

Określanie naprężeń pierwotnych w górotworze metodami hydraulicznymi – możliwości i zastosowania

Hydraulic methods of stress state determination in rock mass – possibilities and applications



Dr hab. inż. Janusz Makówka
prof. GIG*)



Dr inż. Jacek Myszkowski*)



Mgr inż. Grzegorz Merta*)

Treść: W artykule przedstawiono podstawy określania naprężeń pierwotnych w górotworze metodą hydroszczelinowania, w tym jej wersję najczęściej stosowaną w podziemnych kopalniach – metodę *microfrac*. Przedstawiono także opracowaną w Głównym Instytucie Górnictwa metodę NUHS wykorzystującą ukierunkowane hydroszczelinowanie skał. Metoda ta, w odróżnieniu do metody *microfrac*, umożliwiła określenie pełnego tensora naprężenia. W artykule porządkiem przedstawiono przykład połączonego zastosowania obu metod w badaniach dla LW Bogdanka.

Abstract: The article presents the basics of determination of primary stresses in rock mass by hydro-fracturing, including its version most commonly used in underground mines - the *microfrac* method. NUHS method is also presented. The method, developed at Central Mining Institute, uses directed hydro-fracturing of rocks. This method, in contrast to the *microfrac* method, enables determination of the full stress tensor. The article presents an example of a combined application of both methods in research for LW Bogdanka.

Słowa kluczowe:

naprężenia, pomiar, hydroszczelinowanie, naprężenia główne, tensor naprężeń

Keywords:

stress, measurement, hydrofracturing, principal stresses, stress tensor

1. Wprowadzenie

Uwzględnianie wartości składowych tensora naprężeń w górotworze jest jednym ze sposobów poprawy skuteczności, efektywności i bezpieczeństwa prowadzenia robót górniczych. Wyznaczanie takich wartości jest przedsięwzięciem trudnym, złożonym i kosztownym. Z tego powodu w europejskim górnictwie jest wykonywane sporadycznie. Szerzej jest to realizowane w praktyce górniczej poza Europą (Australia, USA, Kanada, RPA), natomiast w Polsce znane są pojedyncze próby w kopalniach rud miedzi i węgla kamiennego. W kopalniach rud miedzi LGOM pomiary zapoczątkowały rozwój „górnictwa kierunkowego” (Goszcz 1999, Butra et al. 2011), a więc takiego prowadzenia eksploatacji, by kierunek głównych wyrobisk udostępniających i innych, o długim okresie utrzymania, był zgodny z większym naprężeniem poziomym. W górnictwie węglowym pomiary takie wykonywano w związku z wdrażaniem samodzielnej obudowy kotwowej w jednej ze spółek węglowych.

Występowanie wysokich wartości naprężeń poziomych, a dokładniej dużej niesymetrii tych naprężeń, może prowadzić do szeregu niepożądanych zjawisk, takich jak:

- zawały mocnych skał stropowych bez ewidentnej przyczyny,
- wyłamywanie stropów do wyrobisk kopalnianych (rys. 1),
- wypiętrzanie spągów,
- odpajanie się fragmentów ociosów,
- niszczenie obudowy górniczej.

Metody pomiarów deformacji skał, niezbędne dla wyznaczania naprężeń, opierają się przede wszystkim na technikach tensometrycznych. Znane są również metody bezpośrednie, wykorzystujące techniki hydraulicznego szczelinowania, w tym szczelinowania ukierunkowanego.

Wyznaczanie wartości tensora naprężeń, szczególnie w wariacie odnoszącym się do wartości pierwotnych (niezaburzonych działalnością górniczą) posiada walory naukowe. Istnieją międzynarodowe organizacje i fora zajmujące się tą problematyką, przede wszystkim w odniesieniu do zagadnień geotektoniki globalnej i lokalnej, ale także stateczności wyrobisk i budowli podziemnych.

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice



Rys. 1. Zawal stropu bezpośredniego na skutek działania znacznych obciążeń poziomych w kopalni White Pine, USA (Butra et al. 2011)

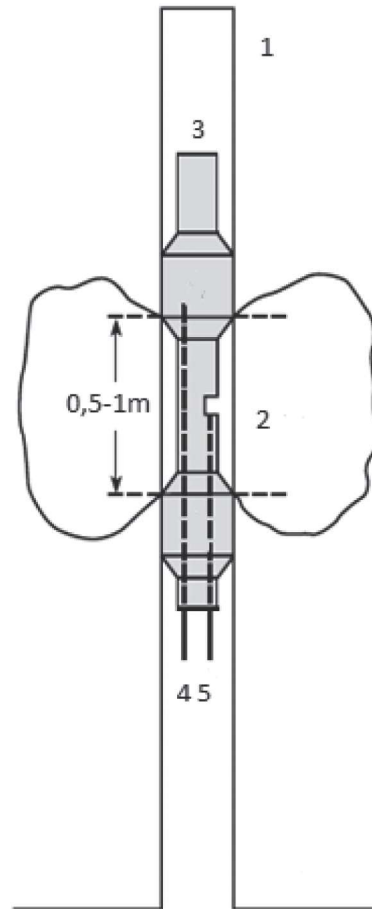
Fig. 1. Direct roof rocks collapse to significant horizontal loads in the White Pine mine (Butra et al. 2011)

Główny Instytut Górnictwa posiada stale rozwijane kompetencje w zakresie pomiaru naprężeń. Opracowana w GIG metoda określania naprężeń w górotworze metodą ukierunkowanego hydroszczelinowania skał NUHS (Makówka 2015) pozwoliła na zgromadzenie pewnego zasobu sprzętu (pompa, packery, aparatura rejestrująca) do prowadzenia badań tą metodą oraz niezbędną wiedzę i doświadczenie. Ten sam zestaw aparatury pozwala na wykonanie pomiaru metodą *microfrac*, uznawaną przez Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał (ISRM) jako zalecaną metodę standardową (Haimson, Cornet 2003). W badaniach dla oceny stanu górotworu i inspekcji otworów wiertniczych pomocna jest kamera endoskopowa.

2. Metoda hydroszczelinowania z pojedynczego otworu wiertniczego – *microfrac*

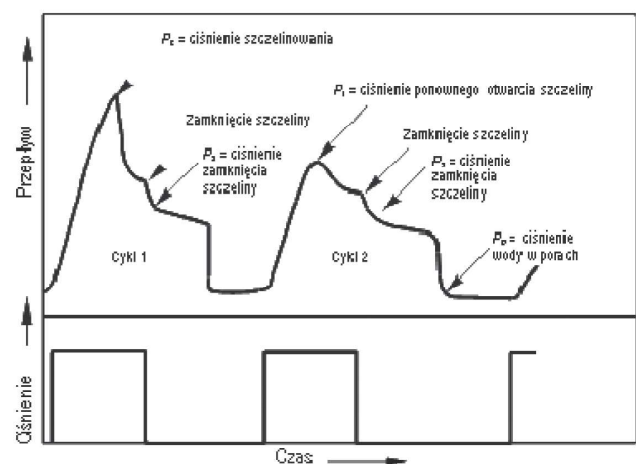
Metoda hydroszczelinowania jako sposób określania naprężeń poziomych (a dokładniej – naprężeń działających w kierunku prostopadłym do otworu wiertniczego) jest jedną z bardziej popularnych i szeroko stosowanych w zastosowaniach z otworów wykonywanych z powierzchni. Istnieje też jego wersja wykonywana z otworów wierconych z podziemnych wyrobisk górniczych, określaną metodą *microfrac* (Haimson, Cornet 2003).

Idea, przedstawiona na rysunku 2, polega na wykonaniu otworu wiertniczego w kierunku zgodnym z kierunkiem największego naprężenia głównego, wprowadzeniu głowicy uszczelniającej (packera) i z jego pomocą odizolowania odpowiednio długiego odcinka otworu i zatłoczeniu wody o takim ciśnieniu, by wytworzyć w nim pęknięcie – szczelinę, której płaszczyzna jest prostopadła do mniejszego naprężenia poziomego, a tym samym jest zgodna z kierunkiem większego naprężenia poziomego (Amadei and Stephanson 1997). Następnie, przy równoczesnej rejestracji zmian ciśnienia tłoczzonej wody i jej prędkości przepływu, podczas zmniejszania ciśnienia, aż do zamknięcia szczeliny i zaniknięcia przepływu wody, możliwe jest określenie zamknięcia szczeliny P_c . Powtarzając cykl zwiększania i zmniejszania ciśnienia można określić ciśnienie ponownego otwarcia szczeliny P_o . Rys. 3 przedstawia uproszczony zapis dwóch cykli tłoczenia.



Rys. 2. Hydroszczelinowanie w otworze pionowym metodą *microfrac*. 1 - otwór wiertniczy, 2 - wytworzona szczelina, 3 - packer (głowica uszczelniająca), 4 - obwód rozpierania packera, 5 - obwód tłoczenia

Fig. 2. Hydrofracturing in the vertical hole using the *microfrac* method. 1 - borehole, 2 - fracture produced, 3 - packer (sealing tool), 4 - packer inflation line, 5 - pumping line



Rys. 3. Uproszczony wykres ciśnienia i przepływu w procesie hydroszczelinowania z dwoma cyklami pompowania

Fig. 3. Simplified chart of pressure and flow in the hydrofracturing proces with two pumping cycles

3. Metoda określania naprężeń z użyciem ukierunkowanego hydroszczelinowania NUHS

Metodą stanowiącą rozwinięcie metody *microfrac* jest metoda określania naprężeń z wykorzystaniem ukierunkowanego hydroszczelinowania. Jest ona oparta o metodę ukierunkowanego hydroszczelinowania skał (UHS), znaną w polskim górnictwie od połowy lat 90 jako skuteczna metoda profilaktyki tąpniowej (Konopko i in., 1997, Myszkowski i in., 2019). Umożliwia ona określenie składowych naprężeń w kilku kierunkach wyznaczonych przez kierunek wykonanych otworów wiertniczych i na tej podstawie odtworzenie pełnego tensora stanu naprężenia (lub alternatywnie kierunki i wartości naprężeń głównych). Metoda polega na wykonaniu 6 do 9 otworów wiertniczych ze szczeliną zarodnikową oraz następnie:

- umieszczeniu w nich głowicy uszczelniającej (packera) z użyciem specjalnych wysokociśnieniowych żerdzi,
- podłączeniu żerdzi i packera do pompy wysokiego ciśnienia.
- podaniu wysokiego ciśnienia przez głowicę uszczelniającą do górotworu i dokonaniu hermetyzacji otworu,
- podaniu wysokiego ciśnienia na odizolowanym odcinku otworu w miejscu wykonanej szczeliny zarodnikowej,
- kilkukrotnym powtórzeniu cyklu zmniejszania i zwiększania ciśnienia w celu obserwacji ciśnienia otwarcia i zamknięcia szczeliny.

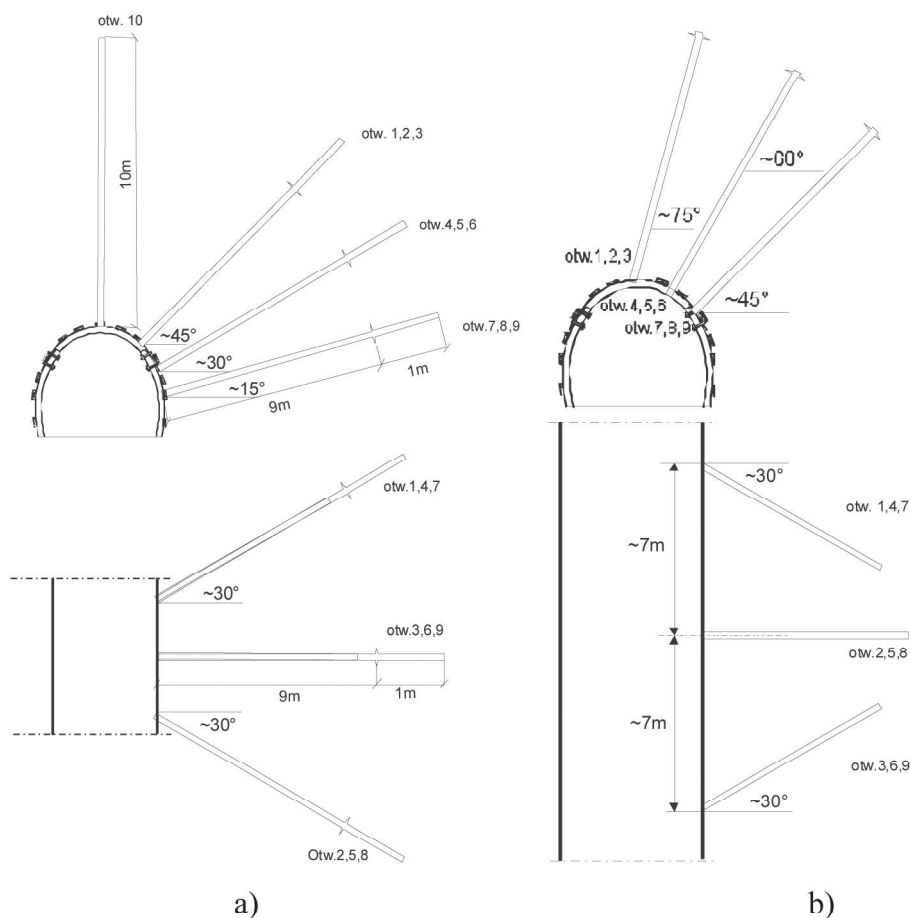
Szczególnie istotne jest, aby stanowisko pomiarowe znajdowało się w wyrobisku chodnikowym w otoczeniu skał niespękanych i niepoddanych bezpośrednim oddziaływaniom eksploatacyjnym. Po wstępnym wytypowaniu lokalizacji sta-

nowiska pomiarowego, na przyszłym stanowisku wykonuje się pionowy testowy otwór wiertniczy o długości 10÷12 m. W otworze takim kamerą endoskopową sprawdzany jest stan górotworu oraz określany profil geologiczny nadległego górotworu

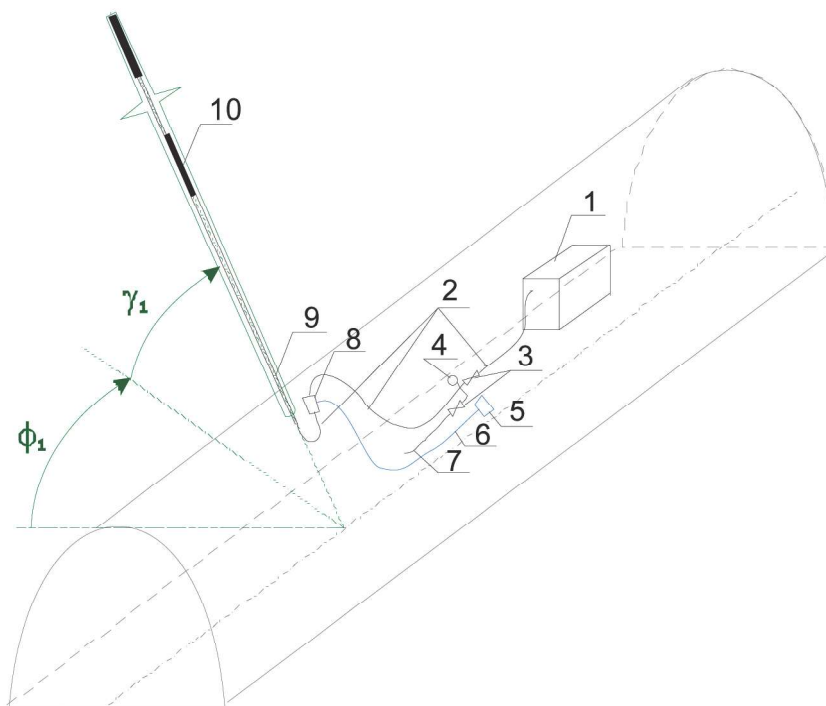
Po stwierdzeniu w otworze testowym odpowiedniej jakości górotworu, na stanowisku pomiarowym wykonywana jest seria otworów badawczych ze szczelinami zarodnikowymi. Seria taka powinna składać się z minimum pięciu otworów. W praktyce korzystnie jest wykonanie większej ich ilości, zwykle zakłada się dziewięć otworów na jedną serię pomiarową. Otwory nadmiarowe służą do zapewnienia zapasu na wypadek natrafienia na lokalne zaburzenia budowy górotworu, złej jakości szczelin zarodnikowych, niekorzystnego przebiegu procesu szczelinowania czy błędów w zapisie przebiegu tego procesu.

Możliwe są dwa układy otworów na stanowisku badawczym:

- wachlarzowy – rys. 4a, w którym otwory wykonane są rozbieżnie względem siebie, przeważnie z jednego stanowiska wiertniczego; układ taki jest najczęściej stosowany jako korzystniejszy i mniej kłopotliwy ze względów ruchowych;
- zbieżny „na wrąb” – rys. 4b, w którym otwory wykonywane są z trzech blisko siebie leżących (w odległości ok. 7 m) stanowisk wiertniczych w grupach po trzy otwory o jednakowym kącie odchylenia poziomego, lecz o różnych kątach podniesienia; układ taki zapewnia objęcie testem mniejszej objętości górotworu, lecz równocześnie prowadzi do łączenia się wytworzonych nieciągłości w mniejszej odległości od otworów.



Rys. 4. Układy otworów badawczych do NUHS: a) wachlarzowy, b) zbieżny
Fig. 4. Systems of test boreholes for NUHS: a) fan-shaped, b) convergent



Rys. 5. Układ pomiarowy do N-UHS 1- agregat pompowy, 2- węże wysokociśnieniowe, 3- zawory, 4- manometr, 5- rejestrator, 6- przewód sygnałowy, 7- wąż odpływowy, 8- czujniki ciśnienia i przepływu, 9- żerdź/przewód wysokociśnieniowy, 10- głowica uszczelniająca

Fig. 5. Measuring system for N-UHS 1- pump, 2- high-pressure hoses, 3- valves, 4- manometer, 5- recorder, 6- signal wires, 7- drain hose, 8- pressure and flow sensors, 9- high-pressure rods, 10- packer

Uproszczony schemat połączeniowy przedstawia rys. 5. Głowica w zależności od zastosowanego typu może być wkładana do otworu z użyciem specjalnych szczelnych żerdzi lub sztywnego węża gumowego. Do końcówki węża lub żerdzi, jak najbliżej wylotu otworu, należy podłączyć przetworniki ciśnienia i przetwornik przepływu, a w odległości zapewniającej bezpieczeństwo obsługi – układ kontrolno-pomiarowy (rys. 6) oraz przyłączyć źródła wysokiego ciśnienia.

Podobnie jak w metodzie *microfrac*, pomiaru dokonuje się poprzez kontrolowane zwiększanie i zmniejszanie ciśnienia

w układzie hydraulicznym przy jednoczesnym współbieżnym rejestrowaniu zmian ciśnienia i prędkości przepływu tłoczonyj cieczy – patrz rys. 3.

Po wykonaniu szczelinowania wskazane jest dokonanie ponownego sprawdzenia otworów kamerą endoskopową. W sprzyjających okolicznościach, jeśli sprawdzenie zostanie wykonane natychmiast po szczelinowaniu, możliwe będzie stwierdzenie wytworzenia nieciągłości poprzez obserwowanie wycieku cieczy.



Rys. 6. Układ kontrolno-pomiarowy do NUHS po podłączeniu na poligonie badawczym

Fig. 6. Control and measurement system for NUHS connected in the test site

Połączone zastosowanie obu wymienionych metod pozwala na szybkie i wiarygodne określenie lokalnego stanu naprężenia w górotworze. Poniżej przedstawiono przykład jednego z takich pomiarów.

4. Określenie naprężeń w Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

Badania metodą *microfrac* w Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. wykonano w pokładzie 385/2, w przekopie N2. Wyrobisko to wykonano w obudowie ŁPZS 10-V36. W sąsiedztwie stanowiska badawczego znajdują się zroby eksploatacji dokonanej w latach 2016-2017. Odległości do tych zrobów wynoszą: dla ściany 2/II/385 - odległość około 180 m na północny wschód, oraz dla ściany 1/I/385 - około 310 m na północny zachód.

W otworze pionowym przeprowadzono inspekcję kamerą endoskopową. W jej wyniku stwierdzono, że górotwór w otoczeniu pokładu 385/2 w tym rejonie zbudowany jest ze skał mułowcowych, charakteryzuje się wysoką podatnością na wilgoć i objawia się ich wysoką rozmakalnością, przy której nie występuje typowy efekt pęknięcia podczas szczelinowania, objawiający się gwałtownym spadkiem ciśnienia przy niezmiennym przepływie. Tego typu skały charakteryzują się znacząco plastycznością, a więc zdolnością do zmiany kształtu pod działaniem sił zewnętrznych bez rozerwania jej ciągłości i do zachowania tego kształtu po usunięciu działania tych sił.

4.1. Pomiar metodą *microfrac*

Pomiar metodą *microfrac* wykonano w otworze pionowym nr 0 (rys. 7), na dwóch głębokościach: 6 i 8 metrów od wlotu otworu.

Przebieg procesu hydroszczelinowania w otworze 0 przedstawiony jest na rysunku 8. Przedstawiono na nim wykresy zmian prędkości przepływu (linia niebieska), ciśnienie w packerze (linia zielona) oraz ciśnienie tłoczenia (linia czer-

wona. Wyróżniono na nim charakterystyczne fazy procesu hydroszczelinowania:

- 1 - napełnianie i odpowietrzanie układu tłoczenia;
- 2 - napełnianie układu rozpierania packera;
- 3 - rozpieranie packera;
- 4 - tłoczenie wody do odciętej części otworu wiertniczego i wytworzenie szczeliny;
- 5, 6 i 7 - kolejne cykle tłoczenia wody z zaznaczonymi ciśnieniami zamknięcia szczeliny P_r .

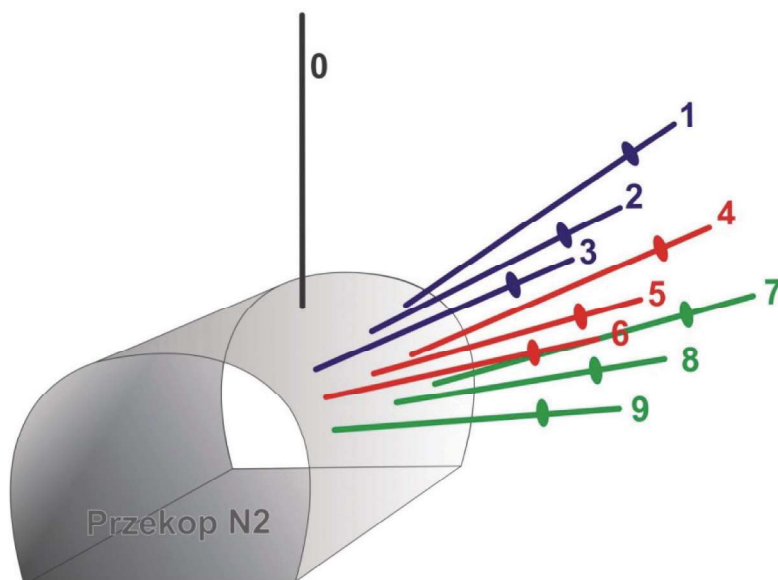
Podobny przebieg miało szczelinowanie w tym samym otworze na głębokości 6 m. Zapis przebiegu zmian ciśnienia i przepływu cieczy szczelinującej przedstawia rys. 9.

Wartości zaobserwowanych ciśnień szczelinowania P_s , jak i ciśnień zamknięcia szczeliny w kolejnych cyklach zawiera tabela 1. Przebieg hydroszczelinowania w otworze 0 zarówno na głębokości 8 m, jak i 6 m charakteryzował się z jednej strony dobrą powtarzalnością, o czym świadczy niska wartość odchylenia standardowego, z drugiej strony natomiast brakiem wyraźnej fazy wytworzenia szczeliny, która zwykle odznacza się pewnym spadkiem ciśnienia cieczy szczelinującej w momencie zaobserwowania przepływu. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest z jednej strony - niska wytrzymałość na rozciąganie skały, w której prowadzono szczelinowanie, a z drugiej - wysoki wydatek pompy zasilającej układ pomiarowy. Z wymienionych powodów podane wartości P_s nie mogą być identyfikowane z ciśnieniem wytworzenia szczeliny.

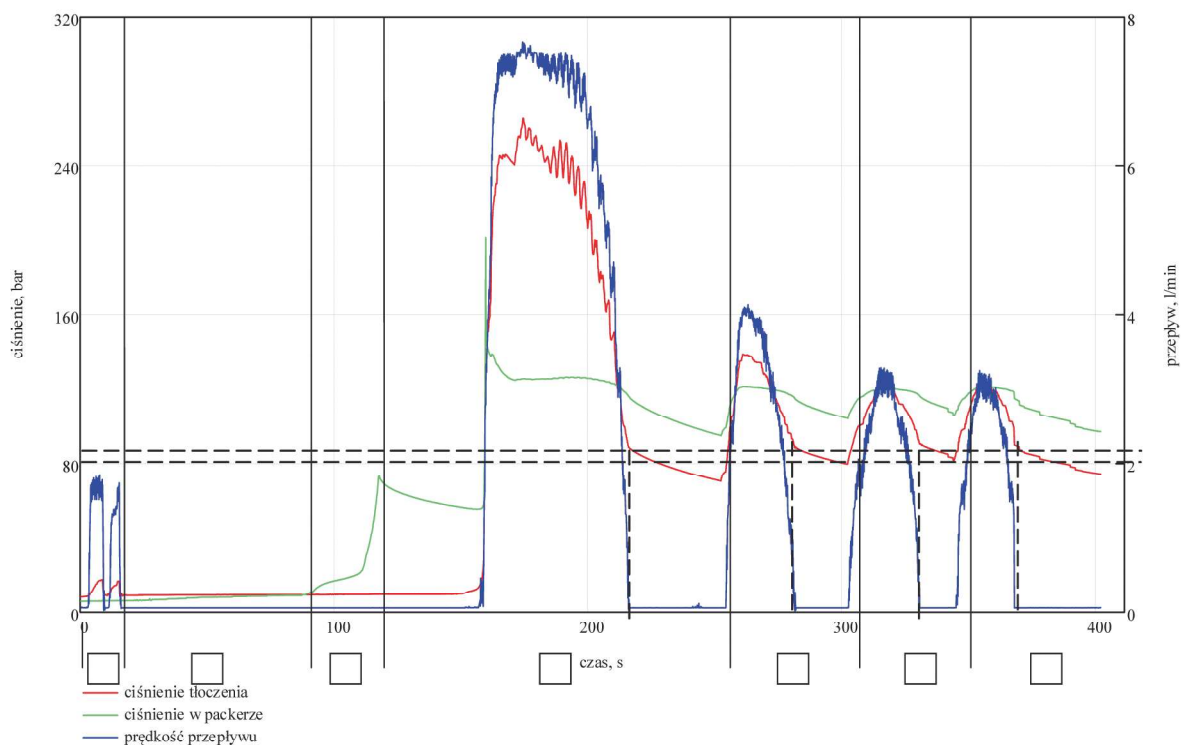
Inspekcja otworu kamerą endoskopową po wykonanych badaniach wykazała, że na głębokości 8 m nie zaobserwowano szczelin czy spękań skały, w której wykonany był otwór wiertniczy.

Lepsze efekty szczelinowania zaobserwowano na 6 metrze, gdzie po wykonanym szczelinowaniu pozostała szczelina, którą pokazano na rys. 10.

Interpretacja kształtu i orientacji powstałej szczeliny pozwoliła odtworzyć jej kształt i orientację w przestrzeni (rys. 1). Jeśli pominiąc niejednorodność płaszczyzny szczeliny oraz

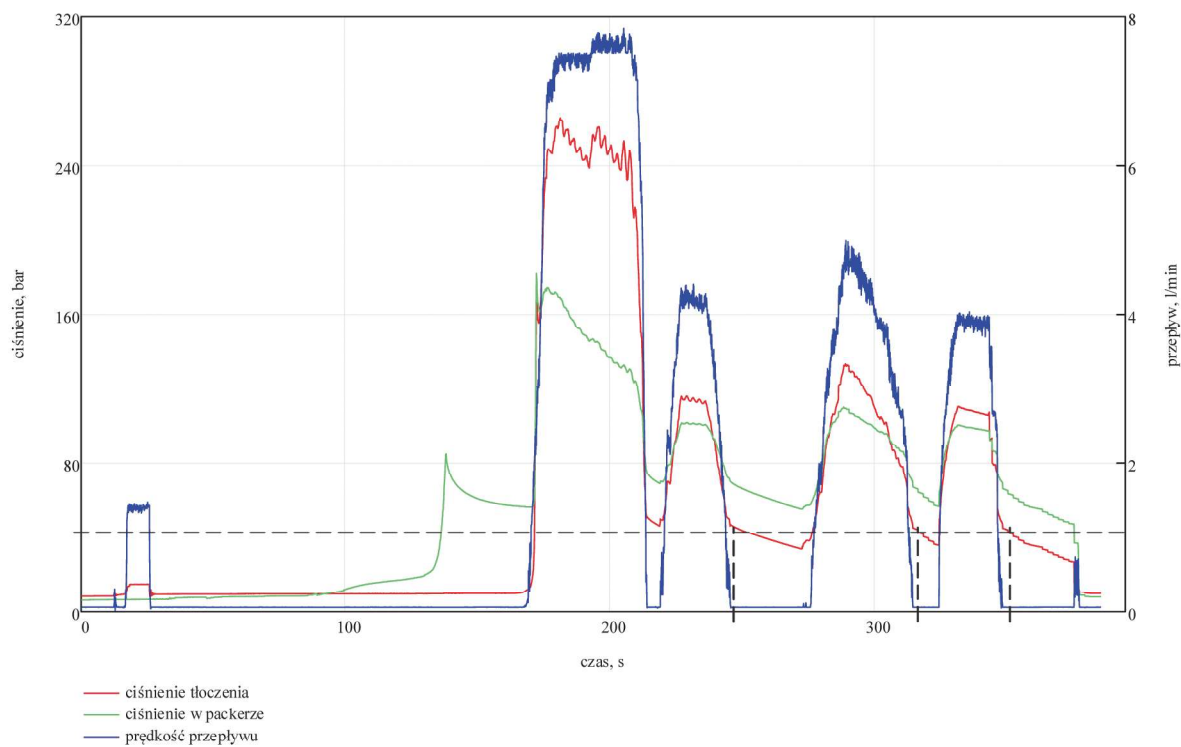


Rys. 7. Schemat wykonania otworów do badań naprężeń w przekopie N2
Fig. 7. Diagram of execution of holes for stress testing in the N2 drift



Rys. 8. Zapis zmian ciśnienia i przepływu cieczy szczelinującej podczas hydroszczelinowania w otworze 0 na głębokości 8 m

Fig. 8. Pressure and flow chart during hydro-fracturing in hole 0 at a depth of 8 m



Rys. 9. Zapis zmian ciśnienia i przepływu cieczy szczelinującej podczas hydroszczelinowania w otworze 0 na głębokości 6 m

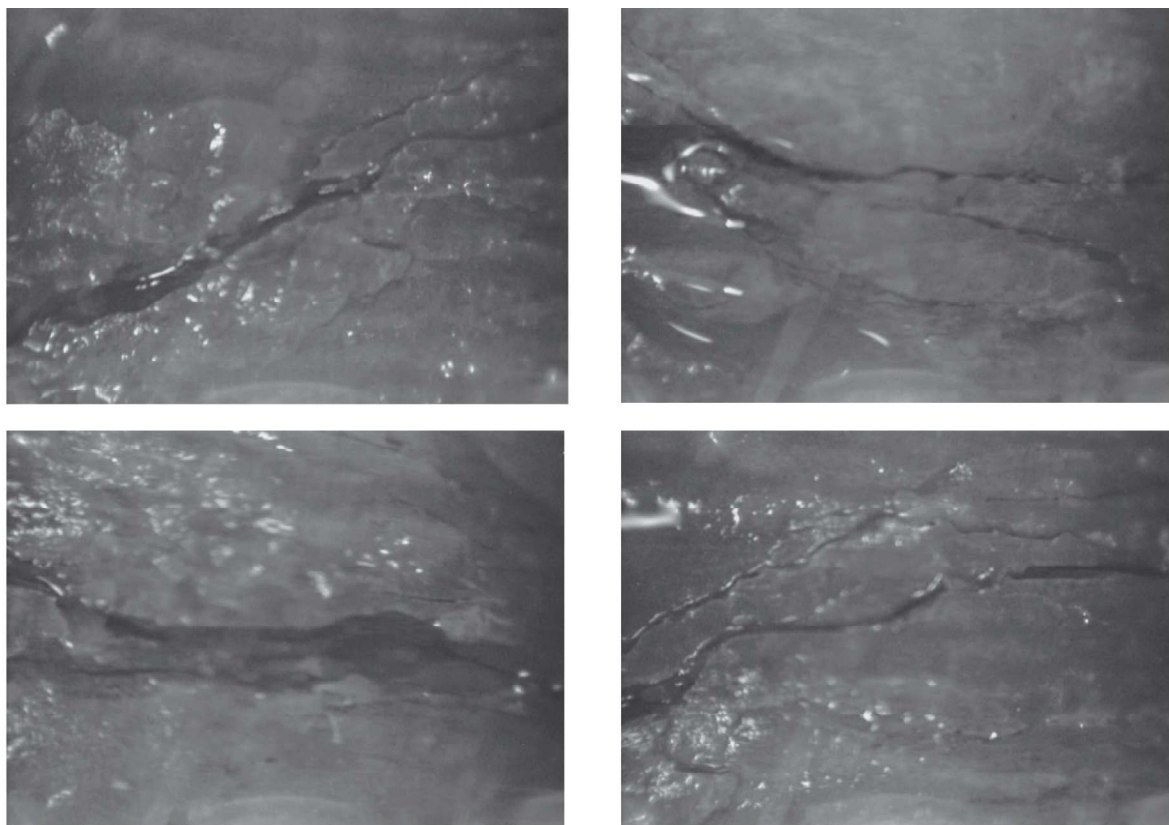
Fig. 9. Pressure and flow chart during hydro-fracturing in hole 0 at a depth of 6 m

Tabela 1. Wartości ciśnień szczelinowania P_s i ciśnień zamknięcia szczelin P_r zarejestrowanych w trakcie badań *microfrac* w otworze 0

Table 1. Values of fracking pressures P_s and closing fracture pressures P_r recorded during the *microfrac* test in borehole 0

Głębokość pomiaru	P_s	P_{r1}	P_{r2}	P_{r3}	P_{r4}	wartość średnia $P_{r\bar{s}}$	odchylenie standardowe P_r
m	bar						
8	268*	90	90	92	92	91,0	1,00
6	266*	50	48	46	50	48,5	1,66

* wartość szczytowa ciśnienia w pierwszym cyklu tłoczenia; nie może być identyfikowana z ciśnieniem wytworzenia szczeliny



Rys. 10. Szczelina wytworzona w otworze nr 0 na głębokości 6 m po wykonanych badaniach metodą *microfrac*
Fig. 10. A fracture formed in the No. 0 hole at a depth of 6 m after the *microfrac* tests

spękania poboczne, z dużą dozą prawdopodobieństwa można określić, że wytworzona szczelina przecinała otwór 0 w płaszczyźnie nachylonej do poziomu o około 36-38°, a jej upad ma kierunek zgodny z osią przekopu N2, czyli 14° na NNW.

4.2. Pomiary metodą NUHS

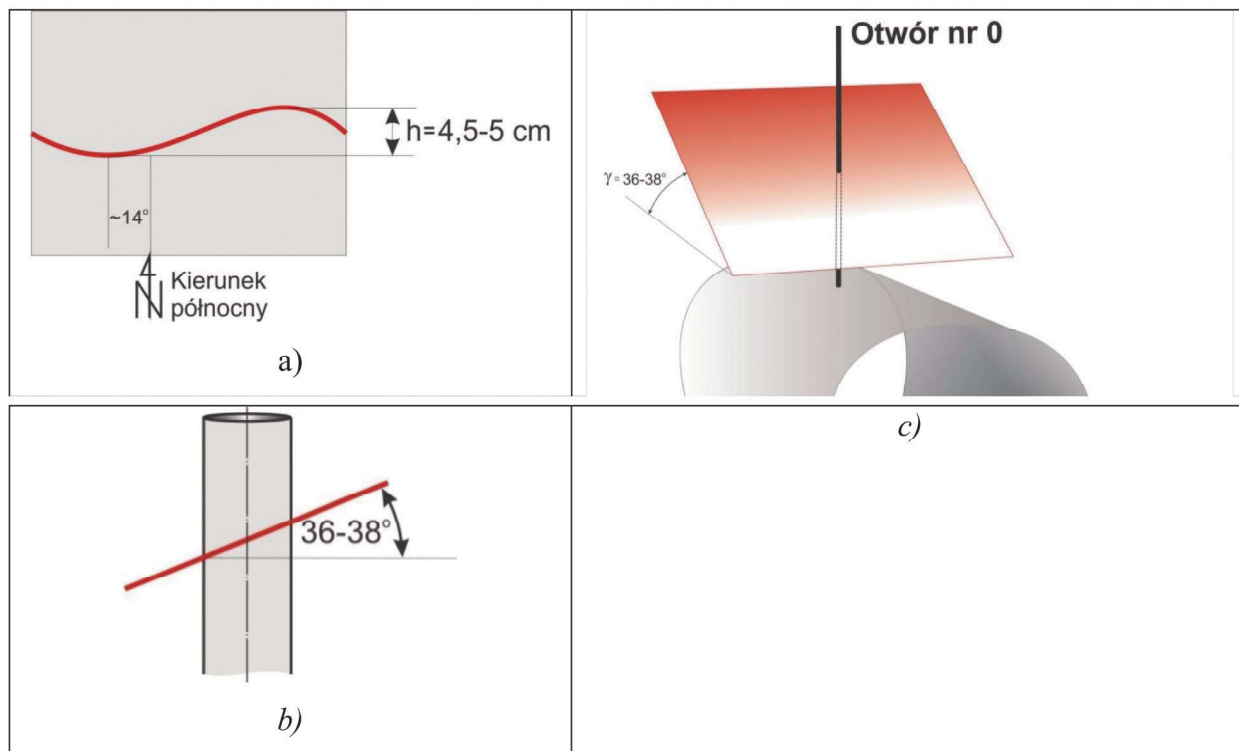
W następnej kolejności wykonano hydroszczelinowanie w 7 z 9 przygotowanych otworów w układzie przedstawionym na rysunku 7. Otwór nr 7 został pominięty, gdyż stwierdzono endoskopowo występowanie spękań w sąsiedztwie szczeliny zarodnikowej, zaś otwór nr 9 był niedrożny na skutek przemieszczenia się odłamków skalnych do otworu wiertniczego w niewielkiej odległości od jego wlotu. Przykładowy zapis przebiegów ciśnienia i przepływu przedstawiono na rysunku 12.

Z wykresów dokonano odczytu wartości ciśnienia zamknięcia wytworzonej szczeliny P_r , odpowiadającej temu ciśnieniu tłoczenia, przy którym zanikał przepływ cieczy do otworu. Odczytano tyle wartości, ile cykli szczelinowania przeprowadzono. Odczytano również wartości ciśnienia szczelinowania P_s , które odpowiada ciśnieniu wytworzenia

szczeliny. Wartości te zawarto w tabeli 2. Podobnie jak w przypadku pomiaru metodą *microfrac*, również w przypadku badań metodą NUHS nie zidentyfikowano wyraźnej fazy spadku ciśnienia po zainicjowaniu przepływu cieczy w pierwszym cyklu tłoczenia. Taki przebieg tej fazy pomiaru mógł mieć przyczynę z jednej strony w małej wytrzymałości skał na rozciąganie, a z drugiej - w dużej wydajności pompy stanowiącej źródło cieczy szczelinującej. Tym niemniej wartość ciśnienia szczelinowania nie jest istotna z punktu widzenia określenia wartości składowych naprężeń.

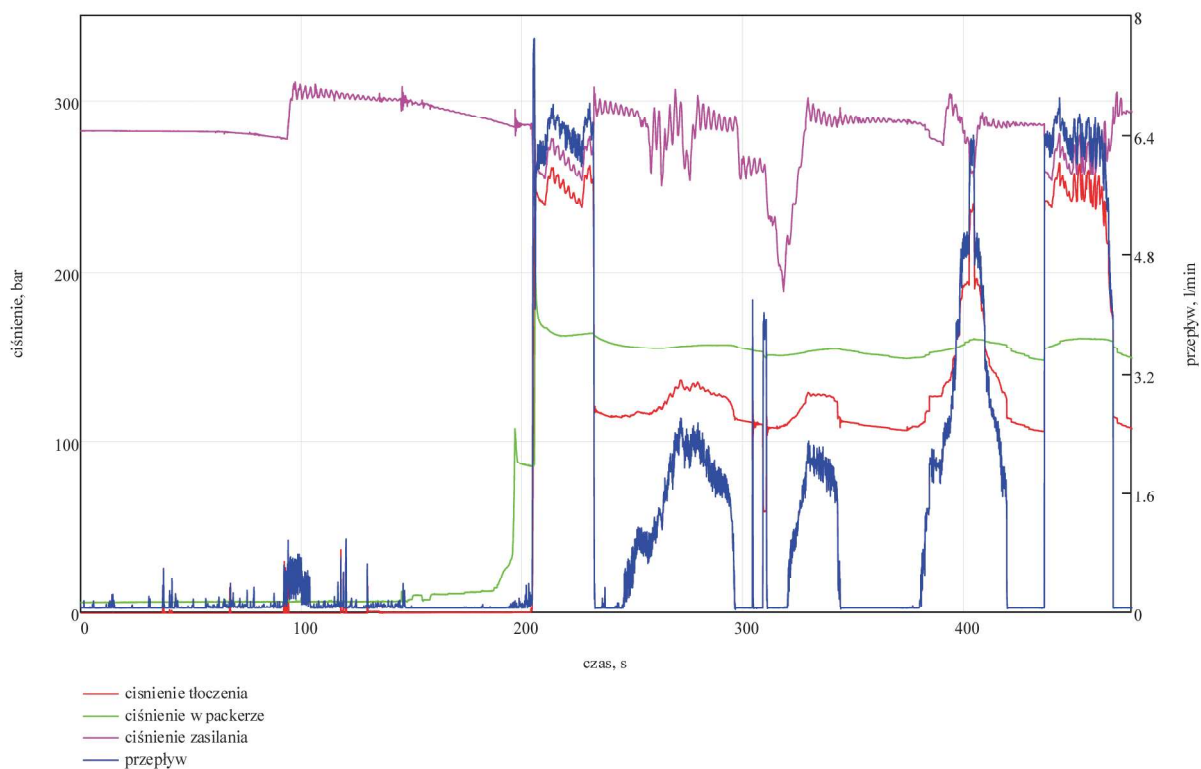
Podane wartości kątów zostały zmierzone następująco: w stosunku do poziomu dla kąta podniesienia, oraz w stosunku do osi przekopu N2, w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara dla kąta odchylenia.

Tabela 3 przedstawia parametry statystyczne odczytów ciśnienia P_r . Uzyskane wartości ciśnień zamknięcia szczeliny cechowały się dużą spójnością, o czym świadczą niskie wartości odchylenia standardowego. Wyjątek stanowią wartości dla otworu nr 6. Otwór ten w czasie inspekcji endoskopowej budził wątpliwości ze względu na podejrzenie występowania nieciągłości przed podjęciem hydroszczelinowania.



Rys. 11. Orientacja szczeliny wytworzonej w otworze 0: a) linearyzacja wytworzonej szczeliny; b) nachylenie płaszczyzny przecinającej otwór; c) wizualizacja orientacji wytworzonej szczeliny

Fig. 11. Orientation of the fracture created in the hole 0: a) linearization of the created fracture; b) the slope of the plane through the borehole; c) visualization of the orientation of the created fracture



Rys. 12. Przebieg pomiaru metodą NUHS w jednym z otworów
Fig. 12. The course of NUHS measurement in one of the holes

Tabela 2. Parametry otworów wiertniczych i wartości ciśnień charakterystycznych pomiaru metodą NUHS na stanowisku w przekopie N2 w LW „Bogdanka”

Table 2. Parameters of boreholes and characteristic pressure values measured by the NUHS method at the station in the N2 crosscut in LW Bogdanka

Nr otw.	Kąt podniesienia	Kąt odchylenia	Ps	Pr1	Pr2	Pr3	Pr4	Pr5	Pr6	Pr7
	stopnie									
1	46	140	298	106	99	99	94	–	–	–
2	62	90	264	120	114	114	111	116	–	–
3	55	43	264	98	104,5	100	100	98	109	105
4	28	132	280	112	104	104	104	–	–	–
5	49	90	brak rej.	117	120	130	–	–	–	–
6	45	47	310	138	138	98	103	–	–	–
7	Otwór silnie splekany									
8	Otwór niedrożny									
9	25	47	290	122	120	126	126	122	–	–

Tabela 3. Parametry statystyczne określeń wartości zamknięcia szczeliny

Table 3. Statistical parameters of the values for closing the fracture

Nr otw.	Kąt podniesienia	Kąt odchylenia	P _r sr	P _r min	P _r max	Odchylenie standardowe P _r
	deg	deg				
1	46	140	99.5	94.0	106.0	4.3
2	62	90	115.0	111.0	120.0	3.0
3	55	43	102.1	98.0	109.0	3.9
4	28	132	106.0	104.0	112.0	3.5
5	49	90	122.3	117.0	130.0	5.6
6	45	47	119.3	98.0	138.0	18.8
9	25	47	123.2	120.0	126.0	2.4

W celu określenia stanu naprężenia wyrażonego przez naprężenia główne oraz kąty określające ich orientację względem przyjętego lokalnego układu odniesienia, konieczne jest podanie pięciu niezależnie pomierzonych danych $P_s^{O1}, P_s^{O2}, \dots, P_s^{O5}$ oraz odpowiednich kątów określających orientację otworów wiertniczych, z których wykonano pomiar wymienionych ciśnień g_n i f_n :

$$P_s^{O1} = [\cos^2(\phi_1 - \phi)\sigma_1 + \sin^2(\phi_1 - \phi)\sigma_2] \cos^2(\gamma_1 - \gamma) + \sin^2(\gamma_1 - \gamma)\sigma_3$$

$$P_s^{O2} = [\cos^2(\phi_2 - \phi)\sigma_1 + \sin^2(\phi_2 - \phi)\sigma_2] \cos^2(\gamma_2 - \gamma) + \sin^2(\gamma_2 - \gamma)\sigma_3$$

$$P_s^{O3} = [\cos^2(\phi_3 - \phi)\sigma_1 + \sin^2(\phi_3 - \phi)\sigma_2] \cos^2(\gamma_3 - \gamma) + \sin^2(\gamma_3 - \gamma)\sigma_3$$

$$P_s^{O4} = [\cos^2(\phi_4 - \phi)\sigma_1 + \sin^2(\phi_4 - \phi)\sigma_2] \cos^2(\gamma_4 - \gamma) + \sin^2(\gamma_4 - \gamma)\sigma_3$$

$$P_s^{O5} = [\cos^2(\phi_5 - \phi)\sigma_1 + \sin^2(\phi_5 - \phi)\sigma_2] \cos^2(\gamma_5 - \gamma) + \sin^2(\gamma_5 - \gamma)\sigma_3$$

Na podstawie danych uzyskanych z interpretacji zapisów uzyskanych podczas pomiarów metodą NUHS i przedstawionych w tablicy 3 wykonano obliczenia przedstawioną powyżej metodą. Obliczenia wykonano z użyciem programu Mathcad v.14. Jako że nie jest możliwe rozwikłanie układu równań w postaci jak powyżej czy w wersji uproszczonej, wykonano serię obliczeń z użyciem danych z otworów 1-5 oraz 9, wykazujących się największą spójnością kolejnych odczytów wartości ciśnienia zamknięcia szczeliny P_r metodą redukcji średniego błędu przybliżenia. Pozwoliło to na określenie następujących wartości naprężeń głównych i ich kierunków. Zachowano konwencję nazw naprężeń zgodną z (Amadei, Stephanson 1997).

Naprężenie główne pionowe

$$S_v = 68,9 \text{ bar} = 6,89 \text{ MPa}$$

Naprężenie główne poziome większe

$$S_H = 163,3 \text{ bar} = 16,33 \text{ MPa}$$

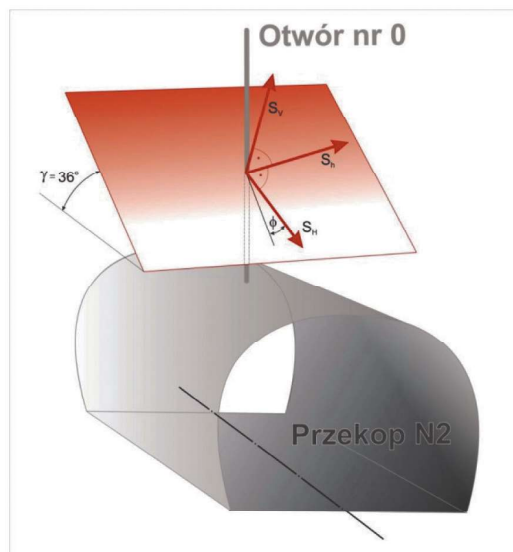
Naprężenie główne poziome mniejsze

$$S_h = 91,2 \text{ bar} = 9,12 \text{ MPa}$$

Kierunek działania większego naprężenia poziomego (S_H)
Kierunek działania naprężenia głównego pionowego (S_v)

Kąt działania większego naprężenia poziomego S_H podano w odniesieniu do osi przekopu N2. W geograficznym układzie współrzędnych kąt ten wynosi 20,6°. Kąt działania naprężenia głównego pionowego S_v mierzono w stosunku do płaszczyzny poziomej. Naprężenie główne poziome mniejsze działa w kierunku prostopadłym do obu naprężeń S_v i S_H .

Rys. 13 przedstawia konwencję oznaczeń oraz schematycznie obrazuje orientację naprężeń.



Rys. 13. Konwencja oznaczenia naprężeń i ich orientacja w przestrzeni w stosunku do lokalnego układu odniesienia

Fig. 13. Convention on the determination of stresses and their orientation in space in relation to the local reference system

5. Podsumowanie

Rozpoznanie stanu naprężeń w górotworze, łącznie z naprężeniami poziomymi, będzie odgrywało w polskim górnictwie coraz istotniejszą rolę. W górnictwie węgla kamiennego pozwoli na lepsze dostosowanie obudowy wyrobisk do lokalnego stanu naprężenia. W przypadku podejmowania eksploatacji w nowej partii złoża odpowiednie zorientowanie wyrobisk przygotowawczych i udostępniających pozwoli na utrzymanie ich w lepszym stanie bez konieczności dokonywania ich przebudów. W górnictwie rud miedzi, stosującej samodzielną obudowę kotwową, świadomość istotności naprężeń poziomych i konieczności dostosowania do nich sposobu rozcięcia złoża zaowocowało wprowadzeniem pojęcia „górnictwa kierunkowego”. Jego realizacja zaowocowała określoną orientacją nowych pól eksploatacji w północnych częściach kopalń Rudna Polkowice-Sierszowice.

Prowadzenie eksploatacji węgla kamiennego na coraz większej głębokości, często w sąsiedztwie uskoków tektonicznych generujących zaburzenia w stanie naprężenia na znacznym obszarze. Możliwość właściwego określenia rzeczywistego stanu naprężenia stwarza warunki dostosowania technologii robót górniczych dla efektywnego i bezpiecznego ich prowadzenia. Istniejące i stale rozwijane techniki pomiarowe mogą być w tym istotnie pomocne.

Niniejszą pracę wykonano w ramach prac statutowych GIG pt.: „Pomiary in situ dla wyznaczania stanu naprężeń w górotworze: aparatura, metodyka, personel”, nr 11050217/141 finansowanych ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- AMADEI, B., STEPHANSON O. 1997 - Rock Stress and Its Measurement. London: Chapman and Hall.
- BUTRA J., DĘBKOWSKI R., PAWELUS D., SZPAK M. 2011. - Wpływ naprężeń pierwotnych na stateczność wyrobisk górniczych. „Cuprum” 58 (1): 43–72.
- GOSZCZ A., 1999 - Elementy mechaniki skał oraz tapania w polskich kopalniach węgla i miedzi. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
- HAIMSON, B. C., CORNET F. H. 2003 - ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation-Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-Existing Fractures (HTPF). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40 (7–8): 1011–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2003.08.002>.
- KONOPKO W., KABIESZ J., MERTA G., MAKÓWKA J., SZUBERT S., ZEHNAL J. 1997 - Ukierunkowane hydroszczelinowanie skał i kierunku jego wykorzystania. Prace Naukowe GIG nr 824, Katowice.
- MAKÓWKA J. 2006 - Podstawy metody określania naprężeń głównych z wykorzystaniem ukierunkowanego hydroszczelinowania skał. Prace Naukowe GIG nr 868. Katowice.
- MAKÓWKA J. 2014 - Metoda określania trójosiowego stanu naprężenia w górotworze z wykorzystaniem ukierunkowanego hydroszczelinowania N-UHS. Prace Naukowe GIG nr 890. Katowice.
- MAKÓWKA, J. 2015. - Method of Determining the Triaxial Stress State in the Rock Mass with Directed Hydrofracturing / Metoda określania trójosiowego stanu naprężenia w górotworze z użyciem ukierunkowanego hydroszczelinowania. Archives of Mining Sciences 60 (3): 729–41. <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0048>.
- MYSZKOWSKI J., MAKÓWKA J., MERTA G. 2019 - Ukierunkowane hydroszczelinowanie skał – nowe rozwiązania i zastosowania. „Przeгляд Górnicy” nr 4.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2019

Artykuł akceptowano do druku – 15 lipiec 2019