

LIDIA KOWALCZYK
e-mail: lidzia15_89@interia.pl

KAROL KRAWCZYK
e-mail: krawczyk_karol@op.pl

AGNIESZKA MAKUCH
e-mail: a.makuch1990@gmail.com

JAKUB MOSIOŁEK
e-mail: kubamos@interia.pl

BARTOSZ PIŚKIEWICZ
e-mail: bartoszpiskiewicz@gmail.com
Kielce University of Technology

MICHAŁ PLUTA
e-mail: majkel170792@gmail.com

AGATA PROBOSZCZ
e-mail: agata.proboszcz@gmail.com

JACEK SZEWCZYK
e-mail: jszewczy@gmail.com, jszewczyk@tu.kielce.pl

KAROLINA ŚWIDZICKA
e-mail: karolajn3@vp.pl

ANNA WIRECKA
e-mail: hydzy@gmail.com
Kielce University of Technology

STUDY OF THE CONDITION OF THE SELECTED UNDERGROUND CAVES IN KADZIELNIA AREA, KIELCE

Abstract

The area of Kadzielnia in Kielce is one of the best known cave areas in the region. Part of the caves (the group Jaskinia Odkrywców – Prochownia – Szczelina) has been made available to tourists. This requires proper protection of a tourist route; in the caves there is a possibility of threats in the form of rock falls, cracks, depressions, etc. Therefore, the state of the caves requires monitoring, including surveying methods. For this reason, an inventory of four selected parts of said group of caves was conducted with the use of modern surveying techniques. The measurement was performed with the use of scanning tacheometry, complemented with digital images of the monitored fragments. The results are presented in the form of spatial models (in AutoCAD Civil 3D and Surfer) and compiled with the taken pictures. Presented results are initiating a broader study on the state of the Kadzielnia caves.

Keywords: inventory survey of the caves, scanning tacheometry

1. Introduction

The inanimate nature reserve Kadzielnia in Kielce is the most famous cave area in the Świętokrzyskie (Holy Cross) Mountains. Inside the walls of the former quarry 25 caves with a total length of 678 m were inventoried and large sinkholes filled with deposits were described. Most of them are located within Skalka Geologów (Geologists Rock), and the biggest ones are located in the eastern wall of the quarry. The caves are partly accessible to tourists (the group: Jaskinia Odkrywców (Explorers Cave) – Prochownia (Gunpowder Works) – Szczelina (Fissure)). This requires ensuring safety while exploring the tourist route. The nature of the geological structure of Kadzielnia, especially the presence of karst phenomena, however, implies the possibility of threats in the form of rock fragments falling off, the appearance of fissures, sinkholes and other deformations of the rock mass. The caves thus

require frequent inventory to determine the possibility of occurrence of deformations and to adopt protective measures.

The inventory consists in determining the current state of the object and the development of appropriate documentation for it, necessary for conservation and design works. This is a complex and laborious process requiring high precision from the doer. It consists of both survey and analysis as well as proper visualization of their results [1].

Initiating the survey of fragments of the caves in Kadzielnia, Kielce in order to conduct an inventory and identify the sites at risk took place in 2014 within the statutory research, the activity of Geomatica Student Academic Circle and engineering theses defended in 2015 at the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering at the Kielce University of Technology [2-5], in parallel with other measurements for the inventory of Kadzielnia area [6, 7].

Surveying included four fragments of the group Jaskinia Odkrywców (Explorers Cave) – Prochownia (Gunpowder Works) – Szczelina (Fissure) (Fig. 1): Wiesław Chamber, the chamber of Korytarz Południowy (Southern Corridor), second and third room from the side of Szczelina (Fissure) and Korytarz Lewy (Left Corridor).

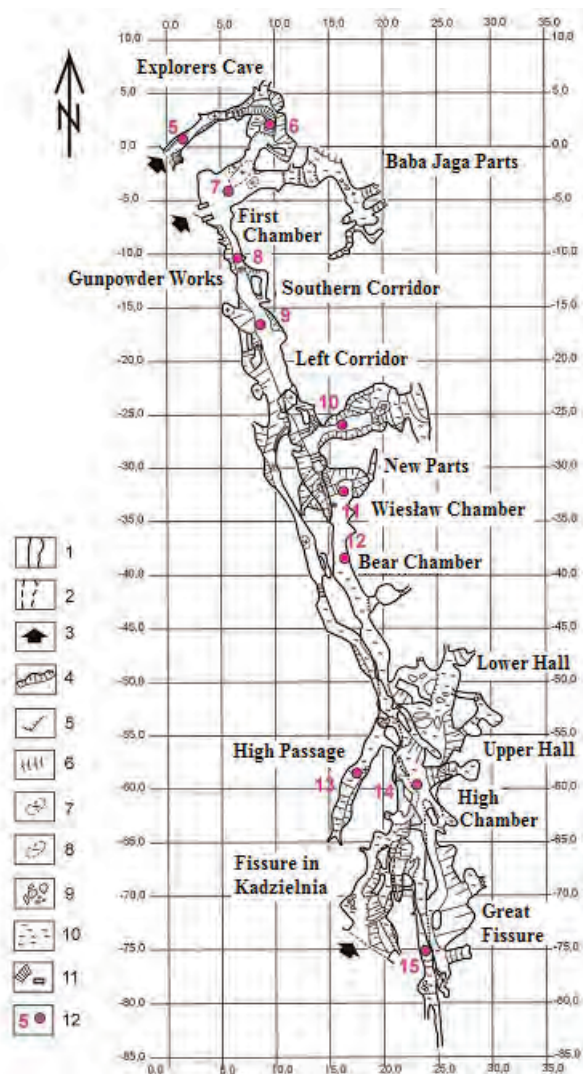


Fig. 1. The system of the caves Jaskinia Odkrywców-Prochownia-Szczelina (Explorers Cave-Gunpowder Works-Fissure) in Kadzielnia, after joining them and finishing mining works which made the caves available in summer 2011. Explanation of the markings: 1 – the contours of the cave corridor, 2 – the contours of the corridor, 3 – arrow pointing at the opening of the cave, 4 – steep sloping of the corridor walls of the cave, 5 – scarp, 6 – sloping of the bottom of the cave, 7 – cave chimney, 8 – cave well, 9 – blocks and rubble rock at the bottom of the cave, 10 – clayey silt at the bottom of the cave, 11 – artificial elements in the cave: masonry, stairs, 12 – an observation point on the educational path (according to [8, 9]). Sites of inventory surveying are shown

The cave system – Jaskinia Odkrywców-Prochownia-Szczelina is the largest underground object in Kadzielnia, Kielce. Originally there were three separate caves which were connected in a series of caves during exploration work conducted by speleologists in 2004-2009. The openings of the caves are artificial, located on the wall which remained after the exploitation of the quarry. Most places in the system of the caves were accessible for surveying, which enabled the stabilization and survey of control point as a traverse, with the points placed in the positions enabling visibility and proper set-up of the surveying equipment. Conditions for monitoring were not favorable. Very narrow fissures in which it was difficult to set up and level the instrument were a significant problem. These fissures also called for the need for very short side lines. Sometimes there were problems with visibility between two points, as a result of the difficult position of the points. The caves are winding (Fig. 2), usually dimly lit, with big height differences between the points.



Fig. 2. Photo of the fragment of the studied area [4]

2. Methods of inventory of the underground objects

Inventory methods of underground objects used in the past and currently are following [1]:

- Photogrammetric method – used in the inventory of overground and underground objects with stereophotogrammetric cameras; it requires good lighting of the object.
- Tacheometric method – known in traditional geodesy, convenient for the inventory of the bottom, often for the cave roof; the advantages of this method are high accuracy and simplicity of survey and study.
- Cross section method – is a tacheometric method in which the measurement is taken at regular space

intervals. The measurement of the side walls and roofs of caves is conducted with this technique.

- Orthogonal method was very popular in surveying before the era of electronic total stations. Simplicity of measuring, low cost and high availability of the required instruments meant that a large part of field surveying was performed using this method. However, it is labor-intensive and not very accurate.
- Surveying method of underground excavations using laser pointers – in mining conditions laser pointers act as auxiliary devices used for signalling situational and height details of a chamber. Measuring horizontal and vertical angles from two independent positions to the laser spot realizes spatial section; replaced by scanning tacheometry.
- Inventory method using laser rangefinders – in underground conditions surveying is conducted with the instruments equipped with laser rangefinders, operating in the visible light, i.e. the wavelength of light in the range 380 to 780 nm (laser spot of red or green); replaced by scanning tacheometry.
- Scanning tacheometry method – enables semi-automatic measurements of angular-linear networks, manual measurements of situational details and measurement of the details in the automatic mode while keeping a specific work interval.
- Laser scanning – measurements are made with a laser beam (near infrared) with high frequency due to prism rotating in a vertical plane. Maximum scanning speed depends on the scanner model, most often several – several tens of thousands (for modern scanners up to one million) points per second. By automating the measurement, especially in dangerous mining conditions, the degree of the user's exposure to hazards that may occur can be greatly eliminated.

Significant technological progress which took place also in geodesy and cartography caused that scanning instruments began to enjoy increasing popularity, greatly accelerating the work of land surveyors. The first measurements with the use of scanning devices began in the 1990s, but the process of their improving and of increasing their functions is still being continued. This development also applies to specialized software for processing data from laser scans. Laser scanning has begun to play an important role in the inventory measurement of large enclosed structures, including caves. Currently, this method is competitive, compared with conventional surveying methods, due to high efficiency in performing high

accuracy studies and the possibility of integration of laser scanning into sensors recording in the optical range of radiation (hyperspectral scanners, thermal cameras) used in photogrammetry. Laser scanner imaging is independent of lighting conditions, lack of sunlight does not constitute a problem during night measurements as the device is powered by an independent source of energy. The results obtained by the method of laser scanning are usually much more accurate compared with traditional surveying methods.

3. Selection of inventory method and performing measurements

While assessing the lay of the land of the caves in the Kadzielnia nature reserve, the best possible method for the measurement of the condition of the caves – if the use of laser scanning which gives a fuller picture of the measured objects is impossible – is the method of cross section combined with use of scanning tacheometry; this allows for high automation of surveying works and a relatively large number of measured points within a short time. These points will be measured with an error not exceeding 1.5 mm with regard to the traverse points.

The project of control network should consider the choice of the optimum geometrical structure of the network, ensuring durability and stability of the measurement marks and the required accuracy of observation. Due to the fact that the control runs through a long and narrow route the best solution was to establish a polygon traverse [10].

Inside the cave system 15 points were stabilized, from the entrance through Szczelina to the exit through Jaskinia Odkrywców, where the traverse was connected to the external points. Eventually, the control network is made up of a 17-point closed traverse, including 2 points outside the caves (Fig. 3).

From the adjustment of the control network errors of positions of the points within the range of up to 6.5 mm were obtained. Error of the height of control point of the traverse ranges to 7.7 mm.

In the inventory measurements two methods of scanning tacheometry were used: reflector and reflectorless. Reflector method was used mainly to measure and stabilize the network points. Reflectorless method was used to measure the interior of the caves.

Measurements in the caves were performed with the use of an electronic total station TOPCON QS1A, operating in automatic and manual reflectorless mode. Using the appliance was possible thanks to the purchase within the project „Retrofitting laboratories assisting the

teaching process in the course of study at Environmental Engineering and Geodesy and Cartography Faculties at Kielce University of Technology”, the project co-financed by the European Union under the European Regional Development Fund Operational Programme Świętokrzyskie Voivodship for the years 2007-2013. Total station is equipped with stepper motors which enable variable work interval so that the data about a specific density of points on the measured area can be obtained automatically. The density of the points enables control over the measurement data (a given measurement point is a control point to an adjacent point), it also gives the opportunity to build a spatial model of inventoried objects. While plane measuring (regular, with distinct planes) the fitting takes place, e.g. with the method of the smallest editable squares, planes and solids (cylinders, spheres, cones), whereas while measuring irregular objects, stretching of triangulation networks takes place directly on the sets of points. In the cave the interval was typically 5^s. Selecting the scan interval (and thus resolution of the image) was dictated by organizational considerations (the caves were available for the measurement one day a week in limited hours). In some parts (where it was not possible to use automatic reflectorless measurement) manual reflectorless measurement was also performed, by way of targeting the laser spot on the measured point. Ceilings, footwall and sidewalls of the caves were measured.

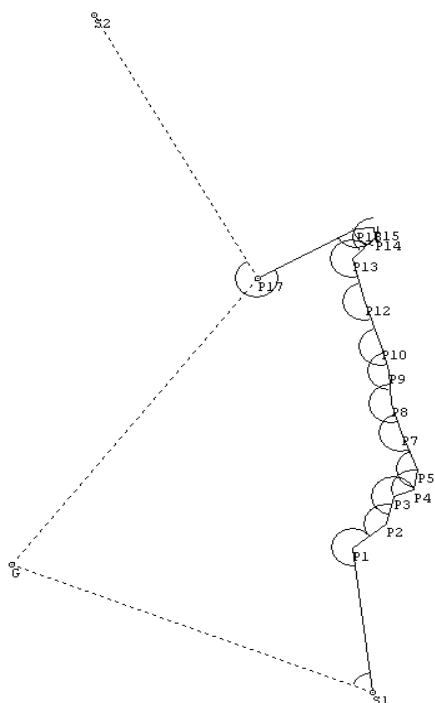


Fig. 3. Sketch of the control network [2–4]

4. Development and visualization of the results of observation

The data from the inventory measurement were transmitted as a text file with a set of coordinates of point cloud from the field computer. The obtained data were processed further in Winkalk. Manual filtration of the points was performed and the points whose data were unnecessary or incorrect were removed. The number of measured pickets after filtration decreased insignificantly. The procedure of manual filtering is more effective than computerized procedures that automate the process of filtration. It may be more time consuming, but reliable. Due to the limited capabilities of the software, the remaining points were divided between three areas: roof, bottom, sidewalls to prevent incorrect visualization in the software. A point cloud was loaded in AutoCAD Civil 3D 2015. Then, the option to display a network of triangles in the wireframe model with the use of visualization options in this software was started. After this procedure an edit option could be used to eliminate the adverse combinations resulting from the creation of a network of triangles which sometimes connected even distant points on a plane.

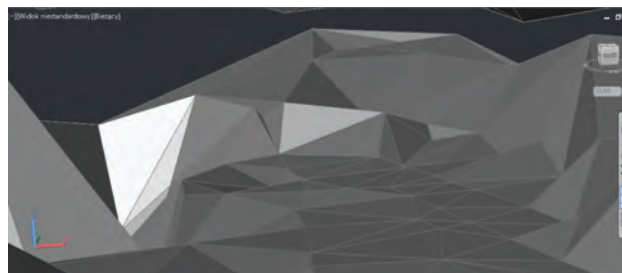


Fig. 4. Sample visualization in AutoCAD Civil 3D 2015 [4]



Fig. 5. A picture to compare with the above visualization [4]

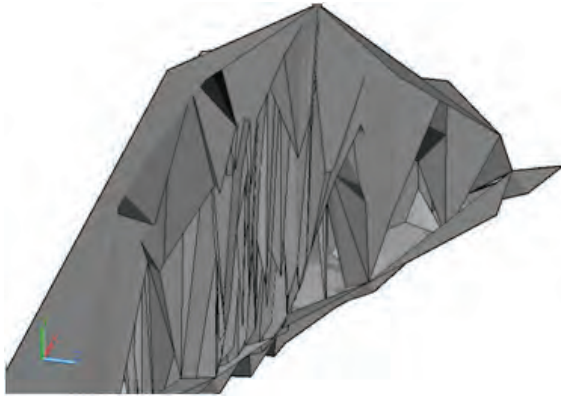


Fig. 6. The view of Korytarz Południowy (Southern Corridor) [3]

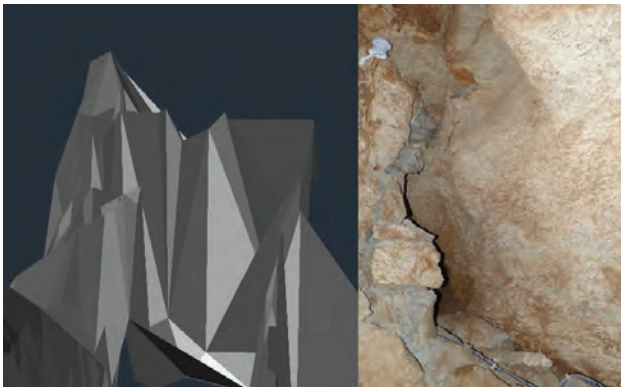


Fig. 7. Comparison of the 3D model created in AutoCAD Civil 3D 2015 with a picture taken in a cave. The fragment shows the cavity at Korytarz Lewy (Left Corridor) [5]

In addition, sample pictures were taken in the observed cave in order to compare them with the obtained results of visualization. Sample compilation of models and pictures of fragments of the cave are shown in Figures 4-7.

Due to the limited resolution of scanning the created 3D model does not accurately reflect the actual topography.

Models of the footwall and sidewalls of the caves were also made in the Surfer software. Examples of the obtained results are provided in Figures 8 and 9.

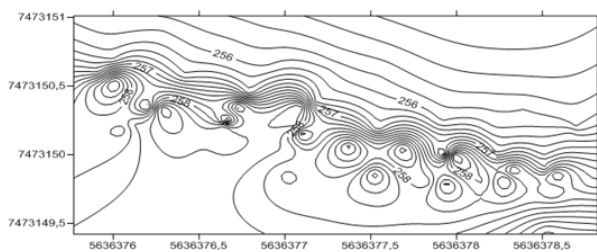


Fig. 8. Contour map showing the situational position of the height of contours of the sidewall [3]

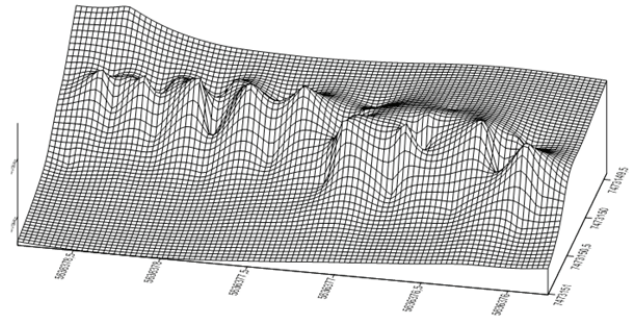


Fig. 9. Wireframe map of the sidewall [3]

Presented schemes will facilitate the comparison of performed inventory with measurements which will be made in the future.

5. Conclusions

1. The need for inventory measurement of the caves which are tourist objects stems from the likelihood of their threat to tourism. These risks relate to the possibility of destabilization of the rocks forming caves, and resulting from mere movement of people, the vibration caused by the events at the amphitheater nearby, performed repairs and geological structure of the orogen (karst).
2. The observation method of the geotechnical object deformation presented in the paper is a new inventory technology, with the use of scanning technique. Instruments used for measuring – TOPCON scanning total station QS1A – and the applied methods worked in the harsh cave conditions. The resulting accuracy matched the assumptions of the observation. The results of measurements and their accuracy depended on the properties of an object and the prevailing conditions such as high humidity reaching 80%, surface texture of the walls and roofs, narrow and winding galleries, low air temperature and ambient field conditions. The constraint was also total station scanning range, which was at least 1 m. Measuring with laser scanner is in such conditions more effective; however, due to the 5 m minimum range of the scanner, it could not be implemented.
3. Error in the position of the pickets is within an average error of measurement with scanning technique. Assumed scan resolution, resulting from organizational capabilities, however, did not provide sufficient quality of a spatial model of the caves.
4. While developing the model, AutoCAD Civil 3D and Surfer were used. After modelling in both programs it can be concluded that the measurements do not reflect the exact shape of the cave.

5. The results of visualization can, regardless of the mentioned objections, serve to monitor specific parts of the caves in order to study the displacements and deformations that may pose a security threat for the area of the cave.
6. Performing subsequent measurement cycles with the use of established geodetic network and a similar set of instruments will enable to compare the position of the cave walls and to determine their possible displacements. 10 cm is applied as a significant value of displacement.

References

- [1] Pielok J. (red.): *Geodezja górnicza*, Wyd. AGH, Kraków 2011.
- [2] Kowalczyk L., Mosiołek J.: *Zastosowanie instrumentów laserowych do inwentaryzacji jaskiń na terenie Kadzielni w Kielcach*. Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [3] Makuch A., Proboszcz A.: *Pomiary laserowe jako metoda inwentaryzacji jaskiń na terenie Kadzielni w Kielcach*. Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [4] Piśkiewicz B., Pluta M.: *Pomiar stanu jaskiń na terenie Kadzielni w Kielcach za pomocą przyrządów laserowych*. Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [5] Świdzicka K., Wirecka A.: *Inwentaryzacja jaskiń za pomocą instrumentów laserowych na przykładzie terenu Kadzielni w Kielcach*. Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [6] Duma P. et al.: *Study of the condition of the selected landslides in the area of Kadzielnia*. Structure and Environment, Kielce University of Technology (in print).
- [7] Klimczyk P. et al.: *Determining the shape and volume of the post-mining basin in Kadzielnia area, Kielce*. Structure and Environment, Kielce University of Technology (in print).
- [8] Urban J., Kasza A., Ochman K., Hercman H.: *Kenozoiczny kras Kadzielni*, Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, 2011.
- [9] Górniak M., Józwiak M., Kasza A., Urban J.: *Przewodnik sesji terenowych*, Sitkówka-Nowiny 2006.
- [10] Gocał J.: *Geodezja inżyniersko-przemysłowa cz. I*, wyd. AGH, Kraków 2004.

Research for the article was funded by statutory research of the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering of Kielce University of Technology, No. 05.0.09.00/2.01.01.01.0022 MNSP.IKGO.15.006

Lidia Kowalczyk
Karol Krawczyk
Agnieszka Makuch
Jakub Mosiołek
Bartosz Piśkiewicz

Michał Pluta
Agata Proboszcz
Jacek Szewczyk
Karolina Świdzicka
Anna Wirecka

Badania stanu wybranych jaskiń podziemnych na terenie Kadzielni w Kielcach

1. Wstęp

Teren rezerwatu przyrody nieożywionej Kadzielnia w Kielcach Kadzielni to najbardziej znany obszar jaskiniowy w Górach Świętokrzyskich. W ścianach dawnego kamieniołomu zinwentaryzowano 25 jaskiń o łącznej długości 678 m oraz opisano duże leje krasowe wypełnione osadami. Większość z nich znajduje się w obrębie Skalki Geologów, zaś największe mieszczą się we wschodniej ścianie kamieniołomu. Jaskinie są częściowo dostępne dla ruchu turystycznego (zespół Jaskinia Odkrywców – Prochownia – Szczelina). Wymaga to zapewnienia bezpieczeństwa podczas zwiedzania trasy turystycznej. Charakter bu-

dowy geologicznej Kadzielni, zwłaszcza występowanie zjawisk krasowych, implikuje jednak możliwość wystąpienia zagrożeń w postaci odpadania odłamków skalnych, pojawiania się szczelin, zapadlisk i innych deformacji górotworu. Jaskinie wymagają więc prowadzenia częstej inwentaryzacji, w celu określenia możliwości występowania deformacji i dla podjęcia zabiegów zabezpieczających.

Inwentaryzacja polega na określeniu aktualnego stanu obiektu oraz opracowaniu dla niego odpowiedniej dokumentacji, niezbędnej w pracach konserwatorskich i projektowych. Jest to złożony i pracochłonny proces, wymagający od wykonawcy dużej precyzji. Składają

się na niego zarówno pomiary, jak i analiza oraz odpowiednia wizualizacja ich rezultatów [1].

Zainicjowanie pomiarów fragmentów jaskiń na terenie Kadzielni w Kielcach w celu inwentaryzacji i wskazania miejsc zagrożonych miało miejsce w 2014 r., w ramach badań statutowych, działalności Studenckiego Koła Naukowego Geomatica oraz prac dyplomowych inżynierskich, obronionych w 2015 r. na Wydziale Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki Politechniki Świętokrzyskiej [2-5], równoległe do innych pomiarów inwentaryzacyjnych obszaru Kadzielni [6, 7].

Prace pomiarowe objęły cztery fragmenty zespołu Jaskinia Odkrywców – Prochownia – Szczelina (rys. 1): komorę Wiesława, komorę korytarza południowego, drugą i trzecią salę od strony szczeliny oraz korytarz lewy.

System jaskiniowy – Jaskinia Odkrywców-Prochownia-Szczelina na Kadzielni jest największym obiektem podziemnym na kieleckiej Kadzielni. Pierwotnie były to trzy osobne jaskinie, które połączone zostały w czasie prac eksploracyjnych prowadzonych przez speleologów w latach 2004-2009 w jeden ciąg jaskiniowy. Otwory tych jaskiń są sztuczne, położone na powstałej w wyniku eksploatacji ścianie kamieniołomu. Większość miejsc w systemie jaskiń była dostępna do prac pomiarowych, co umożliwiło stabilizację i pomiar osnowy geodezyjnej w postaci ciągu poligonowego, z punktami umieszczonymi w miejscach umożliwiających widoczność i prawidłowe rozstawienie sprzętu pomiarowego. Warunki nie były sprzyjające do prowadzenia obserwacji. Istotny problem stwarzały bardzo wąskie szczeliny, w których utrudnione było ustawienie i spoziomowanie instrumentu. Szczeliny te powodowały również konieczność stosowania bardzo krótkich celowych. Niekiedy występowały problemy z widocznością pomiędzy dwoma punktami, wynikającą z trudnego usytuowania punktów. Jaskinie są kręte (rys. 2), zwykle słabo oświetlone, z dużymi różnicami wysokości pomiędzy poszczególnymi punktami.

2. Metody inwentaryzacji stanu obiektów podziemnych

Do stosowanych w przeszłości i obecnie metod inwentaryzacji obiektów podziemnych należą [1]:

- Metoda fotogrametryczna – stosowana jest w inwentaryzacji obiektów naziemnych i podziemnych za pomocą kamer stereofotogrametrycznych; wymaga dobrego oświetlenia obiektu.
- Metoda tachimetryczna – znana z geodezji klasycznej, dogodna jest do inwentaryzacji spągu, często również stropu w jaskiniach; do zalet meto-

dy należy duża dokładność oraz prostota pomiaru i opracowania.

- Metoda przekrojów – jest to metoda tachimetryczna, w której pomiary odbywają się w regularnych odstępach przestrzennych. Za pomocą tej techniki wykonuje się pomiary ociosów i stropów jaskiń.
 - Metoda ortogonalna była metodą bardzo popularną w pomiarach geodezyjnych przed erą tachimetrów elektronicznych. Prostota pomiaru i niewielki koszt oraz duża dostępność wymaganych przyrządów sprawiały, że znaczną część pomiarów terenowych wykonywano za pomocą tej metody. Jest jednak pracochłonna i mało dokładna.
 - Metoda pomiaru wyrobisk podziemnych przy zastosowaniu wskaźników laserowych – w warunkach kopalnianych wskaźniki laserowe pełnią rolę urządzeń pomocniczych służących do sygnalizacji szczegółów sytuacyjno-wysokościowych komory. Pomiar kątów poziomych i pionowych z dwóch niezależnych stanowisk do plamki lasera realizuje przestrzenne wcięcie „w przód”; zastąpiona przez tachimetrię skanującą.
 - Metoda inwentaryzacji z wykorzystaniem dalmierzy laserowych – w warunkach podziemnych wykonuje się pomiary instrumentami wyposażonymi w dalmierze laserowe, działające w paśmie światła widzialnego, tj. długości fali świetlnej z zakresu 380÷780 nm (plamka lasera barwy czerwonej lub zielonej); zastąpiona przez tachimetrię skanującą.
 - Metoda tachimetrii skanującej – pozwala na półautomatyczne pomiary kątowno-liniowe osnów, pomiary manualne szczegółów sytuacyjnych oraz pomiar szczegółów w trybie automatycznym przy zachowaniu określonego interwału pracy.
 - Skaniny laserowe – pomiary wykonywane są za pomocą promienia laserowego (bliska podczerwień), z dużą częstotliwością dzięki obracającemu się w płaszczyźnie pionowej pryzmatowi. Maksymalna szybkość skanowania zależy od modelu skanera, najczęściej jest to kilka – kilkadziesiąt tysięcy (dla nowoczesnych skanerów nawet do miliona) punktów na sekundę. Dzięki zautomatyzowaniu wykonywania pomiarów, zwłaszcza w niebezpiecznych warunkach kopalnianych, można znacznie wyeliminować stopień narażenia użytkownika na mogące wystąpić zagrożenia.
- Znaczny postęp techniczny, który miał miejsce również w dziedzinie geodezji i kartografii spowodował, że coraz większą popularnością zaczęły cieszyć się instrumenty skanujące, w znacznym stopniu

przyspieszające pracę mierniczych. Pierwsze pomiary z zastosowaniem przyrządów skanujących rozpoczęły się w latach 90., jednak nadal trwa proces ich udoskonalania i poszerzania ich funkcji. Rozwój ten dotyczy również specjalistycznego oprogramowania przeznaczonego do opracowywania danych pochodzących ze skaningu laserowego. Skaningu laserowego zaczął odgrywać również ważną rolę w pomiarach inwentaryzacyjnych dużych obiektów kubaturowych, w tym jaskiń. Obecnie metoda ta jest konkurencyjna w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych ze względu na dużą wydajność w wykonywaniu prac o wysokiej dokładności oraz możliwości integracji skaningu laserowego z sensorami rejestrującymi w zakresie optycznym promieniowania (skanery hiperspektralne, kamery termowizyjne) wykorzystywanymi w fotogrametrii. Obrazowanie skanerem laserowym jest niezależne od warunków oświetleniowych, brak światła słonecznego nie stanowi więc problemu przy nocnych pomiarach, gdyż urządzenie zasilane jest niezależnym źródłem energii. Wyniki uzyskane za pomocą metody skaningu laserowego są zwykle znacznie dokładniejsze w porównaniu z tradycyjnymi metodami geodezyjnymi.

3. Wybór metody inwentaryzacji i przeprowadzenie pomiarów

Oceniając ukształtowanie terenu jaskiń w rezerwacie przyrody Kadzielnia, najlepszą możliwą metodą do przeprowadzenia pomiarów stanu jaskiń – przy braku możliwości zastosowania skaningu laserowego dającego pełniejszy obraz pomierzonych obiektów – jest metoda przekrojów w połączeniu z zastosowaniem tachimetru skanującego; pozwala to na dużą automatykę prac pomiarowych i stosunkowo znaczną liczbę pomierzonych punktów w krótkim czasie. Punkty te będą pomierzone z błędem nieprzekraczającym 1,5 mm względem punktów ciągu poligonowego.

Projekt osnowy pomiarowej powinien uwzględnić wybór optymalnej struktury geometrycznej sieci, zapewniającej trwałość i stabilność znaków pomiarowych oraz wymaganą dokładność obserwacji. Ze względu na fakt, że osnowa przebiega przez długą oraz wąską trasę najlepszym rozwiązaniem było założenie ciągu poligonowego [8].

Wewnątrz systemu jaskiń zastabilizowano 15 punktów, od wejścia przez szczelinę aż do wyjścia przez Jaskinię Odkrywców, gdzie ciąg nawiązano do punktów zewnętrznych. Ostatecznie osnowę pomiarową tworzy siedemnastopunktowy ciąg zamknięty, w tym 2 punkty na zewnątrz jaskiń (rys. 3).

Z wyrównania osnowy otrzymano błędy położenia punktów mieszczące się w granicach do 6,5 mm. Błąd wysokości punktów osnowy ciągu poligonowego zawiera się w granicach do 7,7 mm.

W pomiarach inwentaryzacyjnych wykorzystano dwie metody tachimetrii skanującej: lustrową oraz bezlustrową. Metodę lustrową wykorzystano przede wszystkim do pomierzenia i zastabilizowania osnowy pomiarowej. Metodę bezlustrową wykorzystano do pomierzenia wnętrza jaskiń.

Pomiary w jaskiniach zostały wykonane za pomocą tachimetru elektronicznego TOPCON QS1A, pracującego w trybie automatycznym i manualnym bezlustrowym. Tachimetr użyty do pomiaru został zakupiony w ramach projektu „Doposażenie laboratoriów wspomagających proces dydaktyczny kierunku inżynierii środowiska oraz geodezji i kartografii w Politechnice Świętokrzyskiej”, współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Świętokrzyskiego na lata 2007-2013. Tachimetr wyposażony jest w silniki krokowe umożliwiające zmienny interwał pracy, dzięki czemu można automatycznie uzyskiwać dane o określonym zagęszczeniu punktów na mierzonej powierzchni. Zagęszczenie punktów umożliwia kontrolę nad danymi pomiarowymi (dany punkt pomiarowy jest kontrolnym dla punktu sąsiadującego), jak również daje możliwość budowania modelu przestrzennego inwentaryzowanych obiektów. Przy pomiarze płaszczyznowym (regularnym, o wyrazistych płaszczyznach) następuje wpasowanie, np. metodą najmniejszych kwadratów, płaszczyzn i brył (walców, sfer, stożków) edytowalnych, natomiast przy pomiarze obiektów nieregularnych ma miejsce rozpinanie siatek triangulacyjnych bezpośrednio na zbiorach punktów. W jaskini założony interwał wynosił zwykle 5^m. Wybór interwału skanowania (a więc rozdzielczości otrzymywanego obrazu) był podyktowany względami organizacyjnymi (jaskinie dostępne były do pomiaru przez jeden dzień w tygodniu, w ograniczonych godzinach). W niektórych partiach (tam, gdzie nie można było zastosować automatycznego pomiaru bezlustrowego) wykonano również pomiar manualny bezlustrowy, realizowany przez nakierowanie plamki lasera na mierzony punkt. Dokonano pomiaru stropów, spągów i ociosów jaskiń.

4. Opracowanie i wizualizacja rezultatów obserwacji

Dane z pomiarów inwentaryzacyjnych transmitowano w postaci pliku tekstowego ze zbiorem współ-

rzędnych chmury punktów pochodzących z komputera polowego. Uzyskane dane przetwarzano dalej w programie Winkalk. Wykonano ręczną filtrację punktów, usuwając te, których dane były zbędne bądź błędne. Liczba pomierzonych pikiet po procesie filtracji zmalała w sposób nieznaczny. Procedura ręcznej filtracji jest bardziej efektywna od procedur komputerowych automatyzujących proces filtracji. Jest ona wprawdzie bardziej czasochłonna, ale wiarygodna. Ze względu na ograniczone możliwości programu pozostałe punkty podzielono między trzy obszary: strop, spąg, ociosy, aby zapobiec błędnej wizualizacji w programie. Chmura punktów została wczytana w programie AutoCad Civil 3D 2015. Następnie włączono opcję wyświetlania siatki trójkątów w modelu szkieletowym za pomocą opcji wizualizacji w tym programie. Po wykonaniu tej procedury można było za pomocą opcji edycji wyeliminować niekorzystne połączenia wynikające z utworzenia siatki trójkątów, które niekiedy łączyły nawet odległe do siebie punkty na płaszczyźnie.

Oprócz tego wykonano przykładowe zdjęcia w obserwowanej jaskini, w celu porównania ich z otrzymanymi wynikami wizualizacji. Przykładowe zestawienia modeli i zdjęć fragmentów jaskini przedstawiono na rysunkach 4-7. Ze względu na ograniczoną rozdzielczość skanowania zbudowany model 3D nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistego ukształtowania powierzchni. Wykonano również modele spągu i ociosów jaskiń w programie Surfer. Przykłady otrzymanych rezultatów podano na rysunkach 8 i 9. Przedstawione wykresy ułatwią porównanie wykonanej inwentaryzacji z pomiarami realizowanymi w przyszłości.

5. Wnioski

1. Konieczność wykonywania pomiarów inwentaryzacyjnych jaskiń, stanowiących obiekt ruchu turystycznego, wynika z możliwości wystąpienia w nich zagrożeń dla tego ruchu. Zagrożenia te wiążą się z możliwością destabilizacji układu skał, tworzących jaskinie, a wynikającą z samego ruchu ludzi, drgań wywołanych imprezami na pobliskim amfiteatrze, przeprowadzanych remontów oraz z budowy geologicznej górotworu (kras).
2. Przedstawiona w pracy metoda obserwacji odkształceń obiektu geotechnicznego jest nową technologią inwentaryzacji, wykorzystującą technikę skanowania. Zastosowane do pomiarów instrumenty – tachimetr skanujący TOPCON QS1A – i metody sprawdziły się w trudnych warunkach panujących w jaskiniach. Uzyskana dokładność była odpowiednia do założeń obserwacji. Wyniki pomiarów i ich dokładności były uzależnione od właściwości obiektu i warunków w nim panujących, takich jak: wysoka wilgotność powietrza sięgająca 80%, faktura powierzchni ścian i stropów, wąskie i kręte korytarze, niska temperatura powietrza oraz warunki terenowe otoczenia. Warunkiem ograniczającym był również zasięg tachimetru skanującego, wynoszący minimum 1 m. Pomiar skanerem laserowym jest w tych warunkach bardziej efektywny; ze względu na minimalny zasięg skanera, wynoszący 5 m, nie nadawał się jednak do realizacji.
3. Błąd położenia pikiet mieści się w granicach średniego błędu w pomiarach techniką skanowania. Założona rozdzielczość skanowania, wynikająca z możliwości organizacyjnych, nie zapewniała jednak dostatecznej jakości modelu przestrzennego jaskiń.
4. Przy opracowaniu modelu zastosowano programy AutoCad Civil 3D oraz Surfer. Po wykonaniu modelowania w obu programach można stwierdzić, że wykonane pomiary nie obrazują dokładnie kształtu jaskini.
5. Otrzymane wyniki wizualizacji mogą – niezależnie od wymienionych zastrzeżeń – służyć do prowadzenia monitoringu określonych części jaskiń w celu badania przemieszczeń i odkształceń mogących stanowić zagrożenie bezpieczeństwa dla terenu jaskini.
6. Wykonanie kolejnych cykli pomiarowych, z wykorzystaniem założonej osnowy geodezyjnej i podobnego zestawu instrumentów, pozwoli na dokonanie porównań położenia ścian jaskiń i wyznaczenia ewentualnych przemieszczeń. Za znaczącą wielkość przemieszczenia przyjęto 10 cm.