

METODY DOKUMENTOWANIA ZASTOSOWANE W BADANIACH TERENOWYCH STANOWISKA WIETRZEJĄCYCH ANHYDRYTÓW W PISKACH K. LWOWA

DATA COLLECTING METHODS USED IN THE FIELD STUDY OF WEATHERING ANHYDRITES AT PISKY NEAR LVIV

DAMIAN ŁUGOWSKI¹, ADRIAN JARZYNA¹, MACIEJ BĄBEL¹, KRZYSZTOF NEJBERT¹

Abstrakt. W kamieniołomie Pisky, 30 km na południe od Lwowa, wskutek wietrzenia (uwadniania) anhydrytu (CaSO_4) i jego przechodzenia w gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) wzrasta objętość skały i tworzą się wyjątkowe formy rzeźby, nazywane kopułami z hydratacji. We wnętrzach narastających kopuł powstają komory, które stopniowo przekształcają się w jaskinie, zwane jaskiniami z hydratacji (lub jaskiniami z pęcznienia). Równocześnie skały ulegają rozpuszczaniu i na ich powierzchni tworzą się żłobki krasowe. Zachodzące współcześnie, osobliwe procesy wietrzeniowe i rzeźbotwórcze wymagają precyzyjnej dokumentacji i monitorowania. W niniejszej pracy opisano optymalne techniki badań terenowych zastosowane przy dokumentowaniu strefy wietrzenia. Obejmują one metody: reperów, skanowania laserowego 3D, skanowania światłem strukturalnym LED, fotogrametrii naziemnej oraz modelowania obiektów 2,5D za pomocą fotogrametrii. W pracy omówiono wady i zalety zastosowanych metod.

Słowa kluczowe: wietrzenie anhydrytów, jaskinie z pęcznienia, dokumentowanie, skaning laserowy 3D, skanowanie światłem strukturalnym, fotogrametria naziemna, metoda reperów.

Abstract. In the quarry at Pisky, 30 km south of Lviv, the volume of rock mass increases and unique relief features, called the hydration domes, are being formed due to weathering (hydration) of anhydrite (CaSO_4) and its transformation into gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). In the interiors of the growing domes, chambers are formed that gradually transform into caves called the hydration (or swelling) caves. Simultaneously, the rocks dissolve and their surface is covered with rillenkarrren. The unusual weathering and geomorphological processes taking place today require accurate documentation and monitoring. In this paper we describe the optimum field methods used to document the zone of weathering. These methods include: method of benchmarks, method of 3D laser scanning, method of scanning with structured light LED, method of terrestrial photogrammetry, and method of modelling of 2.5D objects using photogrammetry. We discuss the advantages and disadvantages of the methods used.

Keywords: weathering of anhydrites, hydration caves, documentation, 3D laser scanning, structured-light 3D scanning, terrestrial photogrammetry, method of benchmarks.

WSTĘP

W Piskach k. Lwowa (fig. 1), w kamieniołomie badeńskich (środkowomioceńskich) gipsów wskutek eksploatacji zostały odsłonięte skały anhydrytowe, które w nieczynnej części kamieniołomu ulegają intensywnemu wietrzeniu (Bąbel

i in., 2013). Procesy wietrzenia zachodzą na częściowo zawodnionym dnie kamieniołomu i polegają nie tylko na krasowym rozpuszczaniu skał, ale obejmują także hydratację, czyli uwodnienie minerału anhydrytu wskutek kontaktu z wodami

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Geologii Podstawowej, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa;
e-mail: lugowski.damian@gmail.com, a.jarzyna@student.uw.edu.pl, m.babel@uw.edu.pl, knejbert@uw.edu.pl.

powierzchniowymi i przypowierzchniowymi. Podczas uwadniania anhydryt przechodzi we wtórny gips wg reakcji:



anhydryt + woda = gips

Podczas tego procesu dochodzi często do przyrostu objętości skały, który jest zjawiskiem powszechnie znanym i zdaniem niektórych badaczy może osiągać, a nawet przekroczyć 60% (Kwiatkowski, 1972; Gorbunova, 1978; Sonnenfeld, 1984). Wskutek hydratacji powstają naprężenia wywołujące deformacje powierzchniowej warstwy wtórnych gipsów i anhydrytów. Wietrzejące skały pękają i kruszą się. Tworzą się szczeliny i powierzchnie ścięć – uskoki i nasunięcia. Na powierzchni wietrzejących anhydrytów powstają drobne (decymetrowe) i większe (kilku- i kilkunastometrowe) struktury deformacyjne, które mają formę pustych wewnątrz kopuł lub struktur wigwamowych (fig. 2). Otwierające się wewnątrz tych form komory stają się dostępne dla człowieka i przekształcają się w rzadko spotykane typy jaskiń, zwane jaskiniami z hydratacji (ang. *hydration caves*; Kraus, 1905; Gorbunova, 1978), lub jaskiniami z pęcznienia (niem. *Quellungshöllen*; Biese, 1931, ang. *swelling caves*; Kempe, 1996). Równocześnie skały gipsowe i anhydrytowe ulegają typowym procesom krasowym, rozpuszczają się i pokrywają siecią żłobków krasowych.

Jaskinie z hydratacji są unikatowym obiektem przyrodniczym. Znane są one jedynie z kilku miejsc na świecie (Gorbunova, 1978). Najlepiej zbadane znajdują się w rejonie

górz Harzu w Niemczech (Reimann, 1991; Reinboth, 1997), w stanie Nowy Meksyk w USA (Breisch, 1978) i w Nowej Szkocji w Kanadzie (Reimann, Vladi, 2003). Kamieniołom w Piskach stwarza rzadką okazję obserwowania w jaki sposób powstają te niezwykle formy i jak ulegają degradacji. Badania jaskiń z hydratacji wymagają monitorowania całości procesów, które zachodzą w środowisku, zarówno w strefie wietrzenia, jak i w jej otoczeniu. W monitorowaniu tym bez wątpienia fundamentalną sprawą jest bardzo dokładne dokumentowanie zmieniającej się morfologii omawianych form, przekształceń powierzchni odsłoniętych skał, ich przemieszczeń, deformacji, ubytków w skali nie tylko centymetrów, lecz także milimetrów. Ten właśnie problem, jak w warunkach terenowych, przy ograniczonym czasie i dostępie do obiektu badań precyzyjnie dokumentować zmiany reliefu, jest tematem niniejszego artykułu.

Warto wspomnieć, że geotechnicy i budowniczowie napotykać podobne problemy przy wykonywaniu różnego rodzaju robót górniczych, drogowych lub budowlanych w podłożu anhydrytowym. Wzrost objętości uwadnianych skał anhydrytowych jest zjawiskiem szkodliwym i nie do końca zrozumiałym. Szczególnie często ma on miejsce w tunelach przebiegających skały zawierające anhydryt. Ekspansja zachodzi tam często w nieprzewidywalnym tempie i miejscach, osiągając niekiedy ekstremalne wartości 2 mm na dzień (Alonso i in., 2013) i jest trudna, przeważnie niemożliwa do zahamowania. Obserwacje przebiegu takich procesów w Piskach, w naturalnym środowisku wietrzenia anhydrytów, mogą zatem mieć znaczenie

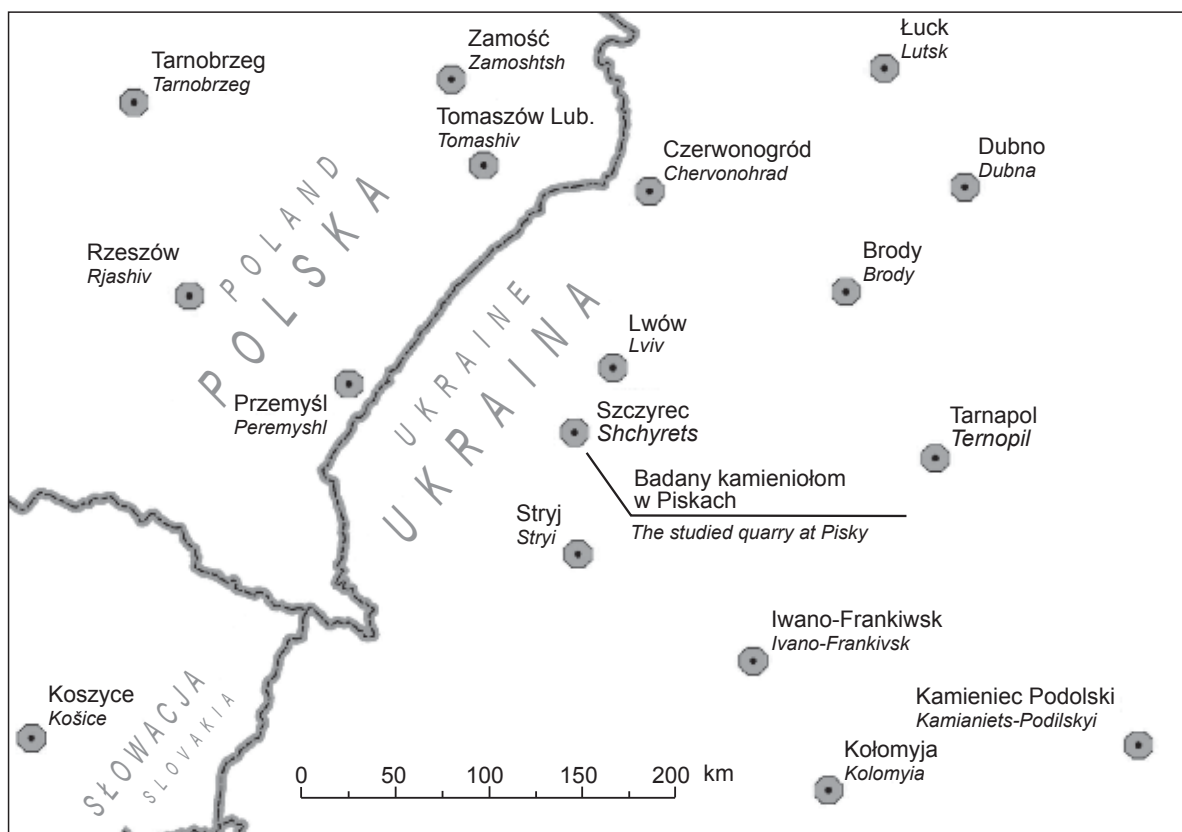


Fig. 1. Mapa lokalizacyjna badanego obszaru w Piskach koło Lwowa

Location map of the study area at Pisky near Lviv

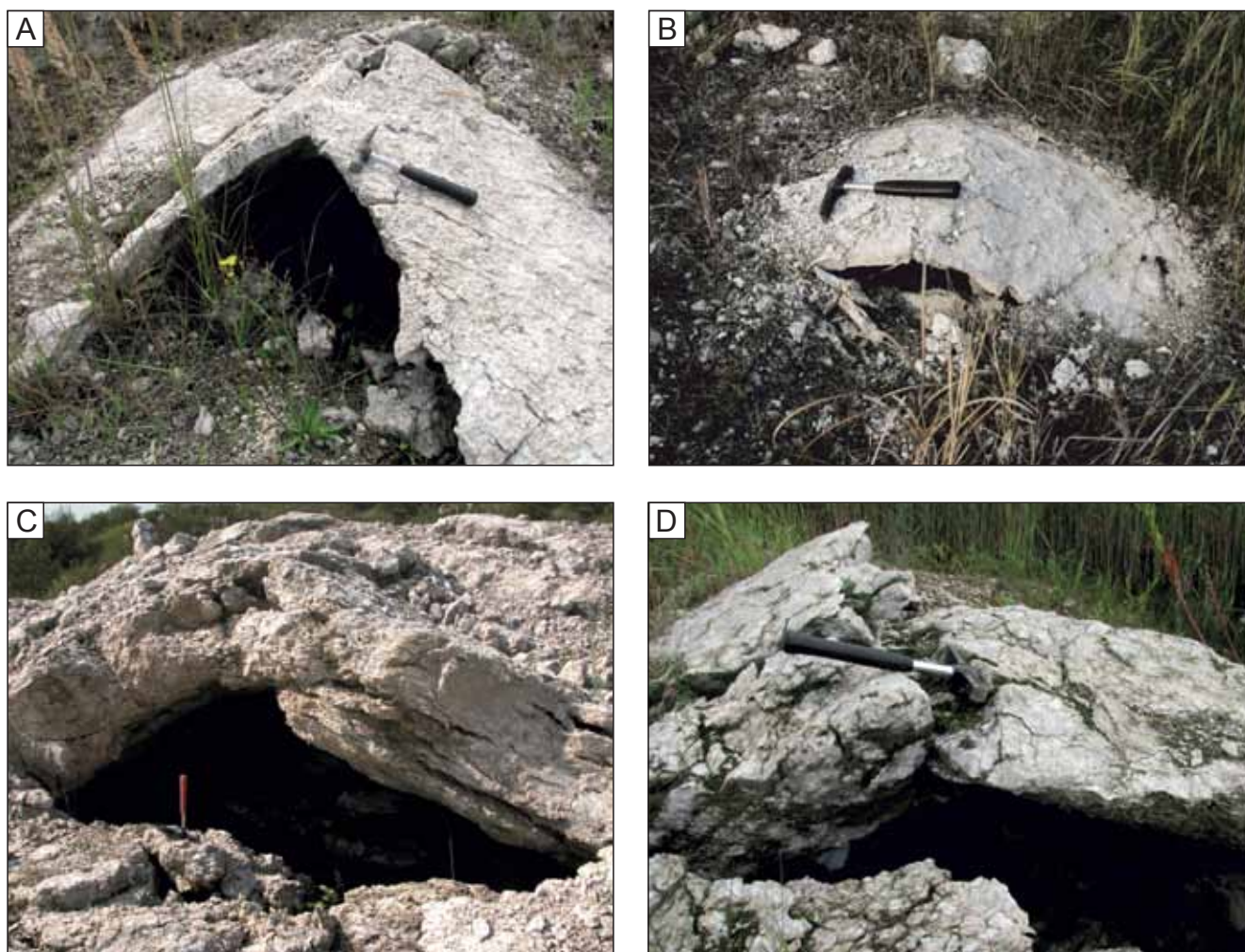


Fig. 2. Przykłady wietrzniowych form deformacyjnych, obserwowanych w kamieniołomie Pisky

A – mała jaskinia z hydratacji o kształcie wigwamowym; **B** – mała otwarta kopuła hydratacyjna; **C** – duża jaskinia z hydratacji o kształcie wigwamowym; **D** – pęknięta kopuła hydratacyjna o kształcie wigwamowym

Examples of weathering deformation forms observed at the Pisky quarry

A – small hydration cave showing the tepee shape; **B** – small open hydration dome; **C** – large hydration cave showing the tepee shape; **D** – broken hydration dome showing the tepee shape

praktyczne dla geotechniki. W niniejszej pracy opisano metody terenowych badań dokumentacyjnych przy użyciu reperów, skanowania laserowego 3D, skanowania światłem struktural-

nym LED (ang. *light-emitting diode*), fotogrametrii naziemnej oraz metodę modelowania obiektów 2,5D za pomocą fotogrametrii. Omówiono wady i zalety zastosowanych metod.

TEREN BADAŃ

Stanowisko wietrzejących anhydrytów znajduje się w kamieniołomie leżącym na południe od miejscowości Pisky (ukr. Піски, dawna nazwa polska: Piaski), w pobliżu Szczyrca (ukr. Щирець, dawna polska nazwa: Szczerzec), 30 km na południe od Lwowa (fig. 1, Ługowski i in., 2016). Struktury deformacyjne koncentrują się w strefie 100×150 m leżącej na dnie kamieniołomu, przy zachodnim skraju płytkich stawów. Strefa ta jest urozmaicona morfologicznie, częściowo pokryta darnią i miejscami porośnięta drobnymi krzewami i drzewami. Podłoże skalne tworzą w większości

śnieżnobiałe, bardzo drobnoziarniste skały, które na pierwszy rzut oka przypominają alabastry, jednak są od nich nieco cięższe – oprócz gipsu zawierają bowiem anhydryt o gęstości większej niż gips, miejscami w ilości 80–90% wagowych (Bąbel i in., 2013). Występują tu wszystkie wymienione wcześniej formy deformacyjne, w tym co najmniej kilkanaście jaskiń z pęcznienia. Największa z nich o wymiarach 9,5×7,8 m i wysokości 1,2 m (dane z sierpnia, 2016 r.) znajduje się we wnętrzu kopuły z hydratacji anhydrytu (niem. *Quellkuppen*, *Quellenkuppen*) – nazywanej Wielką Kopułą.

Kopuła ta ma wymiary $18,1 \times 15,5$ m oraz wysokość względną 2–3 m (Bąbel i in., 2013, fig. 2). Skały gipsowe i anhy-

drytowe są pokryte drobnymi żłobkami krasowymi. Występują liczne szczeliny i spękania.

MONITOROWANIE TEMPA DEFORMACJI I ROZPUSZCZANIA SKAŁ GIPSOWO-ANHYDRYTOWYCH (METODA REPERÓW, DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA)

Stanowisko zauważono w 1996 roku, jednakże dopiero od 2008 roku rozpoczęto systematyczne obserwacje. Aby rozpoznać, czy obecne tu formy hydratacyjne narastają, czy też są stabilne, zamocowano wtedy pierwsze repery. Repery (metalowe kołki rozporowe w plastikowych osadach, czyli tzw. dyble) były montowane w sąsiedztwie szczelin na niektórych kopułach gipsowych za pomocą wiertarki akumulatorowej. Odległości pomiędzy reperami mierzono metalową taśmą z dokładnością 1 mm (fig. 3). Pomiary wykonane po ok. 1 roku wykazały przemieszczenia bloków

skalnych rzędu 1–2 mm. W następnych latach powiększono liczbę zamocowanych reperów do ponad 200, mocując je na kolejnych formach morfologicznych. Celem tych badań było rozpoznanie tempa oraz charakteru przemieszczeń bloków skalnych (repery montowano przeważnie po obu stronach szczelin lub pęknięć). Dla dokładniejszego poznania kierunków przemieszczeń bloków skał gipsowo-anhydrytowych mierzono odległości między wszystkimi sąsiednimi reperami. Liczba pomiarów, powtarzanych co pewien czas, wielokrotnie przekroczyła liczbę reperów.

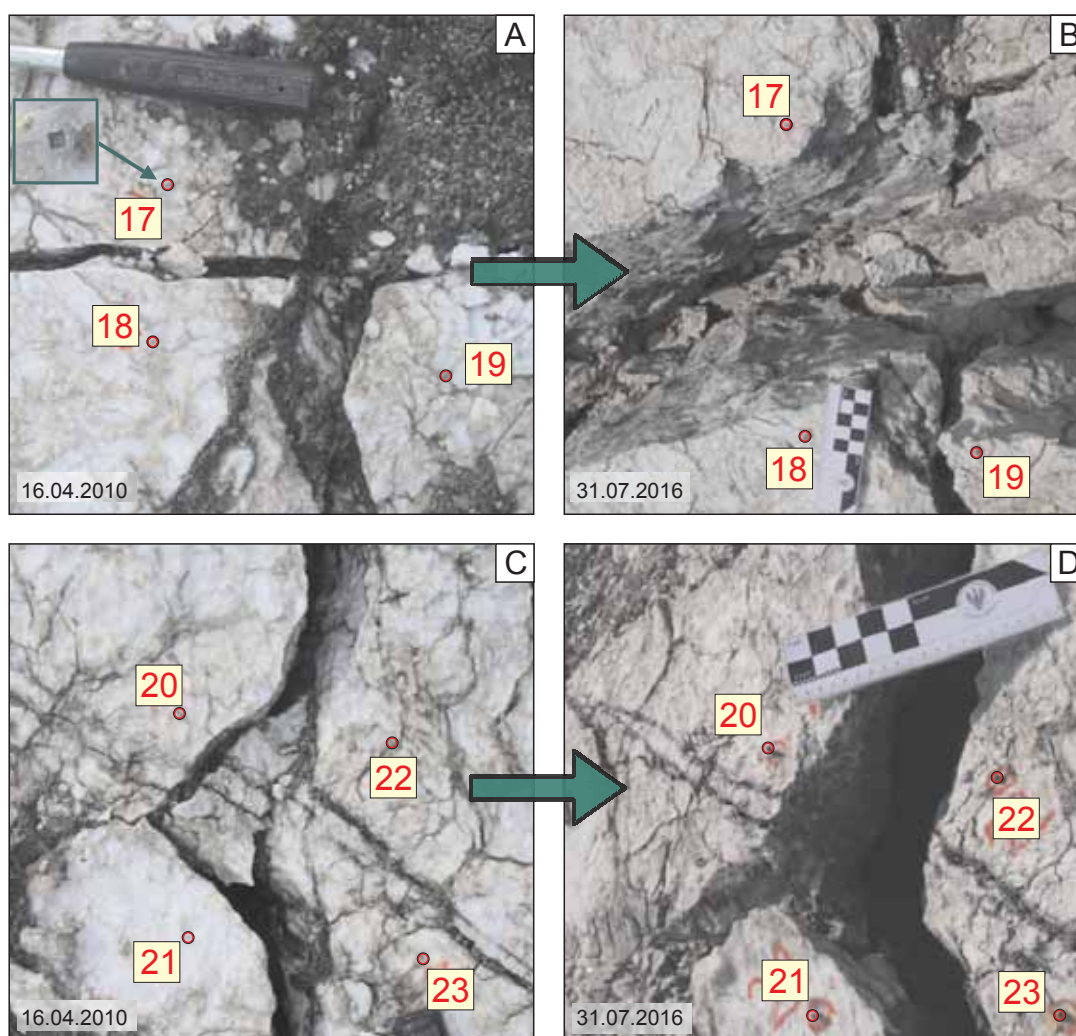


Fig. 3. Dokumentacja i monitorowanie otwierania szczelin oparte o metodę reperów, na przykładzie Kopuły Profesora (Bąbel i in., 2013)

A, C – stan z 2010 r.; B, D – stan z 2016 r.

Documentation and monitoring of the process of opening of fissures based on the method of benchmarks, exemplified by the Dome of the Professor (Bąbel *et al.*, 2013)

A, C – as of 2010; B, D – as of 2016

Pomiary odległości pomiędzy reperami często nie dawały wiarygodnych informacji o tempie otwierania lub zamykania szczelin. Zmierzenie odległości po linii prostej nie zawsze było możliwe. Często przeszkadzały występy skalne. Zdarzało się, że kolejne pomiary wykazywały, że odległość zmieniła się, podczas gdy rzeczywista szerokość szczeliny pozostawała niezmienną, bowiem następowało pionowe lub poziome przemieszczenie się bloku skalnego wzdłuż szczeliny. Niekiedy odległość wzrastała gwałtownie ze względu na zapadnięcie się bloku skalnego. Miejsca zamocowania reperów były dokumentowane fotograficznie, co pozwalało na rozpoznanie charakteru lokalnych zmian.

Metoda reperów dała przekonujące informacje o tym, że niektóre monitorowane bloki skalne były względem siebie nieruchome (wtedy gdy pomiary były identyczne w kolejnych latach). Pomiary odległości pomiędzy reperami nie przyniosły natomiast rzetelnej wiedzy o tempie narastania badanych form, podnoszenia się kopuł z hydratacji lub struktur wígwamowych, ze względu na brak na stałe związanego z obiektem, stabilnego punktu odniesienia. W rzeczywistości całe dno kamieniołomu może ulegać deformacjom a także ubytkom z uwagi na procesy krasowego rozpuszczania. Ponadto poszczególne bloki skalne mogą przesuwać się w różnych kierunkach, zarówno poziomych, jak i pionowych.

Dane uzyskane w wyniku pomiarów odległości między reperami mają najczęściej charakter jakościowy a nie ilościowy i dają jedynie orientacyjne informacje o tempie deformacji (tempie otwierania lub zamykania szczelin). Metoda reperów obarczona jest błędami związanymi z techniką pomiarów, wynikającymi z trudności w wyznaczeniu linii pomiaru (naciągnięcie i właściwie przyłożenie taśmy). W związku z tym otrzymane dane są najczęściej pogładowe, a jedynie w szczególnych przypadkach dostatecznie precyzyjne.

Mimo tych problemów, duża liczba pomiarów pozwoliła na wstępne wyciągnięcie wniosków ilościowych. Statystycznie większość pomiarów, przeprowadzonych w latach

2009–2014, wskazuje na przeciętne tempo przemieszczeń – głównie otwierania szczelin w zakresie 0,5–2,0 cm/rok (Bąbel i in., 2015). Lokalnie, w okresie pomiędzy 2012 a 2014 rokiem, zanotowano większe zmiany – nawet do 4,0 cm/rok, zgodnie z potwierdzonymi przez dokumentację fotograficzną obserwacjami, świadczącymi o pojawieniu się nowych form i struktur (patrz np. Ługowski i in. 2016, ryc. 2). Natomiast dzięki porównaniu dokumentacji fotograficznej z lat 2009 i 2012 wykryto nieoczekiwane i bardzo szybkie utworzenie się nowej formy z obszerną jaskinią z hydratacji (fig. 2C, 6) w miejscu, gdzie nie zamontowano reperów i gdzie przedtem znajdowało się zagłębienie wypełnione wodą (Bąbel i in., 2013, ryc. 5 i 6; 2015). W roku 2014 nowa jaskinia z pęcznienia osiągnęła ponad 1 m wysokości (Bąbel i in., 2014; Ługowski i in., 2016, ryc. 3).

Metoda reperów jest pracochłonna i czasochłonna. Nawiercanie otworów pod repery w skałach gipsowo-anhydrytowych nie jest ani łatwe, ani szybkie. Wiercenie przenośną wiertarką akumulatorową jest mało wydajne i ograniczone pojemnością akumulatorów. Nawiercanie otworów można przyspieszyć, stosując lepszy sprzęt, tj.: wydajniejsze, ale jednocześnie znacznie cięższe wiertarki akumulatorowe lub wiertarki elektryczne, do zasilania których niezbędny jest dodatkowo agregat prądowórczy. Sprzęt ten wymaga transportu samochodem terenowym. Mierzenie odległości sieci reperów jest bardzo czasochłonne i pracochłonne. Niezbędne są do tego minimum dwie a optymalnie trzy osoby (dwie osoby mierzą, jedna notuje). Często pojawiają się trudności z odszukaniem i rozpoznaniem reperów. Problemy te mnożą się wraz ze wzrostem liczby zamocowanych reperów. W efekcie opóźnia to powstawanie dokumentacji. Metoda reperów nie rozwiązuje zasadniczych kwestii, związanych z wiernym monitorowaniem odkształceń powierzchni dna kamieniołomu. Monitorowanie to wymaga sporządzenia bardzo dokładnego, przestrzennego odwzorowania kształtu dna innymi metodami, opisanymi w kolejnych rozdziałach.

DOKUMENTACJA 3D METODĄ SKANOWANIA LASEROWEGO

Precyzyjne monitorowanie tempa, jak i dokładna analiza formy odkształceń zachodzących na badanym obszarze wymagają zastosowania rozwiązań z dziedziny geodezji inżynierskiej.

W badaniach inżynierskich analizę przemieszczeń pionowych i poziomych wykonuje się odpowiednio za pomocą niwelacji geometrycznej oraz pomiarów tachymetrycznych sieci kątowno-liniowych (Muszyński, Milczarek, 2014). Wspomniane metody pomiarów przemieszczeń bezwzględnych w powiązaniu z technikami względnymi oraz siecią sensorów, rejestrujących zachowanie badanego obszaru, składają się na tzw. monitoring strukturalny. System taki umożliwia bardzo precyzyjny pomiar przemieszczeń w czasie (z dokładnością poniżej 1 mm). Niestety jest on ograniczony do danych uzyskiwanych z wybranych punktów stabilnych i na stałe związanych z obiektem. Co więcej, pomiar przemieszczeń danego punktu wymaga zdefiniowa-

nia stałych, stabilnych punktów odniesienia (Muszyński, Milczarek, 2014). W przypadku analizowanego stanowiska wietrzejących skał gipsowo-anhydrytowych, zarówno wielkość obszaru badawczego, jak i dynamika zmian kształtu powstających form wskazują, że wykonanie tradycyjnych, geodezyjnych pomiarów przemieszczeń dla kilkudziesięciu czy kilkuset punktów kontrolnych byłoby niezwykle skomplikowane.

Rozwiązaniem, pozwalającym na szybki pomiar całego obiektu przy bardzo dużej gęstości rejestrowanych punktów, jest naziemny skanowanie laserowe (ang. *Terrestrial Laser Scanning* – TLS). Technologie skaningu laserowego są powszechnie wykorzystywane do obrazowania form przestrzennych w lokalnym układzie współrzędnych x, y, z (Wężyk, 2010). Dane pozyskane z naziemnego skaningu laserowego stanowią obszerny zasób informacji, który w procesie dalszej obróbki może służyć jako materiał źródłowy

do sporządzenia wizualizacji oraz analizy badanego stanowiska. Omawiane metody skaningu laserowego są wykorzystywane do analizy przemieszczeń m.in. przy monitoringu powierzchniowych ruchów masowych (Abellán i in., 2009; Cebulski, 2014) oraz coraz częściej jako wsparcie dla pomiarów geodezyjnych przy monitorowaniu deformacji obiektów budowlanych (Zogg, Ingensand, 2008; Adamek i in., 2012). Wspomniane powyżej doświadczenia badawcze wskazują na zasadność zastosowania metody TLS do monitorowania tempa deformacji skał gipsowo-anhydrytowych w Piskach.

Naziemny skaningu laserowego działa na zasadzie pomiaru czasu jaki upływa od wysłania wiązki lasera do jej powrotu do odbiornika, po uprzednim odbiciu od badanego obiektu. Pryzmat wirujący, w który wyposażony jest skaner, wysyła impulsowo wiązkę promieni świetlnych lasera. Wiązka ta po odbiciu od napotkanego obiektu jest rejestrowana przez odbiornik skanera. Dodatkowo mierzony jest kąt pionowy i poziomy wiązki lasera oraz intensywność powracającego sygnału laserowego. Zebrane dane stanowią informacje pozwalające określić położenie danego punktu w przestrzeni i nadanie mu współrzędnych x, y, z w lokalnym układzie stanowiska skanera (Muszyński, Milczarek, 2014). Rezultatem pracy naziemnego skanera laserowego jest wygenerowana chmura punktów (ang. *point cloud*).

Dokumentacja stanowiska metodą naziemnego skaningu laserowego była prowadzona przez Pracownię Skanerów 3D Instytutu Archeologii Uniwersytetu Warszawskiego. W badaniach wykorzystano impulsowy skaner laserowy Leica ScanStation C10 (specyfikacja techniczna, fig. 4). Według danych producenta skaner ten umożliwia rejestrację położenia pojedynczego punktu w przestrzeni z dokładnością ± 6 mm dla obiektu położonego w zasięgu 1–50 m od pozycji skanera. Przebieg prac terenowych obejmował:

- przygotowanie badanego stanowiska do pomiarów – wycięcie i usunięcie traw i krzewów pokrywających badane formy, w celu polepszenia jakości uzyskanego obrazu i tym samym ograniczenia wpływu szaty roślinnej na wynik skanowania;
- wytypowanie miejsc dla osadzenia punktów stanowiących punkty odniesienia.

Wybrane miejsca powinny być stabilne tak, aby w razie potrzeby powtórzenia skanowania w przyszłości stanowiły punkty referencyjne, łączące dane uzyskiwane z poszczególnych zakresów czasowych. Za takie miejsca posłużyły stabilne ostańce gipsowe w stropowej części gipsów (zlokalizowane w ścianie północnej i południowej kamieniołomu, ok. 15 m powyżej dna kamieniołomu) oraz zabetonowany metalowy słup w dnie kamieniołomu (po stronie południowej). W miejscach tych (po dwa punkty po stronie północnej oraz południowej) w otworach nawierconych w skale gipsowej zamocowano metalowe repery, do których przykręcono tarcze HDS (płaskie tarcze obrotowo-uchylne, stanowiące punkty referencyjne dla skanera, Węzyk, 2010). Odległość do najbliższej pozycji skanera dla dwóch z czterech wybranych punktów mieściła się w zakresach – ok. 25–50 m w linii prostej, zaś dla dwóch pozostałych punktów – ok. 60–100 m (fig. 5). Dodatkowo zainstalowano dwa tymczasowe punkty referencyjne w strefie centralnej badanego stanowiska.

Precyzyjny pomiar współrzędnych geodezyjnych dla poszczególnych punktów wykonano przy użyciu GPS RTK (EPOCH 35 i kontroler Nomad) (fig. 6). Obszar docelowy objęty skanowaniem obejmował ok. 200×300 m. W celu pokrycia wiązką lasera całego badanego terenu oraz wyeliminowania stref niewidocznych dla skanera, przy urozmaiconej i skomplikowanej morfologii dna kamieniołomu, konieczne było wykonanie skanowania wielopozycyjnego (20 stanowisk skanera, fig. 5). Prace trwały 6 dni i zostały zrealizowane przez dwie osoby obsługujące sprzęt pomiarowy.

W wyniku przeprowadzonego skanowania uzyskano chmury punktów reprezentujące badany obszar wraz z otoczeniem. Pierwszym etapem obróbki pozyskanych skanów (plików komputerowych reprezentujących trójwymiarowy obraz zeskanowanego obiektu) była wstępna filtracja i unifikacja zarejestrowanych chmur punktów. Łączenie poszczególnych subskanów (skanów z kolejnych 20 stanowisk) wykonano za pomocą oprogramowania Leica Cyclone 9.0.3, bazując na określeniu położenia skanera i wykonanego skanu względem punktów referencyjnych. Dokładność otrzymanego złożenia wyniosła 0,5 cm, zaś po nadaniu punktom referencyjnym atrybutów z pomiarów GPS RTK dokładność złożenia wyniosła 3 cm (Janowski, 2014). Uzyskana w wyniku połączenia wszystkich skanów chmura punktów miała stanowić podstawę do wykonania szczegółowej trójwymiarowej mapy terenu oraz dalszych analiz ilościowych.

Otrzymana w procesie skanowania chmura punktów stanowi zbiór o znanych atrybutach x, y, z . Każdy następny skan tego samego obiektu może zostać wykonany przy założeniu

Typ instrumentu/lasera <i>Type of instrument/laser</i>	Kompaktowy, impulsowy skaner laserowy <i>Compact, impulsive laser scanner</i>						
Długość fali <i>Wavelength</i>	532 nm (zielone światło lasera) <i>532 nm (green laser light)</i>						
Zasięg <i>Range</i>	300 m przy 90% albedo, 134 m przy 18% albedo <i>300 m at 90% albedo, 134 m at 18% albedo</i>						
Dokładność pojedynczego pomiaru <i>Accuracy of single measurement</i>	<table border="0"> <tr> <td>Położenie <i>Position</i></td> <td>6 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>6 mm (at 1–50 m range)</i></td> </tr> <tr> <td>Odległość <i>Distance</i></td> <td>4 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>4 mm (at 1–50 m range)</i></td> </tr> <tr> <td>Kąt (poziomy/pionowy) <i>Angle (horizontal/vertical)</i></td> <td>60 μrad <i>60 μrad</i></td> </tr> </table>	Położenie <i>Position</i>	6 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>6 mm (at 1–50 m range)</i>	Odległość <i>Distance</i>	4 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>4 mm (at 1–50 m range)</i>	Kąt (poziomy/pionowy) <i>Angle (horizontal/vertical)</i>	60 μ rad <i>60 μrad</i>
Położenie <i>Position</i>	6 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>6 mm (at 1–50 m range)</i>						
Odległość <i>Distance</i>	4 mm (w zasięgu 1–50 m) <i>4 mm (at 1–50 m range)</i>						
Kąt (poziomy/pionowy) <i>Angle (horizontal/vertical)</i>	60 μ rad <i>60 μrad</i>						
Rozdzielczość skanowania <i>Scan resolution</i>	<table border="0"> <tr> <td>Rozmiar plamki lasera <i>Laser spot size</i></td> <td>0–50 m: 4,5 mm (kryterium FWHH); 7 mm (kryterium Gaussa) <i>0–50 m: 4.5 mm (FWHH-based); 7 mm (Gaussian-based)</i></td> </tr> </table>	Rozmiar plamki lasera <i>Laser spot size</i>	0–50 m: 4,5 mm (kryterium FWHH); 7 mm (kryterium Gaussa) <i>0–50 m: 4.5 mm (FWHH-based); 7 mm (Gaussian-based)</i>				
Rozmiar plamki lasera <i>Laser spot size</i>	0–50 m: 4,5 mm (kryterium FWHH); 7 mm (kryterium Gaussa) <i>0–50 m: 4.5 mm (FWHH-based); 7 mm (Gaussian-based)</i>						
Szybkość skanowania <i>Scan rate</i>	Do 50 000 pkt/s <i>Up to 50,000 points/s</i>						
Pole widzenia <i>Field of view</i>	<table border="0"> <tr> <td>W pionie <i>Vertical</i></td> <td>270° <i>270°</i></td> </tr> <tr> <td>W poziomie <i>Horizontal</i></td> <td>360° <i>360°</i></td> </tr> </table>	W pionie <i>Vertical</i>	270° <i>270°</i>	W poziomie <i>Horizontal</i>	360° <i>360°</i>		
W pionie <i>Vertical</i>	270° <i>270°</i>						
W poziomie <i>Horizontal</i>	360° <i>360°</i>						

Fig. 4. Specyfikacja techniczna skanera laserowego Leica ScanStation C10

Technical specification of Leica ScanStation C10 scanner

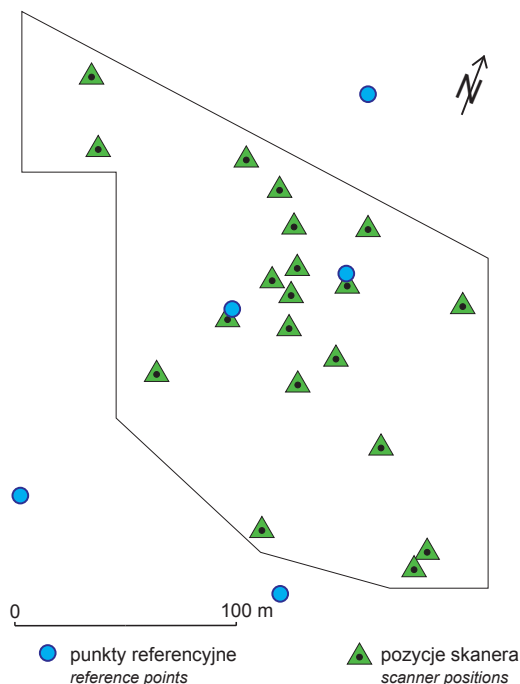


Fig. 5. Schemat rozmieszczenia punktów referencyjnych oraz stanowisk skanera Leica ScanStation C10 w kamieniołomie w Piskach

Scheme of distribution of reference points and positions of the scanner Leica ScanStation C10 at the Pisky quarry

takiej samej gęstości rozłożenia punktów, jednak ich rozmieszczenie na obiekcie będzie w każdym cyklu pomiarowym inne. W celu porównania zmian powierzchni danego obiektu w dwu różnych cyklach pomiarowych konieczne jest opracowanie numerycznych modeli terenu w oparciu o chmurę punktów.

Zasadniczym celem pierwszego skanowania było uzyskanie wiernego modelu numerycznego powierzchni dna kamieniołomu z maksymalną dokładnością.

Przeprowadzone skanowanie laserowe 3D nie dało zamierzonych rezultatów. Wypadkowa chmura punktów była wyjątkowo rozproszona i nie dawała dokładnego obrazu jednej powierzchni. Zasadniczym powodem trudności w opracowaniu wiernego modelu powierzchni te-



Fig. 6. Pomiary współrzędnych geodezyjnych GPS RTK, zdjęcie wykonane 6.08.2014 r.

Measurements of the geodetic coordinate system GPS RTK, the photo was taken on 6 August 2014

renu były tzw. szumy, czyli pojawianie się fałszywych punktów, które wynikały z odbicia wiązki lasera od bardzo licznych traw wyrastających ponad powierzchnię skalną, niemożliwych do wyeliminowania, zaburzających i zniekształcających obraz. Okazało się również, że z pomiarów na obszarach pozbawionych traw nie otrzymano wiernego obrazu w modelu cyfrowym. Mogło to wynikać z niekorzystnych właściwości optycznych skały gipsowo-anhydrytowej, wyjątkowo chropowatej (skrasowiałej) i miejscami przezroczystej (kryształy gipsu są przezroczyste). Uzyskanie wiernego modelu powierzchni terenu nie było zatem możliwe. Natomiast udanym i spektakularnym rezultatem skanowania jest tzw. dokumentacja *true view*, która umożliwiła odbyte wirtualnej wędrówki w przestrzeni 3D, pokazującej wierny, kolorowy obraz badanego terenu, zarejestrowany przez skaner w każdym z 20 stanowisk w sierpniu 2014 r. (do obejrzenia na stronie internetowej pod adresem <http://www.3dscanlab.uw.edu.pl>, patrz dokument: Tw Szczyrc). Wykonane pomiary mogą zostać ponadto wykorzystane jako osnowa geodezyjna do sporządzenia planów stanowiska.

DOKUMENTACJA 3D SKANEREM ŚWIATŁA STRUKTURALNEGO LED

Dokumentację strefy wietrzenia skał gipsowo-anhydrytowych w małej skali, w wybranych punktach terenu, przeprowadzono z zastosowaniem technologii skaningu 3D na bazie białego światła strukturalnego LED. W pracy wykorzystano skaner marki Smarttech Scan3D UNIVERSE (fig. 7).

Skanery oparte na emisji światła strukturalnego pozwalają na uzyskanie o wiele większej dokładności odwzorowania badanej powierzchni niż skanery TLS. Ponadto w procesie skanowania pozyskiwane są zarówno dane przestrzenne x, y, z jak i informacja o kolorze (zapisywana w formacie RGB).

Metoda skaningu z oświetleniem strukturalnym LED polega na analizie obrazu uzyskanego w wyniku projekcji obrazów rastrowych w formie np. prążków o zmiennej gęstości (struktura światła), wyemitowanych przez projektor w kierunku badanego obiektu. Linie wyświetlane na obiekcie ulegają zniekształceniu, odzwierciedlającemu morfologię badanej powierzchni. Kamera skalibrowana z projektorem, wchodząca w skład skanera, wykonuje serię zdjęć oświetlanego obiektu, które są analizowane w czasie rzeczywistym i na ich podstawie wyznaczana jest geometria badanej powierzchni.

Zaletą skanerów światła strukturalnego LED jest bardzo szybka rejestracja danych. Podgląd pojedynczego skanu uzyskuje się w czasie kilku sekund od uruchomienia pomiaru. Wadą jest konieczność zapewnienia całkowitego zaciemnienia obszaru skanowanego oraz małe pole robocze, które w przypadku wykorzystanego skanera wynosiło $120 \times 150 \times 200$ mm. Skaner Scan3D UNIVERSE przy rozdzielczości 1,3 Mpix pozwala na tzw. próbkowanie 40 pkt. na mm^2 , przy odległości między punktami – 0,16 mm. Technologia skaningu 3D na bazie białego światła strukturalnego LED jest wyjątkowo dokładna. Nadaje się ona doskonale zarówno do precyzyjnej dokumentacji stref spękań, jak i analizy morfologii drobnych form krasu powierzchniowego.

W trakcie badań terenowych, prowadzonych w maju 2014 r., wytypowano i udokumentowano 29 obszarów o wymiarach ok. $0,04\text{--}1,2$ m^2 . Po przeskanowaniu tych powierzchni wyróżniono dwa tematy zagadnień o odmiennej problematyce. Pierwszy obejmował tempo rozpuszczania się skał gipsowo-anhydrytowych i tworzących się w trakcie tego procesu różnych form krasu powierzchniowego. Drugi zaś odnosił się do dynamiki otwierania szczelin oraz powstawania sieci spękań. Ponowne skanowanie w przyszłości pozwoli na bardzo dokładną analizę zmian morfologii badanych obszarów i umożliwi precyzyjne monitorowanie tych zmian w czasie (Szczepańska, 2015).

DOKUMENTACJA METODĄ FOTOGRAMETRII NAZIEMNEJ

Dokumentacja stanowiska w Piskach wymagała wykonania bardzo dokładnej mapy terenu, do uzyskania której zastosowano jedną z metod fotogrametrii naziemnej, polegającą na wykorzystaniu fotografii wykonywanych kilka metrów nad

poziomym terenu. Wspomnianą mapę utworzono poprzez rzut ortogonalny odpowiednio opracowanych zdjęć na poziomą płaszczyznę odniesienia. W ten sposób powstała mapa jest ortofotomapą powierzchni terenu (Kurczyński, 2014).

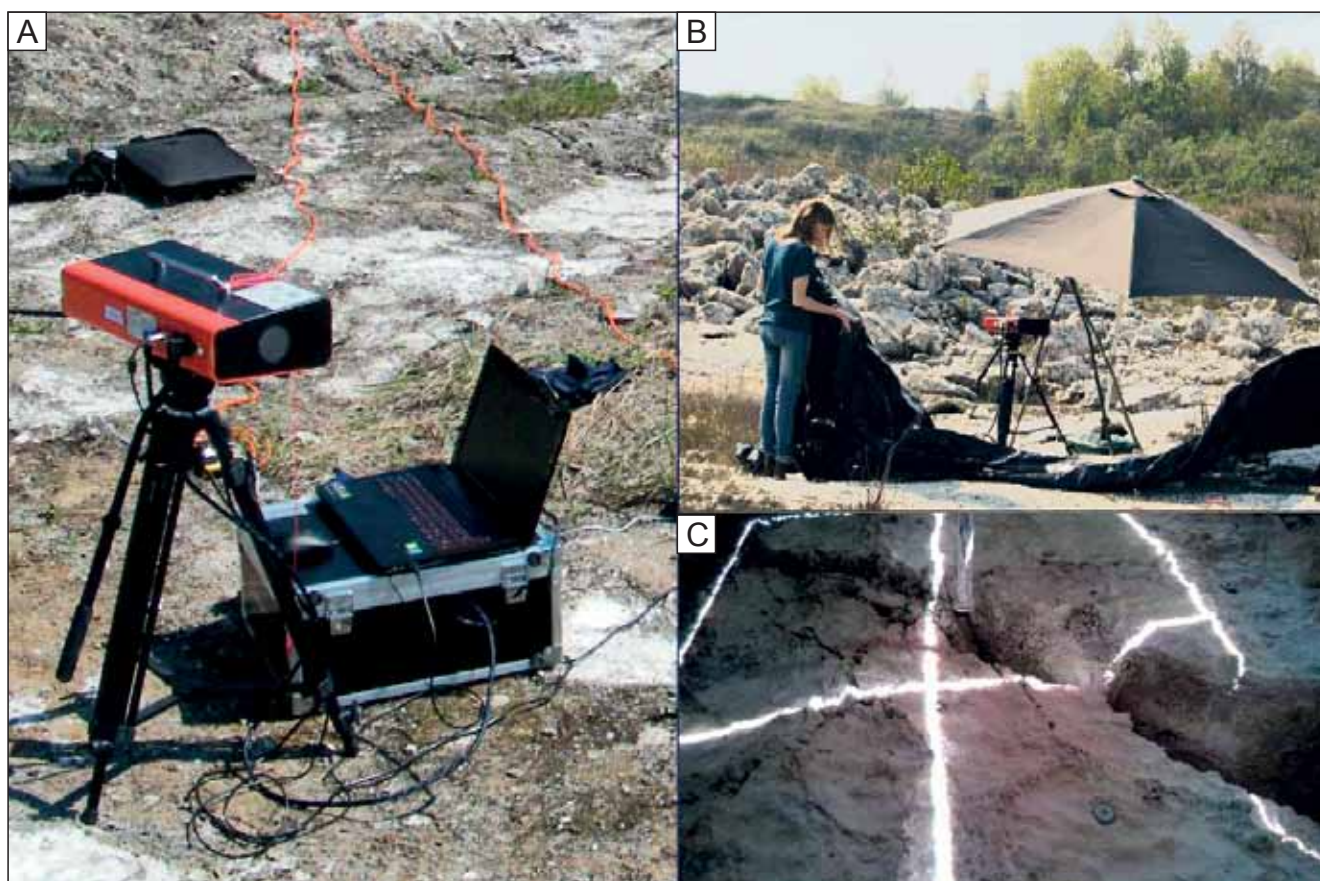


Fig. 7. Charakterystyka stanowiska pracy skanera światła strukturalnego LED

A – wykorzystany sprzęt, na zdjęciu widoczne: laptop, skaner Smarttech Scan3D UNIVERSE; **B** – zakładanie osłony przeciwsłonecznej w miejscu pracy skanera; **C** – pole robocze skanera

Characteristics of the working site for the structured-light 3D scanner

A – equipment used for the study: laptop and Smarttech Scan3D UNIVERSE scanner; **B** – setting of the sun shelter for the fieldwork of the scanner; **C** – working area of the scanner

Proces wykonania ortofotomapy przebiegał w 5 etapach.

1. Pierwszy etap obejmował wybór miejsca wykonania mapy (fig. 8). Wyboru tego dokonano ze względu na reprezentatywność form znajdujących się na danym obszarze. Zadbano o to, aby każde sfotografowane miejsce miało punkt wspólny z sąsiadującym. Obszar badany, ze względu na jego wielkość (150×280 m), podzielono na mniejsze pola. Każde z tych pól zostało sfotografowane w taki sposób, aby sąsiadujące ze sobą pola miały część wspólną (minimum 55%), umożliwiającą ich połączenie.
2. W następnym kroku przygotowano poszczególne pola do sfotografowania. Umieszczono dwie wyskalowane metrowe tyczki, które w procesie obróbki zdjęć stanowiły łatwo rozpoznawalne obiekty wiążące kolejne fotografie. Ponadto precyzyjnie wycechowane tyczki pozwoliły na wyskalowanie trójwymiarowych modeli form morfologicznych (modeli 2,5D, patrz rozdział następny). W obrębie fotografowanego obszaru umieszczano wskaźnik północy oraz wyznaczano równoległe „ścieżki fotografowania”, odległe od siebie o 2–3 m. Zdjęcia zostały wykonane z wysokości ok. 4 m, aparatem fotograficznym GoPro HERO4 Black. Fotografowany obszar obejmował prostokąt o rozmiarach $5,0 \times 4,5$ m. Kolejne zdjęcia powstawały co ok. 2 m, przez co część wspólna dwóch fotografii sąsiadujących ze sobą w jednym rzędzie obejmowała ok. 3 m, natomiast przybliżona wartość części wspólnej zdjęć sąsiadujących ze sobą w dwóch kolumnach wynosiła ok. 2–3 m (fig. 9, 10). Pierwszy operator odpowiadał za kamerę zamocowaną na metalowym stelażu, trzymając przyrząd pionowo tak, aby aparat fotograficzny znajdował się w położeniu poziomym. Drugi operator uruchamiał telefonem komórkowym migawkę aparatu fotograficznego. Telefon komórkowy był połączony bezprzewodowo z aparatem GoPro dzięki dedyko-

wanej aplikacji wykorzystującej technologię Wi-Fi. Dodatkowo drugi operator kontrolował, czy metalowy stelaż zachowuje pion. Omówione prace terenowe trwały 4 dni.

3. W trzecim etapie uporządkowano zrobione zdjęcia (ok. 5000), wykonano ostateczne ich kadrowanie oraz korektę zniekształcenia soczewki obiektywu (tzw. efekt rybiego oka) przy wykorzystaniu programu Adobe Photoshop CS6. W tym programie dokonano najpierw redukcji bezkształtowego zniekształcenia zdjęć. Korekta ta spowodowała utratę zewnętrznych części zdjęcia. Następnie, w przypadku gdy w obszar zdjęcia dostała się dolna część metalowego stelażu, kadrowano fotografię, eliminując



Fig. 9. Schemat ilustrujący sposób wykonywania dokumentacji fotograficznej podczas tworzenia ortofotomapy. Operator aparatu fotograficznego utrzymuje przyrząd rejestrujący równoległe do terenu, podczas gdy operator urządzenia mobilnego uruchamia migawkę aparatu za pomocą technologii Wi-Fi

Scheme illustrating the way of making photographic documentation during creating of the orthophotomap. Photographic camera operator is keeping the rejecting instrument parallel to the ground, while the camera shutter is activated by a mobile device operator using Wi-Fi technology

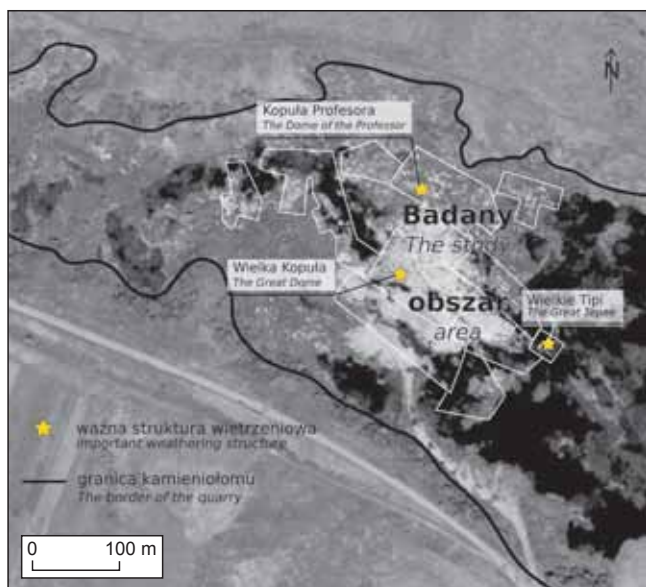


Fig. 8. Fotografowany obszar kamieniołomu w Piskach, podzielony na osobne pola

The Pisky quarry area, divided into separate fields

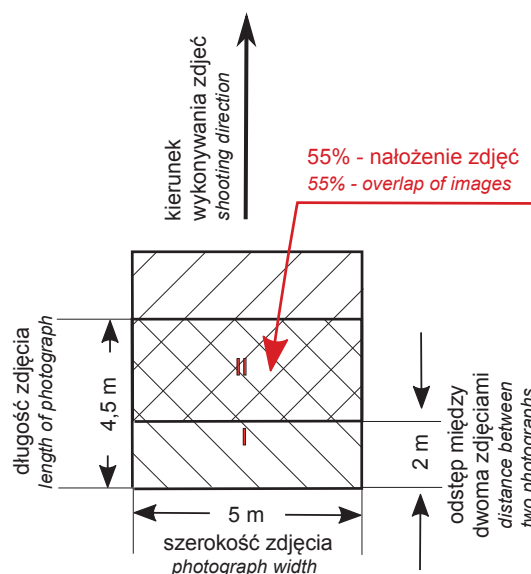


Fig. 10. Pole pojedynczej fotografii i nałożenie się dwóch sąsiednich

The area of a single photo and the overlap between the two neighbouring photos



Fig. 11. Obróbka zdjęć fotograficznych, wykorzystywanych podczas tworzenia ortofotomapy kamieniołomu w Piskach

The image processing used during the creation of orthophotomap for the Pisky quarry

niepotrzebny element. W rezultacie sfotografowany fragment terenu uległ skróceniu nawet o 1 m (fig. 11).

4. Zdjęcia po obróbce były gotowe do złożenia w całość. Łączenie zdjęć wykonano w programie Agisoft Photoscan Professional. Jest to program, umożliwiający utworzenie ortofotomapy 2D i modelu DEM (ang. *Digital Elevation Model*) przy wykorzystaniu zdjęć fotograficznych satelitarnych bądź naziemnych. Zdjęcia poszczególnych pól zaimportowane do programu przeszły przez 6 operacji *postprocessingu* – Align Photos, Optimize Cameras Alignment, Build Dense Cloud, Build Mesh, Build Texture, Build Orthomosaic. Wygenerowana komputerowo ortofotomapa danego miejsca była eksportowana w postaci pliku JPEG, przy jednakowej wartości pikseli dla każdej ortofotomapy powstałego pola. Ortofotomapy uzyskane na bazie fotogrametrii były znacznie bardziej dokładne i czytelne niż ortofotomapy generowane bezpośrednio

z chmury punktów, otrzymanej metodą skaningu laserowego (eksportowane z programu Cyclone) (fig. 12).

5. W programie ArcGIS 10.1 wykonano ostatni etap prac nad mapą kamieniołomu w Piskach. ArcGIS 10.1 jest programem GIS wykorzystywanym do zadań przestrzennych. Spełnia on rolę oprogramowania do analiz, edycji, wizualizacji, gromadzenia oraz tworzenia danych geograficznych. Podkładem do obróbki mapy kamieniołomu była mapa satelitarna (wysokiej rozdzielczości podkład satelitarny dostępny online w programie ArcGIS 10.1). Poszczególne pola, połączone podczas czwartego etapu prac, importowano oraz lokalizowano na podkładzie mapy satelitarnej, a następnie przydzielano im georeferencje w układzie współrzędnych geograficznych Ukraina 2000. Każde dodawane pole łączono z polem sąsiednim. W rezultacie powstała dobrej rozdzielczości mapa badanego stanowiska.

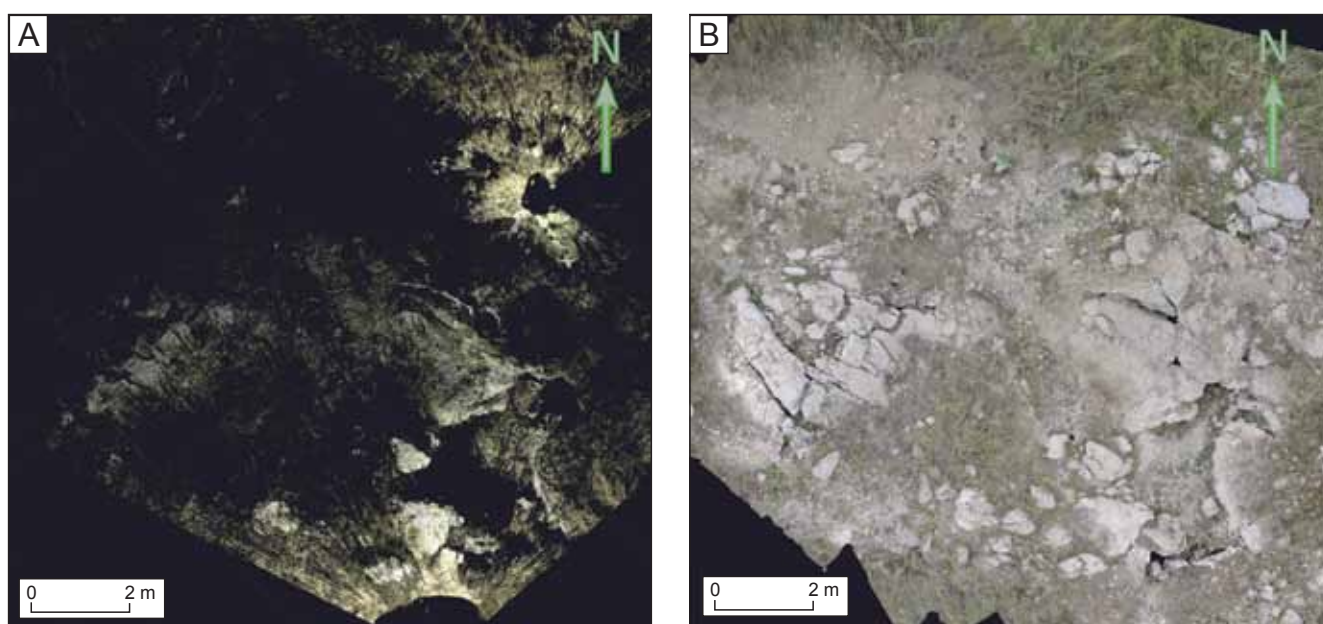


Fig. 12. Porównanie jakości ortofotomap uzyskanych z wykorzystaniem: A – metody skanowania laserowego 3D, B – metody fotogrametrii naziemnej, na przykładzie tzw. Wielkiego Tipi (patrz fig. 8, 13, 14, 15)

The quality of orthophotomap made by: **A** – method of the 3D laser scanning;
B – method of terrestrial photogrammetry, exemplified by the so-called Great Teepee (see Figs. 8, 13, 14, 15)

MODELOWANIE 2,5D Z WYKORZYSTANIEM FOTOGRAMETRII

W dnie kamieniołomu gipsu w Piskach występują wietrzeniowe formy morfologiczne (struktury wigwamowe, kopuły i jaskinie z pęcznienia), które udokumentowano za pomocą modelu w przestrzeni trójwymiarowej, używając metody fotogrametrycznej (fig. 13) (Kurczyński, 2014).

W celu utworzenia modeli 2,5D wykonano zdjęcia fotograficzne danych form w ten sposób, żeby pokrycie sąsiednich zdjęć przekraczało 50%. Fotografowano również tym samym modelem aparatu, jakiego użyto w przypadku

ortofotomapy. Dla każdej sfotografowanej struktury utworzono w programie AgiSoft oddzielny model 2,5D, postępując podobnie jak przy wykonywaniu ortofotomapy. Powstałe modele 2,5D wyeksportowano do programu SketchUp Make 2015. W programie tym istnieje możliwość wyświetlania struktury w dowolnym widoku, edycji graficznej oraz tworzenia przekrojów (fig. 14, 15). Zaletą wykonanej dokumentacji 3D jest możliwość pełnej analizy geometrii badanych form.

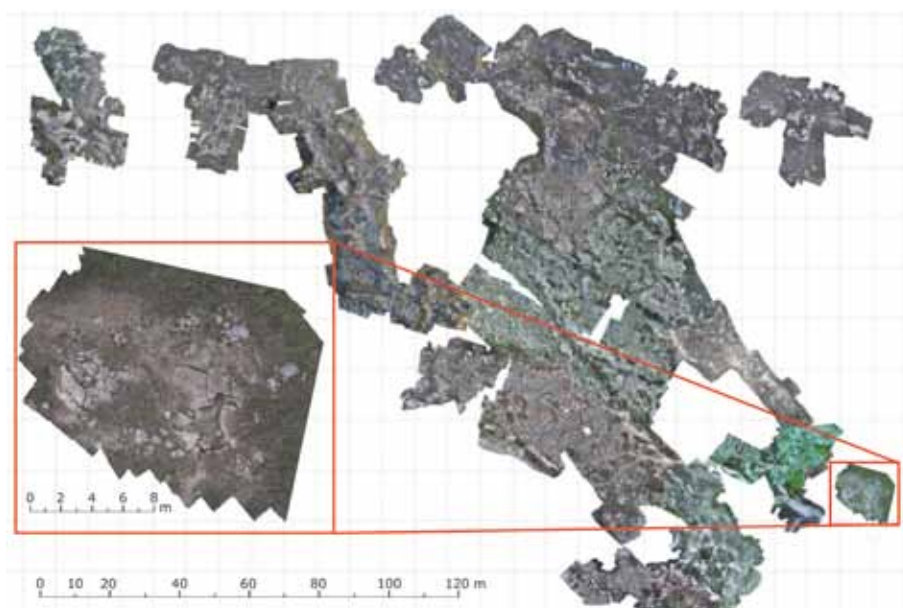


Fig. 13. Ortofotomapa strefy wietrzenia anhydrytów w Piskach k. Lwowa, obszar tzw. Wielkiego Tipi został powiększony

Orthophotomap of the weathering zone of anhydrites at Pisky near Lviv, the area of the so-called Great Tepee is enlarged

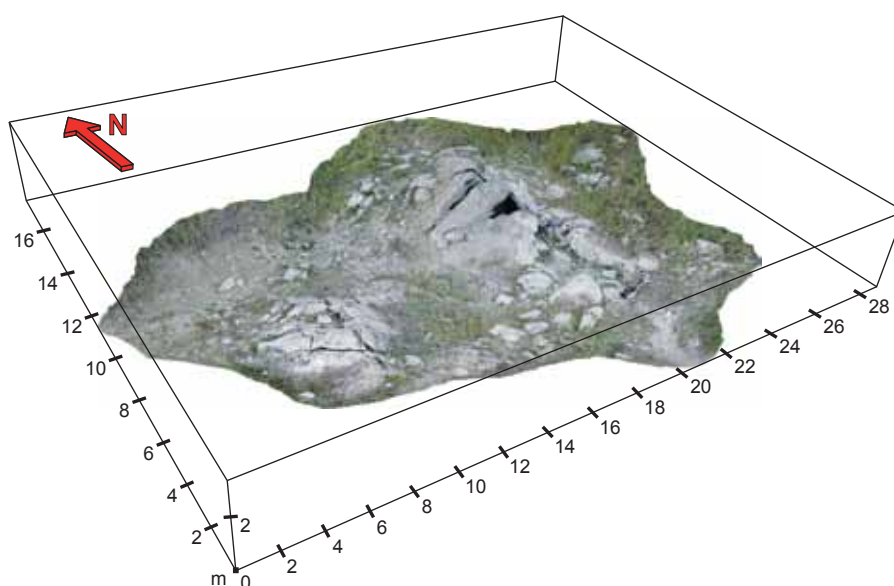


Fig. 14. Model 2,5D wielkiej struktury wigwamowej tzw. Wielkie Tipi, wykonany w programie AgiSoft Photoscan

2.5D model of the large tepee structure (the so-called Great Tepee) created in Agisoft Photoscan

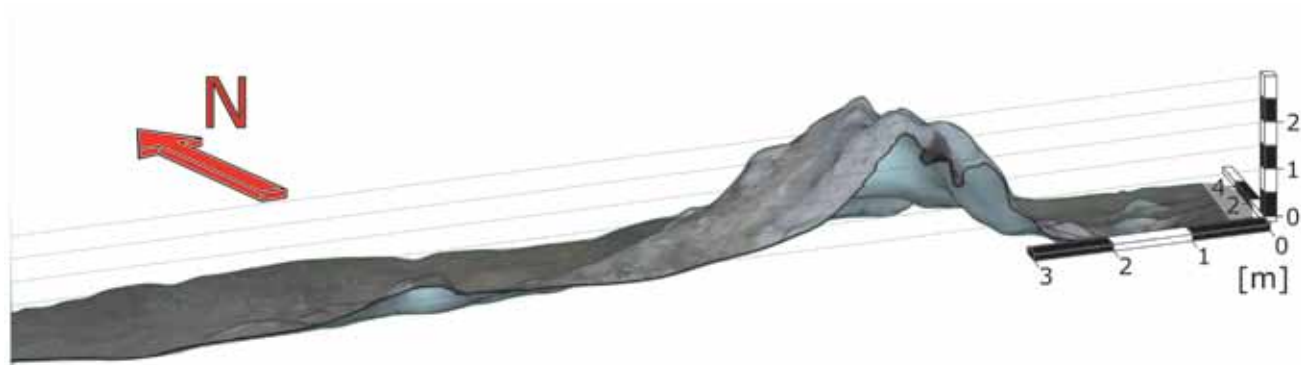


Fig. 15. Przekrój wielkiej struktury wigwamowej, tzw. Wielkiego Tipi (patrz fig. 14), wykonany w programie SketchUp Make 2015

Cross-section of the large tepee structure – the so-called Great Tepee (see Fig. 14), created in SketchUp Make 2015

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W dokumentacji terenowej strefy wietrzenia anhydrytów w Piskach użyto kilku metod. W założeniu miały one w sposób optymalny, w najkrótszym czasie, przy użyciu dostępnego sprzętu i oprogramowania doprowadzić do maksymalnie wiernego odwzorowania powierzchni dna kamieniołomu, aby można było z dużą dokładnością analizować i monitorować jakościowo oraz ilościowo przekształcenia tej powierzchni w czasie. Metody reperów oraz skanowania laserowego 3D przyniosły najmniej oczekiwanych, pozytywnych rezultatów w stosunku do nakładu pracy. Najbardziej efektywną metodą okazała się fotogrametria naziemna, ponieważ prace terenowe były najmniej czasochłonne – trwały kilka dni. Metoda ta wymagała jednak dużo większego wkładu pracy podczas opracowywania zebranych danych. W rezultacie pozwoliło to zarówno na uzyskanie szczegółowej mapy badanego obszaru, jak też kompletnej kolorowej dokumentacji fotograficznej badanych form (fig. 12B). Na podstawie prac fotogrametrycznych wykonano modele 2,5D wybranych form morfologicznych. Uzyskana dokumentacja 3D umożliwiła prowadzenie dalszych ilościowych analiz geomorfologicznych i stanowi idealny materiał wyjściowy do obserwacji zmian zachodzących wskutek wietrzenia skał w czasie. Porównanie

uzyskanego modelu 2,5D lub zrobionych obecnie fotografii z modelem lub fotografiami wykonanymi w przyszłości daje taką sposobność.

Podziękowania. Wykonane badania terenowe są efektem pracy zespołowej prowadzonej od kilku lat przez pracowników i studentów Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Lwowskiego. W pracach tych brały udział m.in. następujące osoby (w kolejności alfabetycznej) – A. Bermes, M. Bura, A. Bogucki, A. Jacyszyn, J. Janowski, J. Kotowski, M. Krawczyk, M. Madej, I. Maksymiów, M. Mazur, V. Mik, D. Olszewska-Nejbert, G. Przybylik, I. Szczepańska, O. Tomeniuk, którym za pomoc serdecznie dziękujemy. Bez ich zaangażowania zaprezentowanie niniejszej pracy nie byłoby możliwe. Dziękujemy Jackowi Rajchelowi, Tadeuszowi Perytowi oraz anonimowemu recenzentowi za krytyczne, konstruktywne uwagi, które ulepszyły niniejszą pracę, zaś pani Brygidzie Grodzickiej za korekty edytorskie.

Badania finansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki, decyzja nr DEC-2012/05/B/ST10/00918.

LITERATURA

- ABELLÁNA, JABOYEDOFF M., OPPIKOFER T., VILAPLANA J., 2009 — Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 365–372.
- ADAMEK A., ZACZEK-PEPLIŃSKA J., GERGONT A., 2012 — Analysis of possibilities to utilise results of laser scanning in technical inspection of water dams. *W: Proceedings of the FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6–10 May 2012.* International Federation of Surveyors (FIG), Consiglio Nazionale Geometri e Geometri Laureati.
- ALONSO E.E., BERDUGO I.R., RAMON A., 2013 — Extreme expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystone: the case of Lilla tunnel. *Géotechnique*, 63, 7: 584–612.
- BAŁBEL M., JACYSZYN A., OLSZEWSKA-NEJBERT D., NEJBERT K., BOGUCKI A., MAKSYMIOW I., MIK W., BERMES A., ŁUGOWSKI D., KACPRZAK K., PRZYBYLIK G., WITKOWSKI M., 2013 — Jaskinie z pęcznienia (ang. swelling caves) w strefie współczesnego wietrzenia anhydrytów w kamieniołomie Pisky w okolicach Lwowa. *W: Od Czarnohory po Góry Świętokrzyskie – geologiczne*

- peregrynacje. Polsko-Ukraińska Sesja Naukowa, Warszawa–Bocheniec 15–19 października 2013 (red. M. Bąbel, M.J. Dzierzek, D. Olszewska-Nejbert): 19–26. Instytut Geologii Podstawowej WG UW, Warszawa.
- BĄBEL M., ŁUGOWSKI D., NEJBERT K., OLSZEWSKA-NEJBERT D., KRAWCZYK M., KOTOWSKI J., SZCZEPAŃSKA I., YATSYSHYN A., BOGUCKI A., MUKHA B., BERMES A., JANOWSKI J., BURZA M., 2015 — Rapid growth of hydration caves in the weathering anhydrite rocks, Pisky quarry, Ukraine. *W: 31st IAS Meeting of Sedimentology, Abstracts Book*. Kraków, 22–26 June 2015: 56. Polish Geological Society, Kraków.
- BĄBEL M., YATSYSHYN A., ŁUGOWSKI D., NEJBERT K., OLSZEWSKA-NEJBERT D., BOGUCKI A., KREMER B., 2014 — Swelling caves from the weathering zone of anhydrite rocks in western Ukraine. *W: 19th International Sedimentological Congress, Sedimentology at the Crossroads of New Frontiers, Abstracts Book*. Geneva, Switzerland, 18–22 August 2014: 35. Université de Genève, IAS.
- BIESE W., 1931 — Über Höhlenbildung. Teil 1. Entstehung der Giphöhlen am südlichen Harzrand und am Kyffhäuser. *Abhandlungen der Preußischen Geologischen Landesanstalt, Neue Folge*, **137**: 1–71.
- BREISCH R.L., 1978 — The truth about gypsum cave. *NSS News*, **36**, 9: 183–185.
- CEBULSKI J., 2014 — Zastosowania naziemnego skanera laserowego (TLS) do oceny aktywności osuwisk, na przykładzie osuwiska Bodaki (Beskid Niski). *Landform Analysis*, **26**: 105–113.
- GORBUNOVA K.A., 1978 — Peşery gidratacji. *Peşery*, **17**: 61–63. Perm.
- JANOWSKI J., 2014 — Opracowanie mapy rzeźby powierzchni kamieniołomu, na podstawie przetwarzania chmury punktów z TLS pochodzącego z kamieniołomu Pisky koło Szczyrca – zachodnia Ukraina [pr. dypl.]. Studium podyplomowe lotniczy i naziemny skaning laserowy. AGH Kraków.
- KEMPE S., 1996 — Gypsum karst of Germany. *Int. J. Speleol.*, **25**, 3/4: 209–224.
- KRAUS E.H., 1905 — Hydration caves. *Science, New Series*, **22**, 564: 502–503.
- KURCZYŃSKI Z., 2014 — Fotogrametria. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa: 1–696.
- KWIATKOWSKI S., 1972 — Sedymentacja gipsów mioceńskich południowej Polski. *Pr. Muz. Ziemi*, **19**: 3–94.
- ŁUGOWSKI D., BĄBEL M., BOGUCKI A., JACYCZYŃSKI A., OLSZEWSKA-NEJBERT D., NEJBERT K., JARZYNA A., BERMES A., PRZYBYLIK G., 2016 — Gipsy i anhydryty badeńskie rejonu Szczyrca k. Lwowa. *W: Wyzwania Polskiej Geologii*, 3. Polski Kongres Geologiczny, Tom Kongresowy (red. J. Wojewoda): 225–228. Polskie Towarzystwo Geologiczne, Wrocław.
- MUSZYŃSKI Z., MILCZAREK W., 2014 — Modelowanie przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skanera laserowego. *W: Geoinformacja jako metoda ochrony przed geozagrożeniami* (red. K. Karsznia, K. Podawca): 42–63. Wyd. SGGW, Warszawa.
- REIMANN M., 1991 — Geologisch-lagerstättenkundliche und mineralogische Untersuchungen zur Vergipsung und Volumenzunahme der Anhydrite verschiedener geologischer Formationen unter natürlichen und labormäßigen Bedingungen. *Geologisches Jahrbuch, Reihe D*, **97**: 21–125.
- REIMANN M., VLADI F., 2003 — Zur Entwicklung der sog. Zwergenkirche am Sachsenstein bei Walkenried, Landkreis Osterode am Harz, Niedersachsen und vergleichende Beobachtungen zur rezenten Entstehung von Quellungshöhlen in einem aufgelassenen Gipssteinbruch bei Dingwall, Nova Scotia, Kanada. *Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher*, **49**, 3: 75–77.
- REINBOTH F., 1997 — Die Zwerglöcher bei Walkenried am Südharz-Bemerkungen zur Frage der Quellungshöhlen. *Die Höhle*, **48**, 1: 1–13.
- SONNENFELD P., 1984 — Brines and evaporites. Academic Press Inc., Orlando: 1–613.
- SZCZEPAŃSKA I., 2015 — Application of the laser scanning for engineering-geological analysis of subsoil in the zone of weathering anhydrite rocks at Pisky quarry near Lviv [pr. magister. po ang.]: 1–106. Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski.
- WĘŻYK P., 2010 — Naziemny skaning laserowy. Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych. *W: Geomatyka w Lasach Państwowych – cz. 1. Podstawy*: 343–357. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- ZOGG H.M., INGENSAND H., 2008 — Terrestrial laser scanning for deformation monitoring – Load tests on the Felsenau Viaduct (CH). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Part B5*, **37**: 555–561. Beijing.

SUMMARY

The unique site of weathering anhydrite rocks exposed at the bottom of the Pisky gypsum quarry, near Schyrets', 30 km S of Lviv (Fig. 1), Ukraine, requires special documentation techniques. This site, ca 200×300 m in size, reveals continuous deformation processes that take place at the surface of the rocks due to their volume increase caused by hydration of anhydrite and its transformation into gypsum. These volume expansion leads to the uplift of the surface layer of the gypsum-anhydrite rock, its separation from the substrate, and the growth of the domal and tepee structures (Fig. 2). The domes' interiors are empty, some of them are large enough to be called caves and to be classified as a special type of these forms known as the swelling or hydration

caves, found only in a few places across the world. Precise documentation (at a millimetre scale) and monitoring of the changing morphology of these unique growing structures, also subjected to dissolution typical of karst processes, is the basic task of the investigation carried out since 2008. The site is not easy to reach from Poland and therefore the fieldwork was limited in time and based on the optimally useful methods. Several methods of documentation were selected and applied, including: photographic documentation, methods of benchmarks, three-dimensional (3D) terrestrial laser scanning, method of scanning with structured light LED, method of terrestrial photogrammetry, and method of modelling of 2.5D objects applying photogrammetry.

Each method provided more or less precise and useful data. The photographic documentation of the same objects, made during successive seasons, permitted to recognize rapid changes of the relief more easily and fully than any other method. The method based on network of benchmarks (Fig. 3), fixed at about 200 sites, was the most time-consuming in the field. It brought mostly poorly precise information about the relative direction of movements of the adjacent blocks of rocks. The rate of such movements could be only roughly estimated at ca 0.5–2.0 cm per year. Locally, this rate was higher than 4 cm per year. However, more rapid movements were detected by analysis of photographic data from the area free of benchmarks. The growth of the new 1m-high swelling cave was recorded by this simple photographic method within an approximately 5-year period (2009–2014).

For precise monitoring of the deformation processes in the study area the Terrestrial Laser Scanning (TLS) method was used (see Fig. 4 for technical specification of the Leica ScanStation C10 scanner). The 3D laser scanning made in the field at 20 sites enclosed nearly the whole investigated area of the quarry (Figs. 5–6). This method did not bring the expected results. The 2.5D model of the quarry was not possible to create mainly due to a very dispersed record of the so-called clouds of points, or in the other words due to too many so-called false points in these clouds (false points mostly being the record of grasses erected above the rock surface). These false points were difficult to remove and

therefore the 2.5D model was not precise. The successful and spectacular result of the scanning is “true view” documentation that allows taking a virtual tour to the Pisky quarry (available free On-line at <http://www.3dscanlab.uw.edu.pl>, see document: Tw Szczyrc). By using the LED scanning method (Fig. 7), 29 selected small fragments of the quarry floor surface (ca 0.04–1.2 m² in size) were documented. These areas, marked by benchmarks, will be monitored in the future (by the same LED scanning) for more precise detection of the rate and size of the deformation and karst dissolution of the rocks.

Among all the methods used, photogrammetry is the most effective (Figs. 8–13). This method has successfully provided both the complete colour photographic documentation of the site and, after data processing, the orthophotomap of the quarry bottom, as well as 2.5D models of the particular hydration deformational structures (Figs. 14, 15). These 2.5D models supplied particularly valuable complete quantitative information about the shape of the hydration structures. The models can be used for making any desired cross-sections of the monitored structures and for the collection of other quantitative information (e.g. size, inclination of slopes, etc.). They can be easily distributed in the electronic form as PDFs 3D. Furthermore, the 2.5D models can be also used as “three-dimensional benchmarks” for monitoring of the quarry floor deformation that is going to occur in the future.