

dr inż. Daniel Wałach<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-5124-0333

# Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań techniczno-materiałowych w modernizacji podziemnych obiektów zabytkowych na przykładzie Smoczej Jamy w Krakowie

*Application of modern technical and material solutions in the modernisation of underground historical buildings on the example of the Dragon's Den in Cracow*

DOI: 10.15199/33.2022.11.11

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie nowoczesnych rozwiązań techniczno-materiałowych w modernizacji podziemnych obiektów zabytkowych na przykładzie Smoczej Jamy w Krakowie. Zaprezentowano metodę dokładnego odwzorowania trójwymiarowej geometrii jaskini na podstawie chmury punktów uzyskanej ze skaningu 3D oraz obliczeń numerycznych i określono zakres oraz metodę zabezpieczenia masywu skalnego. W artykule opisano również przeprowadzone dodatkowe prace modernizacyjne, których celem było ulepszenie funkcjonowania Smoczej Jamy oraz zwiększenie bezpieczeństwa jej użytkowników.

**Słowa kluczowe:** Smocza Jama w Krakowie; podziemne obiekty zabytkowe; skaningu laserowy 3D; modernizacja.

**Abstract.** The paper presents a case study of the application of modern technical and material solutions in the modernisation of underground historical structures on the example of the Dragon's Den in Krakow. It presents a methodology for accurately reconstructing the three-dimensional geometry of the cave on the basis of a point cloud obtained from 3D scanning and numerical calculations, which are the key to determining the extent and method of securing the rock mass. The paper also describes additional modernisation works performed to improve the functioning of the Dragon's Den and increase the safety of its visitors.

**Keywords:** Dragon's Den in Cracow; underground heritage structures; 3D laser scanning; modernisation.

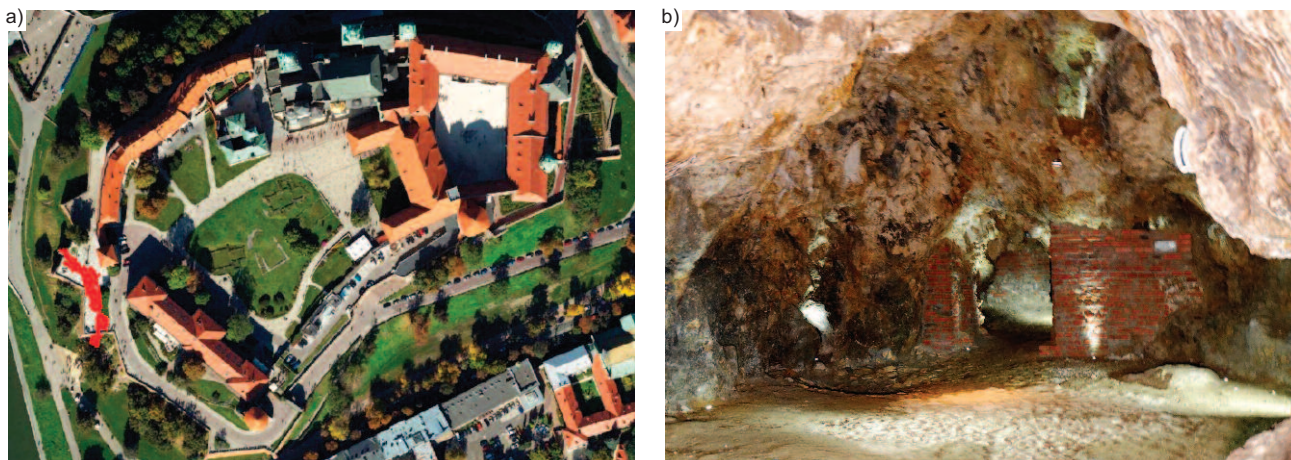
Podziemne obiekty zabytkowe, ze względu na swoją charakterystykę, wymagają indywidualnego podejścia podczas realizacji prac modernizacyjnych oraz remontowych. Dotyczy to zarówno etapu ich projektowania, jak i realizacji. Geometria obiektów podziemnych powoduje konieczność stosowania specjalistycznych metod jej odwzorowania, a projektując ich zabezpieczenie, należy mieć na uwadze obciążenia o innym charakterze niż w przypadku obiektów naziemnych. Z problematyką tą zmierzono się podczas modernizacji naturalnej jaskini zwanej Smoczą Jamą lub Jaskinią Smoka [1] znajdującej się w zachodniej części Wzgórza Wawelskiego w Krakowie (fotografia 1). Powstała ona wskutek procesów krasowych, które spowodowały, że wzdłuż spękań i szczelin w skałach wapiennych woda podziemna wydrążyła pustki w postaci komór i korytarzy, które łącząc się, stworzyły naturalną jaskinię.

W XIX w. jaskinia została oczyszczona przez miasto i w 1842 r. otwarto ją dla turystów (fotografia 2). Obecnie trasa turystyczna to główny ciąg jaskini o długości ok. 80 m. Rozpoczyna się na terenie zamku na Wawelu w pobliżu Baszty Żłodzijskiej, gdzie za pomocą kręconych schodów zwiędzający dostają się do jaskini. Na trasie znajdują się trzy komory (rysunek 1). Największa, zwana komorą Grabowskiego ma długość 25 m i wysokość do 10 m. W niektórych miejscach ściany i sklepienie jaskini zostały wzmocnione ceglanyymi murami i filarami. Wyjście znajduje się w pobliżu koryta Wisły, poza obrębem murów zamku.

Na wartość zabytkową Smoczej Jamy składają się elementy przyrody nieożywionej (budowa geologiczna, naturalny kształt jaskini z charakterystycznymi formami urzeźbienia skały), historyczne struktury budowlane (mury fortyfikacji kleszczowych, XIX-wieczna wieżyczka studzienna adaptowana na klatkę schodową w 1918 r., pozostałości drugiej klatki schodowej, gotycki portal wtórnie użyty w XIX w. jako wejście do jaskini, kopuła nad komorą Grabowskiego i in.), warstwy archeologiczne, a także wartości niematerialne związane z tradycją miejsca (legendarne i historyczne, m.in. najstarszy obiekt w Krakowie udostępniony turystycznie).

Obecnie obiekt zaliczany jest do dziedzictwa zarówno naturalnego, jak i kulturowego. Należy podkreślić, że jaskinia jest też jednym z najważniejszych i najbardziej charakterystycznych elementów Wzgórza Wawelskiego. Smo-

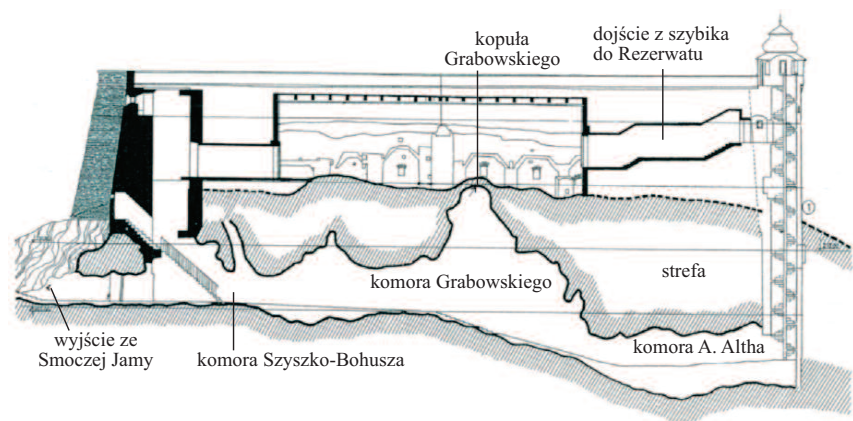
<sup>1)</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami; wałach@agh.edu.pl



Fot. 1. Smocza Jama na Wzgórzu Wawelskim: a) lokalizacja jaskini oznaczona kolorem czerwonym [2]; b) widok wnętrza jaskini  
 Photo 1. Dragon's Den on Wawel Hill: a) location of the cave marked in red [2]; b) view of the cave interior



Fot. 2. Widok Smoczej Jamy w okresie 1920 ÷ 1935 [3]  
 Photo 2. View of the Dragon's Den in the period 1920 ÷ 1935 [3]



Rys. 1. Przekrój podłużny przez Smoczą Jamę [4]  
 Fig. 1. Longitudinal section through the Dragon's Den [4]

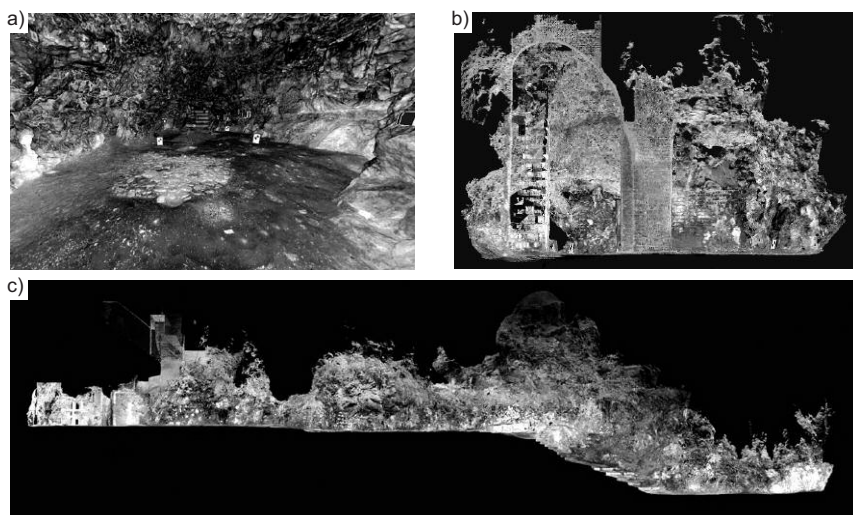
cza Jama stanowi zabytek nieruchomy wpisany do rejestru na podstawie decyzji Urzędu Wojewódzkiego Krakowskiego oraz decyzji Małopolskiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków

o zmianie decyzji w sprawie wpisu do rejestru zabytków nieruchomości dotyczącej całości Wzgórza Wawelskiego. W związku z tym jaskinia podlega pełnej ochronie konserwatorskiej.

### Odwzorowanie geometrii Smoczej Jamy

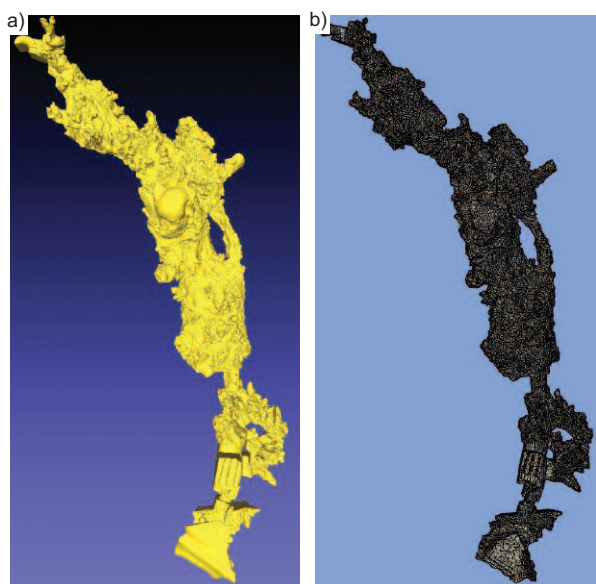
Do odwzorowania geometrii Smoczej Jamy wykorzystano dane TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) uzyskane na podstawie chmury punktów pozyskanych skanerem FARO Fokus S [5]. Odwzorowanie całej jaskini przeprowadzono na podstawie 62 skanów (fotografia 3). W celu połączenia poszczególnych pomiarów wykorzystano program FARO Scene 2018. Algorytm połączył chmurę punktów w sposób automatyczny metodą Cloud to Cloud z Subsampling 50 mm. W procesie łączenia wykorzystano wbudowane w skaner instrumenty w postaci inklinometru oraz kompasu. Dodatkowo wykorzystano automatyczny algorytm wykrywania monochromatycznych markerów naklejonych w obiekcie. W celu przeprowadzenia szczegółowej analizy wybranego odcinka jaskini z powstałej chmury punktów wycięto część, zawierającą punkty w analizowanej przestrzeni techniką ClippingBox analogicznie jak w [6].

Kolejnym etapem obróbki danych było siatkowanie chmury punktów. W tym celu wykorzystano program MeshLab, korzystając z metody Remeshing Surface Reconstruction: Ball Pivoting analogicznie jak w [7]. Uzyskane w ten sposób odwzorowanie geometryczne analizowanej jaskini (fotografia 4) stanowiło podstawę do prowadzenia dalszych analiz wytrzymałościowych oraz prac projektowych w obrębie Smoczej Jamy. Uzyskany trójwymiarowy model jaskini umożliwił wyznaczenie przekrojów charakterystycznych stanowiących podstawę do projektowania jej wzmocnienia oraz modernizacji (rysunek 2).



Fot. 3. Skaning laserowy 3D Smoczej Jamy: a) widok markerów (białe punkty) oraz położenia głowicy skanera podczas pomiarów wewnątrz jaskini; b) szczegóły wątków muru; c) widok ogólny chmury punktów

Fot. 3. 3D laser scanning of the Dragon's Den: a) view of the markers and position of the scanner during measurements; b) details of the brickwork; c) view of the point cloud



Fot. 4. Model 3D Smoczej Jamy: a) chmura punktów ze skaningu 3D; b) siatka powierzchni trójkątnych odwzorowujących geometrię jaskini

Photo 4. 3D model of the Dragon's Den: a) point cloud from 3D scanning; b) grid of triangular surfaces mapping the cave geometry

### Zabezpieczenie i modernizacja Smoczej Jamy

**Obliczenia numeryczne.** W celu określenia stateczności Smoczej Jamy oraz sposobu jej zabezpieczenia przeprowadzono obliczenia w programie FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions). Jest to oprogramowanie wykorzystujące modelowanie numeryczne dedykowane analizom zagadnień z dziedziny geotechniki i mechaniki skał. Obliczenia w programie

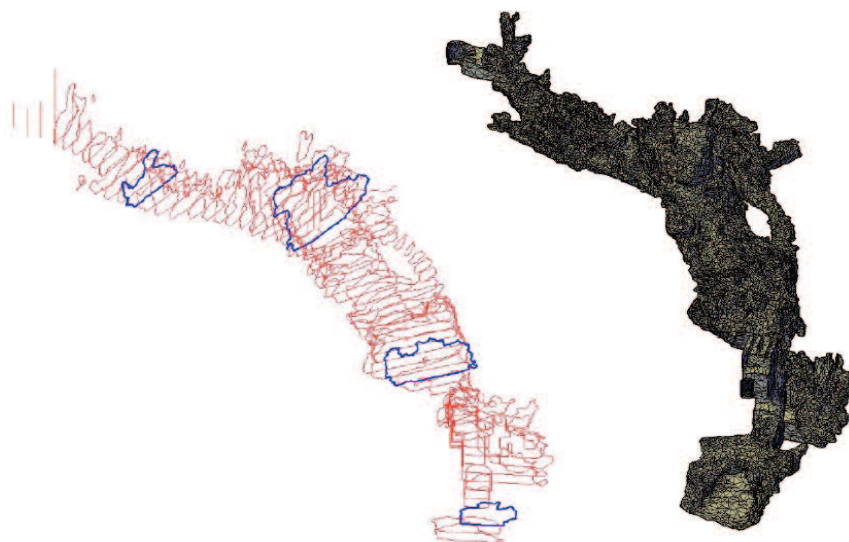
wykonywane są metodą różnic skończonych, w jawnym schemacie obliczeń. Do odwzorowania geometrii Wzgórza Wawelskiego i murów wykorzystano dane z mobilnego i lotniczego skaningu laserowego. Na potrzeby modelu przestrzennego konieczne było odpowiednie ich przetworzenie, aby wygenerować siatkowe powierzchnie terenu oraz odwzorować geometrię obiektów inżynierskich, takich jak mury zewnętrzne, konstrukcje oporowe czy budynki analogicznie jak w przypadku samej Smoczej Jamy (rysunek 3). Przestrzenny model numeryczny uwzględniający rzeźbę Wzgórza Wawelskiego, istniejące obiekty i geometrię obiektów podziemnych składał się z prostopadłościennych elementów o podstawie czworoboków bądź trójkątów. Siatka elementów została zagęszczona w pobliżu obiektów podziemnych w taki sposób, aby elementy na obrysie wyrobiska były nie większe niż 20 cm (rysunek 4). Elementom odwzorowującym mury oraz tarasy nad Smoczą Jamą przypisano liniowo-sprężysty model

konstrytywny. Masyw skalny potraktowano jako jednorodny i przypisano mu parametry liniowo-sprężysto-plastycznego modelu konstytutywnego z kryterium wyężeniowym Coulomba – Mohra. Kotwy wzmacniające masyw skalny odwzorowano jako sztywno połączone z nim dwuwymiarowe elementy strukturalne. Parametry masywu skalnego otaczającego jaskinię przyjęto analogicznie jak w [8].

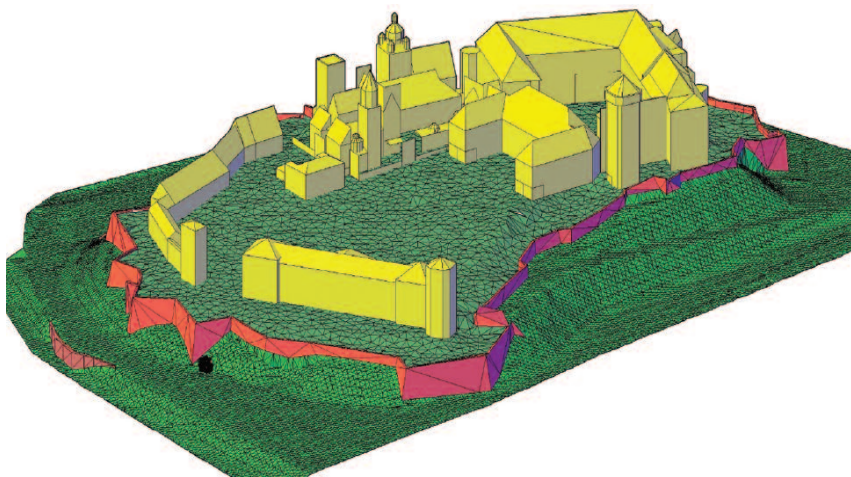
W wyniku obliczeń numerycznych określono stan naprężenia w masywie skalnym w otoczeniu Smoczej Jamy z uwzględnieniem rzeźby terenu Wzgórza Wawelskiego oraz obciążenia od istniejących obiektów. Obliczenia wykonano, uwzględniając pierwotny stan naprężenia w masywie skalnym, a następnie określono stan naprężenia przy uwzględnieniu istniejących obiektów podziemnych (Smocza Jama, Rezerwat – przestrzeń bezpośrednio nad Smoczą Jamą). Uzyskane wyniki obliczeń odniesiono do przekrojów charakterystycznych wyznaczonych na podstawie modelu 3D jaskini.

Obliczenia wykazały, że największa koncentracja naprężeń występowała na powierzchniach bocznych (ociosach) Smoczej Jamy. Pusta przestrzeń nad jaskinią korzystnie wpływała na rozkład naprężenia w jej stropie. Taki układ prowadził również do przekazywania obciążeń z tarasu na masyw w pobliżu ociosów Smoczej Jamy. Dodatkowo masyw skalny w okolicach ociosów obciążony był murami. Największy zasięg stref wymagających wzmocnienia zaobserwowano w miejscach, gdzie jaskinia charakteryzowała się największą wysokością.

**Zabezpieczenie masywu skalnego.** Na podstawie stopnia wyężenia masywu skalnego wyznaczono strefy wymagające wzmocnienia. Określono ich lokalizację i długość kotew jako podstawowych elementów zabezpieczających strop i ociosy jaskini. W celu wyznaczenia stref wymagających wzmocnienia posłużono się wskaźnikiem wyężenia masywu SSR (Stress–Strength Ratio). Kotwy dobierano tak, aby wzmocnić strefy największego wyężenia masywu skalnego (rysunek 5). Przyjęto, że ze względu na oczekiwaną dużą odporność na korozję, do wzmocnienia masywu skalnego zostaną wykorzystane kotwy wklejane z tworzyw sztucznych oraz ze stali kwasoodpornej o wytrzymałości na rozciąganie nie mniejszej niż 350,0 MPa i no-



Rys. 2. Generowanie przekrojów charakterystycznych Smoczej Jamy  
Fig. 2. Generation of Dragon's Den characteristic cross-sections



Rys. 3. Opracowany model geometrii Wzgórza Wawelskiego  
Fig. 3. Completed geometry model of Wawel Hill

śności nie mniejszej niż 100,0 kN. Główne wzmocnienie, w postaci kotew, wprowadzono w 39 przekrojach. Łącznie zaprojektowano i wykonano 291 kotew o sumarycznej długości 1481 m (rysunek 6).

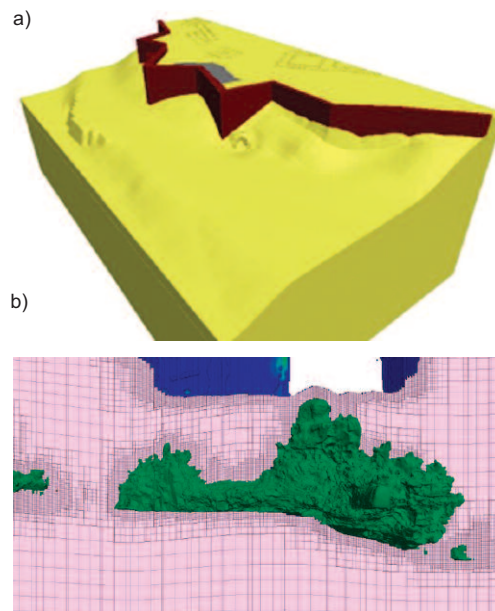
**Ze względu na geomechaniczne zrealizowano następujące zabezpieczenia jaskini:**

- podstawowe stropu i ociosów obudową kotwową (kotwy szkłoepoksydowe);
- dodatkowe zabezpieczenie stropu w rejonie Rezerwatu kotwami ze stali nierdzewnej;
- lokalne zabezpieczenie stropu siatką ze stali nierdzewnej o wytrzymałości drutu na rozciąganie  $\geq 1770$  MPa (fotografia 5a);
- lokalne zabezpieczenie stropu kotwami z tworzyw sztucznych w miejscach likwidacji stojaków drewnianych;

- lokalne zabezpieczenie bloków skalnych kotwami ze stali nierdzewnej;
- lokalne zabezpieczenie masywu skalnego obudową podporową kamienną (fotografia 5b).

**Dodatkowe prace modernizacyjne.** W ramach modernizacji Smoczej Jamy wykonano następujące prace:

- wymianę istniejącego słupa żelbetowego w komorze Grabowskiego na nowy o strukturze powierzchni imitującej powierzchnię drewna przez zastosowanie specjalnych wykładek do form (fotografia 6a);
- usunięcie drewnianych stępli zabudowanych w komorze Szyszko-Bohusza i zabezpieczenie tych miejsc dodatkową obudową kotwową;
- naprawę i konserwację istniejących murowanych wzmocnień;



Rys. 4. Model numeryczny przyjęty do obliczeń: a) widok izometryczny; b) zagęszczenie elementów modelu w pobliżu jaskini  
Fig. 4. Numerical model used for calculation: a) isometric view; b) density of model elements near the cave

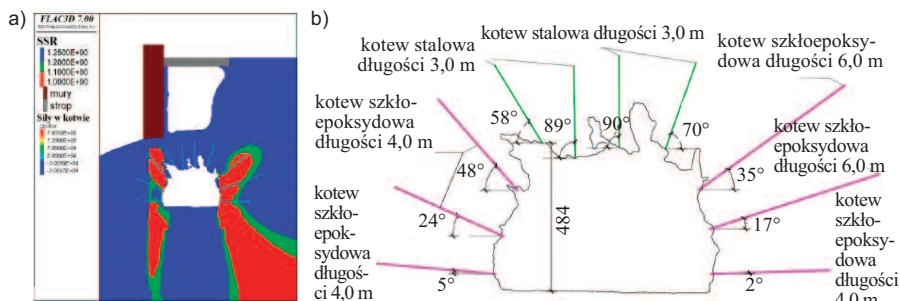
- remont schodów w komorze Grabowskiego oraz wykonanie pochwyty wzdłuż schodów;
- remont schodów przy ścianie szybu w rejonie komory Szyszko-Bohusza;
- renowację portalu gotyckiego oraz rejonu wyjścia ze Smoczej Jamy (fotografia 6b);
- wymianę instalacji elektrycznej i słaboprądowej;
- zabudowanie monitoringu wizyjnego oraz geotechnicznego z pomiarem przemieszczeń masywu skalnego.

Wszystkie prace zabezpieczające oraz modernizacyjne zostały wykonane przez Zakład Robót Górniczych i Wysokościowych „AMC” pod ścisłym nadzorem służb technicznych oraz konserwatorskich Zamku Królewskiego na Wawelu.

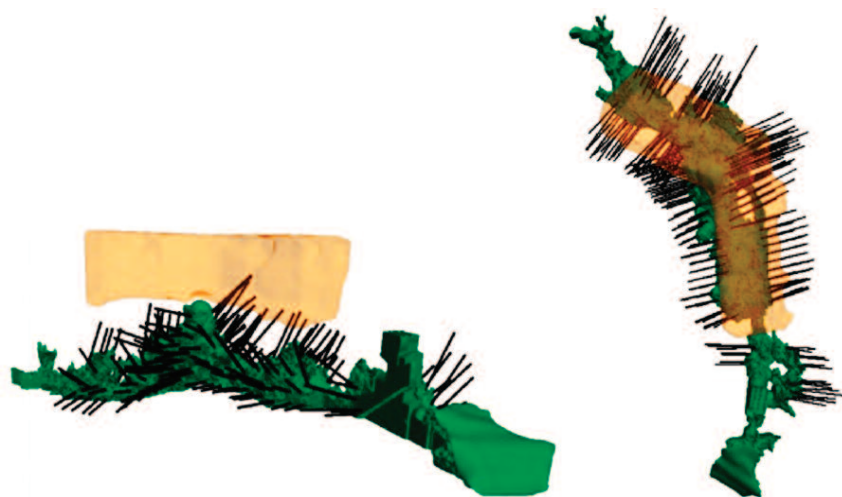
**Monitoring geotechniczny**

Ze względu na charakterystykę Smoczej Jamy, w celu zapewnienia jej bezpiecznego użytkowania zaprojektowano, a następnie wykonano system monitoringu geotechnicznego składającego się z następujących elementów:

- stanowiska do pomiaru rozwarstwienia spēkań – 2 stanowiska;
- stanowiska do pomiaru rozkładu sił działających w żerdzi kotwy przez ten-



**Rys. 5. Przykładowe zabezpieczenie masywu skalnego: a) wyniki obliczeń numerycznych; b) rozmieszczenie kotew wzmacniających w przekroju**  
 Fig. 5. Example of rock mass reinforcement: a) results of numerical calculations; b) distribution of reinforcing anchors in the section



**Rys. 6. Trójwymiarowy model wzmocnienia masywu skalnego w bezpośrednim otoczeniu Smoczej Jamy**

Fig. 6. Three-dimensional model of rock mass reinforcement in the direct area of the Dragon's Den

sometryczny pomiar jej wydłużenia – 1 stanowisko;

- stanowisko do pomiaru sił działających w żerdzi kotwy przez pomiar jej obciążenia – 3 stanowiska;

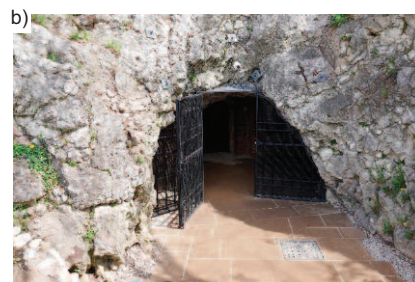
- stanowiska do pomiaru konwergencji jaskini – 10 stanowisk.

Stanowiska do pomiaru rozwarstwienia spękań zainstalowano w komorze Altha oraz Szyszko-Bohusza (rysunek 7). Czujniki zainstalowano w miej-

scach widocznych spękań oraz w niedużej odległości od miejsc, w których zlikwidowano stojaki drewniane. Ostateczny dobór lokalizacji stanowisk został poprzedzony wierceniami i wziernikowaniem otworów badawczych, wykonanych podczas prac kotwiących. Zastosowano szczelinomierze elektroniczne realizujące pomiar w dwóch płaszczyznach oraz z wbudowanym czujnikiem temperatury, który umożliwia re-



**Fot. 5. Dodatkowe zabezpieczenia masywu skalnego Smoczej Jamy: a) zabezpieczenie siatką ze stali nierdzewnej; b) zabezpieczenie podporową obudową kamienną**  
 Photo 5. Additional protection of the Dragon's Den: a) stainless steel wire mesh protection; b) stone support protection



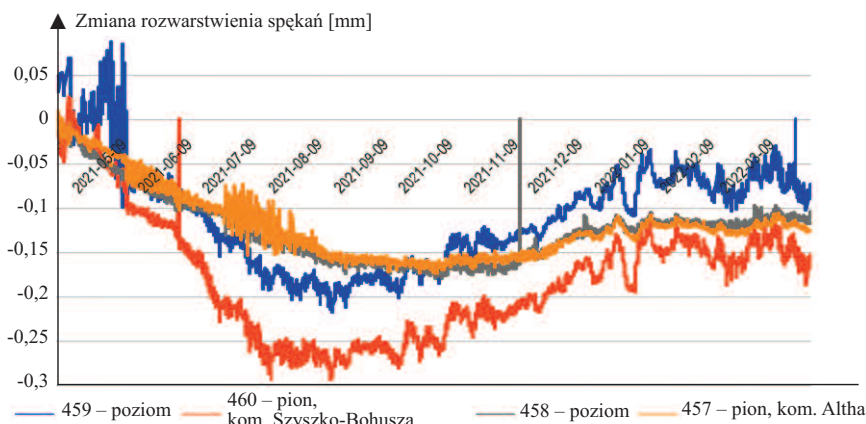
**Fot. 6. Dodatkowe prace modernizacyjne w Smoczej Jamy: a) wymieniony słup żelbetonowy w komorze Grabowskiego; b) modernizacja wyjścia ze Smoczej Jamy**

Photo 6. Additional modernisation works in the Dragon's Den: a) replaced reinforced concrete pillar in Grabowski's chamber; b) modernisation of the exit from the Dragon's Den

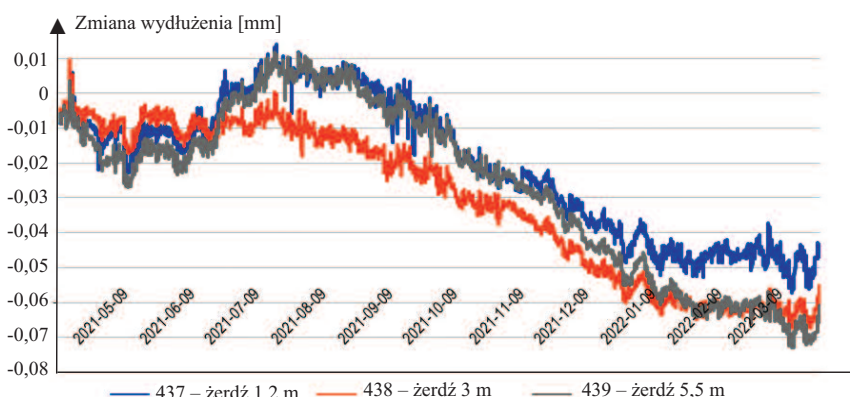
dukcję jej wpływu na wskazania czujników. Ze względu na specyfikę obserwacji rozwartości szczelin w jaskini przyjęto bazę pomiarową od 10 do 25 cm, w zależności od punktu obserwacyjnego.

Dodatkowo zastosowano wielopunktowe tensometry, które zamontowano w komorze Szyszko-Bohusza, realizujące pomiar odcinkowych zmian długości kotwy wgłębnej – rysunek 8 [9, 10]. Zakres pomiarowy i długość kolejnych odcinków pomiarowych dobrano po wziernikowaniu i prognozie zmian mogących zachodzić w górotworze. Do pomiaru obciążeń kotew zastosowano mierniki elektrooporowe (rysunek 9). Czujniki tego typu zainstalowano w komorze Grabowskiego w rejonie słupa żelbetonowego oraz w miejscach zlikwidowanych stojaków drewnianych, a dodatkowo jeden czujnik w komorze Altha.

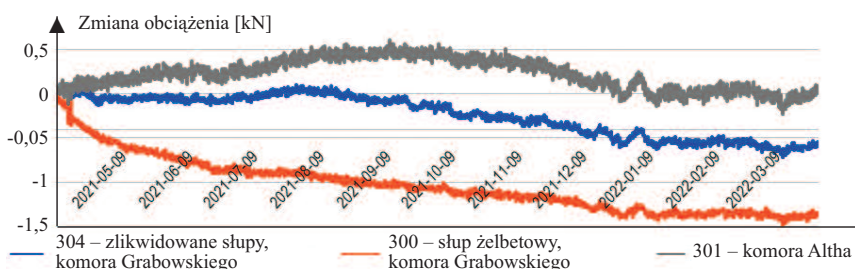
Sieć monitoringu składająca się z dwóch szczelinomierzy, jednego tensometru wielopunktowego i trzech kotwowych mierników obciążeń została zebrana do wspólnej sieci rejestrowania, usytuowanej w pobliżu wejścia do Rezerwatu. System monitoringu umożliwia wykonywanie obserwacji w trybie quasi-ciągłym, tj. przy częstotliwości rejestrowania dobranej do dynamiki zjawiska. Badanie konwergencji ja-



Rys. 7. Wyniki zmiany rozwarstwienia spękań w komorach Altha i Szyszko-Bohusza [mm]  
Fig. 7. Results of fracture stratification change in Altha and Szyszko-Bohusz chambers [mm]



Rys. 8. Wyniki zmiany wydłużenia kotwy węglębnej  
Fig. 8. Results of change in elongation of anchor



Rys. 9. Wyniki zmiany obciążeń kotew w komorach Altha i Grabowskiego  
Fig. 9. Results of load change on anchors in Altha and Grabowski chambers

skini prowadzone jest metodami geodezyjnymi w układzie lokalnym. Zastabilizowano 10 potrójnych baz w wybranych przekrojach składających się z jednego punktu stropowego i dwóch w ociosach. Ze względu na stan spągu i ilość nadkładu nie była możliwa stabilizacja punktów w spągu. Analiza obejmuje pomiar zmian usytuowania punktów pomiarowych względem siebie.

Dotychczasowe wyniki pomiarów nie wykazały istotnych zmian rejestrowanych parametrów. Analiza wykonanych pomiarów jednoznacznie wskazuje, że na żadnym z mierzonych stanowisk nie

uzyskano wartości, które wskazywałyby na występowanie niekorzystnych zjawisk geomechanicznych.

### Wnioski

Zabezpieczanie i modernizacja podziemnych obiektów zabytkowych wymagają od projektantów i wykonawców prac odpowiedniego doświadczenia w realizacji tego typu przedsięwzięć. Ze względu na konieczność dokładnego określenia miejsc wzmocnienia masywu skalnego podstawowym wyzwaniem jest prawidłowe odwzorowanie geometrii takich obiektów. Nieodzowne jest stosowanie metody

TLS pozyskiwania danych na temat kształtu i przebiegu komór oraz korytarzy, co jednoznacznie wykazano na analizowanym przykładzie. Chmura punktów obiektu uzyskana na podstawie skaningu laserowego 3D pozwoliła na zbudowanie numerycznego modelu jaskini oraz stanowiła podstawę do prowadzenia wszelkich prac projektowych (analiza geomechaniczna stopnia wyężenia masywu skalnego, podkłady rysunkowe zabezpieczenia jaskini, podkłady rysunkowe prac konserwatorskich, podkłady rysunkowe modernizacji instalacji elektrycznej i oświetlenia itp.).

W Smoczej Jamie przeprowadzono wiele prac modernizacyjnych, których celem było ulepszenie jej funkcjonowania oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników. Nowoczesne rozwiązania techniczno-materiałowe zastosowane podczas projektowania oraz realizacji tych prac umożliwiły zachowanie wartości zabytkowych Smoczej Jamy, co pozwoliło na bezpieczne jej udostępnienie turystom z możliwością przyszłego rozszerzenia udostępnienia o przestrzeń rezerwatową nad Smoczą Jamą.

### Literatura

- [1] Grontoń T. Zachować dziedzictwo Smoczej Jamy na Wawelu. Kraków: Praca niepublikowana. 2015.
- [2] Geoportal Infrastruktury Informacji Przestrzennej. <https://mapy.geoportal.gov.pl>.
- [3] Fotopolska.eu Ocalić od zapomnienia. <https://www.fotopolska.eu/Krakow>.
- [4] Firlert EM. Smocza Jama na Wawelu: Historia, legenda, smoki. Kraków: Universitas, 1996.
- [5] Pawłowicz JA. Analiza dokładności i przydatności danych z pomiaru metodą TLS do oceny bezpieczeństwa obiektów budowlanych. Logistyka. 2014; 5: 1233 – 1239.
- [6] Wałach D, Kaczmarczyk GP. Application of TLS remote sensing data in the analysis of the load-carrying capacity of structural steel elements. Remote Sens. 2021; doi: 10.3390/rs13142759.
- [7] Cała M, Kohut P, Holak K, Wałach D. Vision-based approach in contact modelling between the footpad of the lander and the analogue representing surface of phobos. Sensors. 2021; doi: 10.3390/s21217009.
- [8] Mikoś T, Chmura J, Lasoń A. Ocena stanu konstrukcji zabezpieczających i stateczności górotworu w aspekcie bezpieczeństwa ruchu turystycznego w Smoczej Jamie. Kraków: Praca niepublikowana, 2016.
- [9] Valeev A. Condition monitoring based on locating defects via strain gauge analysis. Mech. Syst. Signal Process. 2022; vol. 182, 7: 109587, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109587.
- [10] Yue Z, Wang X, Peng L, Xu S, Ren M. In situ simultaneous measurement system combining photoelastic, strain gauge measurement, and DIC methods for studying dynamic fracture. Theor. Appl. Fract. Mech. 2022; doi: 10.1016/j.tafmec. 2022.103596.

Przyjęto do druku: 26.09.2022 r.