

# Zabezpieczanie Smoczej Jamy



tekst: **prof. dr hab. inż. ANTONI TAJDUŚ**, **dr inż. DANIEL WAŁACH**, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

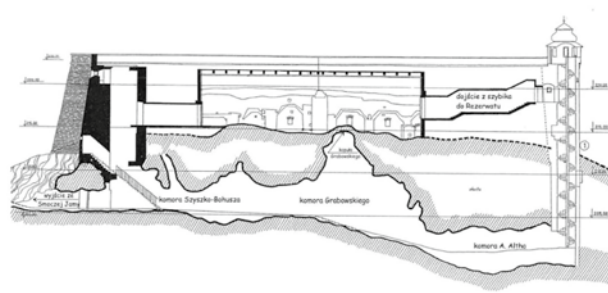
Smocza Jama w Krakowie zaliczana jest do dziedzictwa zarówno naturalnego, jak i kulturowego. Należy podkreślić, że jaskinia jest też jednym z najważniejszych i najbardziej charakterystycznych elementów wzgórza wawelskiego. Smocza Jama stanowi zabytek nieruchomy wpisany do rejestru na podstawie decyzji Małopolskiego Urzędu Wojewódzkiego w Krakowie oraz decyzji Małopolskiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków o zmianie decyzji w sprawie wpisu do rejestru zabytków nieruchomych dotyczącej całości wzgórza wawelskiego. W związku z powyższym jaskinia podlega pełnej ochronie konserwatorskiej.



Ryc. 1. Wyjście ze Smoczej Jamy na skarpie od strony Wisły, fot. S. Kołowca



Ryc. 2. Piękne wnętrze Smoczej Jamy



Ryc. 3. Przekrój podłużny przez Smoczą Jamę, źródło: Firlet E.M.: *Smocza Jama na Wawelu*. Kraków 1996

Smocza Jama znajduje się w zachodniej części wzgórza wawelskiego (ryc. 1). Powstała w wyniku procesów krasowych. Woda podziemna wzdłuż spękań i szczelin występujących w skałach wapiennych wydrążyła pustki w postaci komór i korytarzy, które, łącząc się, stworzyły naturalną jaskinię. Smocza Jama jest jedną z najbardziej znanych jaskiń w Polsce, w której znajduje się jedna z najstarszych w kraju podziemnych tras turystycznych. Trasa ta została udostępniona do zwiedzania 6 czerwca 1842 r. Otwarcia jaskini po częściowym odgruzowaniu dokonał Florian Straszewski, twórca krakowskich Plant. Dalsze odgruzowanie i udrożnienie jaskini prowadził Ambroży Grabowski aż do 1846 r. Za zasługi dla Smoczej Jamy jego imieniem nazwano największą komorę. W 1846 r., po upadku powstania krakowskiego, władze austriackie poleciły zamurować wejście od strony Wisły, przeprowadziły prace budowlane na wzgórzu wawelskim, a w otoczeniu Smoczej Jamy m.in. wykonano ceglany szyb klatki schodowej o wymiarach 3 x 3 m i wysokości ponad 6 m oraz drewniane schody zejściowe do jaskini. Pozwoliło to udostępnić Smoczą Jamę dla zwiedzających.

Pierwsze badania geologiczno-archeologiczne zostały przeprowadzone przez Alojzego Altha w 1874 r., a współpracujący z nim Stefan Kuczyński wykonał pomiary geodezyjne jaskini i sporządził pierwszy dokładny plan Smoczej Jamy. Według pomiarów jaskinia miała długość ok. 58,5 m, powierzchnię 234 m<sup>2</sup> i kubaturę 655 m<sup>3</sup>. Pierwszy generalny remont w 1917 r. przeprowadził prof. Adolf Szyszko-Bohusz. Po tym remoncie w następnym roku udostępniono zwiedzającym Smoczą Jamę, a ożywiony ruch turystyczny trwał do wybuchu II wojny światowej. W czasie okupacji niemieckiej jaskinię zamknięto. Po wyzwoleniu, w 1945 r. odsonięto otwór wyjściowy i wykonano nowe wyjście z kamiennymi schodami. Smocza Jama znów była

dostępna dla turystów, ale wymagała gruntownego zabezpieczenia ze względu na postępujący aktywnie proces erozji. Podejmowano próby sukcesywnego usuwania zagrożeń [1], ale niewiele to dało.

W 1966 r. ze względów bezpieczeństwa zamknięto Smoczą Jamę. Rozpoczęła się akcja ratunkowa prowadzona przez naukowców z Akademii Górniczo-Hutniczej pod nadzorem prof. Zbigniewa Strzeleckiego. Zespół ten opracował projekt trwałego zabezpieczenia obiektu przy czynnej współpracy Kierownictwa Odnowienia Królewskiego Zamku na Wawelu, Państwowego Przedsiębiorstwa Geologiczno-Fizjograficznego i Geodezyjnego Budownictwa „Geoprojekt” Oddział Kraków, Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego w Krakowie, Zakładu Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego w Mysłowicach, Wyższej Szkoły Górniczej w Ostrawie i innych firm.

Kompleksowe badania Smoczej Jamy trwały blisko trzy lata. Były to badania niezwykle trudne ze względu na nieregularny kształt jaskini oraz bardzo zły stan ociosów i stropu. W wielu miejscach odpadały ze stropu i ociosów elementy skalne, a prewencyjne usuwanie zwietrzałych bloków zmniejszało grubość coraz bardziej niestabilnego sklepienia. Masyw skalny w obrębie jaskini był dodatkowo naruszony wysadzeniem mostu Dębnickiego przez wycofujące się wojska niemieckie. Dla oceny stateczności obiektu niezwykle ważnym zagadnieniem było określenie grubości skał wapiennych bezpośrednio leżących nad jaskinią. Ponadto prace zabezpieczające należało tak zaprojektować i przeprowadzić, aby dostosować technologie górnicze do wymogów konserwatorskich.

W trakcie prowadzonych sukcesywnie prac porządkowych, konserwatorskich i remontowych natrafiano często na nieznane i dotąd niespenetrowane części Smoczej Jamy, co nasuwało

przypuszczenie, że istnieje jeszcze szereg nieznanych pustek. Część z nich została zlokalizowana w wyniku wierceń otworów badawczych, a także wykonanych pomiarów geofizycznych. Nie kontynuowano badań tych pustek. Penetrację nowo odkrytego odgałęzienia jaskini, leżącego poza trasą turystyczną, rozpoczęto dopiero kilka lat po zakończeniu prac zabezpieczających prowadzonych pod kierunkiem prof. Strzeleckiego. Na początku 1983 r. grupa speleologów z AGH pod kierownictwem Andrzeja Górnego, Andrzeja Paulo i Mariusza Szelerewicza przystąpiła do zbadania dalszych, nieznanych partii jaskini. W czerwcu 1983 r. przeprowadzono ostatnią akcję, w czasie której Piotr Kulbicki i Janina Wrzak osiągnęli ówczesnie najdalej wysunięty na północ fragment jaskini. W czasie tych akcji grotofazi odkryli korytarze o łącznej długości ok. 160 m. Jednakże w nowo odkrytych częściach Smoczej Jamy nie natrafiono na żadne ślady wcześniejszego pobytu człowieka.

Ponowne badania speleologiczne jaskini podjęte zostały dopiero w 1995 r. Kilka ekspedycji pod kierownictwem Andrzeja Górnego zorganizowali wówczas członkowie krakowskich klubów speleologicznych. Ich efektem było niewielkie „przedłużenie” bocznego ciągu jaskini w kierunku północnym. Zbadano też pustkę krasową w postaci korytarza biegnącą w kierunku od komory Szyszko-Bohusza w stronę znajdującej się na zewnątrz rzeźby smoka i nazwano ją korytarzem Pod Smoka. Przewiduje się, że tych pustek w rejonie wzgórza wawelskiego może być znacznie więcej.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania wykonano projekt zabezpieczenia Smoczej Jamy i w grudniu 1969 r. rozpoczęto działania naprawcze. Dla zobrazowania zagrożenia na rycinach 4 i 5 pokazano przykładowe miejsca odspojenia skał wapiennych w komorze B i komorze C.

Do scalenia spękanego i nieciągłego górotworu postanowiono oprócz innych pomocniczych zabiegów zastosować na dużą skalę technologię kotwienia. Łącznie wprowadzono do górotworu ok. 1700 uźebrowanych kotew stalowych typu Olkusz-1 o nośności ok. 140 KN i różnej długości. Kotwy te od lat z powodzeniem stosowane były w dolomitach kruszonośnych w kopalniach rud cynku i ołowiu. Kotwy wklejano do górotworu za pomocą żywic syntetycznych. Połączyły w sposób trwały groźące oderwaniem od calizny duże bloki skalne, zwiększyły tarcie między blokami skalnymi oraz dodatkowo zakleily większe i mniejsze szczeliny, tworząc w otoczeniu konturu Smoczej Jamy swoisty monolit skalny.

Łączna długość wprowadzonych kotew przekroczyła 4000 m. Ze względu na brak dokładnych danych o rodzaju i wielkości spękań przebiegających w caliznie wapienia, a także z powodu nieregularnej formy przestrzennej jaskini decyzje o rozmieszczeniu, kierunku i długości poszczególnych kotew podejmowano w zależności od potrzeb w charakterystycznych przekrojach poprzecznych. W całej jaskini wyznaczono 66 takich przekrojów, z których najmniejszy miał wymiary 2,8 x 1,4 m, największy 7,5 x 0,6 m, najszerszy 8,2 x 4,3 m.

W tych przekrojach również określano szczegółowo sposób postępowania zabezpieczającego, tj. klejenie i cementowanie szczelin, wypełnianie zaczynem cementowym stwierdzonych w trakcie wiercenia w górotworze pustek. Ta ogromna liczba zamontowanych kotew stworzyła w przestrzeni Smoczej Jamy konstrukcję nośną sklepienia jaskini w formie stalowego jeża. Największą liczbę kotew zainstalowano w najbardziej zagrożonej komorze B. Komora ta jest największa i występują w niej liczne kominy, spękania w stropie oraz odspojenia bloków skalnych.

Z tych powodów ociosy komory B w części północnej dodatkowo skotwiono, a przy wylocie z komory B do komory C strop zabezpieczono siatką rozpiętą na kotwach stalowych. W miejscu zawisającego dużego głazu dla podparcia wprowadzono słup drewniany (por. ryc. 4).

Prace zabezpieczające wykonane w latach 1969–1976 pozwoliły na ograniczenie procesu degradacji podziemi, a zastosowane nowoczesne jak na owe czasy systemy kotwienia i sklepania górotworu zapewniły na dłuższy czas stateczność grotu i bezpieczeństwo odwiedzających Smoczą Jamę turystów.

Minęło 40 lat, w ciągu których stan obiektu stopniowo się pogarszał. Co roku przed otwarciem sezonu turystycznego (w kwietniu) wspólnie z prof. Tadeuszem Mikosiem wizytowaliśmy trasę turystyczną w celu oceny jej stanu i wprowadzenia dodatkowych zaleceń zwiększających bezpieczeństwo. Jednakże w 2016 r. uznaliśmy, że Smocza Jama wymaga ponownej całościowej oceny i dalszych prac zabezpieczających. Pod koniec 2016 r. rozpoczęto prace w celu zabezpieczenia Smoczej Jamy. Program ten uzyskał pozytywną opinię dyrekcji Zamku Królewskiego na Wawelu. W celu realizacji prac zabezpieczających w listopadzie 2018 r. została zawarta umowa pomiędzy Zamkiem Królewskim na Wawelu a Zakładem Robót Górniczych i Wysokościowych AMC oraz Fundacją Nauka i Tradycje Górnicze przy Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH.

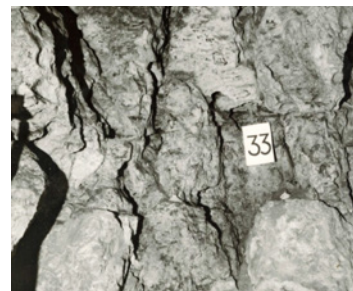
Jako pierwsze wykonano prace naukowo-projektowe, a mianowicie:

- analizę geomechaniczną jaskini, wykonaną przez zespół pod kierunkiem prof. Antoniego Tajdusia [2] z wykorzystaniem przestrzennego modelu numerycznego (taki skomplikowany model został wykonany po raz pierwszy dla Smoczej Jamy);
- dokumentację projektową kompleksowego remontu i zabezpieczenia Smoczej Jamy, wykonaną przez zespół pod kierunkiem prof. Marka Cały [3].

Zasadniczym celem tych prac było sporządzenie dokumentacji technicznej umożliwiającej wykonawcy realizację prac zabezpieczających górotwór w otoczeniu Smoczej Jamy w sposób zapewniający efektywne i bezpieczne użytkowanie turystyczne obiektu.

Aby określić stan naprężenia w sąsiedztwie Smoczej Jamy, należało w miarę dokładnie odwzorować jej geometrię. Znając stan naprężenia, można wykonać analizy wytrzymałościowe, a także zaprojektować zabezpieczenia. Odwzorowanie całej jaskini przeprowadzono na podstawie 62 skanów skanerem FARO Fokus S. Po obróbce danych, wykorzystując odpowiednie programy numeryczne, stworzono trójwymiarowy model jaskini.

Dysponując trójwymiarowym modelem Smoczej Jamy, wykonano obliczenia numeryczne programem metody elementów



Ryc. 4. Odspojenia skał wapiennych w ociosie komory B, fot. z archiwum AGH



Ryc. 5. Podpora odspojonych skał wapiennych w ociosie komory C, fot. z archiwum AGH



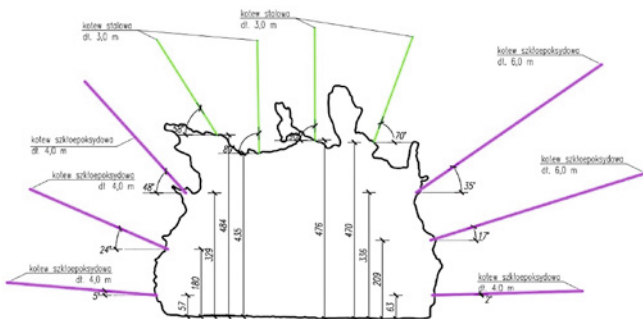
skończonych FLAC3D. Założono, że zachowanie się murów oraz tarasu nad Smoczą Jamą opisuje model sprężysty, natomiast masyw skalny występujący w sąsiedztwie jaskini – jednorodny model sprężysto-plastyczny z kryterium wyężeniowym Colomba – Mohra. W obliczeniach przyjęto również, że wzmocnienie masywu skalnego stanowią odpowiednio rozmieszczone kotwy, które modelowano jako sztywno połączone z nim dwuwymiarowe elementy strukturalne. Dla masywu skalnego przyjęto następujące parametry:

- ciężar objętościowy:  $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
- moduł Younga:  $E = 0,7 \text{ GPa}$
- współczynnik Poissona:  $\nu = 0,25$
- spójność:  $c = 0,12 \text{ MPa}$
- kąt tarcia wewnętrzny:  $\phi = 22^\circ$ .

W przestrzennej analizie geomechanicznej uwzględniono również obciążenia od istniejących budynków, dodatkowy wzrost obciążenia stałego równomiernie rozłożonego  $10,0 \text{ kN/m}^2$ , wzrost obciążenia powierzchni terenu nad Smoczą Jamą spowodowany sporadycznym ruchem samochodami o ciężarze  $3,5 \text{ t}$ , a także obciążenie od samochodów cięższych wykorzystywanych w czasie budowy ( $30 \text{ t}$ ).

Obliczenia wykazały, że największe koncentracje naprężeń występują 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 właśnie na masyw w pobliżu jej ociosów. Dodatkowo masyw skalny w okolicach ociosów obciążony był ciężarem murów. Największy zasięg stref wymagających wzmocnienia zaobserwowano w miejscach, gdzie jaskinia charakteryzowała się największą wysokością.

Zdecydowano, że zabezpieczenie stropu i ociosów będą stanowiły odporne na korozję kotwy wklejane z tworzywa sztucznego oraz ze stali kwasoodpornej o wytrzymałości na rozciąganie nie mniejszej niż  $350,0 \text{ MPa}$  i nośności kotwy nie mniejszej niż  $100,0 \text{ kN}$ , a także lokalnie założone siatki ze stali nierdzewnej o wytrzymałość drutu na rozciąganie  $\geq 1770 \text{ MPa}$ . Rozmieszczenie kotew i ich długości ustalono na bazie stopnia wyężenia masywu skalnego (ryc. 6). Główne wzmocnienie w postaci kotew wprowadzono w 39 przekrojach, łącznie zaprojektowano i wykonano 291 kotew o sumarycznej długości  $1481 \text{ m}$ .



Ryc. 6. Przykładowe rozmieszczenie kotew wzmocniających w przekroju

Lokalnie także wprowadzono zabezpieczenie masywu skalnego obudową podporową kamienną. Ponadto w ramach przebudowy wyglądu Smoczej Jamy wykonano następujące prace:

- wymieniono istniejący słup żelbetowy w komorze Grabowskiego na nowy o strukturze powierzchni imitującej powierzchnię drewna,



Ryc. 7. Schody zabudowane w komorze Grabowskiego i odnowione wyjście ze Smoczej Jamy z portalem gotyckim, fot. z archiwum firmy AMC

- usunięto drewniane stemple zabudowane w komorze Szyszko-Bohusza i zabezpieczono te miejsca dodatkową obudową kotwową,
- naprawiono i zakonserwowano istniejące murowane wzmocnienia,
- wyremontowano schody w komorze Grabowskiego (ryc. 7),
- naprawiono schody przy ścianie szybu w rejonie komory Szyszko-Bohusza,
- dokonano renowacji portalu gotyckiego oraz rejonu wyjścia ze Smoczej Jamy (ryc. 7),
- wymieniono instalację elektryczną i słaboprądową,
- zabudowano monitoring wizyjny oraz geotechniczny do pomiaru 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. Przeprowadzone w Smoczej Jamie prace remontowe i modernizacyjne poprawiły jej funkcjonowanie, a przede wszystkim zwiększyły bezpieczeństwo użytkowników. Zastosowane nowoczesne rozwiązania techniczno-materiałowe podczas projektowania oraz realizacji tych prac pozwoliły w pełni zachować jej wartości zabytkowe, a także stworzyły możliwości przyszłego rozszerzenia udostępnienia o przestrzeń rezerwatową nad Smoczą Jamą.

## Literatura

- [1] Strzelecki Z. et al.: *Kompleksowe badania górotworu na przykładzie akcji ratunkowej w Smoczej Jamie na Zamku Królewskim na Wawelu*. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN. Górnictwo, z. 14. PWN. Warszawa–Kraków 1975.
- [2] Tajduś A. et al.: *Przestrzenna analiza geomechaniczna jaskini „Smocza Jama” w Krakowie*. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2020.
- [3] Cała M. et al.: *Wielobranżowa dokumentacja projektowa dotycząca kompleksowego remontu i zabezpieczenia tzw. Smoczej Jamy*. Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2020.
- [4] Grontoft T.: *Zachować dziedzictwo Smoczej Jamy na Wawelu*. Kraków 2015 (praca niepublikowana).
- [5] Mikoś T., Chmura J., Lasoń A.: *Ocena stanu konstrukcji zabezpieczających i stateczności górotworu w aspekcie bezpieczeństwa ruchu turystycznego w Smoczej Jamie*. Kraków 2016 (praca niepublikowana).
- [6] Geoportal Infrastruktury Informacji Przestrzennej. Dostępny w Internecie: <https://mapy.geoportal.gov.pl>. (dostęp 12 lipca 2022).



Czytaj więcej





Dowiedz się więcej:

[www.geobrudd.com](http://www.geobrudd.com)



Systemy zabezpieczeń przed spadającymi odłamkami wykonane z drutu stalowego o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie

Siatki TECCO® ze stali nierdzewnej do zastosowania w podziemnym środowisku korozyjnym

