, że pozostała ilość metanu (około 63,4%) odprowadzana jest przez wentylację (metan uwolniony do atmosfery). Właściwości metanu jako gazu cieplarnianego sprawiają, że ze względu na ochronę atmosfery istotne i pożądane jest zmniejszenie jego emisji.

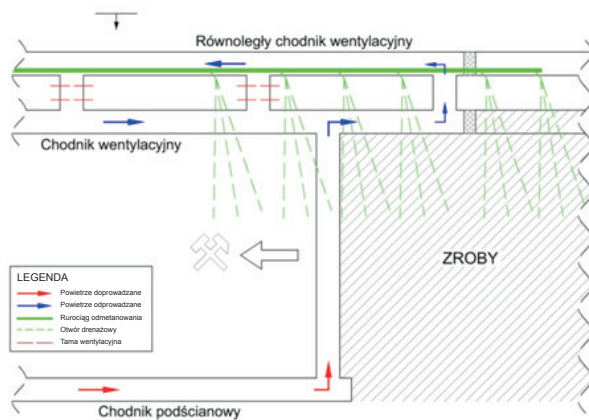
a)



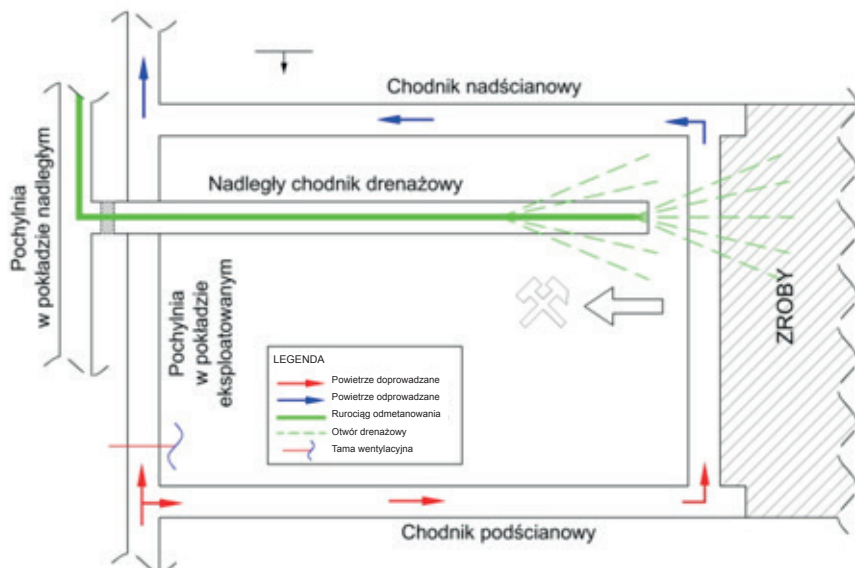
b)



c)



Rysunek 5.7. Schemat odmetanowania wyrobiska ściannowego: a) przy przewietrzaniu systemem na „U”; b) przy przewietrzaniu ściany systemem na „Y”; c) przy przewietrzaniu ściany z podwójnym chodnikami wentylacyjnym (N. Szlązak i in. 2015)



Rysunek 5.8. Schemat odmetanowania ściany z chodnikiem drenażowym (N. Szlązak i in. 2015)

5.4. Stan emisji metanu z kopalń węgla kamiennego

W 2016 roku w Polsce wydobycie roczne z pokładów metanowych wynosiło 70,4 mln Mg. Z górotworu objętego wpływami eksploatacji wydzielilo się 933,8 mln m³ metanu, co stanowi średnie wydzielanie 1771,7 m³ CH₄/min (GIG 2004–2013; WUG 2017). Średnia metanowość wentylacyjna wynosiła 1122,65 m³ CH₄/min.

W tabeli 5.2 przedstawiono kształtowanie się metanowości bezwzględnej w polskim górnictwie węgla kamiennego w latach 2011–2016 oraz ilość metanu ujętego systemem odmetanowania i zagospodarowanego, a także wydobycie i metanowość wyrażoną na megagram wydobywania (GIG 2004–2013; WUG 2017). Warto podkreślić, że w okresie od 2013 do 2016 efektywność zagospodarowania metanu ujętego systemami odmetanowania spadła o 10,8% mimo wzrostu skuteczności odmetanowania o 4,0% (tab. 5.2). Niezagospodarowany metan jest więc uwalniany do atmosfery za pośrednictwem szybów wentylacyjnych, dlatego w rozważanym okresie nastąpił gwałtowny wzrost ilości uwalnianego do atmosfery metanu o prawie 78,7 mln m³ (tab. 5.2), wynosząc w 2016 roku 738,8 mln m³. Niepokojący spadek gospodarczego wykorzystania metanu może świadczyć o problemach z infrastrukturą kopalnianą i braku należytego dofinansowania nowych technologii odmetanowania. Uwzględniając przy tym bardzo niskie opłaty za megagram uwolnionego do atmosfery metanu – 0,29 zł (*Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 czerwca 2016 r. zmieniające rozporządzenie...*), trzeba stwierdzić, że kopalniom bardziej opłaca się emitować metan do atmosfery niż inwestować w nowe technologie, pozwalające na jego ujmowanie i późniejsze zagospodarowanie.

Tabela 5.2

Zestawienie metanowości bezwzględnej, wentylacyjnej i wykorzystania metanu w latach 2011–2016 (GIG 2004–2013; WUG 2017)

Wyszczególnienie	Rok					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Metanowość bezwzględna [mln m ³ CH ₄ /rok]	828,8	828,2	847,8	891,1	933,0	933,8
Metanowość wentylacyjna [mln m ³ /rok]	578,6	561,5	581,7	570,1	594,0	591,7
Ilość ujętego metanu [mln m ³ CH ₄ /rok]	250,2	266,7	276,6	321,0	339,0	342,1
Efektywność odmetanowania [%]	30,2	32,2	32,6	36,0	36,3	36,6
Ilość zagospodarowanego metanu [mln m ³ CH ₄ /rok]	166,3	178,6	187,7	211,4	197,1	195,0
Emisja metanu do atmosfery [mln m ³ /rok]	662,5	649,6	660,1	679,7	735,9	738,8
Efektywność zagospodarowania ujętego metanu [%]	66,5	67,0	67,8	65,8	58,1	57,0
Wydobycie węgla kamiennego [mln Mg]	75,5	79,2	76,5	72,5	72,2	70,4
Metanowość względna [m ³ CH ₄ /t]	11,0	10,5	11,1	12,3	12,9	13,3

5.5. Emisja metanu z szybów wentylacyjnych kopalni zespólonej KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”

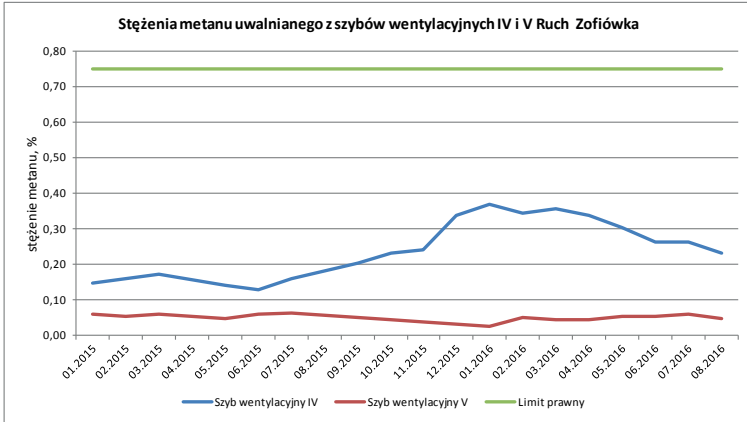
Ze względu na wzrost ogólnej emisji metanu do atmosfery analizie poddano trzy ruchy tworzące kopalnię zspólną KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”. Analiza wyników obejmowała okres od stycznia 2015 do sierpnia 2016 roku. Wykonano pomiary stężenia metanu około 10 m poniżej wlotu do kanału szybu wentylacyjnego w poszczególnych ruchach, a następnie – biorąc pod uwagę strumienie objętościowe powietrza – dokonano ich przeliczenia na wydatki (tab. 5.3). Jednocześnie w przypadku każdego ruchu określono ilości metanu ujętego systemem odmetanowania, wyznaczono także metanowość bezwzględną. Wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 5.9, 5.10 i 5.11.

Tabela 5.3

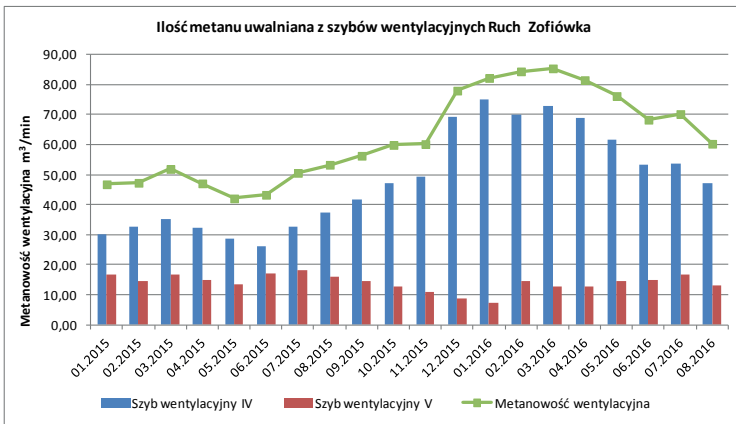
Zestawienie szybów wentylacyjnych wybranych do pomiarów i wydatków objętościowych powietrza

Nazwa kopalni	Numer szybu wentylacyjnego	Wydatek objętościowy powietrza [m ³ /min]
Ruch „Zofiówka”	szyb wentylacyjny IV	20401,00
	szyb wentylacyjny V	28076,00
Ruch „Borynia”	szyb wentylacyjny VI	12759,00
	szyb wentylacyjny III	26332,00
Ruch „Jastrzębie”	szyb wentylacyjny VI	11758,00
	szyb wentylacyjny IV	15169,00

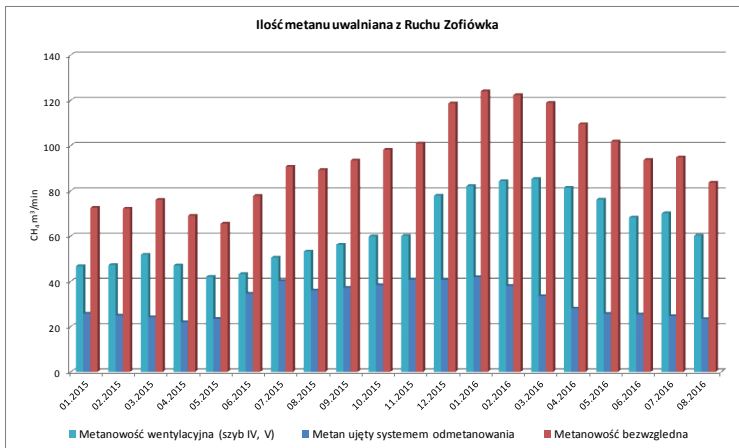
a)



b)



c)



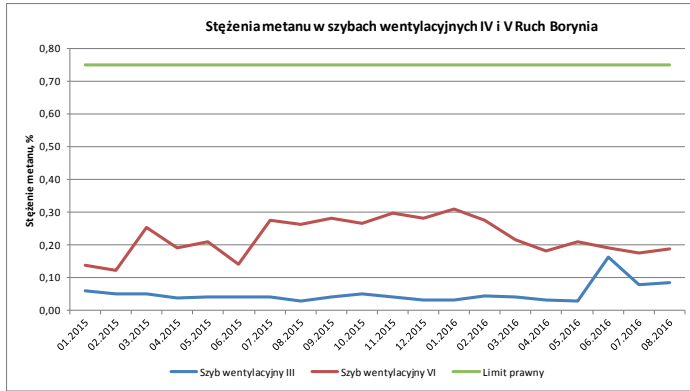
Rysunek 5.9. Zestawienie stężeń metanu (a), jego wydatku w szybów wentylacyjnych (b), a także zestawienie metanowości (c) Ruchu „Zofiówka” w badanym okresie

Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 5.9c, 5.10c i 5.11c, można wyraźnie dostrzec, że największa metanowość bezwzględna została zanotowana w przypadku Ruchu „Zofiówka” – w okresie od grudnia 2015 do kwietnia 2016 roku była bliska 120 m³/min (rys. 5.9c). W przypadku Ruchu „Borynia” maksymalna metanowość bezwzględna przypadła na czerwiec 2016 roku i wynosiła prawie 85 m³/min (rys. 5.10c). Na uwagę zasługuje jednak fakt, że w tym czasie nastąpił gwałtowny wzrost ilości metanu odprowadzanego przez szyb wentylacyjny III tej kopalni (rys. 5.9b–c). Prawdopodobnie było to spowodowane otwarciem nowego obszaru wydobywczego, który był przewietrzany za pośrednictwem wspomnianego szybu. Zdecydowanie najmniejsze wartości metanowości bezwzględnej zanotowano w przypadku Ruchu „Jastrzębie” – dochodziły one do 40 m³/min lub nieco przekraczały tę wartość (rys. 5.11c). Istotne jest jednak to, że w całym badanym okresie w tej kopalni ilości metanu ujęte systemem odmetanowania i uwalniane do atmosfery były na zbliżonym poziomie. W pozostałych dwóch kopalniach metan odprowadzany systemem wentylacyjnym znacznie przekraczał jego ilości ujęte systemem odmetanowania.

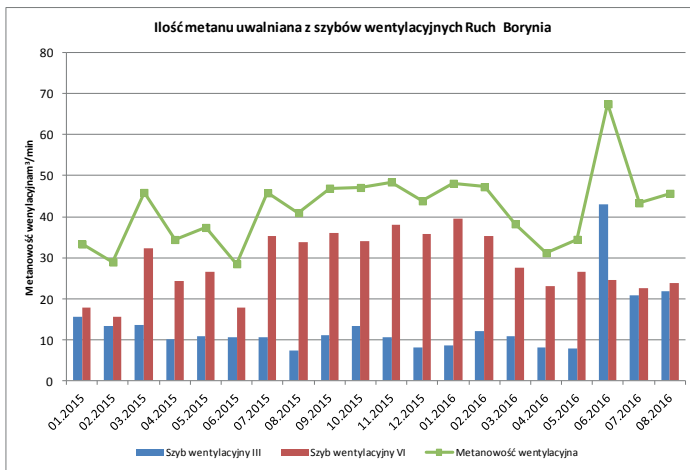
Wyniki przedstawione na rysunkach 5.9b, 5.10b i 5.11b obrazują ilości metanu odprowadzanego systemem wentylacyjnym z dwóch szybów wentylacyjnych w każdej kopalni. Wartości te różnią się w przypadku każdego z szybów, co jest wynikiem prowadzenia eksploatacji w różnych rejonach wydobywczych i przewietrzania wyrobisk górniczych innymi szymbami, przy innych wartościach wydatków powietrza. W przypadku Ruchu „Zofiówka” znacznie większe ilości metanu odprowadzane były za pośrednictwem szybu IV (rys. 5.9b). Należy jednak pamiętać, że w szybie tym wydatek powietrza jest o prawie 7600 m³/min niższy niż w szybie V (tab. 5.3), co powoduje mniejsze rozrzedzenie metanu. Sumaryczna metanowość wentylacyjna nie przekraczała 90 m³/min. W przypadku Ruchu „Borynia” sytuacja była analogiczna (rys. 5.10b). Większość metanu odprowadzana była szybem o mniejszym wydatku powietrza (szyb VI). Analizując jednak przebieg zmienności metanowości wentylacyjnej, można zauważyć, że w czerwcu 2016 roku nastąpił gwałtowny wzrost emisji metanu z szybu III, w którym notowany był ponaddwukrotnie większy wydatek powietrza niż w szybie VI. Od tego momentu ilości metanu odprowadzane oboma szymbami były porównywalne (lipiec i sierpień 2016 roku). Tego typu sytuacja była prawdopodobnie wywołana otwarciem nowego pola eksploatacyjnego, a co za tym idzie – odprężeniem górotworu i znaczną emisją metanu. Metanowość wentylacyjna w przypadku tej kopalni w całym okresie trwania badań, z wyjątkiem czerwca 2016 roku (prawie 70 m³/min), nie przekraczała 50 m³/min. W przypadku Ruchu „Jastrzębie”, podobnie jak w pozostałych dwóch kopalniach, więcej metanu odprowadzано szybem o mniejszym wydatku powietrza (szyb VI), a metanowość wentylacyjna nie przekraczała 25 m³/min (rys. 5.11b). Ruch „Jastrzębie” jest w stanie likwidacji, dlatego prowadzi się tam działania polegające na utrzymaniu wyrobisk przez ich aktywne przewietrzanie i prowadzenie odmetanowania, aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnych przepisami górniczymi stężeń metanu w powietrzu.

W przypadku kopalń węgla kamiennego podstawowe znaczenie mają stężenia metanu uwalnianego do atmosfery z szybów wentylacyjnych. Na rysunkach 5.9a, 5.10a i 5.11a przedstawiono zmiany stężeń dotyczące poszczególnych analizowanych ruchów. Dodatkowo stałą linią zaznaczono graniczne dopuszczalne prawem stężenie metanu. Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa w grupowych prądach zużytego powietrza stężenie metanu nie może przekraczać 0,75% (*Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań...*).

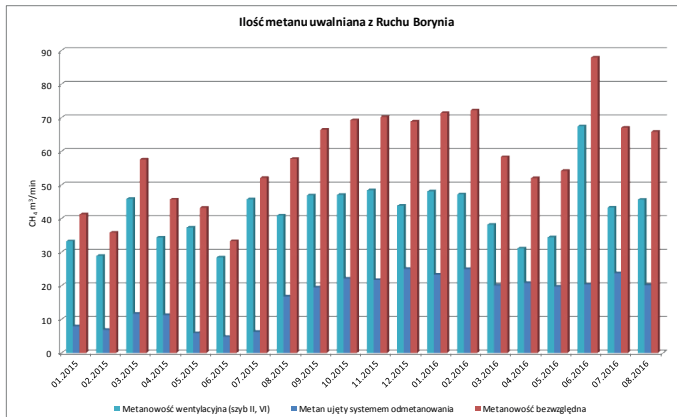
a)



b)

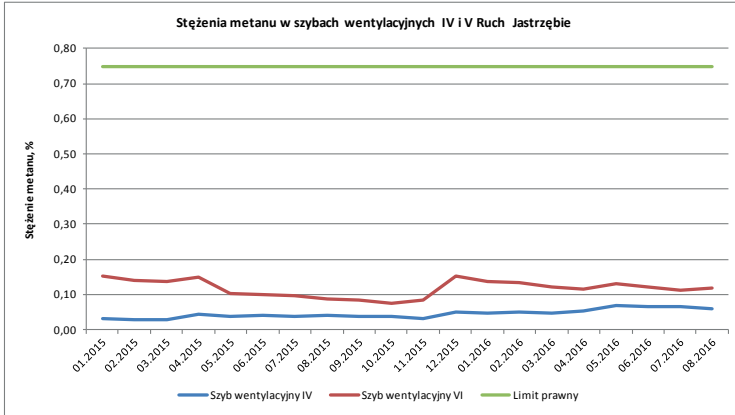


c)

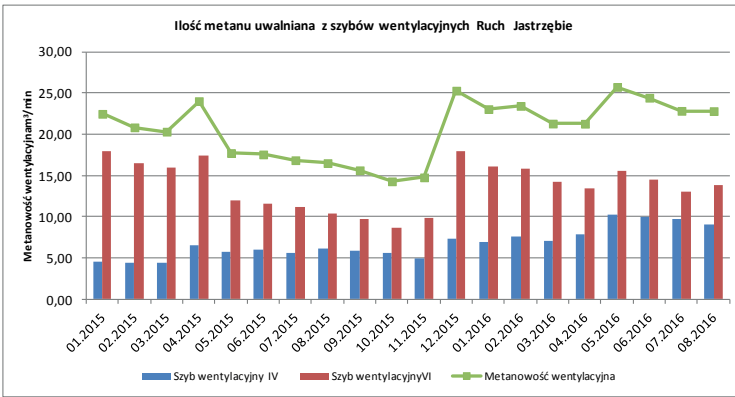


Rysunek 5.10. Zestawienie stężeń metanu (a), jego wydatku w szybach wentylacyjnych (b), a także zestawienie metanowości (c) Ruchu „Borynia” w badanym okresie

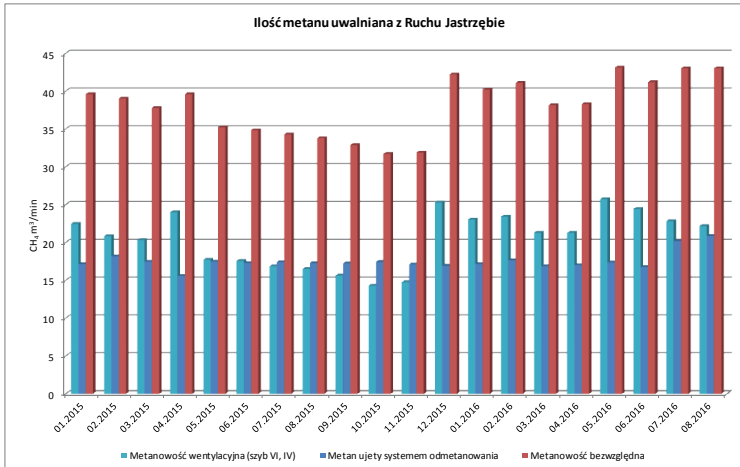
a)



b)

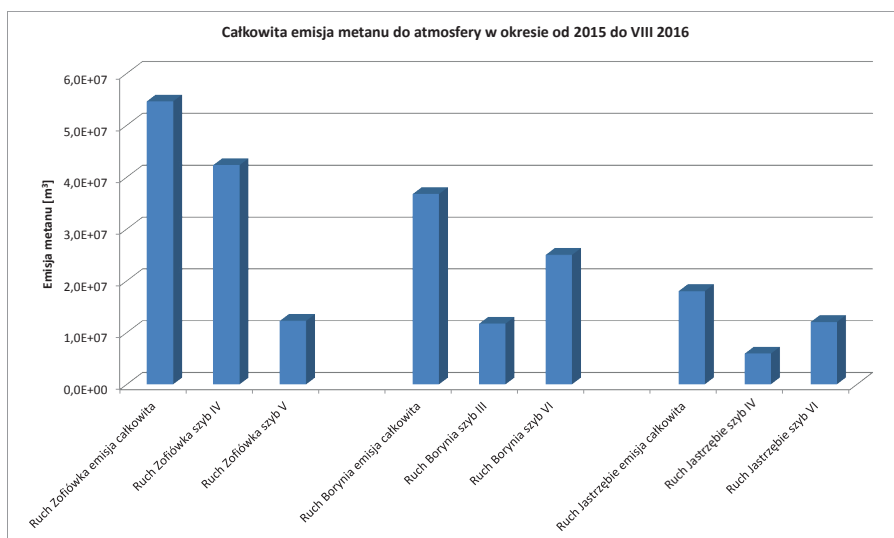


c)



Rysunek 5.11. Zestawienie stężeń metanu (a), jego wydatku w szymb wentylacyjnych (b), a także zestawienie metanowości (c) Ruchu „Jastrzębie” w badanym okresie

Analiza przebiegu zmian wyraźnie pokazuje, że w żadnym z szybów wentylacyjnych nie zanotowano przekroczeń dopuszczalnych stężeń, co więcej – stężenie metanu nie przekraczało 0,5%. Z prawnego punktu widzenia kopalnie przestrzegają przepisów, ale jeśli spojrzeć na sumaryczną ilość odprowadzanego metanu z poszczególnych ruchów kopalni zespolonej, rysuje się trochę inny obraz. Biorąc pod uwagę dwudziestomiesięczny okres, w którym przeprowadzono badania, należy stwierdzić, że ilość metanu uwolniona do atmosfery tylko z Ruchu „Zofiówka” sięgała prawie 55 milionów Mg m^3 (rys. 5.12). Sumarycznie ze wszystkich trzech badanych ruchów odprowadzono prawie 97 mln m^3 , co stanowiło łącznie 69 805 Mg metanu uwolnionego do atmosfery. W Polsce aktywnie działa dwadzieścia kopalń metanowych, dlatego ilość ta ulega znacznemu wzrostowi (tab. 5.2), co wpływa na powiększanie się efektu cieplarnianego. Kopalniom nie opłaca się zmniejszać ilości uwalnianego metanu, gdyż opłata za emisje jest zbyt niska. Na przykład za wspomniane 69 805 Mg uwolnionego metanu kopalnia musiała zapłacić 20 243,45 zł, co w skali miesięcznej stanowi niecałe 1012,17 zł. Jednocześnie niskie wartości stężeń w szybach wentylacyjnych, mimo że były zgodne z obowiązującymi normami prawnymi (*Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań...*), stawiają pod znakiem zapytania sensowność stosowania technologii pozyskiwania metanu z szybów wentylacyjnych. Obecnie panujące w kopalniach warunki wentylacyjne powodują rozrzedzenie metanu do granicy uniemożliwiającej zastosowanie technologii jego odzysku z powietrza wentylacyjnego. Stosowanie wspomnianych metod ma sens przy stężeniu metanu powyżej 0,5%, ale najlepszą efektywność uzyskuje się przy około 1% metanu (N. Szlązak i in. 2015; Swolkień 2015; 2017).



Rysunek 5.12. Ilość metanu odprowadzanego przez kopalnię zespoloną w badanym okresie

6. Podsumowanie

Podstawowym celem monografii było poznanie procesów zachodzących w zrobach ścian zawałowych przy różnych systemach eksploatacji i wpływu, który wywierają one na wyrobiska przyścianowe. Identyfikacja tych procesów pozwoli na przygotowanie i wdrożenie odpowiedniej profilaktyki. W publikacji przedstawiono opracowanie modelu matematycznego filtracji powietrza oraz rozkładu stężenia gazów (metanu, azotu i tlenu) w zrobach ścian zawałowych przy różnych sposobach ich przewietrzania.

Pole przekroju ośrodka porowatego prostopadłe do głównego kierunku penetracji płynu składa się z dwóch części: pola przekroju porów otwartych, przez które zachodzi przepływ, i pola przekroju ciała stałego. Stosunek pierwszego z tych pól do pola przekroju całkowitego jest z dobrym przybliżeniem równy wspomnianej porowatości otwartej ośrodka. Wprowadza się pojęcia tak zwanych parametrów pozornych przepływu: liniowej prędkości pozornej, pozornej gęstości strumienia substancji oraz pozornej gęstości źródła substancji, przy czym pod pojęciem substancji rozumie się zarówno mieszaninę składników gazowych, jak i każdy składnik oddzielnie. Prędkość pozorna odniesiona jest do całkowitego pola przekroju ośrodka, podczas gdy prędkość rzeczywista określana jest wyłącznie przez pole przekroju czynnego. Przy założeniu o pseudohomogeniczności ośrodka prędkość pozorna może być określana również punktowo i tworzyć w jego przestrzeni pole wektorowe. W związku z tym można zdefiniować pozorne gęstości strumieni mieszaniny gazowej i poszczególnych jej składników. Wielkości te tworzą pola wektorowe w całej przestrzeni ośrodka porowatego.

W pierwszej części monografii przedstawiono symulację transportu substancji wewnątrz porowatej struktury powstałej po wyeksploatowaniu pokładu węgla systemem ścianowym w kopalni podziemnej. W przestrzeni porowatej wewnątrz zrobów występują nieuniknione złożone procesy utleniania węgla, następuje również wypływ metanu z warstw nasyconych metanem. Szybkość filtracji metanu, a co zatem idzie – średnia wydajność jego źródeł w przestrzeni zawału, może być w przybliżeniu określona na podstawie wyników odpowiednich pomiarów kontrolnych dokonywanych w trakcie eksploatacji pokładu węgla. W obliczeniach uwzględniono dodatkowo lokalną emisję azotu o zadanym wydatku, doprowadzonego rurociągiem do wnętrza zawału wzdłuż dłuższego brzegu obszaru. W wyniku symulacji uzyskano następujące dyskretne dwuwymiarowe (2D) pola fizyczne występujące w przestrzeni zawału:

- pole przyrostu ciśnienia [Pa],
- pole prędkości pozornej mieszaniny składników gazowych [m/s],

- pole koncentracji molowej azotu N_2 [mol/m^3],
- pole koncentracji metanu CH_4 [mol/m^3],
- pole koncentracji tlenu O_2 [mol/m^3].

Opracowany algorytm obliczeniowy oparto na procedurze metody objętości kontrolnej (*Control Volume Method*), którą w Polsce nazywano również metodą bilansów elementarnych.

Opracowany program komputerowy umożliwia określenie wymienionych wyżej pól w dwóch wariantach różniących się warunkami brzegowymi. Wyniki tych obliczeń pozwalają na ocenę wybuchowości mieszaniny metanu w zrobach oraz rozkładu zawartości tlenu przyczyniającego się do procesów utleniania pozostawionych w zrobach resztek węgla.

Zgodnie z kryterium najczęściej stosowanych systemów przewietrzania ścian opracowany program komputerowy został przystosowany do dwóch różnych systemów przewietrzania:

- systemu przewietrzania na „U” od granic,
- systemu przewietrzania na „Y”.

Zastosowany algorytm obliczeniowy składa się z dwóch części. Pierwsza z nich dotyczy wyznaczania rozkładów ciśnienia p oraz udziałów masowych składników mieszaniny gazowej ω_i w rozważanym obszarze, obejmującym łącznie zrobów wraz z przylegającymi do niego chodnikami, którymi przepływa powietrze doprowadzane do ściany eksploatacyjnej.

Kolejny fragment procedury numerycznej dotyczy estymacji stałych dobieralnych E , których uśrednione wartości determinują dystrybucję ciśnienia powietrza wzdłuż chodnika, gdy zadana jest jego gęstość strumienia masy w punkcie wlotowym.

Przedstawiono kolejność postępowania numerycznego w przypadku zastosowanej procedury obliczeniowej. Sekwencja poszczególnych operacji przedstawia się następująco:

1. Wprowadzenie danych wejściowych (odpowiednich wartości liczbowych): liczba węzłów numerycznych wzdłuż poszczególnych osi układu współrzędnych, wymiary geometryczne strefy zrobów oraz chodników, dane dotyczące przepuszczalności zrobów, wydajność wewnętrznych źródeł metanu jednorodna w całym obszarze zrobów, punktowa wydajność źródła azotu w miejscu zainstalowania wylotu rury doprowadzającej, prędkość liniowa powietrza oraz jego skład objętościowy na wlocie do korytarza, właściwości fizyczne poszczególnych składników gazowych (masy molowe, lepkości dynamiczne, kinematyczne współczynniki dyfuzji).
2. Numeryczne generowanie siatki obliczeniowej.
3. Określenie wartości przepuszczalności wewnątrz zrobów na powierzchniach rozdzielających poszczególne objętości kontrolne.
4. Określenie pierwszego przybliżenia poszukiwanych pól fizycznych, stanowiącego podstawę rozpoczęcia obliczeń iteracyjnych.
5. Kolejne etapy procesu iteracyjnego:
 - a) określenie właściwości fizycznych mieszaniny gazowej, takich jak gęstość i lepkość dynamiczna (algorytm Wilkego) zarówno w węzłach sieci, jak i na powierzchniach rozdzielających poszczególne objętości kontrolne;
 - b) wyznaczenie dyskretnego pola ciśnienia przez numeryczne rozwiązanie równań (3.32) i (3.21),

- c) obliczenie współrzędnych wektora prędkości liniowej medium gazowego według wzorów Darcy'ego (3.33) przy wykorzystaniu pola ciśnienia określonego w punkcie b;
- d) obliczenie dyskretnych pól udziałów masowych azotu i tlenu wewnątrz zrobów oraz w chodnikach z wykorzystaniem równań (3.34) i (3.26);
- e) obliczenie dyskretnego pola udziału masowego metanu wewnątrz zrobów i w chodnikach z wzoru (3.38);
- f) potraktowanie wyników uzyskanych w punktach b, c, d i e jako kolejnego przybliżenia i powrót do punktu a.

Proces iteracyjny zostaje przerwany, gdy uzyskane wartości poszukiwanych pól zmieniają się zanedbywalnie mało (poniżej wartości błędów ewentualnego pomiaru).

Z bogatej literatury fachowej wynikają często sprzeczne spostrzeżenia dotyczące wpływu, szczególnie metanu, do wyrobisk górniczych przy spadku ciśnienia barometrycznego. Z tego powodu w drugiej części monografii opisano obszernie badania, oparte na pomiarach kopalnianych, pozwalające dokonać oceny wpływu zmian ciśnienia na stan zagrożenia wyrobisk wzrostem stężenia metanu w powietrzu kopalnianym. Dodatkowo określono wpływ wielkości wydobywania na emisję metanu do wyrobisk górniczych. Analizie poddano cztery ściany przewietrzane systemem na „U”, ale przy zastosowaniu różnych rodzajów odmetanowania.

Aby ustalić wpływ ciśnienia barometrycznego na wydzielanie się metanu do wyrobisk ścian eksploatacyjnych z odmetanowaniem prowadzonym systemem na „U” oraz na „U” z chodnikiem nadległym (drenażowym), na podstawie analizy statystycznej wyznaczono wartości podstawowych estymatorów charakteryzujących model probabilistyczny wielkości stężenia metanu, ciśnienia, które mierzono na wylotach z analizowanych ścian, a także wydobywania. Następnie dokonano oszacowania ilościowego wpływu czynników, które mogą być połączone zależnością statystyczną zwaną korelacją lub zależnością funkcyjną. Dokonano tego, wyznaczając wartości współczynników korelacji. Następnie podano współczynnik determinacji, który stanowi miarę dokładności dopasowania zależności liniowej i informuje o zależności między zmiennymi przez korelację liniową. Kolejnym krokiem było podanie wartości statystyki t oraz prawdopodobieństwa i określenie istotności statystycznej badanego parametru.

Analiza danych dotyczących wszystkich ścian pokazała dużą fluktuację stężenia metanu i ciśnienia. Spośród czterdziestu czterech przyjętych do analizy obszarów tylko w siedmiu stwierdzono wystąpienie korelacji stężeń metanu z ciśnieniem przeciwnie skierowanej wysokiej (cztery przypadki) i bardzo wysokiej (trzy przypadki). Zanotowano również dziewięć przypadków korelacji przeciwnie skierowanej przeciętnej lub słabej. W sześciu przypadkach wystąpiła korelacja wysoka, w czternastu – przeciętna lub słaba, ale zgodnie skierowana. W pozostałych obszarach korelacja była nikła. Przykładem bardzo wysokiej korelacji była ściana D-2 w pokładzie 410, gdzie w kwietniu w dwóch obszarach na trzy badane prawie 64% (obszar I) i 56% (obszar II) wyników stężenia metanu można było tłumaczyć odwrotną liniową zależnością od ciśnienia. Ponieważ kwiecień był miesiącem, w którym uruchamiano wydobywanie w ścianie, a także dlatego, że wysoka korelacja pojawiła się tylko jeszcze w jednym obszarze (sierpień), nie można jednoznacznie stwierdzić zależności między spadkiem czy wzrostem ciśnienia a wzrostem czy spadkiem stężenia metanu. W pozostałych analizowanych miesiącach korelacja stężenia metanu z ciśnieniem była wysoka lub przeciętna, ale

zgodnie skierowana. Zdecydowanie najwyższą wartość współczynnika korelacji stężenia metanu z ciśnieniem przeciwnie skierowaną stwierdzono w przypadku ściany B-11, gdzie w kwietniu prawie 70% wyników stężenia metanu można było tłumaczyć odwrotną liniową zależnością od ciśnienia. W przypadku tej ściany wysoka korelacja wystąpiła jedynie w dwóch obszarach spośród dwunastu badanych (drugi przypadek odnotowano we wrześniu) i w obu obszarach zanotowano jednocześnie korelację zgodną stężeń metanu z wydobyciem.

Pośród analizowanych obszarów korelację wysoką zgodnie skierowaną stężenia metanu z wydobyciem stwierdzono w jedenastu przypadkach, w tym w jednym była ona bardzo wysoka (ściana D-2 w pokładzie 412lg+ld i 412lg – maj). W dwudziestu trzech analizowanych obszarach stwierdzono korelację przeciętną lub słabą. W pozostałych dziesięciu była ona nikła, zgodnie lub przeciwnie skierowana. Duży wpływ na wynik współczynnika korelacji miał fakt, że w wielu obszarach wydobyć albo było w miarę stabilne, albo go nie prowadzono.

Porównując statystyki, można stwierdzić, że w trzydziestu czterech przypadkach wystąpiła korelacja zgodna stężenia metanu z wydobyciem, a w szesnastu przeciwnie skierowana z ciśnieniem. Można więc uznać, że zakres robót górniczych miał niewątpliwie olbrzymi wpływ na emisję metanu do wyrobisk ścianowych. Ponieważ stałość lub małe wahania wydobywania mogły oddziaływać na pozostałe dziesięć przypadków, wykonano dodatkowe analizy statystyczne. Spośród czterech ścian wybrano dwie – F-3 w pokładzie 406/1 oraz B-11 w pokładzie 348 – i analizowano krótsze odcinki czasu, w których zaobserwowano gwałtowne zmiany wydobywania. W tych obszarach pierwsza analiza statystyczna wykazywała słabą zgodną korelację między stężeniem metanu a wydobyciem.

Podsumowując, można stwierdzić, że złożony charakter zjawisk zachodzących w trakcie prowadzonej eksploatacji nie pozwala na wykazanie jednoznacznych powiązań między zmianami ciśnienia barometrycznego a stężeniem metanu. Analiza badań przedstawiona w niniejszej monografii pokazała, że tak zwane wyżki lub niżki baryczne nie mają wpływu na zmiany emisji metanu do wyrobisk ścianowych. Na związek między badanymi parametrami żadnego wpływu nie miał również przyjęty sposób odmetanowania ściany. Obserwacja miesięczna i obszarowa wykazała, że zmiany stężenia metanu były w większym stopniu wywołane zmiennością wydobywania prowadzonego w poszczególnych ścianach. Pojawienie się w pewnych obszarach korelacji przeciwnie skierowanej stężeń metanu z ciśnieniem wywołane było jednoczesnym wystąpieniem jego wzrostu albo spadku oraz zmian wydobywania. Ponieważ w przypadku zarówno wydobywania, jak i ciśnienia nie wykazano pełnej korelacji ze zmianami stężenia metanu, należy przypuszczać, że inne czynniki naturalne, nieuwzględnione w powyższych rozważaniach, mają pewien udział w emisji metanu do wyrobisk ścianowych.

Analiza procesów zachodzących w zrobach ścian zawałowych i badanie wpływu ciśnienia barometrycznego na emisję metanu do wyrobisk ścianowych stanowiły podstawę niniejszej monografii. Autorka jednak, chcąc w pełni zobrazować złożoność prezentowanych zagadnień, uzupełniła opracowanie o aspekt środowiskowy. Przedstawione zostały nie tylko procesy mogące zachodzić w zrobach, między innymi rozkład stężenia metanu czy wpływ, który wywierają różne czynniki na jego emisję, ale także szkodliwe aspekty jego odprowadzania z szybów wentylacyjnych do powietrza atmosferycznego.

Metan jest gazem cieplarnianym, którego zdolność do pochłaniania promieniowania podczerwonego jest dwudziestopięciokrotnie większa niż dwutlenku węgla. Stanowi on

poważne zagrożenie w warunkach zachodzących obecnie zmian klimatycznych. Występując w pokładach węgla, wpływa również niekorzystnie na stan bezpieczeństwa w podziemnych zakładach górniczych – ze względu na jego uwalnianie podczas prowadzonych robót górniczych. Istotne ze względu na ochronę atmosfery, ale również zapewnienie bezpieczeństwa pracy w podziemnych zakładach górniczych, jest ograniczenie jego emisji. Można tego dokonać, prowadząc aktywne odmetanowanie, a także racjonalnie zagospodarowując ujęty metan. Polskie kopalnie prowadzą aktywne odmetanowanie, uzyskując przy tym dobre wyniki. Przedstawione w trzeciej części niniejszej monografii dane wyraźnie wskazują jednak, że w latach 2013–2016 racjonalne wykorzystanie metanu pochodzącego z odmetanowania spadło prawie o 11%. Kopalnie borykają się z problemami infrastrukturalnymi i są niedofinansowane, w wyniku czego nie są w stanie w pełni wykorzystać ujętego metanu. Niskie opłaty za emisję metanu do atmosfery powodują, że kopalniom bardziej opłaca się wypuszczać gaz do atmosfery, niż poszukiwać nowych technologii jego zagospodarowania. Powoduje to, że do atmosfery wraz z powietrzem wentylacyjnym przedostają się większe jego ilości. Z kolei podniesienie stawek opłat za emisję doprowadzi kopalnie do stanu nierentowności. Ze względu na ochronę powietrza atmosferycznego, a także zapewnienie dobrego funkcjonowania przemysłu wydobywczego w Polsce, konieczne jest wprowadzenie uregulowań prawnych, jak uczyniono to na przykład w Niemczech, co zachęci zarządców kopalń do poszukiwania rozwiązań zwiększających ujęcie metanu z odmetanowania oraz technologii jego wykorzystania.

Bibliografia

- Adamus A., 2011, *Selected Measures to Suppress Spontaneous Combustion in Ostrava-Karvina Mines. Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych. Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych”*, Brenna.
- ANSYS Fluent 2013, *ANSYS Fluent User's Guide*, <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf> [dostęp: 26 grudnia 2014 roku].
- Balusu R., Deguchi G., Holland R., Moreby R., Xue S., Wendt M., Mallet C., 2001, *Goaf gas flow mechanics and development of gas and sponcom control strategies at a highly gassy coal mine*, w: *Proceedings Australia-Japan Technology Exchange Workshop in Coal Mining 2001*, Hunter Valley.
- Balusu R., Humphries P., Harrington P., Wendt, M., Xue S., 2002, *Optimum inertisation strategies*, w: *Proceedings Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, Townsville, Australia, 4–7 August*, s. 133–144.
- Bell S., 1997, *ACARP Project C6019: Demonstration of the GAG-3A Jet Inertisation Device at the Collinsville No 2 Coal Mine*.
- Bell S., Cliff D., Harrison P., Hester C., 1998, *Recent developments in coal mine inertisation in Australia*, w: *Coal 1998: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, ed. N. Aziz, s. 701–717.
- Belle K.B., Cas T., De Klerk C., 2009, *Inertisation of Mine Fires for South African Collieries-A Business Case*, w: *Ninth International Mine Ventilation Congress, India*, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.
- Berger J., Markiewicz J., Dołęga T., 2010, *Influence of Distance of Exploitation Front from Drainage Boreholes on their Efficiency with Use the U Ventilation System*, „Archives of Mining Sciences”, t. 55, nr 3, s. 561–571.
- Brady D., Harrison P., Bell S., 2009, *The Need for a Tube Bundle System for an Effective Mine Gas Monitoring System*, w: *Proceedings of the 9th International Ventilation Congress, New Delhi, India*, s. 907–916.
- Brandt J., 1998, *Analiza danych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Branny M., Karch M., Wodziak W., Szmyd J., Jaszczur J., Nowak R., 2012, *Air flow measurements through the laboratory stand of the crossing of the long wall and ventilation gallery for CFD code validation*, „AGH Journal of Mining and Geoenvironment”, t. 36, nr 2, s. 59–68.

- Branny M., Karch M., Wodziak W., Szmyd J., Jaszczur J., Nowak R., 2013, *Eksperymentalna weryfikacja modeli CFD stosowanych w wentylacji kopalń – Validation of CFD codes applied in mine ventilation system*, „Przegląd Górniczy”, t. 69, nr 5, s. 73–82.
- Branny M., Swolkień J., 2010a, *Usage of FLUENT application in the process of numerical calculation of barium sulphate deposits flow through the Jankowice and Pniówek coal mines' settling tanks*, „Archives of Mining Sciences”, t. 55, nr 3, s. 501–516.
- Branny M., Swolkień J. 2010b., *Sedymentacja siarczanu baru w osadniku jako metoda ograniczenia ilości osadów stałych w rurociągu odpywowym KWK „Jankowice”*, „Rocznik Ochrona Środowiska”, t. 12, s. 927–946.
- Cimr A., Wasilewski S., Przystolik A., 2006, *Możliwości oceny stanu atmosfery w zrobach z wykorzystaniem metanometrii automatycznej*, w: *Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej*, Kraków, s. 509–518.
- Claassen C., 2011, *Goaf Inertisation and Sealing Utilising Methane from In-Seam Gas Drainage System*, w: *11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, s. 369–374.
- Cybulski K., 2005, *Zagrożenie wybuchem pyłu węglowego oraz ocena skuteczności działań profilaktycznych w polskich kopalniach węgla kamiennego*, „Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa”, nr 864, Katowice.
- Cybulski K., Lebecki K., Dyduch Z., 2001, *Test Results and Practical Use of the Water Bags Barriers*, w: *29-th International Conference of Safety in Mines Research Institutes*. Szczyrk, Polska.
- Cygankiewicz J., 2015, *Determination of Critical Conditions of Spontaneous Combustion of Coal in Longwall Gob Areas*, „Archives of Mining Sciences”, t. 60, nr 3, s. 761–776.
- Cygankiewicz J., Knechtel J., 2014, *The Effect of Temperature of Rocks on Microclimatic Conditions in Long gate roads and Galleries in Coal Mines*, „Archives of Mining Sciences”, t. 59, nr 1, s. 189–216.
- Dieu N.H., 1994, *Metoda prognozowania rozkładu koncentracji metanu w zrobach ścian zawalowych*, Politechnika Śląska, Gliwice [mps pracy doktorskiej].
- Dudzińska A., Cygankiewicz J., 2015, *Analysis of adsorption tests of gases emitted in the coal self-heating process*, „Fuel Processing Technology”, t. 137, s. 109–116.
- Dziurzyński W., 1998, *Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego*, „Studia. Rozprawy. Monografie”, nr 56, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Dziurzyński W., 2009, *Badania modelowania przepływu mieszania powietrza i gazów w rejonie ściany w aspekcie walidacji wyników komputerowej symulacji*, „Przegląd Górniczy”, nr 11–12, s. 61–71.
- Dziurzyński W., Krawczyk J., 2012, *Możliwości obliczeniowe wybranych programów symulacyjnych stosowanych w górnictwie światowym, opisujących przepływ powietrza, gazów pożarowych i metanu w sieci wyrobisk kopalni*, „Przegląd Górniczy”, nr 5 (1074), s. 1–11.
- Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T., 2005, *Walidacja modelu matematycznego przewietrzania kopalni stosowanego w programie VentMet z wykorzystaniem bazy danych pomiarowych wybranego rejonu wentylacyjnego KWK*, „Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN”, t. 7, nr 1–2, s. 101–115.

- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2009, *Walidacja procedur programu VentZroby z wykorzystaniem systemu monitoringu stanu atmosfery kopalni*, „Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN”, t. 11, nr 1–4, s. 79–112.
- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2012, *Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej*, „Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN”, t. 14, nr 1–4, s. 121–137.
- Esterhuizen G., Karacan C.Ö., 2005, *Development of numerical models to investigate permeability changes and gas emission around longwall mining panels*, w: *Proceedings Alaska Rocks 2005, 40th US Symposium on Rock Mechanics, Anchorage, Alaska, 25–26 June*.
- Esterhuizen G., Karacan C.Ö., 2007, *A methodology for determining gob permeability distributions and its application to reservoir modeling of coal mine longwalls*, SME Annual Meeting, Denver.
- Ferziger J.H., Perić M., 2002, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer.
- Filipecki J., Janowicz E., Malina Z., 2006, *Efektywne metody odmetanowania górotworu w warunkach KWK „Brzeszcze-Silesia” Ruch I „Brzeszcze”*, Szkoła Aerologii Górniczej, Kraków.
- FLAC3D, 2014, *FLAC3D. Online Manual*, <http://www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6920/FLAC%20manual.pdf> [dostęp: 5 października 2014 roku].
- Garg, P.C., 1987, *Development of Nitrogen Infusion Technology for Fighting and Inhibition of Fires*, „Journal of Mineral, Metal and Fuels”, August, s. 368–377.
- GIG, 2004–2013, *Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Gillies A.D.S., Wu H.W., 2006, *Issues in use of inertisation of fires in Australian mines*, w: *Proceedings Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, Townsville, August*, t. 1, s. 53–66.
- Gillies A.D.S., Wu H.W., 2007, *Issues in use of inertisation of fires in Australian mines*, „Archives of Mining Science”, t. 52, nr 2.
- Greuer R.E., 1974, *Study of Mine Fire Fighting using inert gases*, USBM Contact Report No. 50231075. Bureau of Mines open file Report, s.15–76.
- He C.S., 1991, *The design and research of fire-fighting and prevention system by use of nitrogen*, „Shanxi Meitaf Jishu (Shanxi Coal Technology)”, nr 4, s. 22–27.
- IMG PAN, 2012, *Opracowanie układu do automatycznego pobierania prób powietrza ze zrobów i przestrzeni otamowanych. Sprawozdanie z realizacji etapu nr 3 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”*, Instytut Mechaniki Górniczej PAN, Kraków.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Karacan C.Ö., 2010a, *A new method to calculate permeability of gob for air leakage calculations and for improvements in methane control*, w: *Proceedings of the 13th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Sudbury, Ontario, Canada, June 13–16*, s. 273–282.
- Karacan C.Ö., 2010b, *Prediction of Porosity and Permeability of Caved Zone in Longwall Gobs*, „Transport in Porous Media”, nr 82, s. 413–439.

- Karacan C.Ö., Diamond W.P., Esterhuizen G.S., Schatzel S.J., 2005, *Numerical Analysis of the Impact of Longwall Panel Width on Methane Emissions and Performance of Gob Gas Ventholes*, w: *Proceedings International Coalbed Methane Symposium*, Paper 0505. Tuscaloosa, AL 18–19 May.
- Karacan C.Ö., Ren T.X., Balusu R., 2008, *Advances in grid-based numerical modeling techniques for improving gas management in coal mines*, w: *Proceedings of the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Reno, Nevada, June 9–11, 2008*, ed. K.G. Wallace Jr., University of Nevada, Reno.
- Kelsey A., Lea C.J., Lowndes I.S., Whittles D., Ren T.X., 2003, *CFD modelling of methane movement in mines*, w: *30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, South African Institute of Mining and Metallurgy*, s. 475–486.
- Klonecki W., 1999, *Statystyka dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kłeczek Z., 1994, *Geomechanika górnicza*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Knothe S., 1984, *Prognozowanie wpływów eksploatacji górnicznej*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- Komai T., Isei T., 1989, *Underground Fire-fighting System by a Rapid Evaporation Method of Liquid Nitrogen*, „Mining, Science and Technology”, nr 8, s. 145–152.
- Krajowy raport inwentaryzacyjny...*, 2016, *Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2014*. Raport syntetyczny, IOŚ-PIB. Raport wykonany na potrzeby Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto, Warszawa.
- Krause E., Łukowicz K., 2004, *Odmetanowanie w polskich kopalniach węgla kamiennego osiągnięcia i perspektywy*, w: *XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Tąpania 2004 nt. Nowe rozwiązania w zakresie profilaktyki tąpaniowej i metanowej, 8–10.11.2004, Ustroń*
- Krawczyk J., 2007, *Jedno- i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych: przykłady zastosowań*, „Archives Mining Sciences. Monograph”, nr 2.
- Krawczyk J., 2009, *Prezentacja wybranych trójwymiarowych modeli numerycznych migracji metanu w rejonie ściany przydatnych do weryfikacji programu VentZroby*, „Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN”, t. 11, nr 1–4, s. 145–152.
- Krog R.B., Heasley K.A., 2017, *Longwall Emissions During Falling Atmospheric Pressures and the Sample Frequency Required to Detect Them*, w: *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium Colorado School of Mines Golden, Colorado USA, June 17–22, 2017*, s. 1–9.
- Król M., 2015, *Fraktale i chaos*, http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/matematyka/c_fraktale_i_chaos/fraktale.php?rozdzial=9 [dostęp: 8 stycznia 2015 roku].
- Kugler U., Schewe A., 1975, *Bekämpfung eines Grubenbrandes auf der Yeche Osterfeld durch Einleiten von Stickstoff*. *Gluckauf* 15, Mai 1975, s. 467–472.
- Li X.Y., Logan B.E., 2001, *Permeability of fraktal aggregates*, „Water Research”, t. 35, nr 14, s. 3373–3380.
- Lolon S.A., 2008, *Computational fluid dynamics simulation study on hot spot location in longwall mine gob*, The University of Utah, Salt Lake City, UT.
- Lolon S.A., Brune J.F., Bogin G.E., Grubb J.W., Juganda A., 2017, *Understanding Gob Outgassing Associated with Pressure Disturbances in Longwall Mine*, w: *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium Colorado School of Mines Golden, Colorado USA, June 17–22, 2017*, s. 17–27.

- Malczewski J., Piekarski M., 1992, *Modele procesów transportu masy, pędu i energii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A., 1997, *Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Część II. Geoinżynieria*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
- Mileticz A.F., 1963, *Ucieczki wozducha i ich rasczet pri prowietriwaniu szacht*, Nedra, Moskwa (Милетич А.Ф., 1963, Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт, Недра, Москва).
- Mucho T.P., Houlison I.R., Smith A.C., Trevits M.A., 2005, *Coal mine inertisation by remote application*, w: *Proceedings of the 2005 US National Coal Show. Pittsburgh, PA*, s. 1–14.
- Nowak P., 1992, *Teoria fraktali – nowy sposób opisu obiektów geometrycznie nieregularnych*, „Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii”, nr 25, s. 13–24.
- Pappas D.M., Mark C. 1993, *Behavior of simulated longwall gob material*. Report of Investigations RI No. 9458, US Department of Interior, US Bureau of Mines.
- Parkin R., 2003, *Inertisation of Loveridge No.22 Coal Mine By Queensland Mines Rescue Service*, w: *Queensland Mining Industry Health & Safety Conference*.
- Patankar S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington D.C.
- Pohorecki R., Wroński S., 1979, *Kinetyka i termodynamika procesów inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Przystalik A., *Metoda oceny szczelności izolacji zrobów i nieczynnych wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice [mps pracy doktorskiej].
- Puczow A.A., 1965, *Rieżym dwiżenja wozducha w vyrabotannom prostrantwie*, Izv. Wuzow, Gornyi żurnał, Nr 10, s. 70–76 (Пучков А.А., 1965, Режим движения воздуха в выработанном пространстве, Изв. Вузов, Горный журнал, № 10, с. 70–76).
- Raport końcowy..., 2013, *Raport końcowy z zadania 3 „Opracowanie zasad pomiarów i badań parametrów powietrza kopalnianego dla oceny zagrożenia metanowego i pożarowego w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny”, projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa kopalń”*, Instytut Mechaniki Górnotworu PAN, Kraków [niepublikowany].
- Raport merytoryczny..., 2011, *Raport merytoryczny projektu rozwojowego R09 0004 04 (N524), pt. „Badania rozkładu stężeń gazów w zrobach ścian zawalowych w aspekcie zagrożeń zapaleniami i wybuchami metanu w zrobach”*, Instytut Mechaniki Górnotworu PAN, Kraków [niepublikowany].
- Ren T.X., Balusu R., 2005, *CFD modelling of goaf gas migration to improve the control of spontaneous combustion in longwalls*, w: *Coal Operators' Conference*, s. 259–264.
- Ren T.X., Balusu R., 2009, *Proactive goaf inertisation for controlling longwall goaf heatings*, „Procedia Earth and Planetary Science”, t. 1, nr 1, s. 309–315.
- Ren T.X., Balusu R., 2010, *The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems*, w: *Proceedings of 10th Underground Coal Operators' Conference*, ed. N. Aziz, J. Nemicik, Wollongong, Australia, s. 339–349.
- Ren T.X., Edwards J.S., 2000, *Three-dimensional computational fluid dynamics modelling of methane flow through permeable strata around a longwall face*, „Mining Technology”, t. 109, nr 1, s. 41–48.

- Ren T.X., Wang Z., Nemcik J., Aziz N., Wu, J., 2012, *Investigation of spontaneous heating zones and proactive inertisation of longwall goaf in Fenguangshan Mine*, w: *Proceedings of 12th Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, s. 212–220.
- Ropski S., 1964, *Stan pełnego i wysokiego zawału oraz stref osiadania stropu za ścianą na podstawie pomiarów w kopalni „Wesola” w pokładzie 329*, Kraków [mps pracy doktorskiej].
- Rosenberg D., 1969, *Methods for the numerical solutions of partial differential equations*, Americ. Elsev. Publ., New York.
- Roszkowski J., Szlązak N., Szlązak J., 1997a, *Odmetanowanie jako środek zwalczania zagrożeń oraz sposób pozyskiwania paliwa*. Materiały Konferencyjne Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk 24–28 lutego 1997.
- Roszkowski J., Szlązak N., Szlązak J., 1997b, *Odmetanowanie jako środek zwalczania zagrożenia wybuchami oraz sposób pozyskiwania i wykorzystania etanu w kopalniach węgla kamiennego*, „Wiadomości Górnicze”, nr 10, s. 436–444.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych* (Dz.U. 2017, poz. 1118).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 czerwca 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych* (Dz.U. 2016, poz. 949).
- Singh R.P., Ray S.K., 2009, *Studies on Open Fires under Varied Airflow at CIMFR Experimental Mine Fire Gallery*, w: *Ninth International Mine Ventilation Congress, India*, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.
- Strumiński A., 1986, *Pożary podziemne*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Sułkowski J., Dieu N.H., 1994, *Lokalizacja stref o wybuchowej koncentracji metanu w zrobach ściany zawałowej przewietrzanej przekątnie*, w: *Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagrożenie metanowe w górnictwie”*, Ustroń.
- Swolkień J., 2015, *Utilizing of methane from Polish hard coal mines*, „*Journal of Energy and Power Engineering*”, t. 9, nr 2, s. 149–160.
- Swolkień J., 2017, *Wydzielanie metanu z szybów wentylacyjnych kopalń węgla kamiennego jako antropogeniczne zanieczyszczenie atmosfery*, [w:] *Aktualny stan zagrożeń aerologicznych w polskich kopalniach*, red. N. Szlązak, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna, Kraków, s. 265–281.
- Szlązak J., 1980, *Wpływ uszczelnienia chodników przyścianowych na przepływ powietrza przez zroby*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków [mps pracy doktorskiej].
- Szlązak J., 2000, *Przepływ powietrza przez strefę zawału w świetle badań teoretycznych i eksperymentalnych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Szlązak J., 2001, *The determination of a co-efficient of longwall gob permeability*, „*Archives of Mining Sciences*”, t. 46, nr 4, s. 451–468.
- Szlązak J., 2002, *Numerical determination of velocity field of airflow in gob*, „*Archives of Mining Sciences*”, t. 47, nr 1, s. 451–468.
- Szlązak J., 2010, *Metody obliczania rozplywu powietrza i rozkładu stężenia metanu w zrobach ścian zawałowych. Przykłady wykorzystania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Szlązak J., Szlązak N., 1987a, *Determination of aerodynamic drag of goafs of the breaking down longwalls*, „*Archives of Mining Sciences*”, t. 32, nr 4, s. 547–558.

- Szłazak J., Szłazak N., 1987b, *The air escapes through the caving goaves of the longwalls during the ventilation by C-system in the direction of the strike*, „Archives of Mining Sciences”, t. 32, nr 4, s. 559–568.
- Szłazak J., Szłazak N., 1990, *The effectiveness of packing the longwall headings against the air flow through the cavings of the goaf*, „Archives of Mining Sciences”, t. 35, nr 4, s. 631–644.
- Szłazak J., Szłazak N., 2001, *Filtracja powietrza w zrobach ścian zawałowych*, „Górnictwo”, R. 25, z. 4, Kraków.
- Szłazak J., Szłazak N., 2002, *Przepływ powietrza przez zroby ścian zawałowych*, w: *Materiały 2 Szkoły Aerologii Górniczej, Zakopane, 07–11 październik*, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Kraków, s. 89–104.
- Szłazak J., Szłazak N., 2004a, *Badania numeryczne i kopalniane przepływu powietrza przez zroby ścian zawałowych*, „Górnictwo i Geoinżynieria”, R. 28, z. 3, s. 59–78.
- Szłazak J., Szłazak N., 2004b, *Numerical determination of methane concentration in goaf space*, „Archives of Mining Sciences”, t. 49, nr 4, s. 587–599.
- Szłazak J., Szłazak N., Obracaj D., Borowski M., 2005, *Numerical determination of velocity field of airflow in goaf*, w: *31st Biennial international conference of Safety in mines research institutes: health and safety mining research for a sustainable future, Brisbane, Queensland Australia, 2–5 October*, s. 243–248.
- Szłazak N., 1990, *Ocena zagrożenia pożarowego w zrobach ścian zawałowych na podstawie intensywności ich przewietrzania*, „Archiwum Górnictwa”, t. 35, z. 3, s. 339–345.
- Szłazak N., 2013a, *Materiały zebrane podczas realizacji etapu nr 2 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”*.
- Szłazak N., 2013b, *Opracowanie zasad pomiarów i badań parametrów powietrza kopalnianego dla oceny zagrożenia metanowego i pożarowego w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Informacja z realizacji etapu nr 14 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”*.
- Szłazak N., Szłazak J., 2005, *Filtracja powietrza przez zroby ścian zawałowych w kopalniach węgla kamiennego*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Szłazak N., Zasadni W., 2004, *Wpływ zagrożenia tapaniami na dobór profilaktyki pożarowej w kopalniach węgla*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Szłazak N., Tor A., Jakubów A., 2002, *Analiza ujęcia i wykorzystania metanu w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A.*, w: *Materiały 2. Szkoły Aerologii Górniczej: Zakopane, 07–11 październik 2002*, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Kraków, s. 339–355.
- Szłazak N., Yuan S., Obracaj D., 2005, *Zagrożenie pożarowe w kopalniach węgla kamiennego i metody jego oceny*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Szłazak N., Borowski M., Obracaj D., 2008a, *Kierunki zmian w systemach przewietrzania ścian eksploatacyjnych z uwagi na zwalczanie zagrożeń wentylacyjnych*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, t. 24, z. 1/2, Kraków.
- Szłazak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., 2008b, *Metoda oznaczania meta-
nośności w pokładach węgla kamiennego*, Wydawnictwa AGH, Kraków.

- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2011a, *Inertyzacja azotem zrobów czynnej ściany zawałowej jako metoda ograniczenia procesu samozagrzewania*, w: *ROP'2011: XXXVII Dni Techniki; XXVIII seminarium „Akcje ratownicze pożarowe w kopalniach węgla kamiennego – teoria i praktyka”*, Rybnik, 19 października 2011 r., Naczelna Organizacja Techniczna, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, Instytut Eksploatacji Złóż, Gliwice, s. 97–110.
- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2011b, *Ogólne zasady inertyzacji azotem zrobów czynnej ściany zawałowej*, „Górnictwo i Geoinżynieria”, R. 35, z. 4, s. 131–142.
- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2011c, *Podstawy inertyzacji zrobów ścian zawałowych w kopalniach węgla kamiennego*, w: *Wybrane zagrożenia aerologiczne w kopalniach podziemnych i ich zwalczanie*, red. N. Szlązak, Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 239–259.
- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2011d, *Wykorzystanie piany azotowej w zwalczaniu pożarów podziemnych*, w: *ROP'2011: XXXVII Dni Techniki; XXVIII seminarium „Akcje ratownicze pożarowe w kopalniach węgla kamiennego – teoria i praktyka”*. Rybnik, 19 października 2011 r., Naczelna Organizacja Techniczna, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, Instytut Eksploatacji Złóż, Gliwice, s. 87–95.
- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2012, *Możliwości wykorzystania piany azotowej w zwalczaniu pożarów podziemnych*, „Wiadomości Górnicze”, R. 63, nr 1, s. 2–6.
- Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2013, *Porównanie parametrów wytwornicy azotu WA-700 i membranowego generatora azotu typu MGA-750-97*, w: *Zagrożenia aerologiczne w kopalniach węgla kamiennego – profilaktyka, zwalczanie, modelowanie, monitoring*, red. J. Cygankiewicz, S. Prusek, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, s. 214–221.
- Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., 2014, *Selected issues related to methane hazard in hard coal mines*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., 2015, *Odmetanowanie górotworu w kopalniach węgla kamiennego*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Tauziède C., Mouilleau Y., Bouet R., 1993, *Modelling of gas flows in the goaf of retreating faces*, w: *25. Conférence Internationale des Instituts de Recherches sur la Sécurité dans les Mines, September 1993, Pretoria, South Africa*.
- Tauziède C., Pokryszka Z., Carrau A., Saraux E., 1997, *Modelling of Gas Circulation in the Goaf of Retreat Faces*, w: *Proceedings 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburgh, United States*, s. 243–246.
- Tor A., Jakubów A., Araszczuk D., 2012, *Działania podejmowane w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. mające na celu zwiększenie efektywności odmetanowania*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2012 [materiały konferencyjne].
- Trutwin W., 1972, *Symulacja cyfrowa stanów nieustalonych procesu przewietrzania i regulacji kopalnianych sieci wentylacyjnych*, „Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN”, t. 10, z. 2.
- Trutwin W., 2008, *Metoda oszacowania objętości pustek w zrobach otamowanego pola pożarowego na podstawie pomiarów ciśnienia*, „Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN”, t. 11, nr 1–4, s. 205–209.

- United States Environmental Protection Agency, 2006, *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990–2020. Office of Atmospheric Programs Climate Change Division, Washington, June 2006.*
- Wachel E.W., 2012, *Establishing longwall gob porosity from compaction in western US coal mines*, Colorado School of Mines [mps pracy doktorskiej].
- Wala M.A., Vytla S., Taylor C.D., Huang P.G., 2007, *Mine Face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation*, „Mining Engineering”, t. 59, nr 10.
- Wala M.A., Yingling J.C., Zhang J., Ray R., 1997, *Validation Study of Computational Fluid Dynamics as a Tool for Mine Ventilation Design*, w: *Proceedings of the Sixth International Mine Ventilation Congress – May 17–22, Chapter 82 – Fans and Systems*, Pittsburgh, Pennsylvania May.
- Walters D.M., 1997, *Using Inert Gases to Fight Mines Fire*, „Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa”, lipiec/wrzesień, s. 86–96.
- Wasilewski S., 2013a, *Badania poligonowe i doświadczalna weryfikacja metod pobierania prób i oceny zagrożenia metanowego i pożarowego w kopalniach. Sprawozdanie z realizacji etapu nr 6 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”* (materiały niepublikowane).
- Wasilewski S., 2013b, *Układ do automatycznego pobierania prób powietrza ze zrobów i przestrzeni otamowanych. Produkt 1 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”* (materiały niepublikowane).
- Wasilewski S., 2017, *Wpływ zmian ciśnienia na rozkład gazów w zrobach ścian – oddychanie zrobów*, w: *Aktualny stan zagrożeń aerologicznych w polskich kopalniach*, red. N. Szlązak, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna, Kraków.
- Wasilewski S., Araszczuk D., 2014, *Próby ruchowe i testy czujników bezprzewodowych rozszerzonego systemu gazometrii automatycznej w warunkach kopalń JSW SA*, w: *Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach. Teoria i praktyka*, Gliwice, s. 273–296.
- Wasilewski S., Branny M., 2008, *A preliminary study of the unsteady states of the ventilation parameters at the longwall face during the shearer operation*, w: *Proceedings of the 12 U.S. North American Mine Ventilation Symposium: June 9–11, 2008, Reno, Nevada*, ed. K.G. Wallace Jr., University of Nevada, s. 107–114.
- Wasilewski S., Cimr A., Wach M., 2010, *Ocena zagrożenia pożarowego w zrobach przestrzeniach otamowanych za pomocą czujników gazometrii automatycznej*, XXXVI Dni Techniki ROP, XXVII Seminarium „Pożary podziemne – teoria i praktyka”, s. 145–161.
- Wasilewski S., Dziurzyński W., Krach A., Gorgoń J., Kozielska R., 2012, *Opracowanie układu do automatycznego pobierania prób powietrza ze zrobów i przestrzeni otamowanych. Sprawozdanie z realizacji etapu nr 3 zadania badawczego nr 3 w ramach strategicznego projektu badawczego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”* (materiały niepublikowane).
- Wasilewski S., Jakubów A., Araszczuk D., 2013, *Ciągły monitoring składu atmosfery w zrobach ściany F-1, pokład 406/1, KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”* *Ruch „Zofiówka” JSW S.A. w systemie gazometrii automatycznej*, „Górnictwo i Geologia”, t. 8, s. 193–207.

- Wedding W.C., 2014, *Multiscale modeling of the mine ventilation system and flow through the gob*, University of Kentucky [mps pracy doktorskiej].
- Widzyk-Capehart E., 2007, *Advanced Mining Technologies in Australian Coal Mines. Day 2, Wednesday 7 February 2007. Session 4: Advanced Mining Coal Technology*, http://www.egcfe.ewg.apec.org/publications/proceedings/CFE/Hanoi_2007/4-1_Widzyk-Capehart.pdf [dostęp: 25 sierpnia 2014 roku].
- Worrall D.M., 2012, *Modeling Gas Flows in Longwall Coal Mines Using Computational Fluid Dynamics*, Colorado School of Mines.
- WUG, 2017, *Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2016 roku*, Katowice.
- Yuan L., Smith A.C., 2007, *Computational Fluid Dynamics Modeling of Spontaneous Heating in Longwall Gob Areas*, w: *2007 SME Annual Meeting, February 25–28 Salt Lake City, Utah*.
- Yuan L., Smith A.C., 2008a, *Effects of ventilation and gob characteristics on spontaneous heating in longwall gob areas*, w: *Proceedings 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*.
- Yuan L., Smith A.C., 2008b, *Numerical study on effects of coal properties on spontaneous heating in longwall gob areas*, „Fuel”, t. 87, s. 3409–3419.
- Yuan L., Smith A.C., 2009a, *Numerical Study on Spontaneous Combustion of Coal in U.S. Longwall Gob Areas*, w: *Proceedings of the Ninth International Mine Ventilation Congress, New Delhi, India, November 10–13, 2009*, ed. DC Panigrahi, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, s. 263–271.
- Yuan L., Smith A.C., 2009b, *CFD modeling of spontaneous heating in a large-scale coal chamber*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, t. 22, No. 4.
- Znański J., 1961, *Podziemna eksploatacja złóż – część I*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.