Górnictwo i Geoinżynieria • Rok 33 • Zeszyt 3/1 • 2009

Jerzy Cieślik, Jerzy Flisiak*, Antoni Tajduś**

ANALIZA WARUNKÓW STATECZNOŚCI WYBRANYCH KOMÓR KS „WIELICZKA" NA PODSTAWIE PRZESTRZENNYCH OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH**

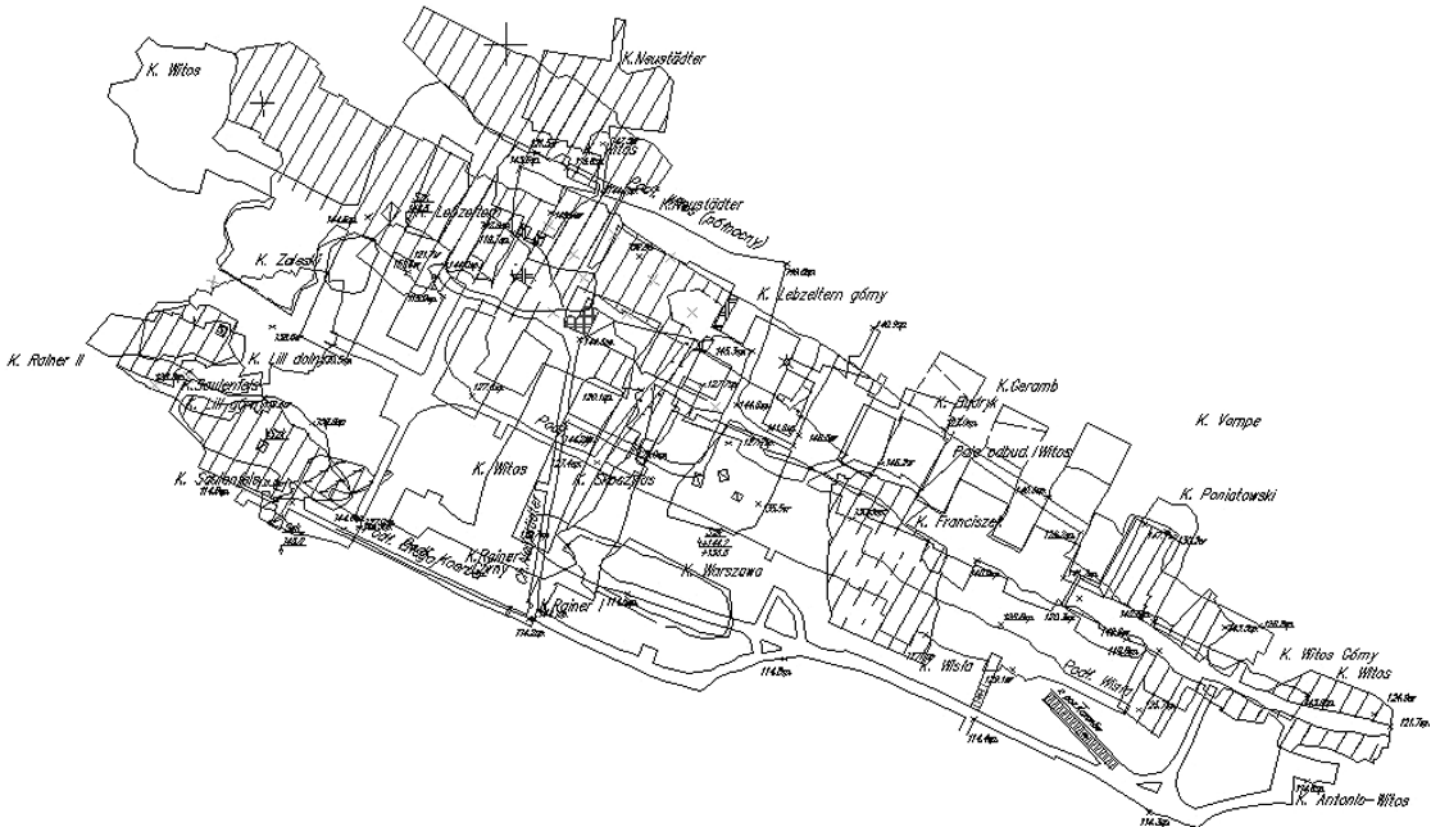
1. Wprowadzenie

Przedstawiona w artykule analiza stateczności dotyczy wycinka trasy turystycznej KS „Wieliczka", a mianowicie komór Warszawa, Budryk oraz Wisła. Komory te zostały wykonane w złożu pokładowym soli spizowych, na tzw. „międzypoziomie" Kazanów, który zalega na głębokości ok. 117 m pod ziemią. W prezentowanych w pracy obliczeniach pod uwagę wzięto wszystkie komory zalegające w otoczeniu wymienionych trzech komór trasy turystycznej, z których część znajduje się w złożu pokładowym soli spizowych:

— Neustadter, zespół komór Geramb (na poziomie IIn);
— Lebzeltern, Lebzeltern górny i komora Witos górny (na międzypoziomie Kazanów);
— zespół komór Witos na poziomie III kopalni;
— pozostałe zaś wykonane zostały w bryłach soli i należą do nich;
— Sulenfels, Zaleski, Reiner I Dolny, Reiner I Górny, Reiner II, Skoczylas (na poziomie IIw);
— Lill Dolny i Górny.

W pierwszej części artykułu zaprezentowano wyniki przestrzennego odwzorowania kształtu i orientacji komór w bezpośrednim otoczeniu komór Warszawa, Wisła i Budryk. Drugą część stanowi analiza wyników obliczeń stanu naprężenia i odkształcenia górotworu solnego w analizowanym rejonie oraz odpowiedź na pytanie, jaki wpływ na stateczność komór trasy turystycznej mają komory je otaczające. Przestrzenne obliczenia numeryczne przeprowadzono na modelu, w którym wiernie odwzorowano geometrię poszczególnych komór oraz przyjęto sprężysto-plastyczny model górotworu.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
** Praca została wykonana w ramach badań statutowych WGiG AGH numer 11.11.100.197



Rys. 1. Zestawienie rzutów poziomych wszystkich komór przyjętych do analizy w otoczeniu analizowanego wycinka trasy turystycznej

Obliczenia przeprowadzono na modelu fizycznym, którego parametry obliczeniowe odpowiadały reologicznym parametrom górotworu lepko-sprężystego. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych i analiz odkształceń plastycznych możliwa była ocena stateczności górotworu w obrębie komór trasy turystycznej Warszawa, Budryka i Wisła.

2. Geometryczne odwzorowanie komór w otoczeniu komór Warszawa, Wisła i Budryk

Geometryzację wykonano na podstawie materiałów dostarczonych przez Kopalnię Soli „Wieliczka". W zakres tych materiałów wchodziły mapy cyfrowe rzutów poziomych poszczególnych poziomów kopalni I, IIw, IIn, Kazanów i III, oraz cyfrowe mapy pionowych przekrojów poszczególnych komór. Udostępnione przez kopalnię mapy bardzo precyzyjnie przedstawiały rzeczywisty kształt analizowanych komór i na ich podstawie możliwe było stosunkowo wierne odtworzenie rzeczywistego kształtu komór.

Złożenie wszystkich rzutów poziomych komór z różnych poziomów opisanego wyżej rejonu kopalni przedstawiono na rysunku 1. Komory te stanowią skomplikowany przestrzenny układ wyrobisk.

W tabeli 1 zestawiono wszystkie komory, które uwzględniono w analizie, oraz podano współrzędne spągu i stropu komory, przyjęte do odwzorowania wraz z określeniem poziomu, na którym się znajdują. Przedstawione powyżej mapy oraz pionowe przekroje poszczególnych komór pozwoliły na budowę przestrzennych modeli geometrycznych komór.

TABELA 1

Zestawienie wszystkich komór przyjętych do obliczeń w otoczeniu wycinka trasy turystycznej

Komora	Współrzędne spągu, m n.p.m.	Współrzędne stropu, m n.p.m.	Uwagi
Poziom IIw			
Skoczylas	150	162	Po stronie zachodniej do poziomu 159 m n.p.m. wypełniona podsadzką
Sulenfels	145	170	Częściowo wypełniona urobkiem
Reiner II	160	169	
Reiner I dolny	159	164,5	Komora częściowo zabezpieczona kasztami
Reiner I górny	173	193	Niedostępna, rzeczywisty kształt nieznany
Franciszek	160	176,5	Komora podsadzona
Zaleski	160	173	

TABELA 1 cd.

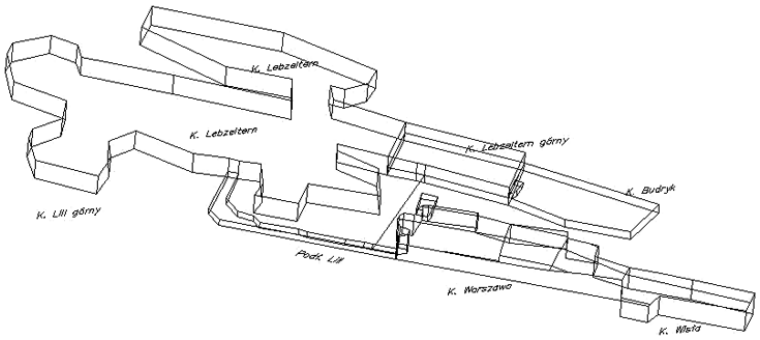
Komora	Współrzędne spągu, m n.p.m.	Współrzędne stropu, m n.p.m.	Uwagi
Poziom IIn			
Nustadter (większa)	144	159	Częściowo wypełniona urobkiem
Nustadter (mniejsza)	140	155	Komora niedostępną, podsadzona
Zespół komór Geramb	140	146,5	
Poziom Kazanów			
Warszawa	127	135	Stanowi część trasy turystycznej
Wisła	127	135	Stanowi część trasy turystycznej
Budryk	127	130	
Lebzeltern górny	127	134	Podsadzka do poziomu 130
Lebzeltern	127	134	Komora podsadzona,
Witos górny	126	130	
Poziom III			
Zespół komór Witos	115	122	Komory podsadzone żużlem

Na rysunku 2 zaprezentowano przykładowe, przestrzenne bryłowe odwzorowanie poszczególnych komór na międzypoziomie „Kazanów", które następnie wykorzystano przy budowie numerycznego modelu w rejonie analizowanego wycinka trasy turystycznej KS „Wieliczka".

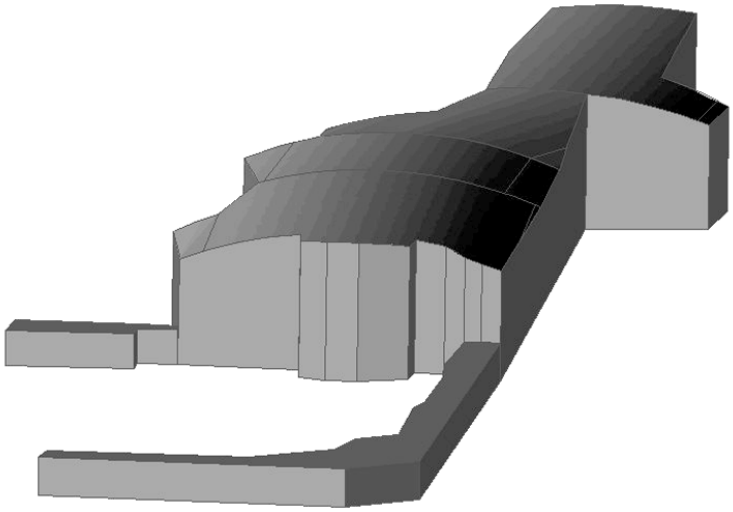
W odwzorowaniu pominięto drobne szczegóły geometryczne oraz wyrobiska niewielkich rozmiarów (w większość chodników), które nie miały praktycznego znaczenia w obliczeniach numerycznych. Cały model geometryczny dla wszystkich komór w analizowanym rejonie zaprezentowano na rysunku 3.

Poszczególne rysunki, tak jak prezentowane wcześniej mapy, nie są zaprezentowane w określonej skali, jednak stosunki odległości pomiędzy komorami oraz ich wzajemne wymiary zostały zachowane, a ich położenie określono na podstawie danych kopalnianych w geodezyjnym układzie odniesienia. Tak przygotowane odwzorowanie geometrii układu komór zostało „naniesione" na warunki geologiczne złoża soli spizowych oraz zubrów w rozpatrywanym rejonie kopalni.

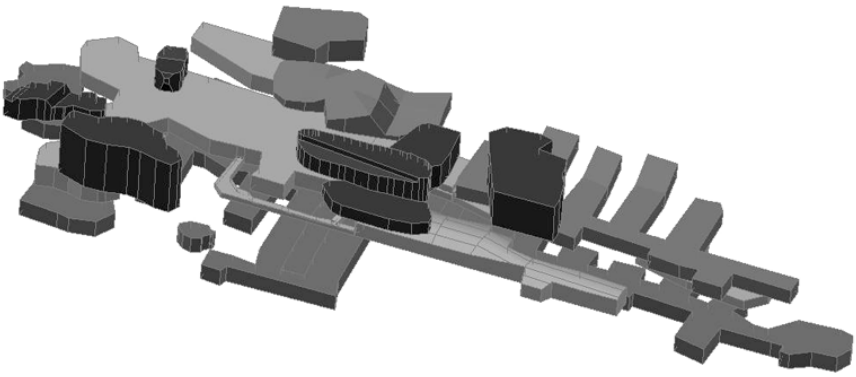
a)



b)



Rys. 2. Model komór zlokalizowanych na międzypoziomie „Kazanów” (po lewej) oraz widok od strony sceny komory „Warszawa” (po prawej)

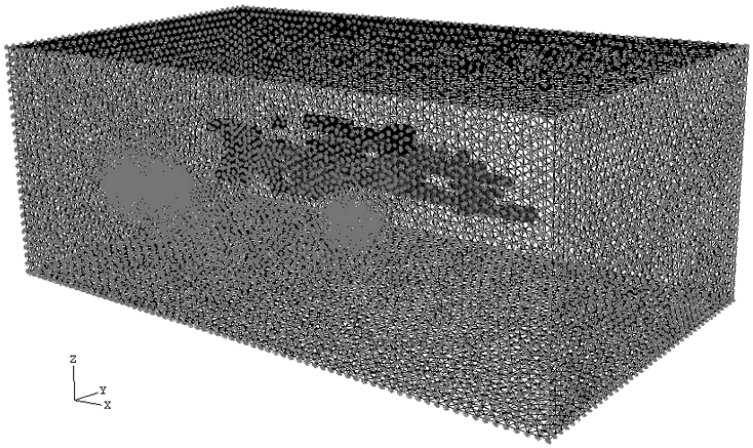


Rys. 3. Zestawienie wszystkich przestrzennych modeli komór uwzględnianych w modelowaniu numerycznym

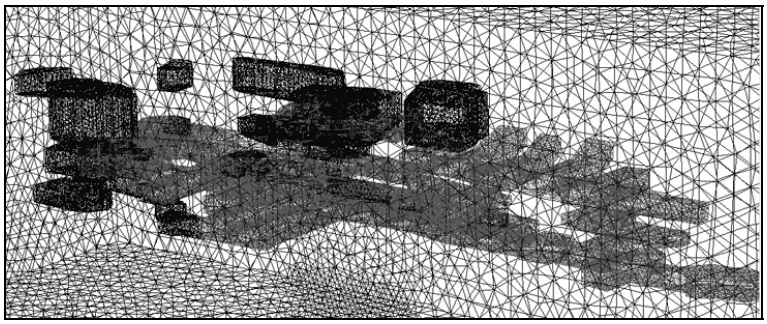
3. Obliczenia MES stanu naprężenia i odkształcenia górotworu w otoczeniu komór Warszawa i Wisła

Celem zaprezentowanych w artykule obliczeń było określenie wpływu komór wykonanych w otoczeniu wyrobisk trasy turystycznej, na stateczność komór Warszawa, Budryk oraz Wisła. Dla realizacji zamierzonego celu przeprowadzono przestrzenne obliczenia numeryczne na modelach górotworu uwzględniających aktualną sytuację górniczo geologiczną oraz przestrzenny układ komór tego rejonu. Do modelowania numerycznego wykorzystano metodę elementów skończonych, a obliczenia wykonano za pomocą programu MES ABAQUS.

a)



b)



Rys. 4. Geometria, siatka MES oraz warunki brzegowe przyjęte do obliczeń numerycznych

Zgodnie z uzyskanymi z KS „Wieliczka" informacjami o budowie geologicznej złoża przyjęto, że model górotworu w wybranym rejonie zbudowany jest z 3 warstw: warstwy zubrów w spągu i w stropie, oraz soli spizowych w otoczeniu analizowanych komór. W związku z tym, że górotwór zamodelowano do samej powierzchni terenu, obciążenie modelu sta-

nowił jedynie ciężar własny modelowanych utworów skalnych (przyjęto, że średnia gęstość nadkładu wynosi 2100 kg/m^3). W obliczeniach przyjęto, że poziom „Kazanów" oraz komory Warszawa i Wisła znajdują się na poziomie127 m n.p.m., co odpowiada głębokości 117 m od powierzchni terenu. Wygląd omawianego modelu, wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi zaprezentowano na rysunku 4. W modelu geometrycznym wygenerowano 735 326 elementów skończonych typu TETRA (ostrosłupów o podstawie trójkątnej), odpowiednio zagęszczonych w miejscach spodziewanej, największej koncentracji naprężeń. Siatkę MES w przykładowym przekroju modelu zaprezentowano również na rysunku 4.

Warunki brzegowe modelu przyjęto w postaci zerowych przemieszczeń w kierunkach normalnych do odpowiednich pionowych i poziomej płaszczyzny na brzegach modelu. Płaszczyznę odpowiadającą powierzchni terenu pozostawiono swobodną.

4. Parametry i model fizyczny górotworu oraz warianty obliczeń numerycznych

Przyjęte do obliczeń parametry odpowiadały aktualnym, uwzględniającym zmianę własności ośrodka w czasie dla stanu z grudnia 2008 roku, lepko-sprężystym parametrom górotworu solnego.

TABELA 2
Parametry przyjęte do obliczeń

Warstwa	$E(t)$, MPa	ν, –	Rc, MPa	Rr, MPa	Rc_d, MPa	Rr_d, MPa	c, MPa	ϕ, °	c_d, MPa	ϕ_d, °
Sól spizowa	2570	0,4	36,9	0,91	22,1	0,55	4	35	2,4	21
Zubry	850	0,35	–	–	–	–	1,7	21	0,95	19

Poza parametrami odkształceniowymi w tabeli 2 zestawiono parametry wytrzymałościowe przyjęte dla soli spizowej, uzyskane w próbach doraźnych oraz parametry odpowiadające wytrzymałości długotrwałej (z indeksem *d*) obliczanej zwykle jako 0,6 wartości doraźnych. Na podstawie tych parametrów do obliczeń przyjęto sprężysto-plastyczny model górotworu z warunkiem plastyczności Coulomba Mohra i niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia. Obliczenia przeprowadzono na modelu obliczeniowym, w którym w warunku plastyczności przyjęto parametry wytrzymałości długotrwałej [3].

Zasadniczym celem przeprowadzonych obliczeń była analiza stanu naprężenia i odkształcenia górotworu w obrębie komór Warszawa, Budryk i Wisła, stanowiących część trasy turystycznej KS „Wieliczka" oraz wykazanie, jaki wpływ na te wyrobiska mają komory z najbliższego otoczenia.

W związku z tym, iż obecnie odtworzenie szczegółowej historii wykonania poszczególnych komór jest bardzo trudne, obliczenia MES przeprowadzono w dwóch krokach obliczeniowych — w pierwszym modelowano uzyskanie pierwotnego stanu naprężenia a w drugim wykonanie jednocześnie wszystkich komór. W wyniku takiego postępowania uzyskano rozkład przemieszczeń, naprężeń i odkształceń górotworu.

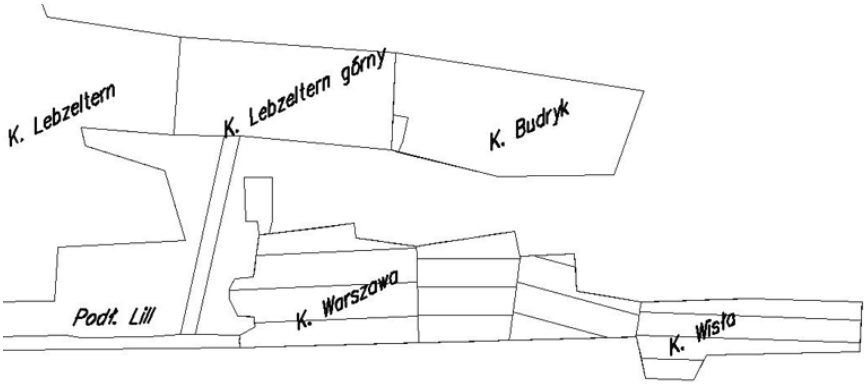
5. Wyniki obliczeń numerycznych — analiza stanu naprężenia i odkształcenia w wybranych rejonach komór

Przyjęty model obliczeniowy jest niezwykle rozbudowany i skomplikowany, a jego analiza w całości praktycznie niemożliwa. W artykule analizę wyników zdecydowano się przeprowadzić jedynie w wybranym rejonie górotworu obejmującym następujące zespoły komór:

— rejon trasy turystycznej w obrębie komór Warszawa, Budryk, Wisła, oraz komorę Lebzeltern Górny i Lebzeltern na miedzypoziomie Kazanów;
— rejon komór Geramb na poziomie Iin;
— rejon komór Witos na poziomie III.

Analiza wyników w tych rejonach pozwoliła prześledzić wpływ komór otaczających wycinek trasy turystycznej na wyrobiska trasy, a z drugiej strony ocenić stan poszczególnych komór. Wyczerpującą charakterystykę wyników zaprezentowano w pracy [3].

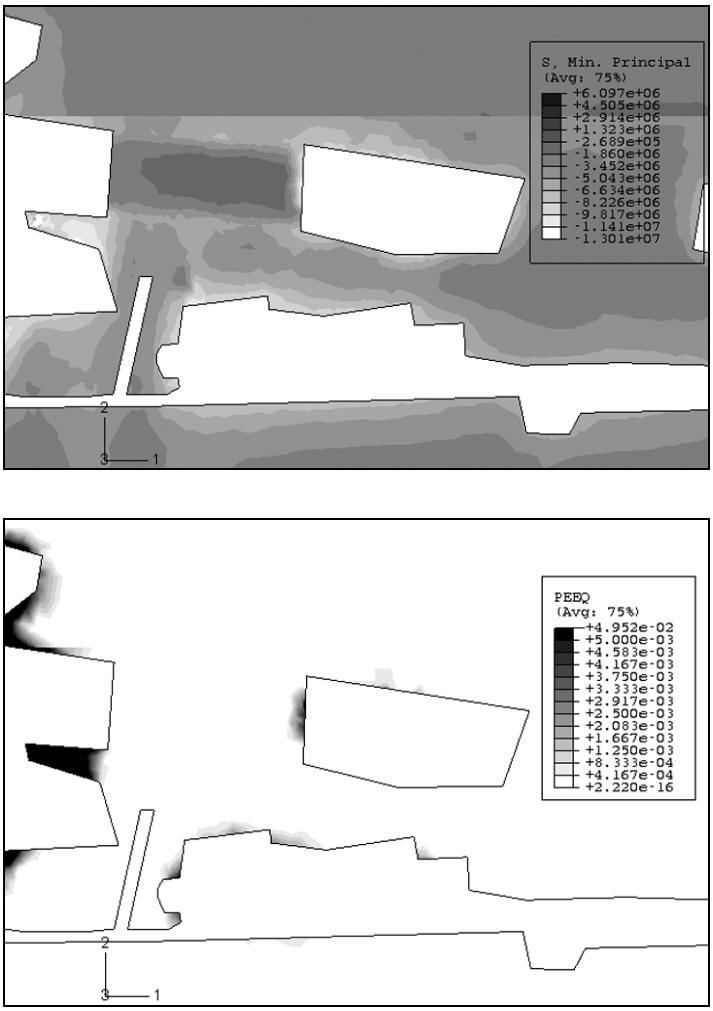
Wyniki obliczeń stanu naprężenia (najmniejszych i największych naprężeń głównych) zaprezentowano w przekroju poziomym i dwóch przekrojach pionowych w wybranym rejonie (rys. 5), zaś stan odkształcenia w tych samych przekrojach przedstawiono w postaci map zredukowanych odkształceń plastycznych górotworu. Współrzędna pionowa przekroju poziomego wynosiła +129 m n.p.m. Przekrój obejmował komory Warszawa, Wisła oraz Budryk na wysokości 2 m od ich spągu.



Rys. 5. Usytuowanie przekroju poziomego, dla którego wykonano mapy stanu naprężenia i odkształcenia górotworu w otoczeniu części trasy turystycznej

a)

b)



Rys. 6. Mapa najmniejszych naprężeń głównych σ_3 (a); Mapa zredukowanych odkształceń plastycznych dla komór trasy turystycznej Warszawa, Budryka i Wisła (b)

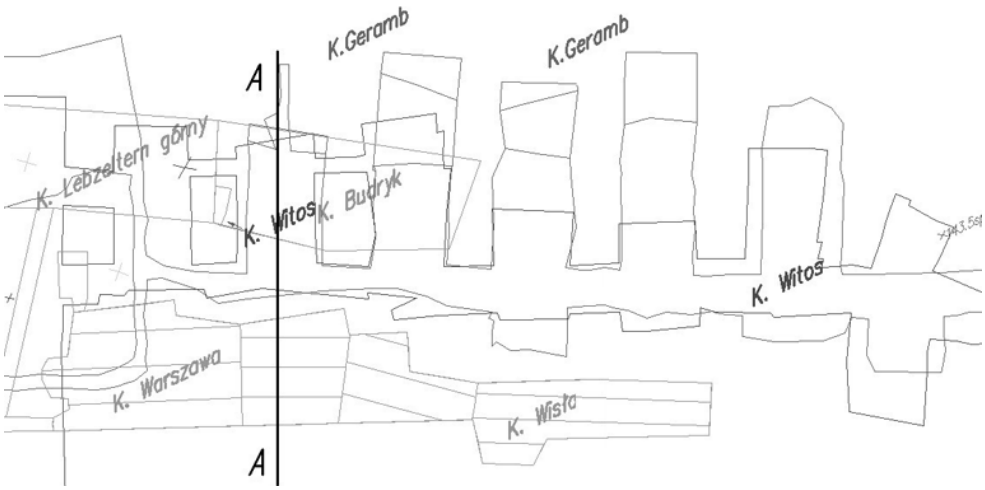
Analiza map najmniejszych naprężeń głównych σ_3 w poziomym przekroju komór trasy turystycznej (rys. 6a) pozwala stwierdzić, że największa koncentracja naprężeń σ_3 występuje w ociosach komory Lebzeltern oraz w filarze wchodzącym do wewnątrz tej komory. Wartość tych naprężeń jest stosunkowo wysoka (w odniesieniu do naprężeń pierwotnych) ale nie przekracza $\sigma_3 = -13$ MPa. W filarze pomiędzy komorami Lebzeltern i Warszawa najmniejsze naprężenia główne nie przekraczają $\sigma_3 = -3{,}5$ MPa. Nieco większe wartości σ_3 można odnotować w filarze pomiędzy komorami Budryk i Warszawa, gdzie osiągają one wartości ok. $\sigma_3 = -6$ MPa, a w północnym ociosie komory Warszawa dochodzą nawet do

$\sigma_3 = -10$ MPa. Podobnej wartości naprężenia ściskające można też obserwować w bezpośrednich ociosach komory Budryk i Lebzeltern Górny. W komorze Wisła na ociosach tej komory najmniejsze naprężenia główne nie przekraczają $\sigma_3 = -7$ MPa.

Zaprezentowana na rysunku 6b mapa zredukowanych odkształceń plastycznych obrazuje strefy górotworu, w którym przekroczony został warunek plastyczności (Coulomba-Mohra). Jak można zauważyć na rysunku 6b, odkształcenia plastyczne pojawiają się głównie w ociosach komory Lebzeltern oraz o niewielkim zasięgu w północnym ociosie komory Warszawa i w otoczeniu sceny komory Warszawa. W miejscach lokalizacji tych odkształceń komora Warszawa zabezpieczona jest kasztami, a komora Lebzeltern jest podsadzona. Odkształcenia plastyczne można również zauważyć lokalnie na północnym ociosie komory Budryk. Również i w tym miejscu komora ta zabezpieczona jest kasztami.

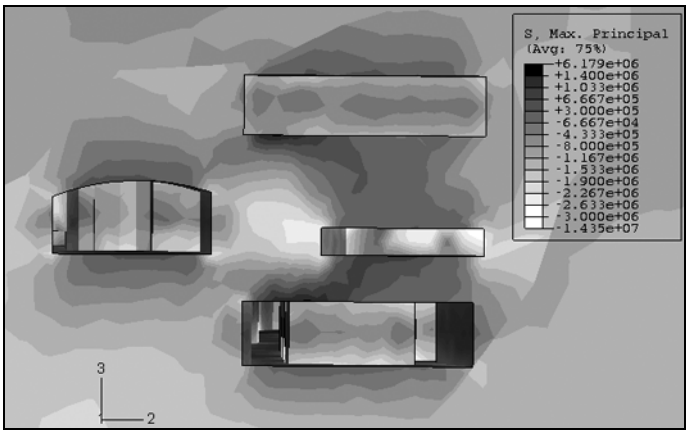
Przykładową analizę stanu naprężenia przeprowadzono również w pionowym przekroju A–A wykonanym w odległości 35 m od wlotu podłużni Lill do komory Warszawa (rys. 7). Przekrój zorientowany jest prostopadle do dłuższej osi komór Warszawa i Wisła i przechodził przez komorę Budryk oraz komory wyżej leżące — Geramb IIn/24 i niżej leżące — Witos III/129, na poziomach IIn i III.

Analiza map dla przekroju A–A (rys. 8) pozwala stwierdzić, że największe naprężenia rozciągające występują w półkach pomiędzy komorami Geramb, Budryk i Witos, a ich wartość dochodzi do ok. $\sigma_1 = 1{,}4$ MPa (w spągu komory Geramb i stropie komory Witos). Zasięg tych naprężeń jest jednak lokalny. W filarze pomiędzy komorami Warszawa i Budryk σ_1 osiągają wartości ok. $\sigma_1 = -2{,}4$ MPa i mają charakter naprężeń ściskających. W stropie komory Warszawa można zaobserwować niewielkie wartości naprężeń rozciągających, nie przekraczających $\sigma_1 = 0{,}70$ MPa

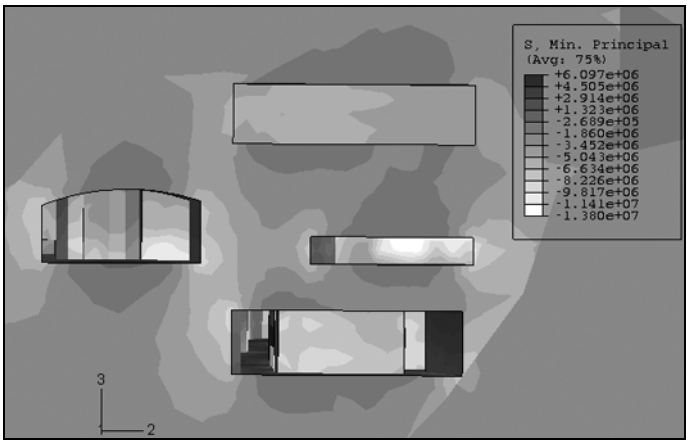


Rys. 7. Usytuowanie przekroju pionowego A–A, w którym wykonano mapy stanu naprężenia i odkształcenia górotworu w otoczeniu części trasy turystycznej

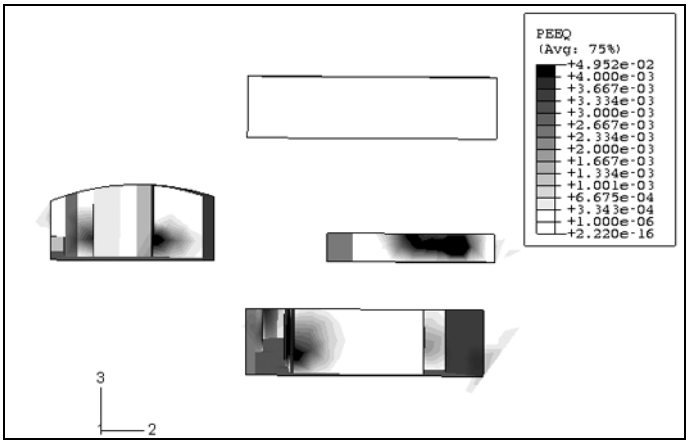
a)



b)



c)



Rys. 8. Wyniki obliczeń w przekroju pionowym A–A w otoczeniu trasy turystycznej

Analiza map najmniejszych naprężeń głównych σ_3 w pionowym przekroju A–A modelu pozwala stwierdzić, że największe koncentracje naprężeń ściskających w tym przekroju występują w filarze pomiędzy komorami Warszawa, Budryk i Witos oraz w północnym ociosie komory Budryk. Przyczyną tych koncentracji w przypadku filara jest wzajemne położenie komór Geramb, Warszawa i Witos, a w przypadku ociosu komory Budryk dodatkowo granica złoża pokładowego soli. Wartości najmniejszych naprężeń głównych w tych rejonach nie przekraczają $\sigma_3 = -10{,}2$ MPa.

Mapy zredukowanych odkształceń plastycznych w tym przekroju wskazują, że jedynie na południowym ociosie komory Warszawa, w przystropowej części oraz północnych ociosach komór Geramb i Witos może dochodzić do przekroczenia warunku plastyczności. Zasięg tych odkształceń jest jednak lokalny. W filarze pomiędzy komorami Warszawa i Budryka nie wykazano przekroczenia warunku plastyczności (dla długotrwałych parametrów wytrzymałościowych). Północny ocios komory Budryka, w miejscu przekroju jest zabezpieczony kasztami, zaś komora Witos jest częściowo (lokalnie) podsadzona.

6. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując obliczenia przeprowadzone w otoczeniu komór trasy turystycznej Warszawa, Budryk i Wisła należy stwierdzić, iż największy wpływ na zachowanie tych komór i stan naprężenia w ich otoczeniu mają wyrobiska (komory) lezące powyżej — Geramb i poniżej czyli zespół komór Witos. To wzajemne usytuowanie wyrobisk jest przyczyną koncentracji naprężeń ściskających w północnych ociosach komory Warszawa oraz Budryk (w przypadku komory Budryka dodatkowo negatywnie wpływa również jej lokalizacja w pobliżu granicy złoża pokładowego soli). Komora Wisła leży w dalszej odległości od krawędzi komór wyżej i niżej leżących, stąd mniejsze koncentracje naprężeń w jej otoczeniu. W stropie komór Warszawa i Budryk można obserwować niewielkiej wartości naprężenia rozciągające, ale należy zaznaczyć, iż w modelu nie uwzględniono żadnych elementów obudowy kotwiowej czy kasztów, którymi w rzeczywistych warunkach komory są zabezpieczone. Analiza odkształceń plastycznych pozwala stwierdzić, iż odkształcenia te pojawiają się głównie w północnym ociosie komory Warszawa i w otoczeniu sceny komory. Mają one zasięg lokalny. W miejscach lokalizacji tych odkształceń komora Warszawa zabezpieczona jest kasztami. Odkształcenia plastyczne można również zauważyć lokalnie na północnym ociosie komory Budryka, gdzie zamontowano obudowę kasztową. W filarze pomiędzy komorami Warszawa i Budryk nie stwierdzono występowania odkształceń plastycznych, które zagrażałyby jego stateczności.

W przypadku komór wykonanych w złożu pokładowym należy zaznaczyć, że przekroczenie wytężenia, czy warunku plastyczności w górotworze solnym (zdefiniowanego dla parametrów wytrzymałości długotrwałej) nie oznacza nagłego zniszczenia górotworu tak jak to dzieje się w skałach, ale skutkuje, w stosunkowo długim okresie bardziej intensywnym pełzaniem górotworu oraz możliwością pojawienia się pęknięć lub rozwarstwień na

granicach litologicznych czy przewarstwieniach. Trzeba też dodać, iż skutki takich zjawisk powinny być obserwowane głównie w przeszłości, obecnie zaś górotwór w tych rejonach może być jedynie osłabiony. Należy też podkreślić, że proces pełzania górotworu solnego w obrębie analizowanych komór zachodził w przeszłości, zachodzi obecnie i będzie postępował w przyszłości, jednak z punktu widzenia geomechaniki najbardziej istotna jest intensywność tych zjawisk. Dzięki przeprowadzonych w tej pracy obliczeniom wyznaczono rejony, w których można się spodziewać zwiększonej intensywności niekorzystnych zjawisk towarzyszących naturalnej tendencji do zaciskania i odspajania się słabszych części, czy pękania niezwykle niejednorodnego i różnorodnego górotworu solnego Kopalni Wieliczka (np. na licznych przewarstwieniach, czy niejednorodnościach).

Należy podkreślić, iż dla tak skomplikowanej, trójwymiarowej sytuacji górniczej jedynie przestrzenne obliczenia mogą dać rzetelną ocenę stanu górotworu w otoczeniu analizowanych komór.

LITERATURA

[1] *Mikoś T.*: Metodyka kompleksowej rewitalizacji, adaptacji i rewaloryzacji zabytkowych obiektów podziemnych z wykorzystaniem technik górniczych. UWND AGH, Kraków, 2005

[2] *Szewczyk J.*: Interpretacja rezultatów badań deformacji powierzchni i górotworu w rejonie centralnym Kopalni „Wieliczka" w aspekcie ochrony powierzchni i wyrobisk oraz zagrożeń wodnych za rok 2005. Kraków, 2005 (praca niepublikowana)

[3] *Tajduś A. i in.*: Wpływ wykonywanych robót górniczych w tym wykonania chodnika dojściowego, na stateczność komory „Warszawa" na poziomie III oraz stateczność innych komór zlokalizowanych w jej rejonie. Kraków, 2009 (praca niepublikowana)