

Model geomechaniczny LW „Bogdanka”

Geomechanical Model of Bogdanka Coal Mine



Mgr inż. Michał Marciniak^{*)}



Dr inż. Michał Kowalski^{**)}

Treść: Artykuł prezentuje model geomechaniczny kopalni LW „Bogdanka”, wykonany w środowisku FLAC3D. Poza tym opisano cechy górotworu, krytyczne do odwzorowania w analizie numerycznej, a także problematykę modelowania numerycznego eksploatacji ścianowej. Po części opisowej zaprezentowano także przykład zastosowania narzędzia w analizie wpływu eksploatacji pola V na infrastrukturę zlokalizowaną w filarze na poziomie 960. Wykonano także analizę numeryczną stateczności wyrobiska objazd południowy, szukając mechanizmu zniszczenia, który doprowadził do utraty funkcjonalności wyrobiska. Użycie modelu sprężysto-plastycznego z osłabieniem oraz powierzchnią *ubiquitous joint* pozwoliło uzyskać zadowalające odzwierciedlenie rzeczywistości.

Abstract: A thorough description of Bogdanka’s coal mine geomechanical model may be found in this article. The model itself has been prepared in numerical code FLAC3D. A brief rock mass characteristic, fundamental to the numerical analysis, together with problems concerning numerical modeling of longwall mining was presented. Apart from the description, use of the model in an analysis of the effects of the exploitation of longwall panels adjacent to the underground infrastructure located on 960 level was prepared. A numerical analysis of a drift size model was back analyzed to obtain the failure mechanism that led to its destruction. Use of strain softening ubiquitous joint model allowed to obtain satisfactory results.

Słowa kluczowe:

model geomechaniczny, model geologiczny, model strukturalny, model górotworu, analiza numeryczna, eksploatacja ścianowa, wpływy eksploatacji ścianowej

Keywords:

geomechanical model, geological model, structural model, rock mass model, numerical modeling, longwall, stability analysis, strain softening ubiquitous joint

1. Wprowadzenie

Lubelski Węgiel „Bogdanka” prowadzi eksploatację czterech pokładów węgla znajdujących się w utworach formacji z Lublina karbonu lubelskiego (Zdanowski 1999). Oprócz pokładów węgla o parametrach złożowych do głównych typów litologicznych skał zalicza się iłowce i mułowce, wliczając także te o charakterze gleby stigmariowej oraz piaskowce (Małkowski i in., 2019). Górotwór ten wyróżnia:

- obecność wkładek węglowych bądź łupków węglowych czy węglistych o zdecydowanie niższych od otaczającego go górotworu parametrach wytrzymałościowych,
- niska wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie węgla pokładów bilansowych,
- obecność w warstwach otaczających węgle iłowców oraz mułowców o charakterze gleby stigmariowej o niskich parametrach wytrzymałościowych oraz niskim stosunku

wytrzymałości na ściskanie w stanie nasyconym wodą do wytrzymałości na ściskanie w stanie suchym.

W praktyce inżynierskiej, jak zaznaczają Brady i Brown (2007) przekłada się to na:

- niską, często wręcz pomijalną, wytrzymałością na rozciąganie górotworu na kierunku prostopadłym do istniejących wkładek węglowych,
- niską wytrzymałością na ścinanie wspomnianych powierzchni

Wszystko to sprawia, że załoga kopalni ma do czynienia z ośrodkiem wybitnie anizotropowym, co w połączeniu z głębokością prowadzonej eksploatacji często uwidacznia się w wyrobiskach chodnikowych pod postacią:

- wypiętrzania spągu,
- w przypadku występowania wkładki węglowej w skałach stropowych może dochodzić do utraty kontaktu na ww. wkładce, często doprowadza do zniszczenia warstw sąsiadujących, objawiającym się nadmiernym zaciskaniem pionowego przekroju wyrobiska,
- w przypadku wyjątkowo niskich parametrów wytrzymałościowych skał znajdujących się w ociosie i/lub koncen-

^{*)} Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

^{**)} AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

tracji naprężeń może także dochodzić do nadmiernego zaciskania przekroju poprzecznego wyrobisk.

Chcąc zebrać jak najwięcej informacji o górotworze i jego cechach, które mogą wywołać wspomniane wyżej mechanizmy, dając przy okazji kadrze inżynierskiej narzędzie wspomagające procesy projektowo-decyzyjne, Zarząd LWB zlecił wykonanie modelu geomechanicznego kopalni.

2. Opis modelu

Wraz z postępem technologicznym umożliwiającym prowadzenie symulacji numerycznych obejmujących często całe obszary górnicze, branża górnicza zdała sobie sprawę z potrzeby usystematyzowania swoich baz danych celem wykorzystania symulacji numerycznych w procesach projektowo-decyzyjnych kopalń. W tym świetle model geomechaniczny jawi się jako szkielet spinający dane zbierane przez działy geologiczne, geomechaniczne, miernicze oraz planowania produkcji danej kopalni. Jak zauważają m.in. Read i Stacey (2009) oraz Dunn (2014), dokładność tych danych ma pierwszorzędne znaczenie przekładając się na wiarygodność proponowanych przez kadrę inżynierską rozwiązań wspierających ruch kopalni. Read i Stacey (2009) wydziałają następujące cztery części składowe modelu geomechanicznego, co prezentuje rys. 1.:

Model geologiczny (*geological model*) opisuje rozkład poszczególnych typów skał i ich miąższości w przestrzeni.

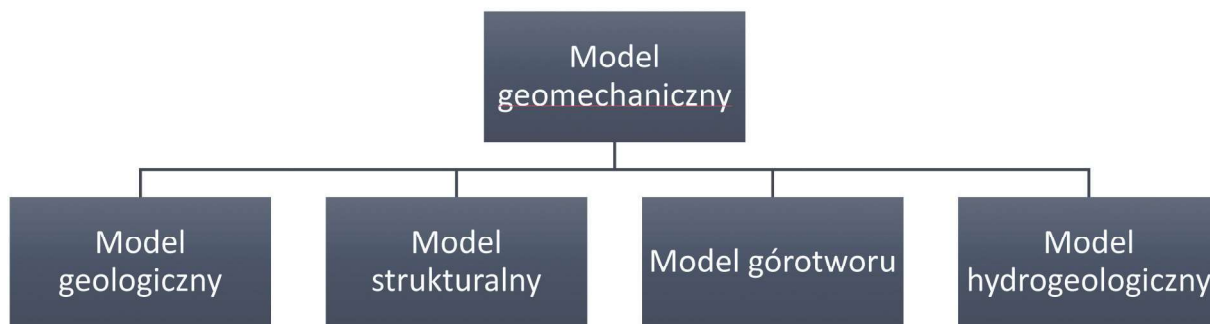
W przypadku LWB tworzą go bazy danych Działu Geologicznego oraz Mierniczego, do których zaliczyć można:

- trójwymiarowe mapy spągów oraz stropów pokładów bilansowych, wykorzystywane przez Dział Planowania Strategicznego Robót Górniczych do tworzenia harmonogramów produkcji,
- powierzchnie ograniczające zasięgi utworów karbonu, jury oraz kredy,
- mapa powierzchni terenu,
- bazy danych otworów powierzchniowych, długich otworów podziemnych, a także krótkich otworów badawczych wykonywanych w celu przeprowadzenia wytrzymałościowych badań penetrometrycznych określających wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, z których zczytywane są do modeli numerycznych poszczególne typy skał.

Rys 2. prezentuje przykład modelu numerycznego obejmującego obszar na północ od szybu 1.2 z przypisanym modelem geologicznym kopalni w środowisku FLAC3D. Powierzchnie znajdujące się na rys. 2. przedstawiają następujące warstwy:

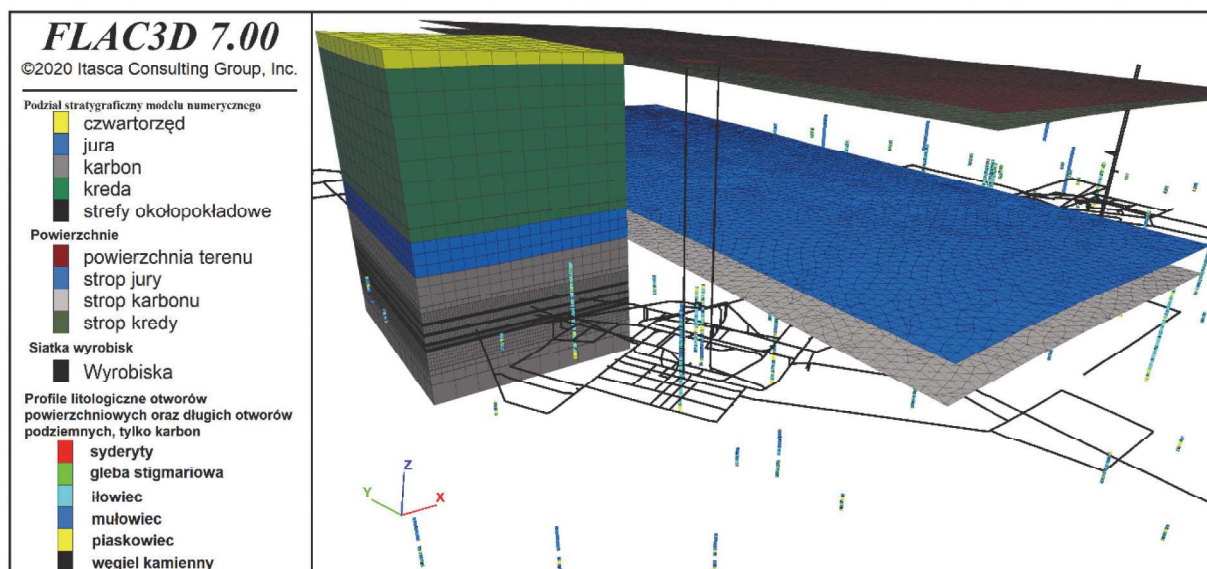
- szara – strop karbonu,
- niebieska – strop jury,
- ciemnozielona – strop kredy,
- ciemnoczerwona – powierzchnia terenu.

Każda z tak przygotowanych siatek rozciąga się na obszarze o powierzchni dochodzącej do 211 km². Rys. 2. przedstawia także profile litologiczne odwzorowane ze wszystkich typów otworów badawczych Kopalni.



Rys. 1. Części składowe modelu geomechanicznego, przetłumaczone z Read i Stacey (2009)

Fig. 1. Components of geomechanical model, Read and Stacey (2009)



Rys. 2. Model geologiczny LWB

Fig. 2. LWB's geological model

Model strukturalny (structural model), z racji braku zyskowania złoża, skupia się na odwzorowaniu poszczególnych pokładów pozabilansowych, tworzących wspomniane w rozdziale 1 powierzchnie, na których dochodzi do utraty kontaktu pomiędzy przyległymi warstwami. Rys. 3. przedstawia zasięg poszczególnych pokładów pozabilansowych w obszarze złożowym LWB z wyłączeniem złoża K6-K7. Tak stworzone mapy dzielą model numeryczny w sposób pozwalający w kolejnych krokach nadać strefom modelu, przecinanym przez te powierzchnie, niższe parametry wytrzymałościowe.

Model górotworu (rock mass model) jest adaptacją wielu zbiorów danych przygotowywanych przez Dział Badań i Wdrożeń, na podstawie których należy jak najwierniej odwzorować parametry wytrzymałościowe górotworu. Każda z ww. baz prowadzona jest dla następujących warstw okolo-pokładowych:

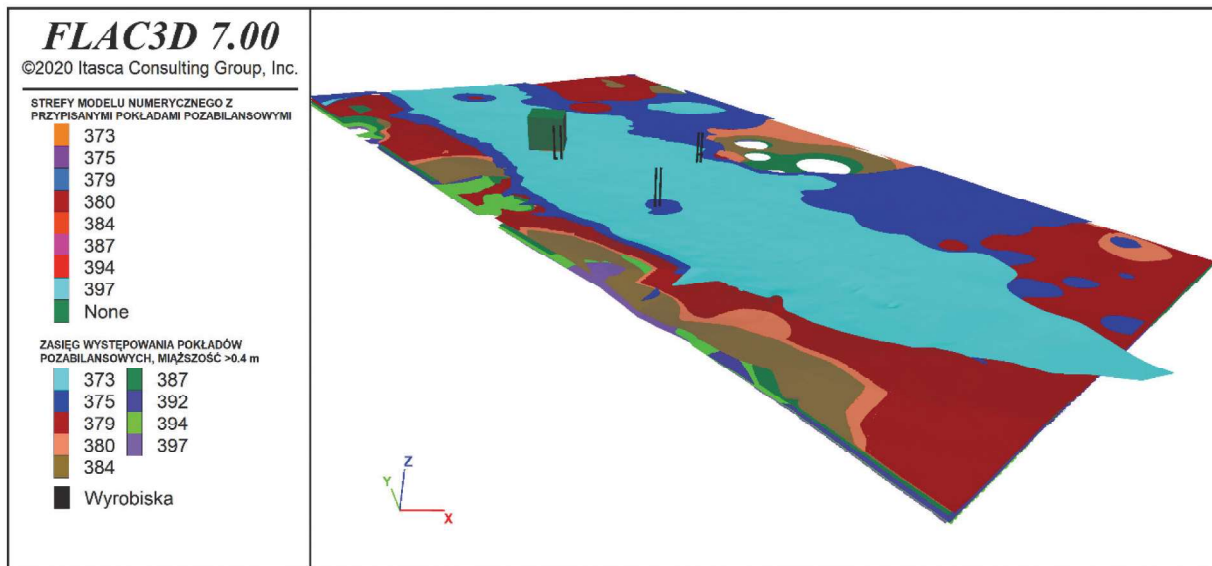
- 0-3, 3-5 metrów poniżej spągu
- 0-3 i 3-6 metrów powyżej stropu pokładu.

Podział ten został wyszczególniony na modelu numerycznym widocznym na rys. 5. Bazy danych zawierają następujące wartości parametrów:

- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określona badaniami laboratoryjnymi, której odwzorowanie w modelu numerycznym widoczne jest na rys. 6.,
- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określona badaniami penetrometrycznymi,
- wskaźnik podzielności rdzenia RQD.

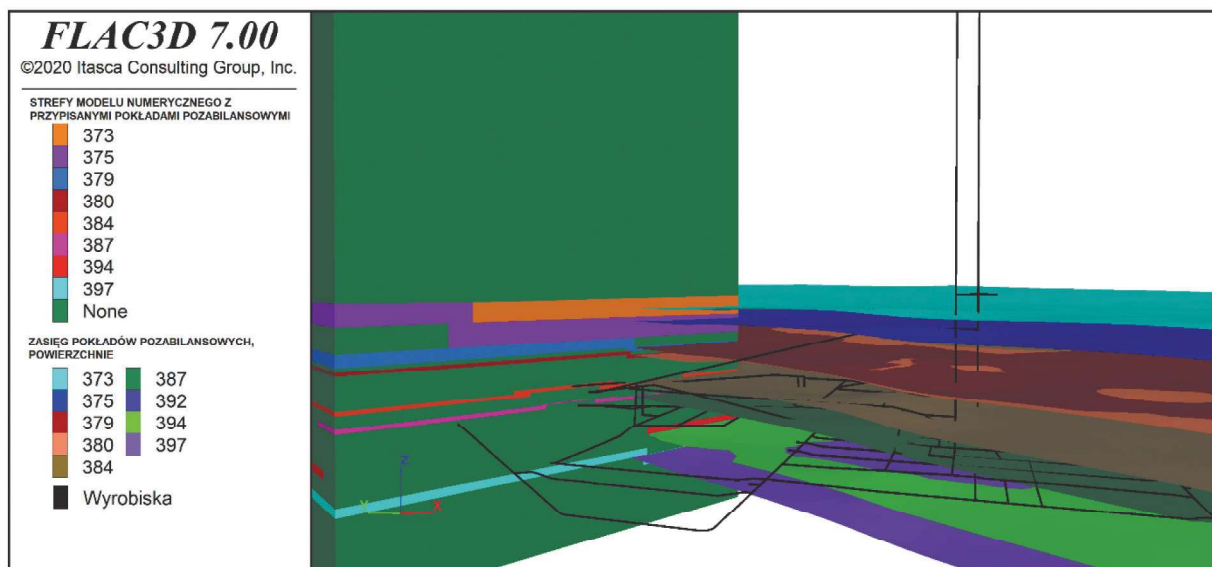
Na ich podstawie metodą krigingu interpolowane są płaskie mapy konturowe prezentujące rozkład tych wartości w przestrzeni, które później zaczytywane są do modeli numerycznych.

Model hydrogeologiczny szeroko stosowany w górnictwie odkrywkowym, często w formie modelu blokowego opisującego rozkład ciśnienia porowego w otaczającym górotworze. Z racji wielkości terenu górniczego prowadzenie takiego modelu dla podziemnej kopalni węgla jest nieuzasadnione.



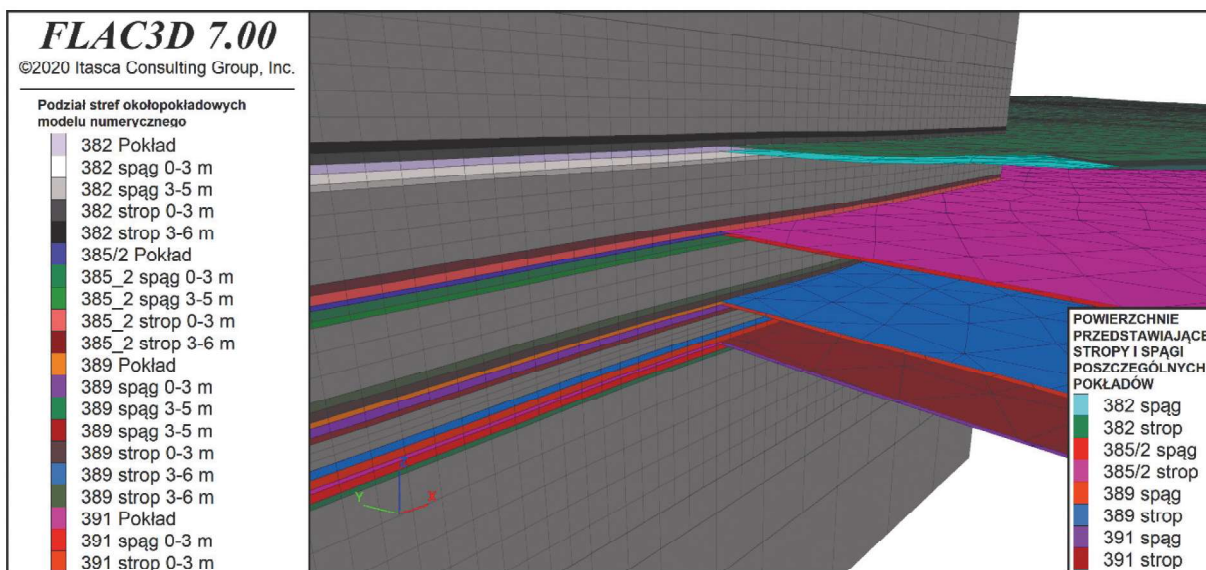
Rys. 3. Model strukturalny LWB

Fig. 3. LWB's structural model

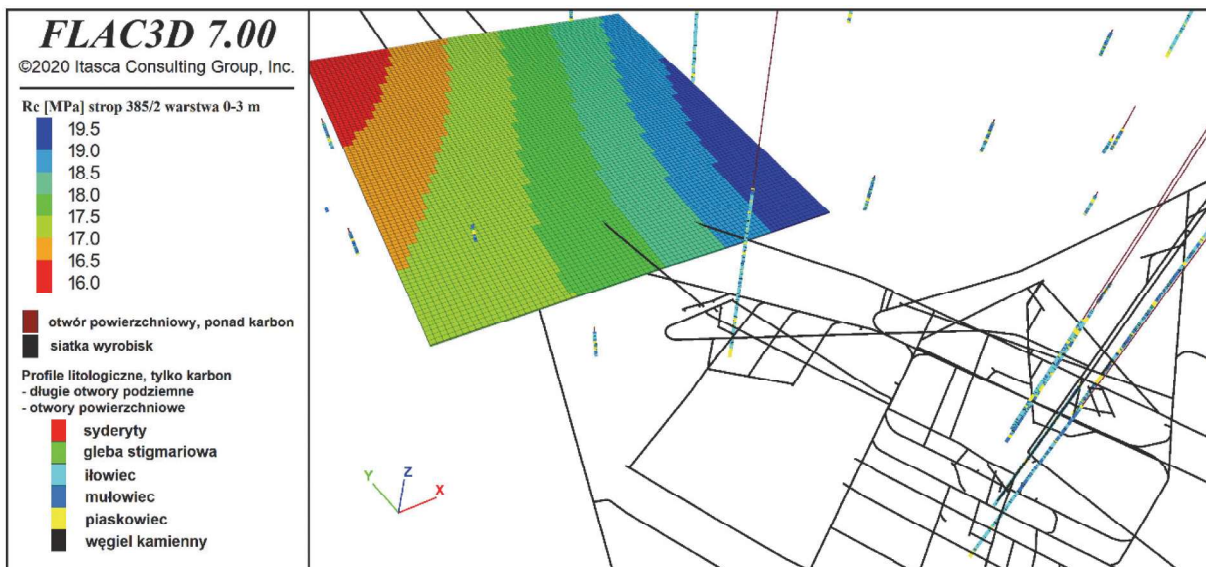


Rys. 4. Model strukturalny LWB odwzorowany w modelu numerycznym

Fig. 4. LWB's structural model included in a numerical model



Rys. 5. Siatka modelu numerycznego, strefy około-pokładowe
 Fig. 5. Mesh of numerical model, stratas adjacent to the seams.



Rys. 6. Odzworowane w modelu numerycznym wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie [MPa], pochodzące z badań laboratoryjnych, uśredniona wartość dla warstwy 0-3 m ponad strop pokładu 385/2
 Fig. 6. Mean values of laboratory based uniaxial compressive strength [MPa] of virtual strata 3 m thick located above seam 385/2

Przedstawione w rozdziale 2 bazy danych stanowią wsad do obliczeń numerycznych. W nich na podstawie harmonogramów dostarczanych przez Dział Planowania Strategicznego Robót Górniczych odwzorowywana jest kolejność eksploatacji. Obecnie trwają prace nad uszczegółowieniem baz danych, zestawionych dla długich otworów podziemnych. Bazy te pozwolą na zautomatyzowanie procesu nadawania parametrów wytrzymałościowych dla pozostałych stref modelu. Zasadność poszczególnych założeń odnośnie parametrów wytrzymałościowych górotworu zostanie omówiona w rozdziałach 3 i 4.

3. Problematyka symulacji eksploatacji ścianowej

Modelowanie numeryczne eksploatacji ścianowej obarczone jest dużym błędem, szczególnie dla warunków LW „Bogdanki”. Omówienie wszystkich czynników mających na

to wpływ jest materiałem na osobny artykuł, jednakże należy wspomnieć o tych kluczowych:

- parametry wytrzymałościowe otrzymywane w wyniku badań laboratoryjnych nie są reprezentatywne dla dużych stref modelu. Dzieje się tak przez zależność parametrów wytrzymałościowych od wielkości badanej próbki. Sytuacji nie poprawia fakt, iż odcinki rdzeni wiertniczych trafiające na maszynę wytrzymałościową są niereprezentatywne, ponieważ charakteryzują się zazwyczaj najwyższymi parametrami wytrzymałościowymi, a reszta rdzenia, posiadająca wtrącenia węglowe, determinujące wytrzymałość górotworu nawet w skali mikro, jest splekana i nie zostaje zbadana (Hoek, 2000, Mas Ivars i in. 2008, Tajduś i in., 2012, Xiabing i in. 2020);
- górotwór LWB charakteryzuje wyjątkowa anizotropowość, tj. zróżnicowanie parametrów wytrzymałościowych w zależności od kierunku. Wynika to z obecności wspo-

- mnianych wkładek, najczęściej węglowych oraz spekań utworzonych przez prowadzoną eksploatację. Na nich dochodzi do utraty kontaktu pomiędzy sąsiadującymi warstwami i poziomej propagacji zniszczenia górotworu;
- prowadzona eksploatacja ścianowa zmienia nie tylko stan naprężenia, ale także stan wyężenia górotworu, co pociąga za sobą obniżenie parametrów wytrzymałościowych analizowanego ośrodka. Przyjęty kąt dylatacji ma decydujący wpływ na zakres i propagację strefy zniszczenia w analizowanym ośrodku. Więcej o kącie dylatacji i jego wpływie na wyniki symulacji numerycznych prezentują prace Sainsbury (2012) oraz Alejano i Alonso (2005);
 - określenie zakresu strefy zawałowej oraz dobranie dla niej reprezentatywnych parametrów wytrzymałościowych;
 - obecność wody ma duży wpływ na obniżenie parametrów wytrzymałościowych górotworu, szczególnie iłowców oraz iłowców o charakterze gleby stigmariowej;
 - duża zmienność parametrów wytrzymałościowych, nawet na krótkich odcinkach.

Wyżej wymienione warunki oraz możliwości obliczeniowe, a także dostępny dla celów analizy czas oraz rodzaj metody numerycznej, na której oparty jest program obliczeniowy wymuszają przyjęcie pewnych uproszczeń. Dotychczas, w zdecydowanej większości modeli opracowanych na potrzeby LWB, górotwór opisywano modelem sprężysto-idealnie plastycznym, traktując górotwór jako ośrodek izotropowy (parametry wytrzymałościowe niezależne od kierunku), a eksploatację symulowano poprzez obniżanie parametrów wytrzymałościowych w strefach modelu, gdzie scenariusz symulacyjny zakładał zasięg strefy zawałowej powstałej po przeprowadzonej eksploatacji (Cała i in. 2004). Wynikiem tego typu analizy jest współczynnik koncentracji naprężeń normalnych na kierunku pionowym. Strefy opisane modelem sprężysto-idealnie plastycznym nie zmieniają parametrów wytrzymałościowych wraz z postępowaniem kroków obliczeniowych pomimo przekroczenia krytycznego stanu naprężenia (zniszczona próbka ma takie same parametry wytrzymałościowe jak ta sprzed zniszczenia). Miarą „zniszczenia” górotworu w tym przypadku jest wyłącznie zmieniony stan naprężeniowy otrzymany w modelu. Wymusza to wprowadzenie idei relaksacji naprężeń wraz z czasem po ukończeniu eksploatacji danej ściany według indywidualnie przyjętej funkcji (aby zamarkować proces wygaszenia koncentracji wywołanej kompaktacją zrobów). Jednakże, w przypadku eksploatacji wielopokładowej prowadzi to do wielu problemów, ponieważ strefy, które zostały zniszczone w dawnych krokach obliczeniowych (dla ścian poprzednich), cały czas mają wejściowe parametry wytrzymałościowe, co ostatecznie może prowadzić do mało realistycznych wyników analizy.

4. Analiza wpływu eksploatacji ścian V pola na stateczność wyrobisk na poziomie 960

Dostępny na stanie Działu Badań i Wdrożeń (DNW) komputer oraz oprogramowanie pozwala na użycie bardziej złożonych założeń. Starając się wiernie odwzorować te warunki, strefom górotworu w obrębie osadów węglonośnych formacji z Lublina przypisano parametry wytrzymałościowe odpowiadające średniej jakości iłowca, opisanego modelem sprężysto-plastycznym z osłabieniem, który został dodatkowo osłabiony poziomo zalegającą powierzchnią *ubiquitous joint* (*strain softening ubiquitous-joint* opartym o kryterium wytrzymałościowe Coulomba Mohra), mającą za zadanie odwzorować wkładkę węglową. Wkładka taka również posiada możliwość obniżenia parametrów wytrzymałościowych wraz z postępującym wyężeniem. Dodatkowo w modelu

numerycznym moduł Younga każdej ze stref jest dynamicznie zmieniany (funkcja fishcall) podczas obliczeń i zależy od zmiany odkształcenia objętościowego danej strefy. Pozwala to zamodelować proces rekompaktacji zrobów, a także ich ponownego zruszenia przez prowadzoną eksploatację kolejnych pokładów. Przyjęte założenia znacznie wydłużają czas obliczeń, z drugiej strony dając lepszy wgląd w procesy zachodzące w górotworze podczas eksploatacji ścianowej. W modelu przyjęto niestowarzyszone prawo płynięcia dla zniszczenia poprzez ścinanie, a początkowy kąt dylatacji równy $8,17^\circ$ zmierzal do 0 wraz z postępującym zniszczeniem strefy. Po wykryciu zniszczenia strefy poprzez rozciąganie, jej wytrzymałość na rozciąganie była momentalnie obniżana do 0, by wykluczyć możliwość nadmiernego, a przez to niestowarzyszonego przyrostu objętości danej strefy (spowodowanej przez stowarzyszone prawo płynięcia). Przyjęte parametry wytrzymałościowe przedstawia tabela 1. Eksploatację odwzorowano usuwając kolejno strefy węgla poszczególnych skrawów ściany (wyidealizowany postępowanie = 10 m), po czym model przeliczany był do osiągnięcia stanu równowagi, pozwalając na naturalny przyrost strefy zawałowej. Stworzony w ten sposób scenariusz obliczeniowy zajął komputerowi wyposażonemu w procesor Intel i9-9940X CPU @ 3.30GHz oraz 128GB pamięci RAM 20 dni na całkowite przeliczenie.

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe górotworu
Table 1. Rock mass' shear strength

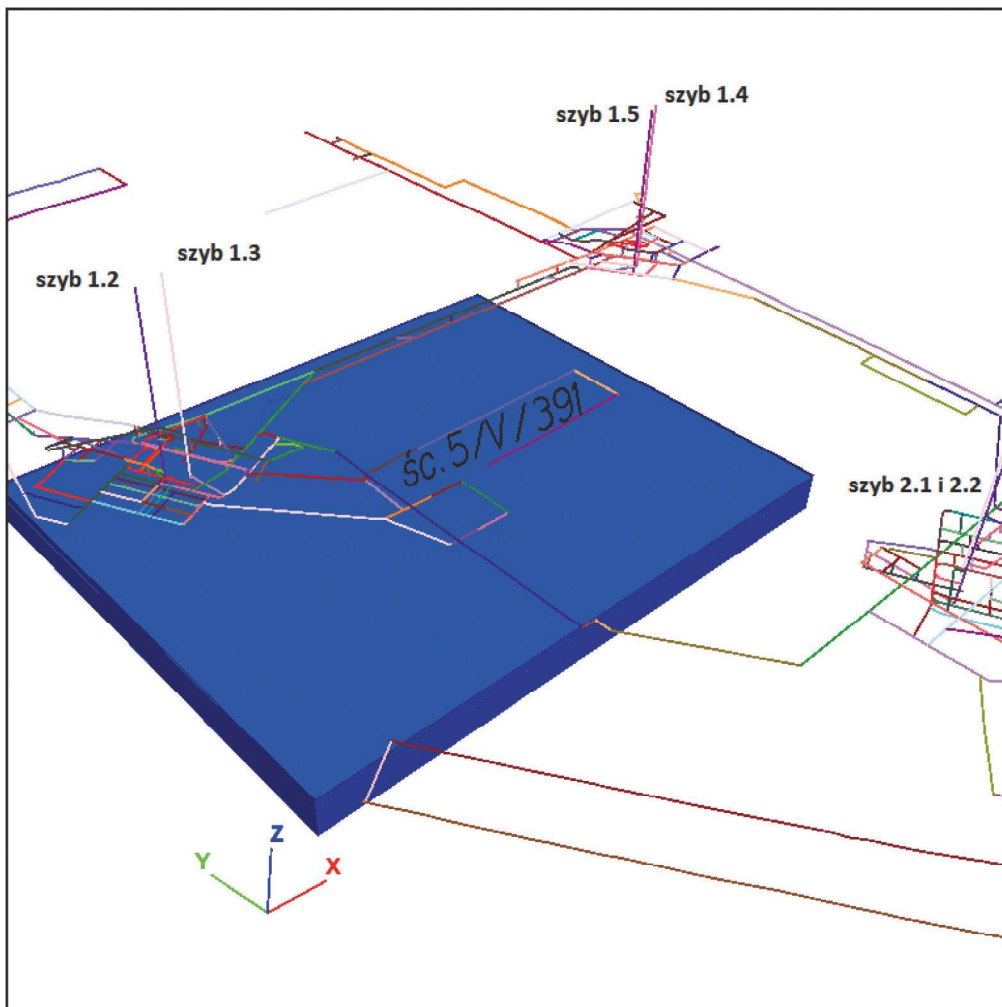
| Parametr | Górotwór | Pokłady 382, 385/2 oraz 391 | Parametry wkładki węglowej (<i>ubiquitous joint</i>) |
|--------------------------|--------------|-----------------------------|--|
| Kohezja | 919 kPa | 206 kPa | 10 kPa |
| Kąt tarcia wewnętrzznego | $24,5^\circ$ | $21,81^\circ$ | 17° |
| Początkowy kąt dylatacji | $8,17^\circ$ | $7,27^\circ$ | - |
| Wejściowy moduł Younga | 4 GPa | 1,1 GPa | - |
| Współczynnik Poissona | 0,22 | 0,39 | - |

Model stworzony w celu oszacowania wpływów eksploatacji ścian pola V na stateczność wyrobisk na poziomie 960 miał niżej podane wymiary, a jego przestrzenny zakres zestawiony z mapą wyrobisk przedstawia rys. 7:

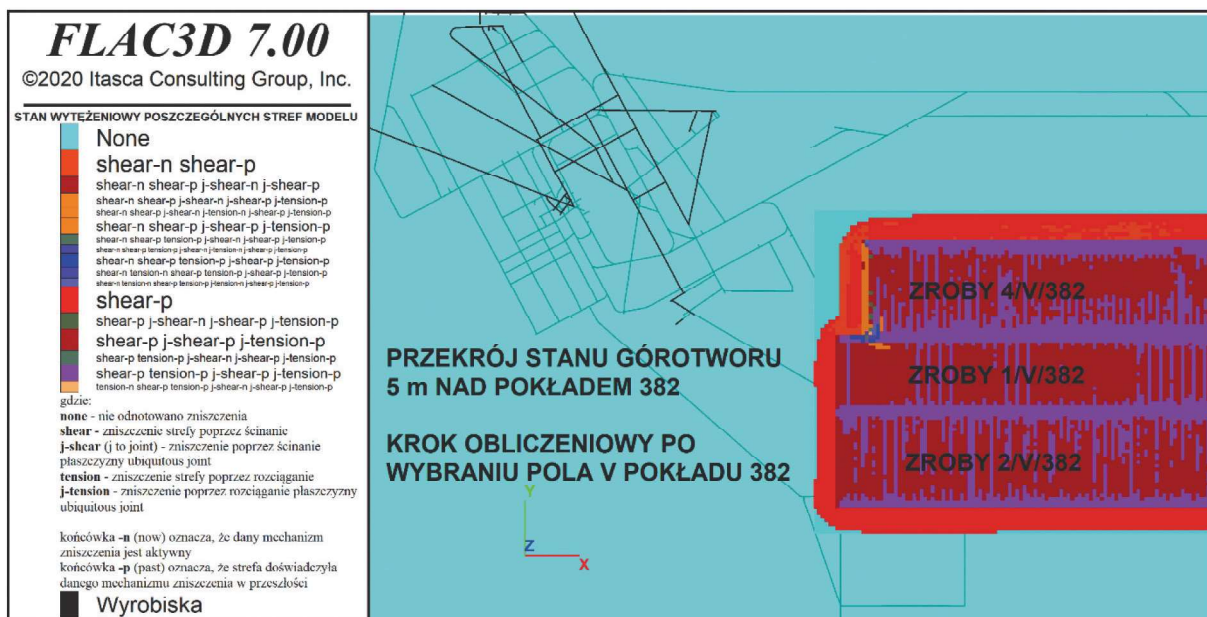
- długość 2960 [m],
- szerokość 2400 [m],
- wysokość 1220 [m].

Model skalibrowano sprawdzając 3 warunki:

1. Zasięg strefy zawałowej nad wybraną ścianą pierwszego eksploatowanego pokładu, odwzorowany po wykonanym odwiercie do strefy zawałowej pokładu 382 (zmieniane wartości kohezji, kąta tarcia wewnętrzznego oraz kąta dylatacji stref, a także parametrów wytrzymałościowych na powierzchniach nieciągłości *ubiquitous joint*, jak również funkcje opisujące zmiany tych parametrów wraz z postępowaniem odkształcenia).
2. Funkcja zmiany modułu Younga wraz ze zmianą odkształcenia objętościowego danej strefy. Dobrane tak, by 250 metrów za frontem ściany obserwowalne było wygaszenie wpływu koncentracji naprężeń.
3. Zasięg zniszczenia filarów oporowych ścian. Źródło: obserwacje dołowe, zasięg zniszczenia 60-80 m. Więcej w przypadku negatywnego ustawienia ścian, w miejscach, w których dochodzi do nadmiernych koncentracji naprężeń. Rys. 8. prezentuje zasięg zniszczenia górotworu po wybraniu ścian 1/V/382, 2/V/382 oraz 4/V/382. Przekrój



Rys. 7. Zasięg modelu wraz z infrastrukturą podziemną
 Fig. 7. Model's extents presented with mine's underground infrastructure

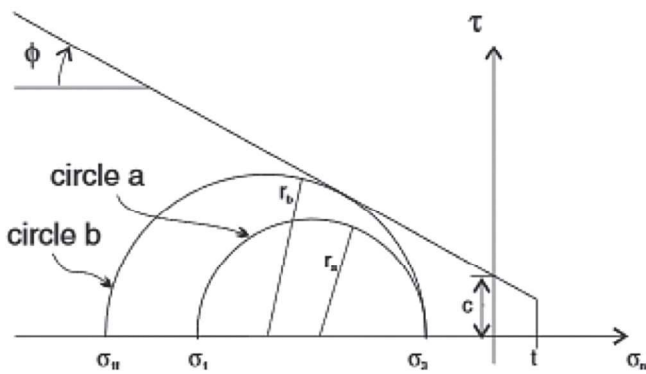


Rys. 8. Rzut z góry zasięgu zniszczenia stref modelu warstwy znajdującej się 5 metrów nad pokładem 382
 Fig. 8. Plan view of the extent of yielded zones of the strata located 5 meters above 382 seam

wykonano 5m nad stropem pokładu 382. Kolorem czerwonym zaznaczono strefy, które zostały zniszczone przez ścinanie. Kolor ciemnopomarańczowy (*shear-n shear-p*) przedstawia strefy, które oprócz wcześniejszego zniszczenia, dalej są niszczone przez ścinanie. Na Rys. 8. pośrednio widać także wpływ rekompakcji zrobów na stan naprężenia dookoła wybranej ściany. Zrobiy ścian 2/V/382 oraz 1/V/382 odciążąły już otaczający górotwór, czego nie widać w przypadku co dopiero wybranej ściany 4/V/382.

W ramach rozwijania modelu geomechanicznego kopalni przeprowadzono szereg obliczeń sprawdzających każde z możliwych założeń oraz ich wpływ na zasięg występowania problemów z utrzymaniem stateczności wyrobisk.

Dla przejrzystości i łatwości przyrównania wyników po każdym z przeliczonych kroków obliczeniowych, wyniki odwzorowano na siatce wyrobisk kopalni. Parametrem, który przyrównano jest współczynnik bezpieczeństwa wyrażony przez stosunek krytycznego stanu naprężenia do obecnego stanu naprężenia (*Stress-Strength Ratio*). Jako, że zarówno powierzchnie symulujące wkładki węglowe, jak i strefy modelu opisano warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra, zależności te można sprowadzić do równań 1 oraz 2. Graficzną reprezentację tak wyrażonego współczynnika bezpieczeństwa pokazano na rys. 9. **Im większą wartość osiąga współczynnik bezpieczeństwa, tym lepiej. Im bliżej 1, tym bliżej zniszczenia górotworu.** W przypadku już odnotowanego zniszczenia przez rozciąganie wartość współczynnika bezpieczeństwa (FS) na rys. 10. i 11. jest równa 0. Wszystkie z ww. rysunków zaprezentowane są w tej samej skali FS.



Rys. 9. Graficzna reprezentacja współczynnika bezpieczeństwa dla dwóch obwiedni kół Mohra (Itasca ... 2020).

Fig. 9. Graphic representation of Factor of Safety based on two Mohr's envelopes (Itasca ... 2020).

$$\sigma_{1f} = \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) \sigma_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} \quad (1)$$

$$FS = \frac{r_b}{r_a} = \frac{\sigma_3 - \sigma_{1f}}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (2)$$

Gdzie:

- σ_{1f} – niszczące naprężenie główne największe (dla danego)
- ϕ – kąt tarcia wewnętrznego
- σ_3 – naprężenie główne najmniejsze
- σ_1 – naprężenie główne największe
- FS – współczynnik bezpieczeństwa

5. Wyniki

Skalę współczynnika bezpieczeństwa FS widocznego na rys. 10.-11. dobrano w sposób umożliwiający zaobserwowanie zmiany stanu naprężenia wywołanej wpływami eksploatacji. Początkowa, tj. sprzed rozpoczęcia eksploatacji, wartość FS wynosiła 1,43. W trakcie przeprowadzania obliczeń zauważono korelację zasięgu strefy, w której dochodziło do problemów z utrzymaniem stateczności wyrobisk z obniżeniem się parametru FS o co najmniej 10% (na rys. 10-11. są to strefy zaznaczone kolorem czerwonym, FS poniżej 1,3). Dla lepszego zobrazowania wyników naniesiono trzy dodatkowe izoliny przedstawiające zakres wartości współczynnika FS dla następujących wartości:

- 1,24 kolor czarny (15% obniżenie współczynnika FS względem poziomu początkowego),
- 1,3 kolor czerwony (10% obniżenie współczynnika FS względem poziomu początkowego),
- 1,36 kolor zielony (5% obniżenie współczynnika FS względem poziomu początkowego).

Na Rys. 10.-11. widać, iż największa zmiana współczynnika bezpieczeństwa FS została zanotowana po wybraniu ostatniej ściany z pokładu 385/2, eksploatowanej w latach 2008-2009. Pokrywa się to z prowadzonymi od tego czasu przebudowami odcinków następujących wyrobisk:

- objazd południowy,
- objazd R 2 u.

By móc ocenić prognozowany wpływ eksploatacji ścian 5/V/391 oraz 6/V/391 na stateczność wyrobisk objazd południowy oraz objazd R 2 u, na rys. 12, porównano zmianę współczynnika FS dla dwóch kroków obliczeniowych:

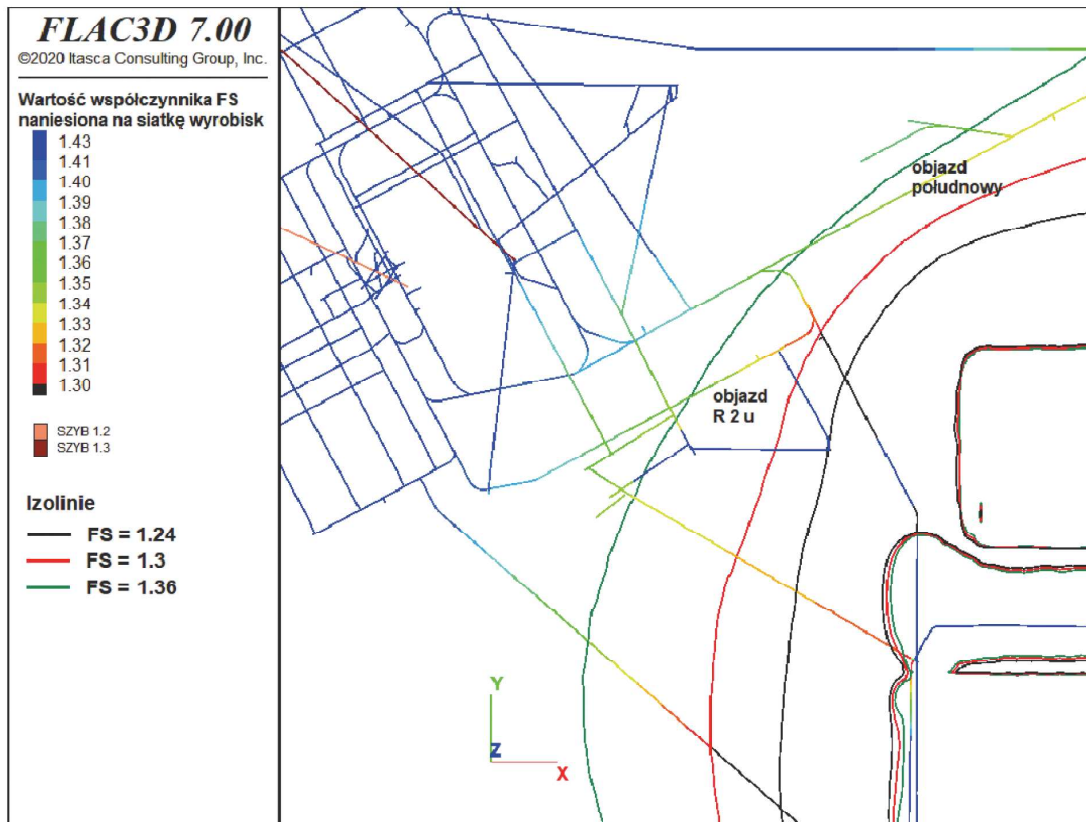
- 290 m przed końcem ściany 5/V/391 - reprezentującą stan obecny,
- na koniec eksploatacji, tj. po wyeksploatowaniu ściany 6/V/391.

Obliczenia wskazują, iż zasięg stref, w których odnotowuje się $FS < 1.3$ wzrosło średnio o 40 metrów.

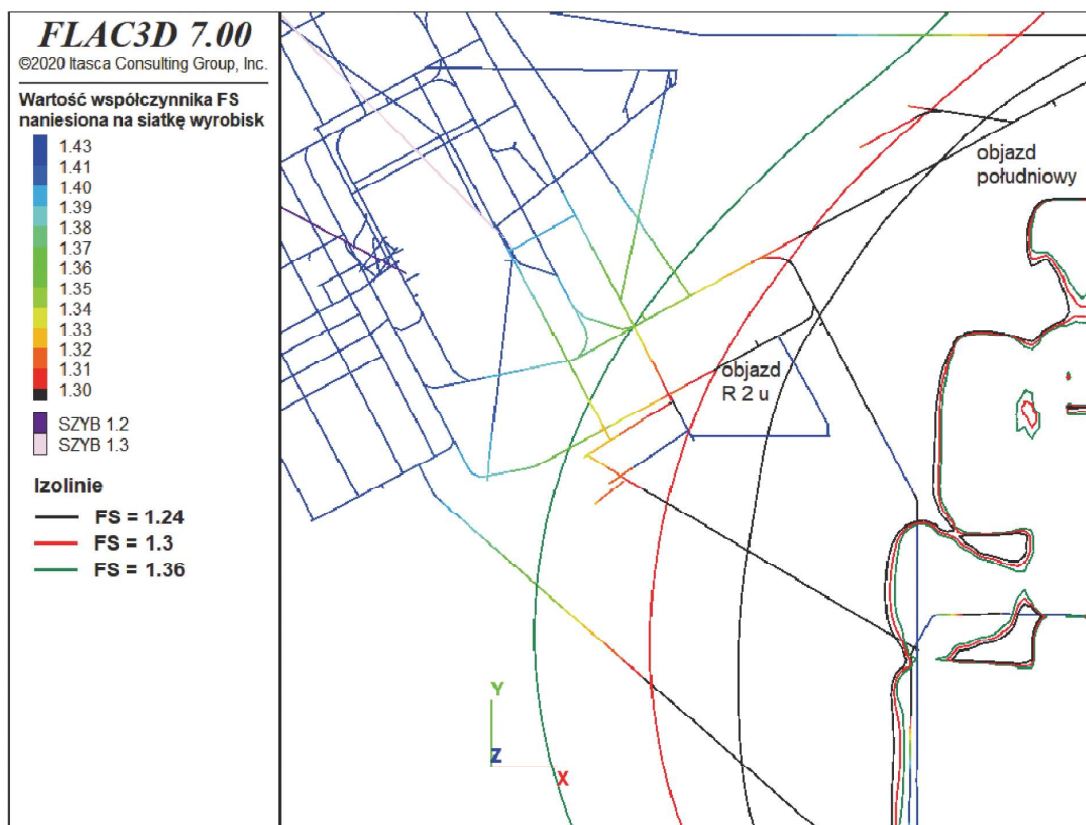
6. Obliczenia stateczności wyrobiska objazd południowy

Dla potrzeb modelu geomechanicznego opracowano także środowisko symulacji stateczności wyrobisk, które wciąż jest rozbudowywane. Poniżej zaprezentowano przykład jego zastosowania w próbie odwzorowania mechanizmu zniszczenia wyrobiska *objazd południowy*. W roku 2019 wykonano dodatkowe otwory badawcze dla badań penetrometrycznych, tj. stropowy BR-30/19 (o długości 20 m, przebadany do 10 m, z krokiem co 5 cm) oraz spągowy BR-30/1/19 (o długości 10 m, przebadany do 5 m). Na ich podstawie wykonano siatkę modelu numerycznego o wymiarach 45,6 x 44 x 0,6 [m]. Poszczególne strefy modelu odwzorowano w większości blokami sześciennymi o długości boku 0,3 m, przypisując im uśrednioną wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie z badania penetrometrycznego. Litologię oraz parametry wytrzymałościowe warstw nieujętych w BR-30/19 oraz BR-30/1/19 odwzorowano na podstawie długich otworów podziemnych BR-8/04 oraz BR-27/16 (rys. 13.).

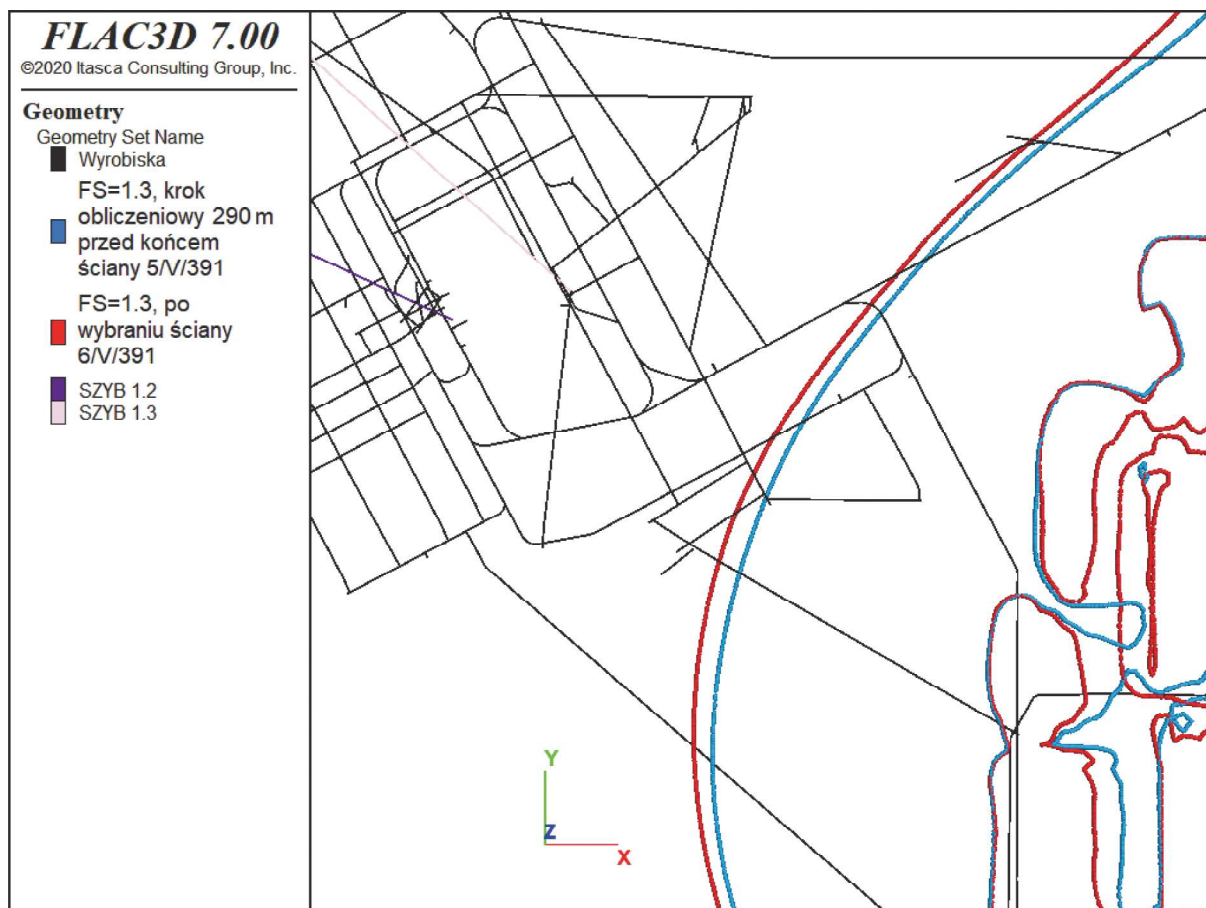
Podczas rozwijania modelu geomechanicznego kopalni, na podstawie dostępnych wyników badań laboratoryjnych, zaproszono wartości modułu odkształcalności liniowej (moduł Younga) w funkcji wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_c) dla ilowców, mułowców, piaskowców oraz węgla. Środowisko symulacji zaadaptowano inspirowane pracą Esterhuizen i in. (2013). Górotwór opisano modelem sprężysto-plastycznym z osłabieniem, a anizotropię nadano poprzez uwzględnienie poziomo zalegających powierzchni



Rys. 10. Mapa współczynnika bezpieczeństwa FS po wybraniu ścian V pola z pokładu 382 (1/V/382, 2/V/382, 4/V/382)
Fig. 10. FS values displayed on level 960 infrastructure, plot taken after the completion of first three panels: 1/V/382, 2/V/382, 4/V/382

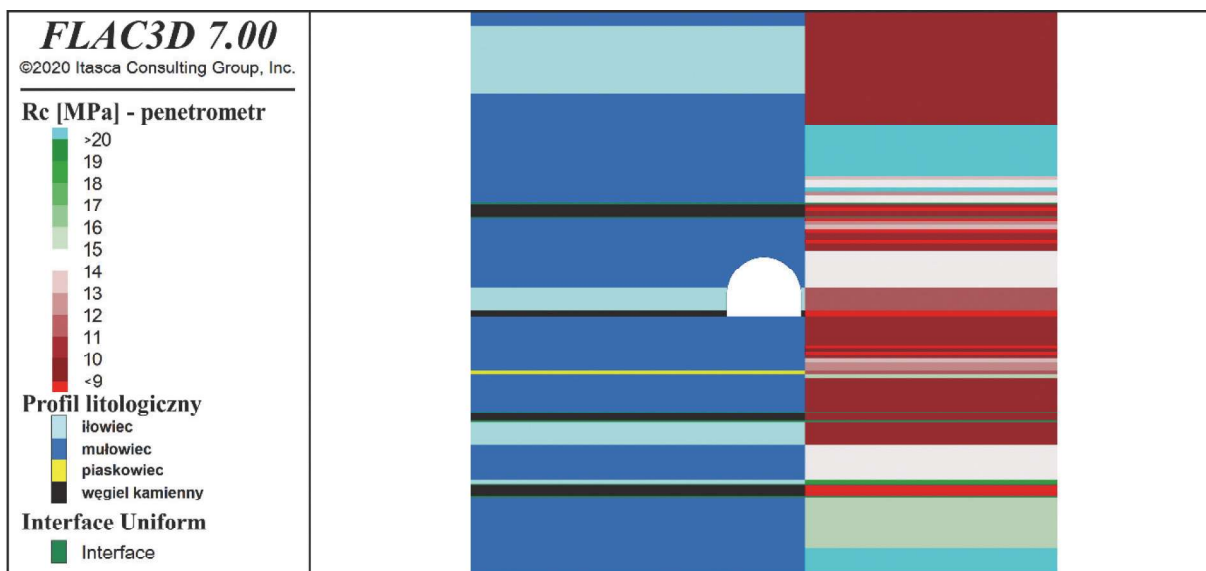


Rys. 11. Mapa współczynnika bezpieczeństwa FS po wybraniu ścian V pola z pokładu 385 (5/V/385, 6/V/385, 7/V/385)
Fig. 11. FS values displayed on level 960 infrastructure, plot taken after the completion of panels: 5/V/385, 6/V/385, 7/V/385



Rys. 12. Zasięg stref z $FS < 1,3$, dla stanu obecnego i po wyeksploatowaniu 6/V/391

Fig. 12. Isolines of FS values $< 1,3$ for steps representing current state and at the end of 6/V/391 panel



Rys. 13. Model numeryczny wyrobiska objazd południowy

Fig. 13. Numerical model of objazd południowy drift

ubiquitous-joint, których parametry wytrzymałościowe (kohezja, kąt tarcia wewnętrznego) na drodze analizy wstecznej, powiązано równaniami z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie (pochodzącą z badań penetrometrycznych). Ww. powierzchnie zamodelowano jako elastyczne idealnie plastyczne, a więc nie uwzględniono obniżenia kohezji oraz kąta tarcia wewnętrznego wraz z postępującym wyężeniem.

Kohezje i kąty dylatacji stref oraz powierzchni *ubiquitous joint* obniżane były zgodnie z tabelą 1.

Strop i spąg każdej z warstw węgla (rys. 13.) został zamodelowany elementem interface o zerowej wytrzymałości na rozciąganie, kohezji równej 10 kPa oraz kącie tarcia wewnętrznego równego 17° . Zastosowano niestowarzyszone prawo płynięcia dla naprężeń ściskających oraz stowarzy-

Tabela 1. Parametry pokrywcze górotworu
Table 1. Strain softening parameters

| | | | |
|---|------|--------------------------|-------|
| odkształcenia plastyczne (plastic shear strain) [-] | 0 | 0,1 | 0,2 |
| kąt dylatacji stref [°] | 10 | 5 | 0 |
| kąt dylatacji powierzchni uj [°] | 8 | 0 | 0 |
| kohezja strefy | 100% | 10% wartości początkowej | 1 kPa |
| kąt tarcia wewnętrznego stref oraz uj | 100% | 100% | 100% |

szone prawo płynięcia dla naprężeń rozciągających. Model przeliczono dla naprężeń poziomych równych 1,2 naprężeń pionowych w trzech krokach obliczeniowych, w których zmieniano wartość naprężeń pionowych przyłożonych do górnej granicy modelu:

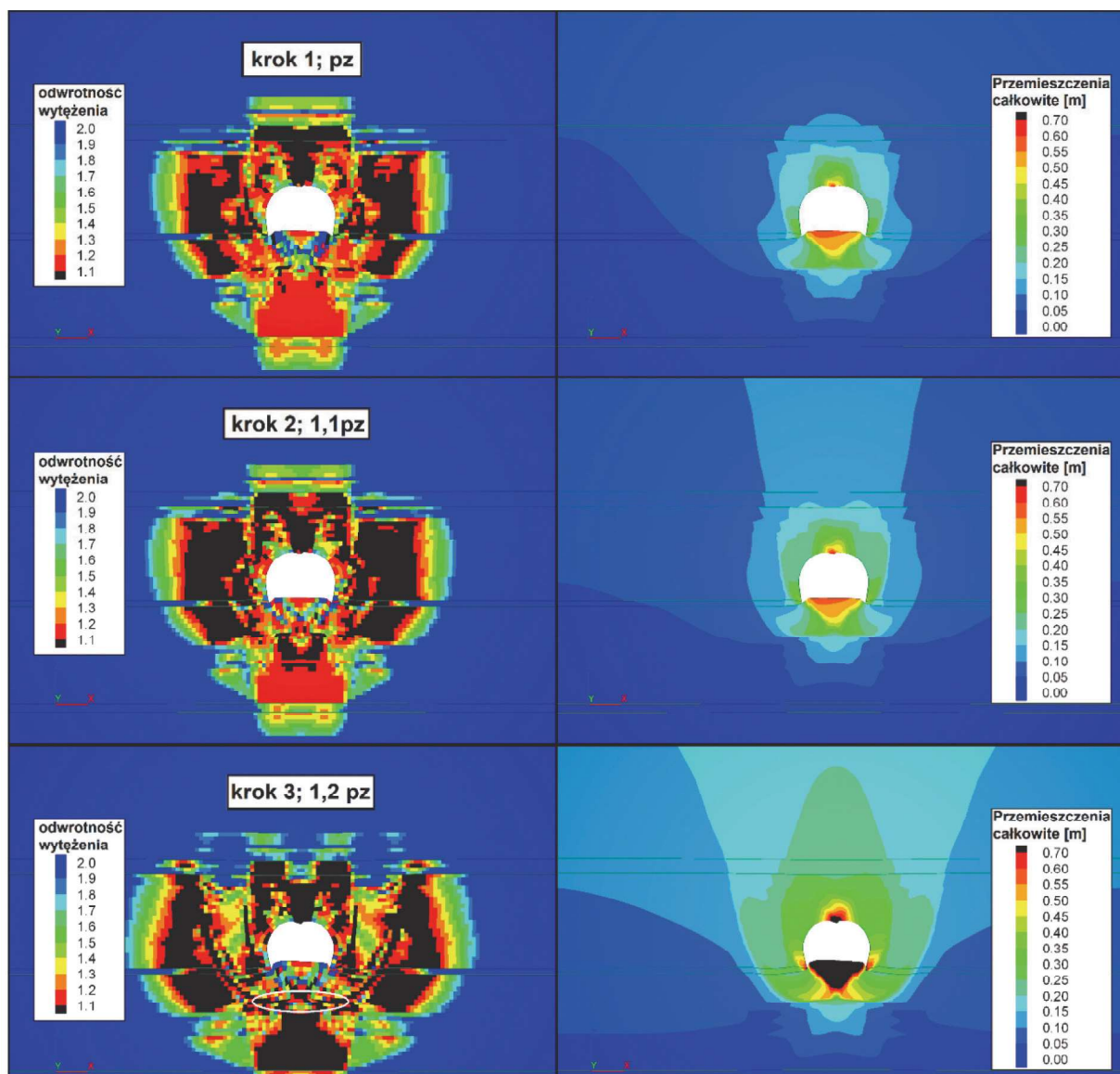
- 1) naprężenia pionowe $p_z = 18,24$ MPa
- 2) naprężenia pionowe $p_z = 1,1 \cdot 18,24$ MPa
- 3) naprężenia pionowe $p_z = 1,2 \cdot 18,24$ MPa

Przekrój wyrobiska odwzorowano na podstawie obudowy ŁPZS10 – najbardziej przypominającej kształtem oryginalnie

zamontowaną obudowę, jednakże z racji braku danych odnośnie jej nośności nie odwzorowano jej w modelu. Uzyskano dużą zgodność w zakresie zasięgu zniszczenia górotworu otrzymanego w modelu, z dokumentacją otworu BR-30/19 oraz BR-30/1/19. Wyniki analizy zamieszczono na rys. 14. W pierwszej kolumnie przedstawiono odwrotność wyężenia, gdzie kolorem czarnym zaznaczono strefy, w których dochodzi do wyężenia. W drugiej kolumnie znajdują się całkowite przemieszczenia.

Mechanizm zniszczenia jest następujący (rys. 14.):

1. Dochodzi do wyężenia warstw stropowych, do warstwy węgla włącznie (krok 1).
2. Przenoszone przez ocios naprężenia doprowadzają do coraz to większej degradacji skał w ociosie i spągu, podczas gdy warstwy stropowe nad węglem dzięki swoim wysokim parametrom wytrzymałościowym pozostają nadal w dużej mierze samonośne (krok 1-2).
3. W kroku nr 3 dochodzi do całkowitego zniszczenia warstewki mułowca znajdującej się w spągu, na rys. 14 zaznaczono ją białą elipsą. Dochodzi do nadmiernego wypiętrzenia spągu oraz zaciskania ociosów doprowadzających do zniszczenia siatki obliczeniowej.



Rys. 14 Mapa odwrotności wyężenia oraz przemieszczeń całkowitych otrzymanych z modelu numerycznego wyrobiska objazd południowy

Fig. 14. Stress-strength and displacement plots obtained from a numerical model of objazd południowy drift

7. Wnioski

Zaprezentowane obliczenia pokazują skomplikowany charakter zniszczenia górotworu, w którym eksploatację prowadzi LW „Bogdanka”. Prowadzone w Kopalni bazy danych oraz przyjęte założenia pozwoliły wiernie odwzorować mechanizmy zniszczenia obserwowane w Ruchu Zakładu. Prace nad modelem geomechanicznym Kopalni są kontynuowane.

Autorzy składają podziękowania za wkład w rozwój modelu geomechanicznego działom:

- DNS w składzie: D. Kijanka, D. Mól, M. Jekielek, R. Koncewicz
- DNW w składzie: B. Marciniak, M. Baszkiewicz-Zajic, A. Ruchel, M. Antoniuk,
- PMM – M. Szadziul.

Literatura

- ALEJANO, L., ALONSO E. 2005 - Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42. 481-507.
- BRADY, B., BROWN E. 2007 - Excavation design in stratified rock. In: *Rock Mechanics for underground mining*. Springer, Dordrecht. 225-226
- CAŁA M., PIECHOTA ST., TAJDUŚ A. 2004 - Stan naprężenia w górotworze w otoczeniu pól ścianowych w kopalni Bogdanka. *Wiadomości Górnicze* nr 2.
- DUNN M. 2014 - Geotechnical Models and Data Confidence in Mining Geotechnical Design, *Aus Rock 2014: Third Australasian Ground Control in Mining Conference*, (The AusIMM: Melbourne), pp. 127-133.
- ESTERHUIZEN G., BAJPAYEE T.S., ELLENBERGER J.L., MURPHY M. 2013 - Practical estimation of rock properties for modeling bedded coal mine strata using the Coal Mine Roof Rating. *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013*. 3. 1634-1647.
- HOEK E. 2007 – Practical Rock Engineering, źródło internetowe: <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>, pp. 198-200.
- Itasca Consulting Group, INC. 2020 - *FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 7.0*. Minneapolis: Itasca.
- MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z., OSTROWSKI Ł. 2019 - Opracowanie wytycznych doboru metryki kotwienia wzmacniającego górotwór między odrzwiami obudowy podporowej oraz jej przykotwiania w drążonych wyrobiskach korytarzowych w warunkach LW „Bogdanka”, praca niepublikowana.
- MAS IVARS D., PIERCE M., DEGAGNÉ D., DARCEL C. 2008 - Anisotropy and scale dependency in jointed rock-mass strength - A synthetic rock mass study. *1st International FLAC/DEM Symposium on Numerical Modeling*.
- READ J., STACEY P. 2009 - *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood, Vic, CSIRO Publishing, 7.
- SAINSBURY B.A. 2012 - A Model for Cave Propagation and Subsidence Assessment in Jointed Rock Masses.
- TAJDUŚ A., CAŁA M., TAJDUŚ K. 2012 - Geomechanika w budownictwie podziemnym. *Projektowanie i budowa tuneli*. pp. 140-141.
- XIABING L., SHAOHUI H., DAHAI W. 2020 - Numerical Analysis of the Anisotropy and Scale Effects on the Strength Characteristics of Defected Rockmass, *Advances in Civil Engineering Volume 2020*.
- ZDANOWSKI A. (red.) 1999 - *Atlas geologiczny Lubelskiego Zagłębia Węglowego*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2020
Artykuł akceptowano do druku – 27.11.2020