

Automatyczny system monitoringu stateczności wyrobisk korytarzowych

Roadways stability automatic monitoring system



*Dr hab. inż. Piotr Małkowski
prof. AGH^{*)}*



*Dr hab. inż. Zbigniew Niedbalski
prof. AGH^{*)}*



Dr inż. Łukasz Bednarek^{)}*



*Mgr inż. Marian Pytlik^{**)}*



*Mgr inż. Arkadiusz
Frymarkiewicz^{***)}*



*Mgr inż. Krzysztof
Filipowicz^{***)}*

Treść: Zapewnienie stateczności wyrobisk jest kluczową sprawą dla prawidłowego funkcjonowania kopalni podziemnej. Dla danych warunków geologiczno-górnictwowych, w celu zachowania wymaganych gabarytów wyrobiska, dobierany jest odpowiedni schemat obudowy. Po wykonaniu projektu taki powinien jednak zostać zweryfikowany na podstawie pomiarów dołowych. Badania te powinny dotyczyć zarówno górotworu, jak i obudowy i stać się następnie podstawą kalibracji przyjętych modeli obliczeniowych oraz parametrów warunku wytrzymałościowego dla skał. W artykule przedstawiono opracowany system zintegrowanego automatycznego monitoringu wyrobiska przyścianowego oraz podano przykładowe wyniki pomiarów. Urządzenia elektroniczne zabudowane w wyrobisku pozwoliły na pomiar rozwarstwień stropu, obciążenie obudowy podporowej, obciążenie obudowy kotwicznej oraz na pomiar zmian naprężeń w górotworze. Ponieważ wyrobisko było utrzymywane w części przyrobowej, wykonywano także pomiar obciążeń kasztów. Wszystkie urządzenia podpięte były do rejestratorów, które mogły gromadzić bezobsługowo dane przez dłuższy okres czasu. Uzyskane doświadczenia pokazują, że opracowany system można zastosować w innych wyrobiskach, gdzie dostęp jest utrudniony lub np. drążony w samodzielnej obudowie kotwicznej.

Abstract: Ensuring mining workings stability is the key problem for the proper underground mine activity. The support passport of any working is designed for the common mining and geological conditions and should guarantee the required working dimensions for the specific range of time. However, after the support execution, the project should be then verified by the underground measurements. These measurements should concern both rock mass and support control and they should serve as the calibration of the rock mass model assumptions and the failure criterion. The integrated automatic monitoring system for the gate stability control and exemplary results are presented in the paper. Electronic devices installed in the working allowed to measure the roof rocks separation, a load on support frame, a load along the rock bolt and a change of stress in the rock mass. As the gate was maintained behind the longwall face the load on wooden box cribs was controlled as well. All the devices were connected to dataloggers, which could collect data unattended for a long time. The experience gained shows, that designed system can be applied in other underground workings, especially there, where the access is limited or e.g. where only roofbolting is applied.

^{*)} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków ^{**)} JSW SA, Jastrzębie ^{***)} JSW SA, KWK „Pniówek”, Pawłowice

Słowa kluczowe:

stateczność wyrobiska podziemnego, monitoring górotworu, monitoring obudowy, automatyczny system monitoringu

Keywords:

mining working stability, rock mass monitoring, support monitoring, automatic monitoring system

1. Monitoring wyrobisk podziemnych

Z punktu widzenia utrzymania stateczności wyrobisk podziemnych niezbędne jest prowadzenie monitoringu. Monitoring dostarcza nie tylko informacji dotyczącej aktualnego stanu wyrobiska, ale przede wszystkim daje informację zwrotną dotyczącą poprawności przyjętych założeń projektowych i sposobu zaprojektowania wyrobiska (Shen i in. 2003, Singh i in. 2004, Majcherczyk i in. 2003, 2005b, 2006, 2008, 2010, Prusek 2004, 2008a, Niedbalski 2014, Małkowski, Niedbalski 2019). W wielu przypadkach jest podstawą do zmiany przyjętych schematów i obudowy i jej optymalizacji (Majcherczyk i in. 2006, 2008, Małkowski i in. 2017, Walentek, Lubosik 2017, Xie i in. 2018, Walentek 2019).

Warunkiem prowadzenia właściwego monitoringu stateczności wyrobisk podziemnych jest jednoczesna kontrola pracy górotworu i kontrola pracy obudowy. Prowadzenie wyłącznie kontroli stanu górotworu sprawia, że brakuje informacji o obciążeniu obudowy i wykorzystaniu jej nośności. Z kolei kontrola tylko pracy obudowy nie pozwala na określenie przyczyn koncentracji obciążeń i odniesienia ich do wielkości deformacji lub intensywności spękań skał otaczających wyrobisko. Kontrola stanu wyrobiska może być dokonywana poprzez pomiary:

- konwergencji wyrobiska (liniowe, obwodowe),
- wypiętrzania spągu,
- skanowania 3D,
- obserwacji otworów wiertniczych za pomocą kamery,
- zmian naprężeń w górotworze,
- rozwarstwień skał stropowych,
- obciążenia obudowy (podporowej, kotwowej, powłokowej),
- deformacji elementów obudowy,
- stanu naprężeń w obudowie.

Prowadzenie monitoringu w długim okresie czasu pozwala ponadto na określenie trendów deformacji górotworu i obciążeń obudowy, które służyć predykcji zachowań wyrobisk drążonych w zbliżonych lub specyficznych (np. zawodnienie skał, obecność uskoku) warunkach górniczo-geologicznych (Ostrowski, Małkowski 2016, Małkowski i in. 2018). Shen (2014) podkreśla, że monitoring powinien być dostosowany do możliwej formy utraty stateczności wyrobiska, którą może w związku z tym być pęknięcie belki stropowej, rozwarstwianie się stropu, zawisanie stropu, opad skał, łuszczenie się stropu i ociosów lub obwał. Kontrola rozwarstwień skał stropowych i obciążenia obudowy jest szczególnie istotna przy projektowaniu obudowy kotwowej (Majcherczyk i in. 2005b, Bigby i in. 2010, Shen 2014, Jena i in. 2016, Xie i in. 2018), gdy zagrożenie wystąpieniem nagłego obwał jest większe niż w przypadku stosowania obudowy podporowej. W tym drugim przypadku wskazane jest prowadzenie pomiaru konwergencji (Majcherczyk i in. 2006, 2008, Prusek 2008a, Ostrowski i Małkowski 2016, Walentek i Lubosik 2017, Walentek 2019, Małkowski i Niedbalski 2019), lub skanowania 3D (Majcherczyk i in. 2015, Kukutsch i in. 2015). W swojej pracy Walentek (2019) udowadnia, że w przypadku wyrobisk górniczych za pomocą konwergencji można wręcz sterować doбором obudowy wyrobiska, wykorzystując badania dołowe do wyznaczenia krzywej reakcji masywu skalnego (GRC), profilu przesunięcia wzdłużnego (LDP) oraz krzywej charakteryzującej obudowę.

Dodatkowym pomiarem, który może pomóc w ocenie stateczności wyrobiska lub też być dodatkowym miernikiem przyczyn problemów w utrzymaniu stateczności wyrobiska są pomiary zmiany stanu naprężenia w górotworze (Shen i in. 2003, Singh i in. 2004, Shen 2014, Lubosik i in. 2017). Dotyczy to w szczególności sytuacji zbliżania się frontu eksploatacji i oddziaływania dodatkowych ciśnień (Shen i in. 2003, Prusek 2004, Lubosik i in. 2017, Waclawik i in. 2017, Walentek, Lubosik 2017). W tym przypadku mogą być także przydatne zarówno pomiary konwergencji (Prusek 2004, 2008a, Majcherczyk i in. 2011), jak i badania endoskopowe, wykonywane za pomocą kamery umieszczonej w otworach wiertniczych (Majcherczyk i in. 2003, 2006, 2011, Kasperkiewicz i in. 2010, Walentek 2018). Pomiary endoskopowe bardzo dobrze pokazują rozwój sieci spękań i wzrost nieciągłości górotworu w czasie zmiany sytuacji geomechanicznej (Majcherczyk i in. 2006, 2008, Małkowski 2013, Xie i in. 2018, Walentek 2018, Małkowski, Niedbalski 2019).

Niemniej istotny jest pomiar obciążeń obudowy, który wskazuje na poprawność jej doboru i charakter współpracy z górotworem. Pomiar sił w kotwach nie może przekraczać deklarowanej przez producenta wartości nośności kotwi (Singh i in. 2004, Majcherczyk i in. 2005a, 2006, 2008, Niedbalski 2014, Jena i in. 2016, Małkowski i in. 2017, Walentek, Lubosik 2017, Xie i in. 2018, Małkowski, Niedbalski 2019). Monitoring obudowy podporowej w pierwszej kolejności wskazuje również wartość maksymalnego lub roboczego obciążenia obudowy (Prusek 2004, Majcherczyk i in. 2005a, 2006, 2008, 2011, Niedbalski 2014, Walentek i Lubosik 2019). Należy jednak zauważyć, że rozmieszczenie czujników (dynamometrów) na obwodzie odrzwi obudowy podporowej lub też pod łukami ociosowymi (stojakami) pokazuje kierunek obciążenia obudowy. Stwierdzenie niesymetrycznego obciążenia wskazuje na niewłaściwą pracę odrzwi, w tym, w przypadku obudowy podporowej podatnej na brak zsuwów na złączach i deformacje plastyczne (Majcherczyk i in. 2005a, 2006, 2008, Prusek 2008a, Małkowski, Niedbalski 2018).

Wszystkie otrzymywane podczas monitoringu wartości pomagają w przygotowaniu modelu numerycznego i pomagają we właściwej kalibracji wyznaczonych wcześniej parametrów górotworu oraz parametrów kryterium wytrzymałościowego (Majcherczyk i in. 2006, 2008, 2010, Kasperkiewicz i in. 2010, Shen 2014, Małkowski 2013, Niedbalski 2014, Walentek 2018, Małkowski i in. 2018).

Należy podkreślić, że monitoringiem stateczności wyrobisk należy odpowiednio zarządzać. Wśród czynności, które należy wykonać w ramach takiego zarządzania to wybór mierzonych wielkości, wybór właściwych dla sytuacji urządzeń (ich dokładności, zakresu działania, wymiarów, warunków stosowania), ich rozmieszczenie, ustalenie osób odpowiedzialnych za pomiar, gromadzenie i przetwarzanie danych (Małkowski 2017). Brak dobrej organizacji, a potem analizy danych nie pozwoli na pełne wykorzystanie z trudem gromadzonych informacji.

Gromadzenie i interpretacja pomiarów może być znacznie uproszczona, choć bardziej skomplikowana technicznie, gdy zbudowany jest spójny system monitoringu, a więc taki który połączy ze sobą zarówno obserwacje górotworu, jak i obudowy. W tym przypadku należy dobrać urządzenia, tak aby w najlepszy sposób oddawały wpływ zmian sytuacji

geomechanicznej na wyrobisko, a jednocześnie umożliwiały automatyczną rejestrację pomiarów za pomocą jednego rejestratora lub miernika. Choć tego typu projekty miały już miejsce (Prusek 2008b, Lubosik i in. 2017, Walentek, Lubosik 2018), to jednak najczęściej są to pojedyncze zabudowane urządzenia, niewspółpracujące z jednolitym systemem pomiaru (Shen i in. 2003, Singh i in. 2004, Majcherczyk i in. 2006, 2008, 2010, 2014, Niedbalski 2014, Małkowski i in. 2017, 2019).

2. Monitoring wyrobisk przyścianowych

W przypadku wyrobisk przyeksploatacyjnych np. przyścianowych, monitoring wyrobiska może pełnić różną rolę. Najczęściej prowadzi się go ze względu na:

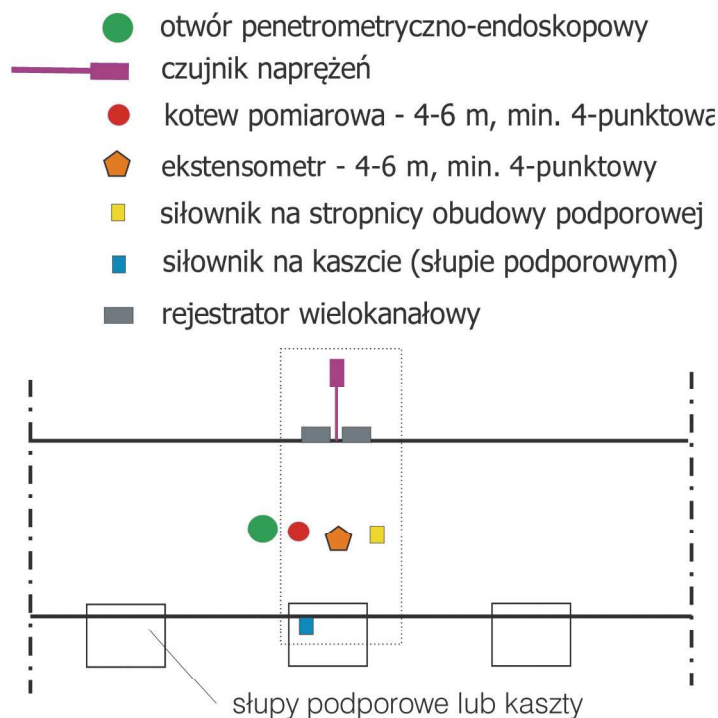
- ocenę skuteczności wybranego schematu obudowy,
- kontrolę pracy wybranego elementu obudowy,
- ocenę odległości wpływu frontu eksploatacyjnego na górotwór i obudowę,
- ocenę współpracy obudowy z górotworem dla danych warunków górniczo-geologicznych,
- testowanie skuteczności pracy nowych rozwiązań technologicznych.

Kontrola ta jest stosunkowo prosta, jeżeli wyrobisko znajduje się przed frontem eksploatacji, bowiem dostęp do urządzeń jest swobodny i bezpieczny. Można zatem wykonywać pomiary ręcznie, a urządzenia w razie potrzeby serwisować. Sytuacja jest znacznie trudniejsza, gdy wyrobiska utrzymywane są za frontem eksploatacji. Dostęp do nich jest bowiem utrudniony lub wręcz niemożliwy ze względów bezpieczeństwa np. ze względów wentylacyjnych. Często wyrobiska te są wygrozdzone. Kontrola zachowania się górotworu oraz obudowy jest jednak bezcenna z punktu widzenia poznawczego i poprawności wykonywania dalszych projektów. W takim przypadku jedynym rozwiązaniem staje

się **monitoring automatyczny**. Rejestrowanie pomiarów na automatycznych urządzeniach odczytowych pozwala na długie gromadzenie danych i ich odczyt nawet co kilka tygodni (w zależności od pojemności pamięci rejestratora) lub też na odczyt danych w dalszej odległości od wyrobiska, poprzez transmisję danych za pomocą sieci teletechnicznej. Ponadto monitoring automatyczny pozwala na ciągłą rejestrację danych w dowolnie ustalonym interwale czasowym, zwykle od 1 do 12 godzin i obserwację nawet niewielkich zmian w zachowaniu się górotworu i obudowy.

Zatem przykładowy prawidłowy schemat automatycznej stacji monitoringowej w przypadku stosowania w wyrobisku obudowy podporowo-kotwowej powinien być następujący (rys. 1): ekstensometr wielopunktowy (minimum 4-punktowy) zabudowany w stropie (kolor pomarańczowy), czujnik siły umieszczony na stropnicy obudowy podporowej (kolor żółty), kotew pomiarowa wielopunktowa (minimum 4-punktowa - kolor czerwony). Dodatkowo zaleca się kontrolować zmianę stanu naprężenia poprzez czujnik naprężeń (minimum dwuosiowy – kolor fioletowy), a w przypadku wyrobiska eksploatacyjnego lub przyścianowego zaleca się umieścić dodatkowe czujniki obciążenia na zabudowanych kasztach, słupach podporowych lub innych elementach wzmacniających opadający strop (kolor niebieski).

Oczywiście stację taką można wyposażać także w dodatkowe czujniki, takie jak np. czujniki siły umieszczane pod łukami ociosowymi, lub czujniki monitorujące zmianę przekroju wyrobiska. Należy jednak pamiętać, że każde urządzenie wymaga kolejnych kanałów przesyłowych, stąd pomimo na pozór niewielkiej liczby proponowanych urządzeń, liczba potrzebnych kanałów rejestracji może przekraczać możliwości jednego rejestratora (kolor szary). Dlatego należy liczyć się z koniecznością zastosowania dwóch lub trzech takich urządzeń na jednej stacji pomiarowej. Dodatkowo, niezależnie od stacji pomiarowej, należy wykonać otwór badawczy (kolor zielony), w którym będzie można przeprowadzać badania



Rys. 1. Schemat typowej automatycznej stacji monitoringowej dla kontroli wyrobiska przyeksploatacyjnego w obudowie podporowo-kotwowej

Fig. 1. The scheme of typical automatic monitoring station to control the gateroad stability if the stand-and-roofbolting support is used

endoskopowe, obserwując zmiany stopnia zeszczerzenia skał w kolejnych fazach drążenia i utrzymywania wyrobiska. Na pozyskanych z otworu rdzeniu lub bezpośrednio w otworze można wtedy także określić parametry mechaniczne warstw skalnych w otoczeniu wyrobiska.

W niniejszym artykule przedstawiono opracowany system monitoringu kontrolujący ruchy górotworu, obciążenie obudowy oraz obciążenie wzmocnień w strefie przyrobowej, który został z powodzeniem zastosowany w jednej z kopalń JSW SA. w przyścianowym wyrobisku chodnikowym.

3. Przykład systemu monitoringu dla wyrobiska przyścianowego

3.1. Opis stacji pomiarowej

W omawianym przypadku system monitoringu został opracowany dla wyrobiska przyścianowego w kopalni węgla, utrzymywanego za frontem ściany w celach wentylacyjnych. Zatem z założenia miał to być kompleksowy system kontroli stateczności wyrobiska, z możliwością cyklicznego odczytu danych na miejscu. W tym celu należało tak dobrać i skonfigurować urządzenia pomiarowe monitorujące ruchy górotworu i naciski na obudowę, aby można było odczytywać i rejestrować wartości na jednym rejestratorze lub mierniku. Przygotowując projekt, należało zatem rozwiązać szereg problemów technicznych. Wśród nich można wymienić:

- wybór urządzeń, które mogą pracować w warunkach dołowych,
- dostosowanie zakresów pomiarowych do przewidywanych wartości zmian,
- dostosowanie jednakowego napięcia urządzeń,
- dobór urządzeń zintegrowanych w jeden system,
- dopuszczenie do stosowania na dole według wymagań polskich,
- dopuszczenie do stosowania w warunkach zagrożenia wybuchowego – certyfikat ATEX,
- dostosowanie liczby urządzeń i kanałów przesyłowych do możliwości rejestratora.

Podczas prac nad projektem monitoringu okazało się, że międzynarodowe certyfikaty (np. amerykańskie lub koreańskie), umożliwiające stosowanie danego urządzenia na dole w kopalni nie uprawniają do stosowania ich w górnictwie polskim. Jednocześnie część z nich nie spełnia wymogów zabezpieczenia przeciwybuchowego, a wyrobiska znajdują się w polach metanowych. Ostatecznie rejestratory, które pozostawały w przekroju wyrobiska zdecydowano się chronić specjalnymi atestowanymi skrzyniami iskrobezpiecznymi.

W przypadku monitorowanego chodnika PW-1 w kopalni „Pniówek” celem była weryfikacja nowych schematów obudowy chodnika podścianowego utrzymywanego za frontem ściany. Dwa nowe schematy zostały zastosowane na 200-metrowych odcinkach, a zachowanie się obudowy porównane z typową obudową stosowaną przez kopalnię. Na każdym odcinku znalazły się dwie stacje pomiarowe, z których wyposażenie każdej stanowiły (rys. 2):

- czujnik obciążenia montowany na stropnicy obudowy podporowej,
- ekstensometr o długości 6 m i 4 poziomach pomiarowych,
- kotew pomiarowa o długości 6 m i 6 poziomach pomiarowych,
- czujnik obciążenia kasztu,
- dwa czujniki naprężeń dwuosiowe.

Czujniki naprężeń zamontowano w ociosach po skosie pod kątem 90° do siebie, aby można było określić wypadkowe

zmiany naprężeń pionowych i poziomych w obu kierunkach, a więc trójosiowy stan naprężenia.

Ponadto na pięciu z sześciu stacji odwiercono otwory endoskopowe, do oceny stanu zeszczerzenia stropu, od momentu wykonania wyrobiska.

Na rysunku 2 przedstawiono jeden z podstawowych porównawczych schematów obudowy z podciąganiem o profilu V, montowanym w osi wyrobiska, przykotwionym kotwami strunowymi, w układzie wzdłuż zrobów z zabudowanymi kasztami.

3.2. Kontrola pracy górotworu

W analizowanym przypadku do kontroli rozwarstwienia stropu zastosowano ekstensometry z drgającą struną model 1391 firmy ACE Instrument Co. Ltd – *rod extensometer*. Ekstensometry te składają się z 6-milimetrowych rurek wykonanych z polietylenu, na końcu których znajdują się kotwiczki z drgającą struną o długości 100 mm, wykonane z włókna szklanego (rys. 3a). Długość zakotwiczenia czujników w otworze badawczym można wybrać dowolnie. W niniejszym przypadku, ze względu na 6-metrowe kotwy strunowe zabudowane w stropie, ekstensometr miał również długość 6 m, a czujniki znalazły się na głębokościach 5,95 m, 4,45 m, 2,95 m i 1,45 m.

Głowica wykonana jest ze stali nierdzewnej i ze stopów nierdzewnych stali (rys. 3b). Umożliwia nadanie naciągu wstępnego kotwiczkom ekstensometru (ustalenie wartości zerowej). Ponadto znajduje się w nim czujnik temperatury dla kompensacji wskazań strun. Ekstensometr wklejano do stropu na całej długości na kleju żywicznym Verpensin (rys. 3c).

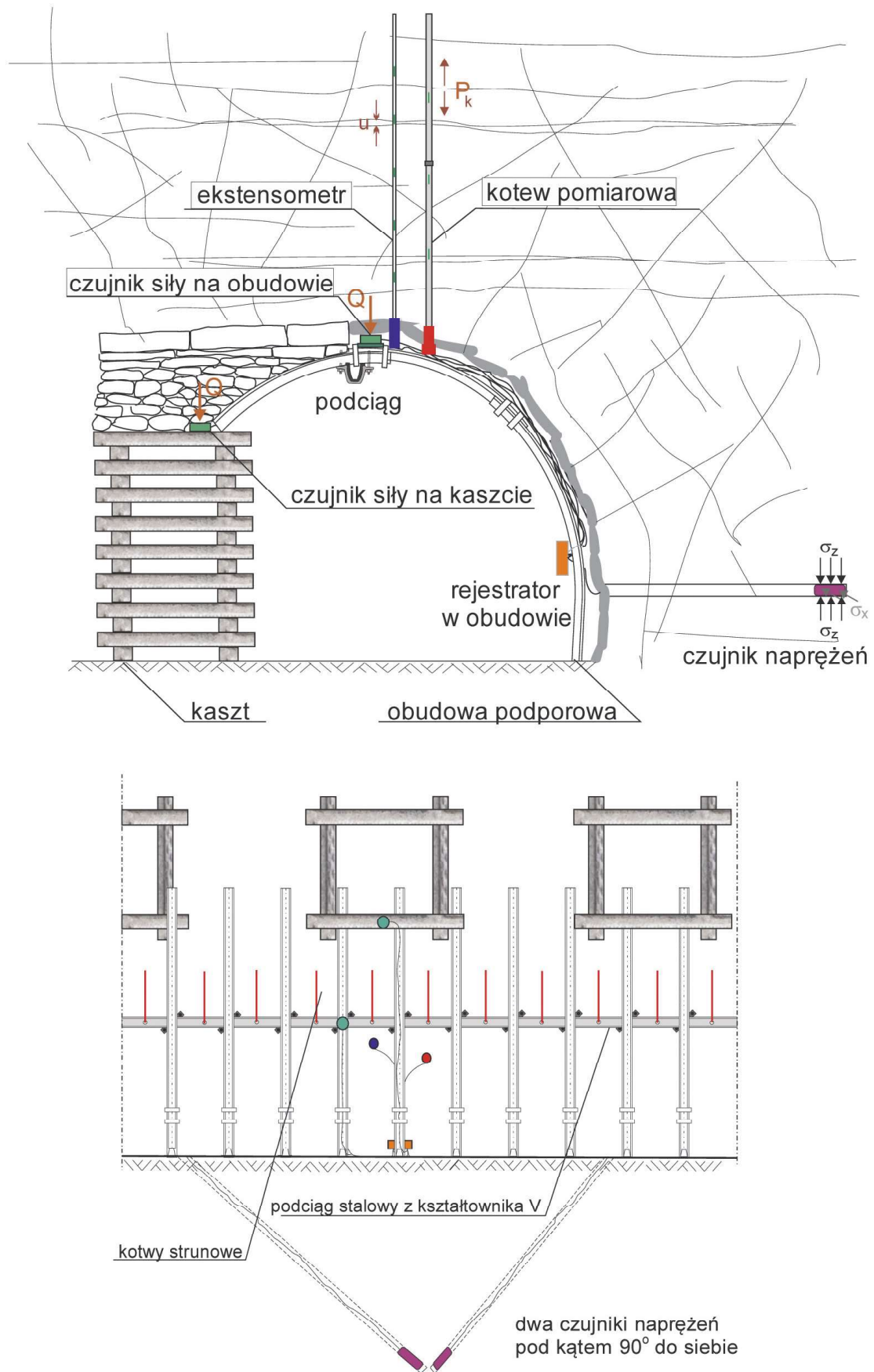
Na rysunku 3d przedstawiono wyniki pomiarów z jednego z czujników, które prowadzone były zarówno przed frontem, jak i za frontem ściany. Można na nim zauważyć wyraźny spadek wartości rozwarstwień związanych z powstającym obok zawałem skał (przechodzenie frontu ściany obok stacji pomiarowej) i opadaniem warstw stropu bezpośredniego na obudowę podporową wyrobiska.

Dla kontroli zmiany stanu naprężenia wokół chodnika zastosowano dwuosiowe czujniki naprężeń (*biaxial stressmeter*) – model 1375 firmy ACE Instrument Co. Ltd. (rys. 4a). Znajdujące się wewnątrz sondy trzy struny odchyłone od siebie pod kątem 120° pozwalają na pomiar zmiany stanu naprężenia w płaszczyźnie prostopadłej do głowicy sondy. Wewnątrz głowicy, podobnie jak w ekstensometrze znajduje się czujnik temperatury. Obudowa wykonana jest ze stali nierdzewnej i jest wodoszczelna. Głowice wprowadzono do otworów skośnych na głębokość ok. 10 m, osadzając je na zaprawie cementowej (rys. 4b).

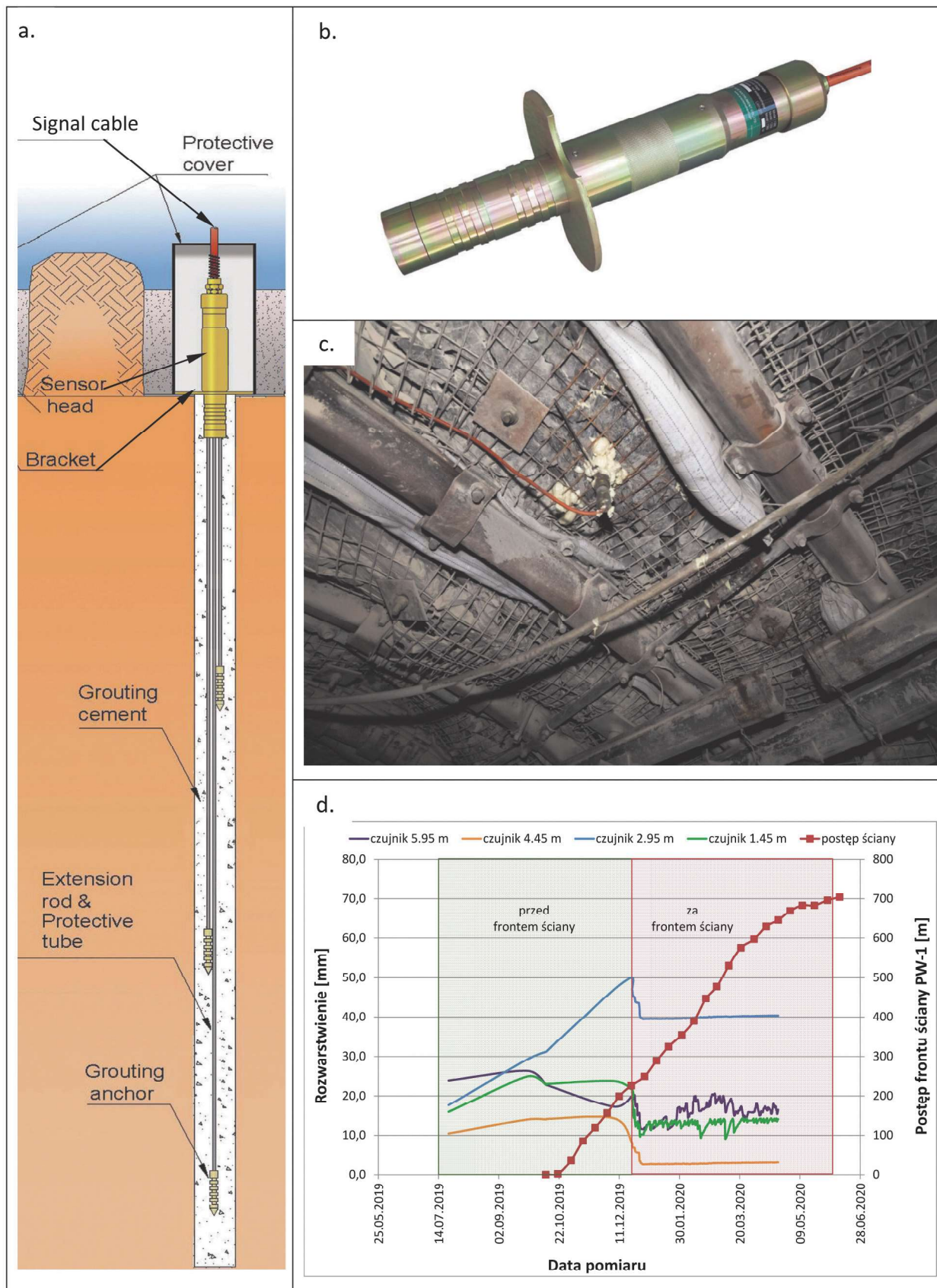
Na rysunku 5 pokazano czujnik naprężeń zabudowany w ociosie chodnika z widoczną rurką odpowietrzającą po jej instalacji.

Czujnik dwuosiowy pozwala na wyznaczenie nie tylko wartości naprężeń kierunkowych w płaszczyźnie prostopadłej do czujnika, ale także kąta nachylenia wypadkowej naprężeń głównych. Na rysunku 6a pokazano wykres zmian naprężeń poziomych i pionowych oraz położenia frontu ściany. Naprężenia stale wzrastają wraz z przesuwanym się frontem eksploatacji i 100 m przed nim w przypadku naprężeń pionowych jest to już ok. 1,6 MPa. Na rys. 6b pokazano sposób określania wypadkowej naprężeń głównych, a kąt jej odchylenia od pionu pokazuje rys. 6c. Wykres potwierdza obserwacje w wyrobisku, że wypadkowa ta jest odchylona od pionu, w tym przypadku o kąt $60-75^\circ$, a wartość ta nie jest stała.

Niestety w przypadku tego czujnika, pomimo jego umieszczenia na wysokości ok. 90 cm w ociosie, w wyniku coraz większego wypiętrzania spągu przed frontem ściany doszło

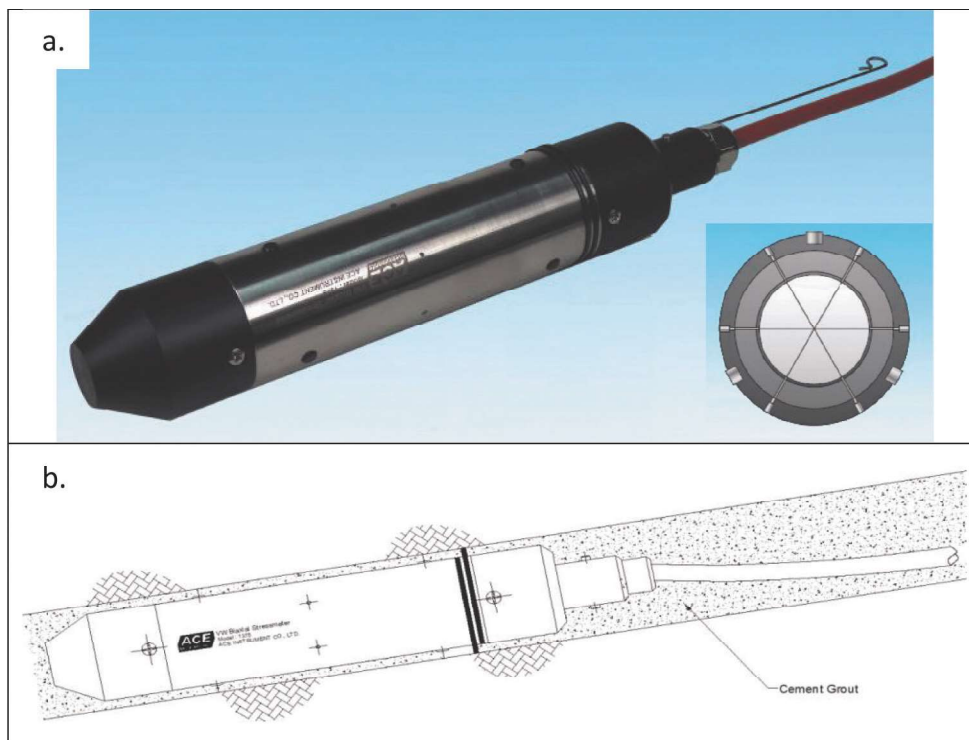


Rys. 2. Schemat stacji pomiarowej w chodniku podścianowym
 Fig. 2. The monitoring station layout in a main gate



Rys. 3. Extensometr MPBX model 1390, a. widok ogólny i schemat instalacji, b. głowica ekstensometru, c. ekstensometr wklejony do stropu w chodniku, d. wyniki pomiarów ze stacji nr 1

Fig. 3. Rod extensometr MPBX model 1390, a. the general view and its instalment, b. the head of the extensometer, c. extensometr installed in the gate roof, d. The results of the investigation from the station no 1



Rys. 4. Dwuosiowa sonda naprężeń, a. widok sondy, b. sposób mocowania sondy (www.aceco.kr)
 Fig. 4. Bialaxial stressmeter, a. a general view, b. the grouting method (www.aceco.kr)



Rys. 5. Czujnik naprężeń (bialaxial stressmeter) zabudowany w ociosie chodnika, widoczna rurka odpowietrzająca po instalacji
 Fig. 5. Bialaxial stressmeter installed in the rib, the deaerating tube after installment is visible

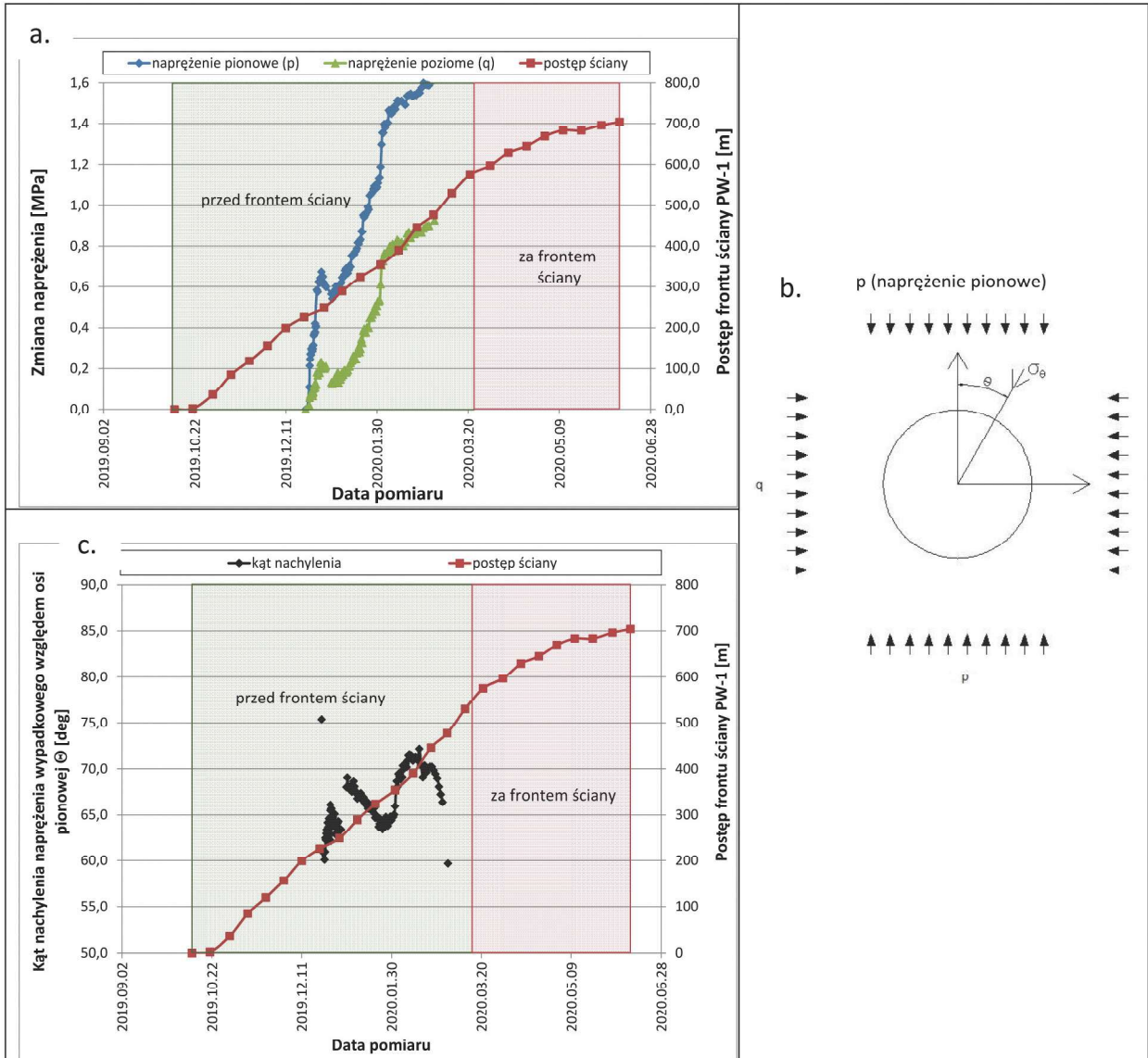
do uszkodzenia przewodu i w odległości ok. 110 m od frontu ściany czujnik przestał działać.

3.3. Kontrola stanu obudowy

Dla oceny stanu obciążenia odrzwi obudowy podporowej zdecydowano się na zastosowanie takich czujników, które będą kompatybilne z rejestratorem. Wybrano zatem ponownie czujniki z drgającą struną tzw. *load cell VW* model 1102 firmy ACE Instrument Co. Ltd., trzystrunowe, przeznaczone do kontrolowania maksymalnych obciążeń do 40 ton. Seria modeli 1100 jest przeznaczona do kontroli obciążeń kotwi,

konstrukcji betonowych lub elementów stalowych (rys. 7). Do pomiarów w wyrobisku wybrano tę właśnie serię, ponieważ przewidywany zakres obciążeń zarówno obudowy, jak i kasetów mógł zostać monitorowany przez urządzenia jednego producenta, o tej samej zasadzie działania.

W celu uzyskania właściwego kontaktu pomiędzy odrzwiami obudowy a górotworem, krążek dynamometru umieszczano na stropnicy obudowy podporowej (rys. 8), na specjalnie w tym celu wykonanej podkładce, z blokadą od dołu umożliwiającą klinowanie się jej w profilu obudowy V oraz ograniczającą od góry możliwość zsuwu krążka z podkładki.



Rys. 6. Ocena zmian stanu naprężenia w górotworze podczas prowadzonej eksploatacji ścianą PW-1, na stacji nr 6: a. wykres zmian naprężeń, b. schemat określania kąta wypadkowej naprężeń głównych, c. zmiana kąta naprężeń głównych w trakcie zbliżania się frontu ściany

Fig. 6. The assessment of rock mass pressure change on measurement station no 6 during PW-1 longwall operation: a. the pressure change chart, b. the scheme of determination of the principal stress resultant angle, c. The change of the principal stress resultant angle during approach of a longwall face

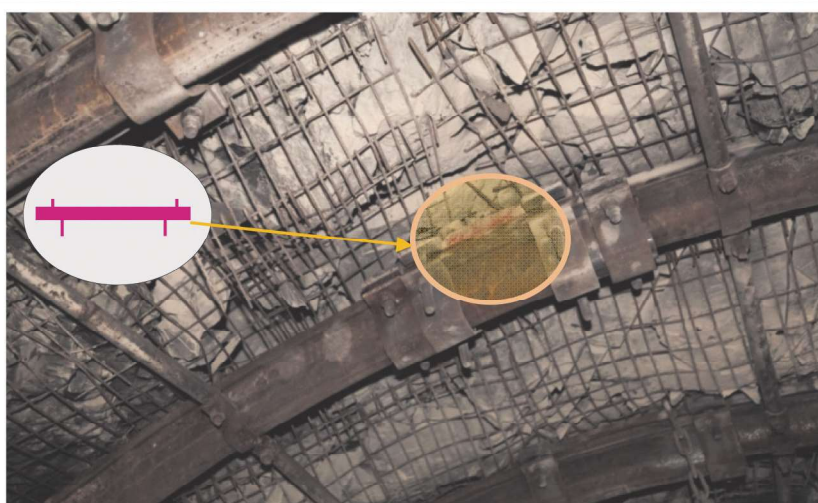
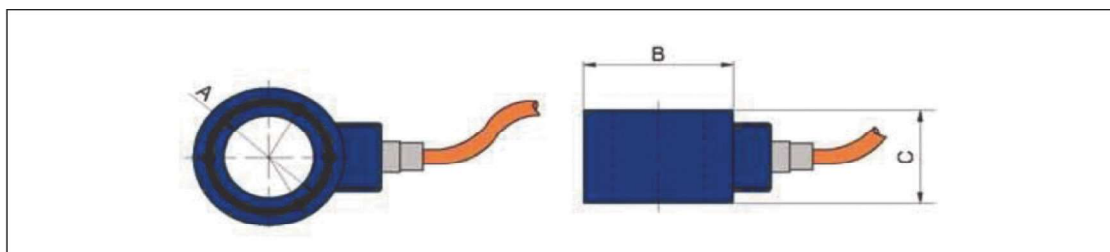


Rys. 7. Dynamometry serii 1100 firmy ACE Co Ltd. (www.aceco.kr)

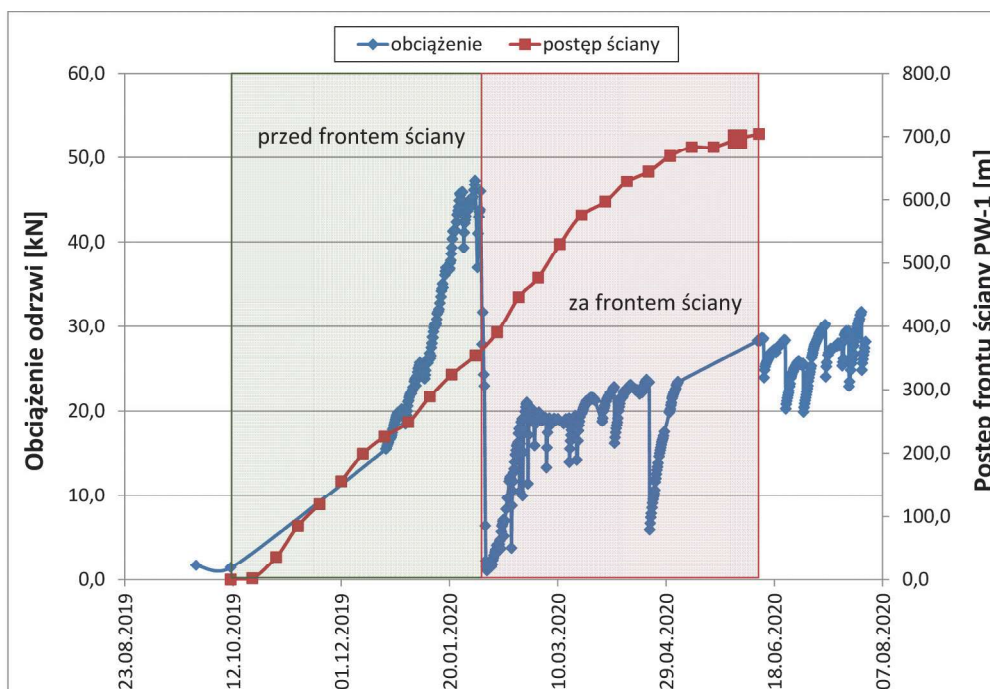
Fig. 7. Dynamometers of 1100 series of ACE Co Ltd. (www.aceco.kr)

Tabela 1. Parametry modeli siłowników serii 1100 firmy Ace Co Ltd.

Model siłownika	1102	1103	1105	1110	1115	1120
Max. obciążenie [T]	40	80	140	140	140	200
Wymiar A [mm]	38,5	50	100	125	75	100
Wymiar B [mm]	72	88	138	158	122	150
Wymiar C [mm]	80	80	80	80	80	80
Pow. oporowa [cm ²]	29,07	41,18	71,03	73,34	72,72	98,17



Rys. 8. Czujnik obciążeń typu VW umieszczony na łuku stropnicowym obudowy ŁP na podkładce stalowej w chodniku PW-1
 Fig. 8. The load cell VW type placed on the roof arch of support frame on the special steel pad in maingate PW-1



Rys. 9. Obciążenie dynamometru zabudowanego pomiędzy górotworem a stropnicą odrzwi ŁP w chodniku PW-1 wraz z przebiegiem postępu ściany – stacja nr 3
 Fig. 9. The load of rock on a roof arch frame in maingate PW-1 with the longwall face advance course – monitoring station no 3

Przykład rejestrowanego obciążenia dynamometru zabudowanego pomiędzy górotworem a stropnicą odrzwi ŁP w chodniku PW-1 wraz z przebiegiem postępu ściany przedstawiono na rys. 9. Pomimo zastosowania obudowy podporowo-kotwowej widoczny jest wyraźny spadek obciążenia odrzwi po odprężeniu stropu bezpośredniego na linii frontu ściany.

W celu pomiaru obciążeń obudowy kotwowej zastosowano kotew pomiarową 6-poziomową *rock bolt stressmeter* – model 1350 firmy ACE Instrument Co. Ltd. Kotew ta posiada również wewnątrz moduły drgającej struny. Czujniki w liczbie

maksymalnie 8 można rozmieścić wewnątrz stalowego pręta, który jest rozciągany (lub ściskany) wraz z rozwarstwiającym się górotworem. W głowicy wykonanej z nierdzewnego stopu stali znajduje się także czujnik temperatury. Dla kontroli pracy kotwi zabudowanych w chodniku wybrano kotwy 6-metrowe (rys. 10a). Może się wtedy w niej znajdować sześć poziomów pomiarowych co 0,75 m. W analizowanym przypadku punkty pomiarowe zamontowano na długościach: 0,75 m, 1,50 m, 2,25 m, 3,78 m, 4,25 m i 5,78 m (rys. 10b). Należy zauważyć, że tak długie sztywne kotwy, dłuższe niż wysokość wyrobiska, wymagają specjalnego montażu. Składają się one powiem



Rys. 10. Kotew pomiarowa z drgającą struną: a. widok ogólny kotwi, b. odcinek kotwi z drgającą struną, c. łącznik segmentów kotwi, d. gniazdo łączenia segmentów kotwi

Fig. 10. Rock bolt stressmeter: a. a general view, b. the section with a vibrating wire, c. bolt segments connector, d. the connecting socket

z dwóch segmentów łączonych tuleją (rys. 10c). Należy jednak dobrze zmontować obie części kotwy ze sobą, dokładnie łącząc poszczególne czujniki do gniazda (rys. 10d) i dobrze skręcając obydwie części kotwy ze sobą. Kotew zabudowaną w stropie wyrobiska na zaprawie cementowej pokazano na rysunku 11.

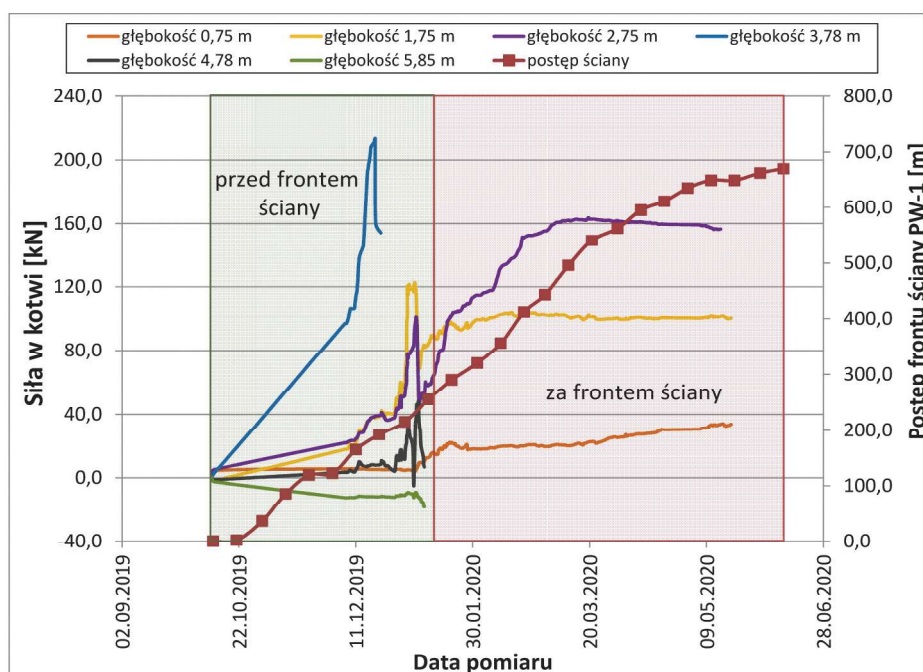
Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy zapis monitoringu obciążenia kotwi. Wynika z niego, że przed frontem ściany kotew jest coraz mocniej obciążona, nawet do 215 kN

na poziomie 3,75 m. Obciążenie to na długości kotwi jest jednak zmienne, bowiem zależy od poziomu rozwarstwiania się skał stropowych. Za frontem ściany obciążenie kotew rośnie. W podanym przypadku, pomimo starannego montażu kotwi jeszcze przed frontem ściany, przy wzrastających ciśnieniach eksploatacyjnych nastąpiło jej wygięcie i rozłączenie części górnej kotwy z dolną. Stąd w odległości ok. 15 m stanowiska pomiarowego od frontu ściany nie ma już odczytu wartości sił na trzech wyższych czujnikach kotwy.



Rys. 11. Kotew pomiarowa zabudowana w stropie chodnika PW-1, widoczna końcówka pakera po instalacji

Fig. 11. The rock bolt stressmeter installed in the maingate PW-1 roof, visible instalment tube in the roof next to the bolt



Rys. 12. Rozkład sił w kotwi oprzyrządowanej zabudowanej w chodniku PW-1 wraz z przebiegiem postępu ściany – stacja nr 2

Fig. 12. Load distribution along the measurement bolt built-in the maingate roof with the longwall face advance – monitoring station no 2

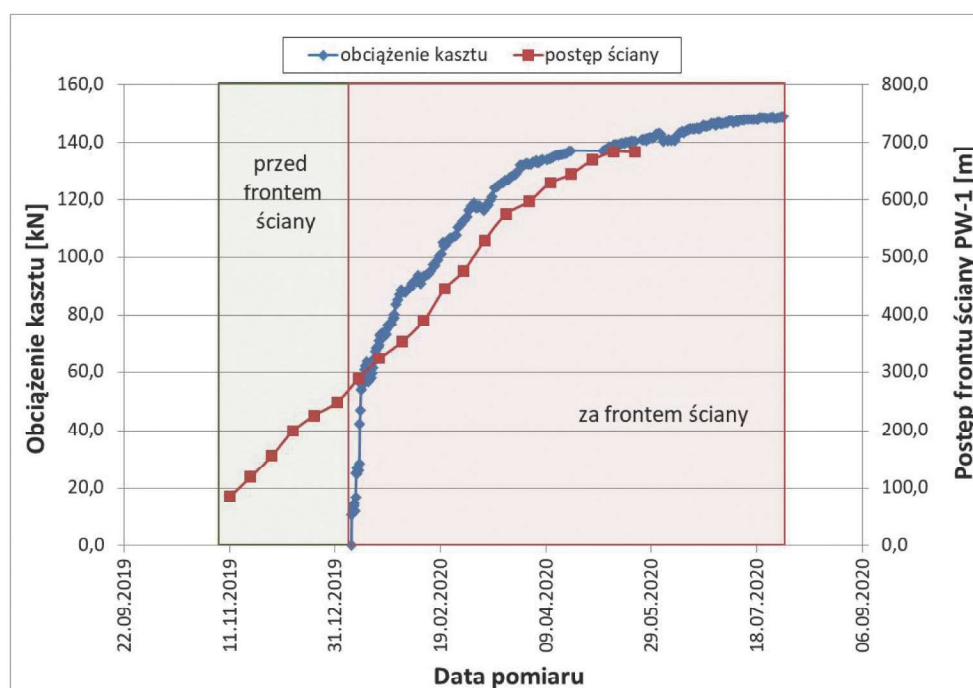
Ponieważ chodnik PW-1 był utrzymywany za frontem ściany, dodatkowo monitorowano obciążenie kasztów. W tym celu wykorzystano dynamometr do pomiaru obciążeń z drgającą struną (*load cell VW*), o nośności 200 ton siły - model 1120 firmy ACE Instrument Co. Ltd. Parametry urządzenia zamieszczono w tabeli 1. Dla zabudowywanych stosów drewnianych zakres 200 ton siły został dobrany z dużym zapasem, ale ze względu na brak takich pomiarów w praktyce, przy teoretycznej nośności kasztu na poziomie ok. 160 ton siłą, zakres taki wydał się odpowiedni. Na rysunku 13 przedstawiono konstrukcję monitorowanego kasztu. W praktyce problemem okazało się umieszczenie

siłownika tak, aby znalazł się pod gruzowiskiem skalnym i prawidłowo wskazywał wartość obciążenia przenoszoną na całą powierzchnię kasztu.

Jak pokazały pomiary, obciążenie kasztów nie było wysokie (rys. 14). Nie przekraczało ono wartości ok. 210 kN (21 T). W tym przypadku dość krótki wspornik załamujących się skał stropu bezpośredniego nie obciążał mocno zabudowanych podpór. Należy jednak zauważyć, że czujniki umieszczone były od strony wyrobiska, gdzie nacisk na kaszt był nieco mniejszy, nie przenosząc obciążenia całego pękającego nad kasztem stropu.

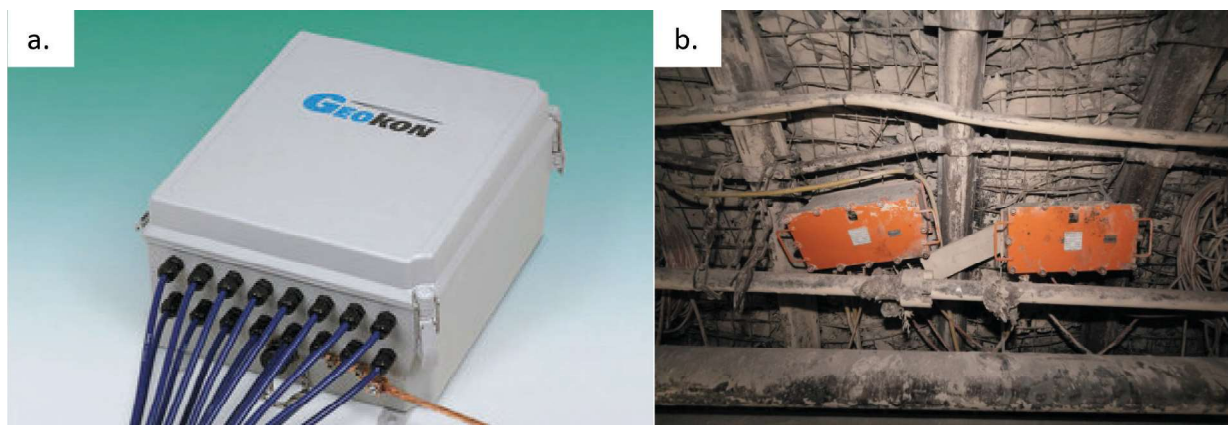


Rys. 13. Widok monitorowanego kasztu za frontem ściany PW-1
Fig. 13. The box crib monitored behind the longwall face PW-1



Rys. 14. Obciążenie kasztu zabudowanego w chodniku PW-1 wraz z przebiegiem postępu ściany – stacja nr 2

Fig. 14. The box crib load and the advance of longwall face – monitoring station no 2



Rys. 15. 16-kanalowy rejestrator firmy Geokon, a. widok ogólny, b. dwa rejestratory zabudowane na stacji pomiarowej w chodniku PW-1

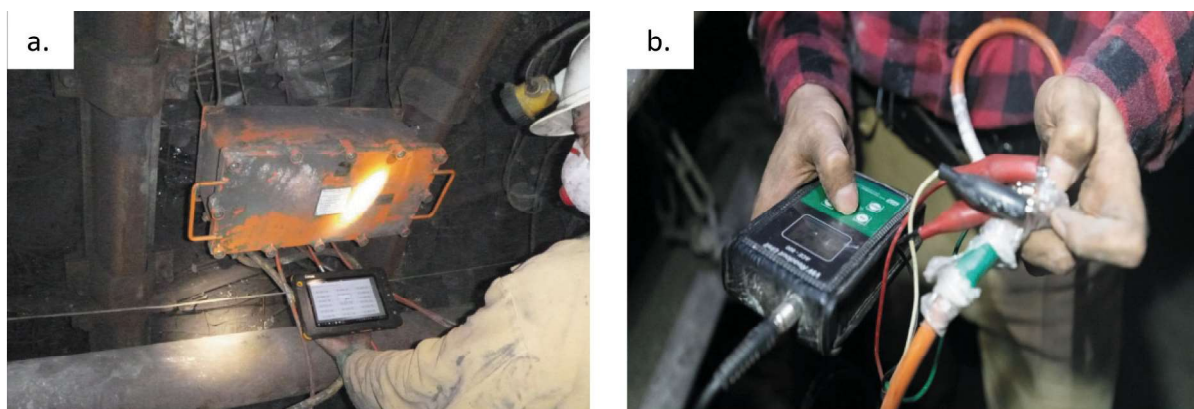
Fig. 15. 16-channel datalogger by Geokon, a. a general view, b. two dataloggers installed on the monitoring station in the maingate PW-1

Wszystkie pomiary rejestrowane były automatycznie przez rejestrator 16-kanalowy firmy Geokon (rys. 15a). Ze względu na dużą liczbę potrzebnych kanałów transmisyjnych na jednej stacji zabudowywano po dwa rejestratory, zatem łącznie w wyrobisku było 12 takich urządzeń. Ze względów bezpieczeństwa i istniejącego zagrożenia metanowego, każdy rejestrator znalazł się w iskrobezpiecznej osłonie OS253/15/0/B, spełniającej wymagania ATEX (rys. 15b). Ponadto rejestratory nie miały własnego zasilania, ale połączono je równolegle z zasilaniem sieci kopalnianej. W ten sposób w przypadku nagłego wzrostu koncentracji metanu, pożaru lub innego zagrożenia, zasilanie rejestratorów zostałoby odcięte automatycznie.

Dane gromadzone były z interwałem 6 godzin, a następnie sczytywane przez pracownika z każdego rejestratora za pomocą tabletu (rys. 16a). Do momentu uruchomienia rejestracji automatycznej wyniki pomiarów z każdego urządzenia można było odczytać przyrządem ręcznym (rys. 16b), co pozwoliło na wykonanie wstępnych odczytów referencyjnych. Należy podkreślić, że opracowany system daje także możliwość transmisji danych za pomocą sieci telemetrycznej kopalni do dyspozytora na danym poziomie wydobywczym, lub na powierzchnię.

4. Podsumowanie

1. W celu właściwej kontroli stateczności wyrobiska podziemnego niezbędny jest jednoczesny monitoring górotworu i obudowy. Monitoring górotworu należy prowadzić za pomocą rozwarstwieniomierzy lub czujników konwergencji, a pomiar zachowania się obudowy powinien być realizowany za pomocą dynamometrów mierzących obciążenie obudowy podporowej oraz sił w kotwach. Wskazane jest, aby pomiary ekstensometryczne oraz sił w kotwach odbywały się wielopoziomowo. Zestawienie tych dwóch informacji wraz z analizą map geologicznych i górniczych może stać się podstawą do prawidłowej oceny skuteczności zastosowanego systemu obudowy w danych warunkach górniczo-geologicznych.
2. W przypadku wyrobisk znajdujących się w strefach eksploatacji lub też utrzymywanych w strefach likwidowanych albo przyzrobowych, np. w celach wentylacyjnych, najbardziej skuteczne jest zaprojektowanie monitoringu automatycznego. Gromadzenie danych odbywa się wtedy w dowolnie ustawionym interwale czasowym. Ponadto warto wówczas wykonać też pomiar obciążenia elementów wzmacniających wyrobisko, takich jak słupy podporowe, kaszty lub inne. Dodatkową ceną informacją w przypadku



Rys. 16. Odczyt pomiarów z urządzeń zabudowanych w chodniku PW-1, a. za pomocą tabletu, b. za pomocą miernika ręcznego

Rys. 16. The monitoring data reading in the maingate PW-1, a. with a help of tablet, b. with a help of manual unit

- wyrobisk znajdujących się w rejonie wpływów eksploatacji jest pomiar zmian naprężeń w górotworze, związany z działaniem ciśnienia eksploatacyjnego. Zmiana naprężeń pionowych w tej strefie jest zwykle tylko szacowana, a od niej zależy dobór systemów wzmacniania chodnika.
3. W artykule przedstawiono pierwszy przypadek chodnika przyścianowego w polskich kopalniach węgla, gdzie zastosowano w pełni zautomatyzowany i zintegrowany system monitoringu górotworu i obudowy, działający zarówno przed, jak i za frontem ściany. Zarejestrowane wyniki jednoznacznie wskazują na wzrost naprężeń przed frontem eksploatacji i na odprężenie górotworu w części przyrobowej za frontem. Choć jakościowo informacje te są powszechnie znane, to jednak ilościowo, bez wykonania monitoringu w danych warunkach górniczo-geologicznych i danym rejonie kopalni, pozostają one zawsze niewiadome.
 4. Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły określić skuteczność zastosowanych w chodniku PW-1 schematów obudowy. Zdobyte doświadczenia pozwoliły zidentyfikować błędy techniczno-organizacyjne, jakie powstały podczas budowy stacji pomiarowych i sprawiły, że opracowany system warto zastosować podczas realizacji kolejnych robót górniczych w nowych partiach i poziomach wydobywczych oraz przy zastosowaniu nowych schematów obudowy. Stosowanie zaawansowanego systemu monitoringu jest szczególnie istotne w przypadku głębokości powyżej 1000 m, gdzie naprężenia pierwotne są wysokie, a zachodzące zjawiska w górotworze mają intensywny przebieg.

Literatura

- BIGBY D., MAC A.K., HURT K. 2010 - Innovations in mine roadway stability monitoring using dual height and remote reading electronic telltales. In: Materials of the 10th Underground Coal Operators' Conference, Carlton, Victoria 2010, Australia: University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, s. 145-160.
- JENA S.K., RITESH D.L., MANOJ P., KULDIP P. 2016 - Analysis of strata control monitoring in underground coal mine for apprehension of strata movement. Proceedings of the Conference on Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016), 2016, s. 505-511, DOI: 10.2991/rare-16.2016.81.
- KASPERKIEWICZ W., KAMIŃSKI W., SEWERA M., WALENTEK A., RAJWA S. 2010 - Badania dołowe zasięgu strefy spękań nad wyrobiskiem przyścianowym za frontem ściany. „Wiadomości Górnicze”, nr 4, s. 210-215.
- KUKUTSCH R., KAJZAR V., KONICEK P., WACLAWIK P., PTACEK J. 2015 - Possibility of convergence measurement of gates in coal mining using terrestrial 3D laser scanner. Journal of Sustainable Mining, 14(1), s. 30-37.
- LUBOSIK Z., WACLAWIK P., HORAK P., WRANAA. 2017 - The Influence of In-Situ Rock Mass Stress Conditions on Deformation and Load of Gateroad Supports in Hard Coal Mine. Procedia Engineering, Vol. 191, s. 975-983.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P. 2003 - Wpływ frontu ściany na wielkość strefy spękań wokół wyrobiska przyścianowego. „Wiadomości Górnicze”, nr 1, s. 20-29.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2005a - Badania obciążeń obudowy w wybranych wyrobiskach korytarzowych. Kwartalnik AGH „Górnictwo i Geoinżynieria”, z. 3/1, s. 289-298.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2005b - Zmiany rozwarstwień skał stropowych w wyrobiskach korytarzowych w samodzielnej obudowie kotwowej o długim okresie użytkowania. Warsztaty górnicze; „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, 20-22.06.2005, IGSMiE PAN, Kazimierz Dolny, s. 257-266.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2008 - Badania nowych rozwiązań technologicznych w celu rozrzedzenia obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych. Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2006 - Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań in situ. Wydawnictwo WGiG AGH.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2011 - Geomechaniczna ocena stateczności wyrobisk przyścianowych w obudowie podporowo-kotwowej. „Przeгляд Górniczy”, nr 6, s. 43-49.
- MAJCHERCZYK T., NIEDBALSKI Z., MAŁKOWSKI P. 2010 - Wzmacnianie obudowy wyrobisk korytarzowych w złożonych warunkach górniczo-geologicznych. Kwartalnik AGH „Górnictwo i Geoinżynieria”, z. 2, s. 451-462.
- MAJCHERCZYK T., NIEDBALSKI Z., ULASZEK A. 2015 - Roadway stability evaluation on the basis of modern monitoring of displacement. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 37, No. 1, s. 45-52, DOI: 10.1515/sgem-2015-0006.
- MAŁKOWSKI P. 2013 - Rola stref spękań w ocenie stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla. Wydawnictwa AGH, seria: Rozprawy – monografie, nr 265, Kraków.
- MAŁKOWSKI P. 2017 - Zarządzanie monitoringiem zagrożeń w górnictwie. Inżynieria Mineralna (Journal of the Polish Mineral Engineering Society), July-December 2017, s. 215-223, DOI: 10.29227/IM-2017-02-24 (in Polish).
- MAŁKOWSKI P., MAJCHERCZYK T., NIEDBALSKI Z. 2017 - Zastosowanie kotwi dla rozrzedzenia odrzwi obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych. „Przeгляд Górniczy”, nr 7, s. 12-22.
- MAŁKOWSKI P., OSTROWSKI Ł., BACHANEK P. 2018 - Stateczność wyrobiska korytarzowego drążonego w strefie uskokowej w świetle badań kopalnianych i numerycznych. „Przeгляд Górniczy”, nr 2, s. 17-28.
- MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2019 - Monitoring wyrobisk korytarzowych jako weryfikacja przyjętego schematu obudowy. „Przeгляд Górniczy”, nr 10, s. 53-65.
- NIEDBALSKI Z. 2014 - Prognoza utrzymania funkcjonalności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, seria: Rozprawy – monografie, nr 300, Kraków.
- OSTROWSKI Ł., MAŁKOWSKI P. 2016 - Wpływ zawodnienia na wypiętrzanie skał spągowych wyrobiska korytarzowego. „Przeгляд Górniczy”, nr 3, s. 28-38.
- PRUSEK S. 2008a - Metody prognozowania deformacji chodników przyścianowych w strefach wpływu eksploatacji z zawałem stropu. Wydawnictwa GIG.
- PRUSEK S. 2008b - Możliwości monitoringu obudowy wyrobisk korytarzowych. Miesięcznik WUG, nr 9, s. 14-18.
- PRUSEK S. 2004 - Obliczenie zaciskania oraz obciążenia obudowy chodników, zlokalizowanych w polu eksploatacji zawałowej. „Przeгляд Górniczy”, nr 7-8, s. 11-16.
- SHEN B. 2014 - Coal mine roadway stability in soft rock: A case study. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6), pp. 2225-2238, DOI: 10.1007/s00603-013-0528-y.
- SHEN B., POULSEN B., KELLY M., NEMCIK J., HANSON C.: Roadway span stability in thick seam mining – field monitoring and numerical investigation at Moranbah North mine. In: Materials of the 2003 Coal Operators' Conference, Carlton, Victoria, Australia: University of Wollongong, The AusIMM Illawarra Branch, pp. 173-184.
- SINGH R., SINGH A.K., MANDAL P.K., SINGH M.K., SINHA A. 2004 - Instrumentation and monitoring of strata movement during underground mining of coal. Minetech, 25(5), pp. 12-26.
- WACLAWIK P., KUKUTSCH R., KONICEK P., PTACEK J., KAJZAR V., NEMCIK J., STAS L., SOUCEK K., VAVRO M. 2017 - Stress State Monitoring in the Surroundings of the Roadway Ahead of Longwall Mining. Procedia Engineering, Vol. 191, pp. 560-567.
- WALENTEK A. 2019 - Analysis of the applicability of the convergence control method for gateroad design based on conducted underground investigations. Archives of Mining Sciences, Vol. 64, Issue 4, pp. 765-783.

WALENTEK A. 2018 - Empiryczna i numeryczna metoda prognozy zasięgu strefy spękań górotworu wokół wyrobiska przyścianowego przed frontem ściany. „Przeгляд Górnicy”, nr 2, s. 50-59.

WALENTEK A., LUBOSIK Z. 2017 - Optymalizacja obudowy wyrobisk przyścianowych zlokalizowanych na głębokości większej niż 1000 m. „Przeгляд Górnicy”, nr 2, s. 76-84.

XIE Z., ZHANG N., QIAN D., HAN C., AN Y., WANG Y. 2018 - Rapid excavation and stability control of deep roadways for an underground coal mine with high production in Inner Mongolia. Sustainability, 10(4), no 1160, DOI: 10.3390/su10041160.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2021

Artykuł akceptowano do druku – 15.08.2021



Szanowni Państwo

Uprzejmie informujemy, że czasopismo „Przeгляд Górnicy (ISSN: 0033-216X)” pozytywnie przeszło proces oceny i jest indeksowane w bazie **ICI Journals Master List za rok 2019**.

Na podstawie weryfikacji informacji z ankiety ewaluacyjnej oraz analizie wydań czasopisma z 2019 roku, wyznaczona została wartość wskaźnika *Index Copernicus Value* (ICV) za rok 2019.

ICV 2019 = 70.34

Wyznaczona ocena jest widoczna na liście czasopism **ICI Journals Master List 2019**

<https://journals.indexcopernicus.com/search/formjml> oraz w Paszporcie Państwa czasopisma

<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=28377&lang=pl>

Jednocześnie zapraszamy Państwa do skorzystania z dodatkowych możliwości wynikających z indeksacji czasopisma na liście **ICI Journals Master List 2019**.

Z poważaniem,

Zespół Ewaluacji Czasopism Naukowych

Index Copernicus International

www.indexcopernicus.com