

Ocena deformacji budynku spowodowanych podziemną eksploatacją górniczą z wykorzystaniem technologii UAV

Estimating of building deformation caused by mining exploitation using UAV technology



Dr inż. Paweł Sikora^{*)}



Mgr inż. Bartosz Apanowicz^{**)}



Mgr inż. Sebastian Hein^{*)}

Treść: W artykule dokonano oceny uszkodzeń zewnętrznej elewacji budynku, spowodowanych podziemną eksploatacją górniczą z wykorzystaniem technologii UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*). Jako obiekt badań wybrano Kościół pod wezwaniem Św. Krzyża, zlokalizowany przy ulicy Frenzla w Bytomiu. W rejonie Kościoła prowadzona była wieloletnia eksploatacja węgla kamiennego. W celu oceny aktualnego stanu zewnętrznej elewacji przeprowadzono nalot bezzałogowym statkiem powietrznym. Wykonano serię zdjęć frontu budynku. Do opracowania metrycznej fotomapy elewacji wykorzystano oprogramowanie CAD (ang. *Computer Aided Design*) z nakładką Geolisp. Procedura umożliwiła inwentaryzację i kategoryzację uszkodzeń.

Abstract: The article performer evaluation of damage to the building's external façade caused by mining exploitation using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technology. The church which is located at Frenzla Street in Bytom was chosen for the study. In the area of the church was carried out coal mining for many years. To assess the current condition of the external façade was using a unmanned aerial vehicle. A series of photos of the front of the building were taken. CAD (Computer Aided Design) software with Geolisp overlay was used to develop a metric photomap. The procedure allowed inventories and categorization of damage.

Słowa kluczowe:

szkody górnicze, UAV, wysokie budynki

Key words:

mining damage, UAV, high buildings

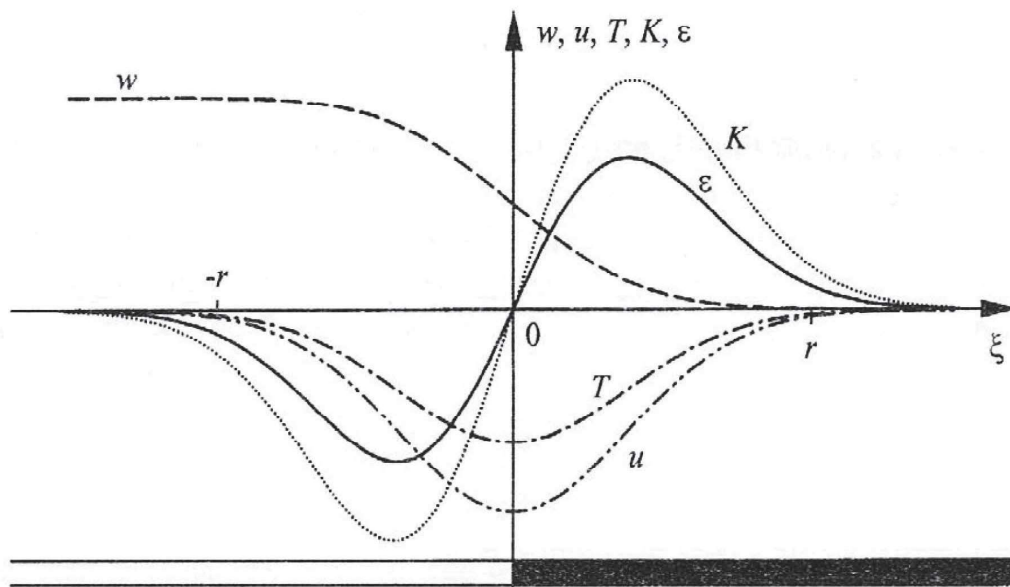
1. Wprowadzenie

Konieczność monitoringu obiektów budowlanych znajdujących się na terenach górniczych wynika bezpośrednio z Prawa Geologicznego i Górniczego (Prawo ... 2011). Związane jest to przede wszystkim z oddziaływaniem eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. Wpływy podziemnej eksploatacji powodują deformację oraz uszkodzenia obiektów budowlanych, które są z reguły większe niż na terenach nieobjętych wpływami górniczymi (Kawulok 2015). W celu minimalizacji uszkodzenia obiektów jeszcze przed rozpoczęciem planowanych prac dokonuje się tak zwanej prognozy deformacji powierzchni. Obecnie najczęściej stosowaną teorią wykorzystywaną w prognozach jest geometryczno-całkowa teoria Budryka - Knothego (Kowalski 2015). Wynika to z faktu, że jest prosta i ściśle koreluje z kategoryzacją terenów górniczych. Teoria zakłada wyznaczenie wskaźników deformacji tj. obniżenia $w(x)$, nachylenia $T(x)$, odkształcenia poziomego $u(x)$ (Popiołek 2009). Teoretyczny rozkład wskaźników deformacji przedstawia rysunek 1.

Na podstawie wskaźników deformacji (rys. 1), określa się kategorię terenu górniczego (tab. 1) oraz kategorię odporności obiektów budowlanych. Zakłada się, że kategoria terenu górniczego powinna być równa bądź niższa od kategorii odporności obiektu budowlanego (Kwiatek 1997). Omówione kategorie terenu górniczego przedstawia tabela 1.

Diagnostykę obiektu inżynierskiego przeprowadza się pod kątem warunków górniczych oraz faktycznego stanu obiektu (Kwiatek 1997). Oględzin dokonuje się z reguły z poziomu terenu, co jest utrudnione w przypadku wielkogabarytowych obiektów takich jak wysokie wieże lub duże wiadukty. W takim przypadku można skorzystać z pomocy bezzałogowych statków powietrznych (BSP), zwanych potocznie dronami. Największym atutem statków latających jest możliwość dostania się tam, gdzie człowiek dotrzeć nie może (Mika i in. 2018). Nowoczesne drony mogą spędzać w powietrzu od kilku minut nawet do kilku godzin. Dodatkowo prawie każdy z nich wyposażony jest w kamerę o wysokiej rozdzielczości, a także transmisję obrazu na żywo. Zasady korzystania z bezzałogowych statków powietrznych określa prawo lotnicze (Prawo ... 2002). W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania BSP w celu uzupełnienia dokumentacji określającej wpływ

^{*)} Politechnika Śląska, Gliwice ^{**)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice



Rys. 1. Teoretyczny przebieg wskaźników deformacji (Kwiatk 2002)
Fig. 1. Theoretical course of deformation indicators (Kwiatk 2002)

Tabela 1. Kategorie terenu górniczego (Kwiatk 2002)
Table 1. Categories of mining terrain (Kwiatk 2002)

Kategoria	Nachylenie [mm/m]	Odształcenie poziome [mm/m]	Promień krzywizny [km]
0	$T < 0,5$	$\varepsilon < 0,3$	$R \geq 40$
I	$0,5 < T \leq 2,5$	$0,3 < \varepsilon \leq 1,5$	$40 > R \geq 20$
II	$2,5 < T \leq 5$	$1,5 < \varepsilon \leq 3,0$	$20 > R \geq 12$
III	$5 < T \leq 10$	$3,0 < \varepsilon \leq 6,0$	$12 > R \geq 6$
IV	$10 < T \leq 15$	$6,0 < \varepsilon \leq 9,0$	$6 > R \geq 4$
V	$T > 15$	$\varepsilon > 9,0$	$R < 4$

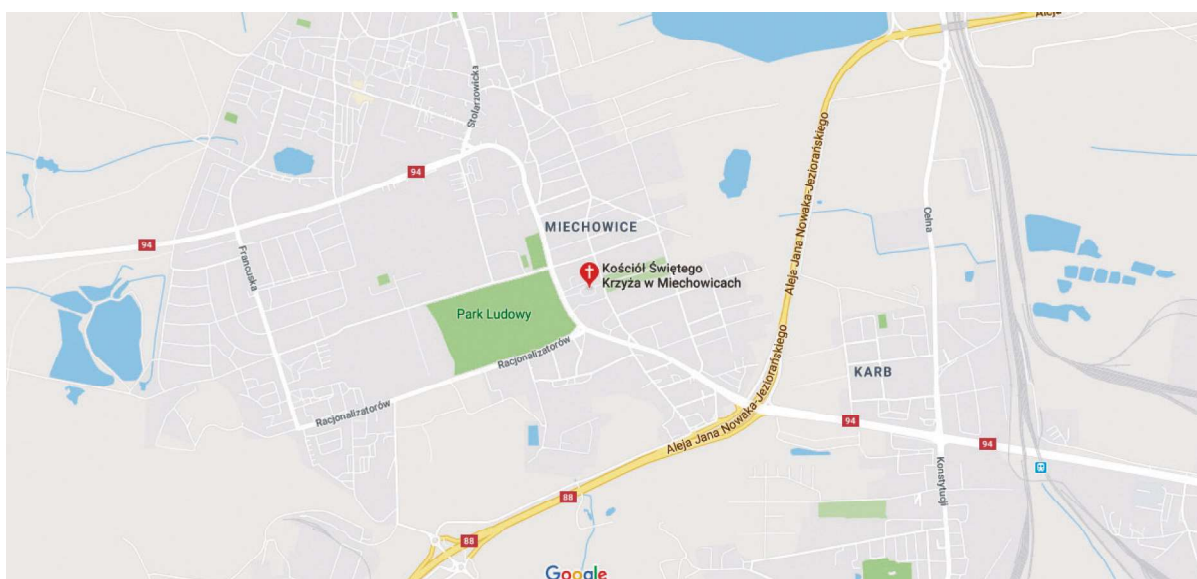
eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. Procedurę przedstawiono na przykładzie kościoła pw. Św. Krzyża w Bytomiu.

2. Lokalizacja kościoła

Do celów pomiarowych wybrano Kościół pod wezwaniem Św. Krzyża (rys. 2). Został on wybudowany w latach 1856 -

1864 r. Obiekt ten wybrano ze względu na eksploatację węgla kamiennego prowadzoną na terenie całego Bytomia i wciąż podlega jej wpływom. Dodatkowo budowla (rys. 3) charakteryzuje się wielkimi gabarytami (wysoka wieża).

Kościół zlokalizowany jest przy ulicy Frenzla w Bytomiu w dzielnicy Miechowice (rys. 2). W pobliżu Kościoła występuje luźna zabudowa – głównie dwukondygnacyjnych budynków mieszkalnych. W bezpośrednim sąsiedztwie Kościoła



Rys. 2. Lokalizacja miejsca pomiarowego (maps.google.com)
Fig. 2. Location of the measuring place (maps.google.com)

rosną wysokie drzewa. Frontowa elewacja budynku została przedstawiona na rysunku 3.

3. Analiza wpływu eksploatacji na kościół

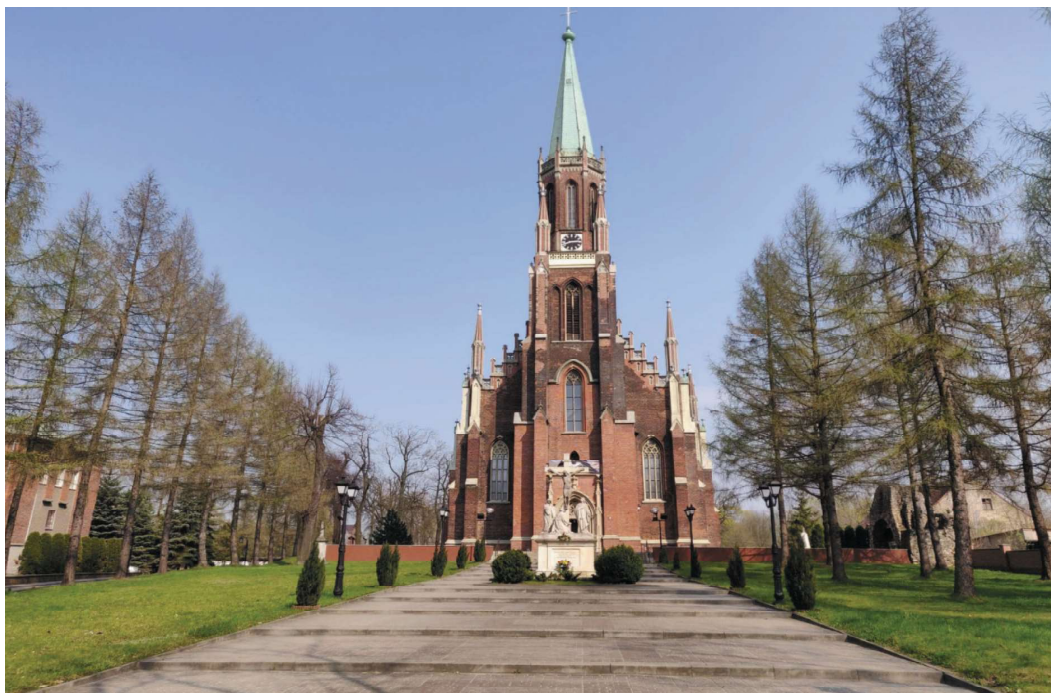
Na terenie Kościoła prowadzone były obserwacje geodezyjne, które obejmowały między innymi (Kowalski 2015):

- niwelację precyzyjną 6 reperów na budynku (rys. 5),

- pomiar wychyleń wieży kościoła o wysokościach 28,8 m oraz 59,3 m.

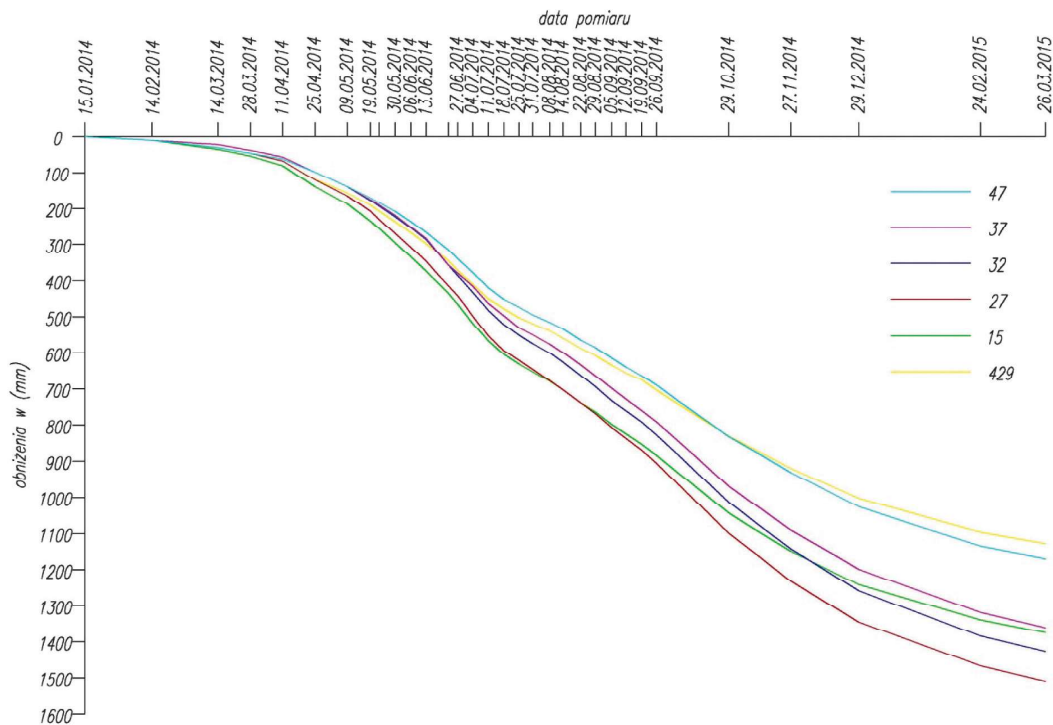
Niwelację reperów, a także pomiar wychYLENIA wieży kościoła rozpoczęto 15.01.2014 r. Do niwelacji wykorzystano niwelator Ni007. Pomiary nawiązywano do reperu znajdującego się poza zasięgiem wpływów, w odległości ok. 1,5 km, a średni błąd wysokości reperu wynosił $\pm 2,5$ mm (Kowalski 2015).

Z wykresu przedstawiającego obniżenia terenu (rys. 5) wynika, iż największe osiadanie wystąpiło na 27 reperze,



Rys. 3. Kościół pod wezwaniem Św. Krzyża w Bytomiu (źródło własne)

Fig. 3. Church of St. the Cross in Bytom (own source)



Rys. 5. Obniżenia reperów w funkcji czasu założonych na budynku kościoła pw. Św. Krzyża w Bytomiu-Miechowicach od 15.01.2014 r. do 26.03.2015 r. (Kowalski 2015)

Fig. 5. Lower benchmarks as a function of time founded on the church building St. Of the Cross in Bytom – Miechowice from January 15, 2014 to March 26, 2015 (Kowalski 2015)

który położony jest najbliżej dna niecki obniżeniowej i wyniosło 1575 mm. Natomiast cały budynek obniżył się średnio ok 1390 mm (Kowalski 2015) Wchylenie wieży Kościoła, podczas trwania pomiarów, zmieniało się wraz z postępem frontu eksploatacyjnego. W kierunku północnym wzrastało od 6,1 do 9,0 mm/m, po czym malało do 5,6 mm/m. W kierunku wschodnim natomiast wzrosło od 10,6 mm/m do 15,0 mm/m (Kowalski 2015).

4. Pomiar fotogrametryczny i opracowanie wyników

Do wykonania nalotu fotogrametrycznego został wykorzystany dron DJI Mavic Air ważący 430 g (rys. 7). Statek został wyposażony w niemetryczną kamerę o rozdzielczości 12 Mpix i kącie widzenia 85°. Posiada możliwość robienia zdjęć w formacie JPEG oraz DNG (RAW) o maksymalnej rozdzielczości 4056 x 3040 pikseli (DJI 2018). Według polskiego prawa operator drona wykonujący nalot musi posiadać Świadectwo Kwalifikacji, między innymi (Prawo ... 2002):

- w przypadku kiedy waga drona wynosi powyżej 0,6 kg,
- w przypadku wykonywania lotów w celach innych niż sportowe lub rekreacyjne.

Z uwagi na drugi z wymienionych faktów nalot został wykonany przez wykwalifikowanego operatora posiadającego Świadectwo Kwalifikacji wydawane przez Urząd Lotnictwa Cywilnego. Należy również podkreślić, iż wykorzystany dron (rys. 7) nie należy do profesjonalnych statków powietrznych, wykorzystywanych w nalotach fotogrametrycznych, ponieważ nie posiada metrycznej kamery. Zdecydowano się na taki krok ze względu na dostępność sprzętu latającego oraz możliwość sprawdzenia potencjału dronów „komercyjnych”.

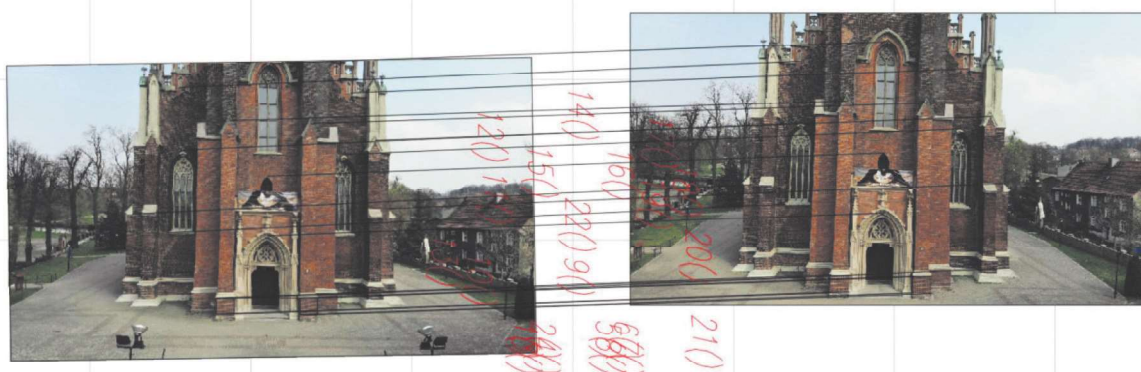
Podczas pomiaru wykonano serię zdjęć frontowej elewacji Kościoła począwszy od podnóża, aż po szczyt wieży. Dodatkowo pomierzono, przy pomocy dalmierza laserowego, odległości pomiędzy charakterystycznymi elementami elewacji, w celu późniejszego wpasowania fotogrametrycznego (rys. 8). Uzyskane zdjęcia w formacie JPEG były zdeformowane, co wynika prawdopodobnie z zastosowania wewnętrznego algorytmu. Dodatkowo pliki tego typu ulegają stratnej kompresji obrazu, przez co tracą na jakości. Z tego powodu do opracowania wyników wybrano fotografię w formacie DNG. Zawiera ona pełny zrzut zawartości matrycy w trakcie wykonywania zdjęcia. Mimo wielu zalet wiąże się to z dużym rozmiarem pliku. Podczas formatowania zdjęć napotkano duży problem dystorsji obrazu. Jest to wada optyczna występująca w każdej soczewce, wynikająca z różnej odległości obrazu od osi optycznej obiektywu. Polega ona na zniekształceniu fotografii na krawędziach.

Do ograniczenia opisanego zjawiska został wykorzystany program komputerowy Adobe Negative Converter działający na bezpłatnej licencji. Do dalszego opracowania wyników wykorzystano środowisko komputerowe typu CAD (ang. *Computer Aided Design*) z nakładką Geolisp. Aby możliwe było wykorzystanie nakładki Geolisp, w pierwszej kolejności należało przekonwertować obrazy do formatu JPG. Wykorzystano do tego program FastStone Image Viewer w wersji bezpłatnej. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie zdjęć w formacie JPG bez znaczącej utraty jakości obrazu. W środowisku Geolisp wykonano transformację konforemną, czyli przeskalowanie obiektu do rzeczywistych rozmiarów polegające na wpasowaniu zdjęcia ze zmianą skali i obrotem. Przykład wpasowania fotogrametrycznego przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. DJI Mavic Air - dron wykorzystany podczas nalotu (dji.com)

Fig. 7. DJI Mavic Air - drone used for measurement (dji.com)



Rys. 8. Wpasowanie fotogrametryczne wykonane za pomocą programu Geolisp (źródło własne)

Fig. 8. Photogrammetric fitting using the Geolisp program (own source)

Na fotografii (rys. 8) można zauważyć punkty dopasowania wykorzystane do kalibracji obrazów rastrowych. Średni błąd dopasowania wykonanego transformacją konforemna nie przekroczył 0,030. Dodatkowo pomierzono odległości pomiędzy charakterystycznymi punktami budowli. Różnica w długościach boków pomierzonych w terenie oraz na skalibrowanym obrazie nie przekroczyła 4 cm. Finalnie uzyskano zobrazowanie frontu Kościoła, które umożliwiło rozpoznanie uszkodzeń zewnętrznej elewacji Kościoła. Uzyskane zobrazowanie przedstawia rysunek 9.

5. Analiza wyników

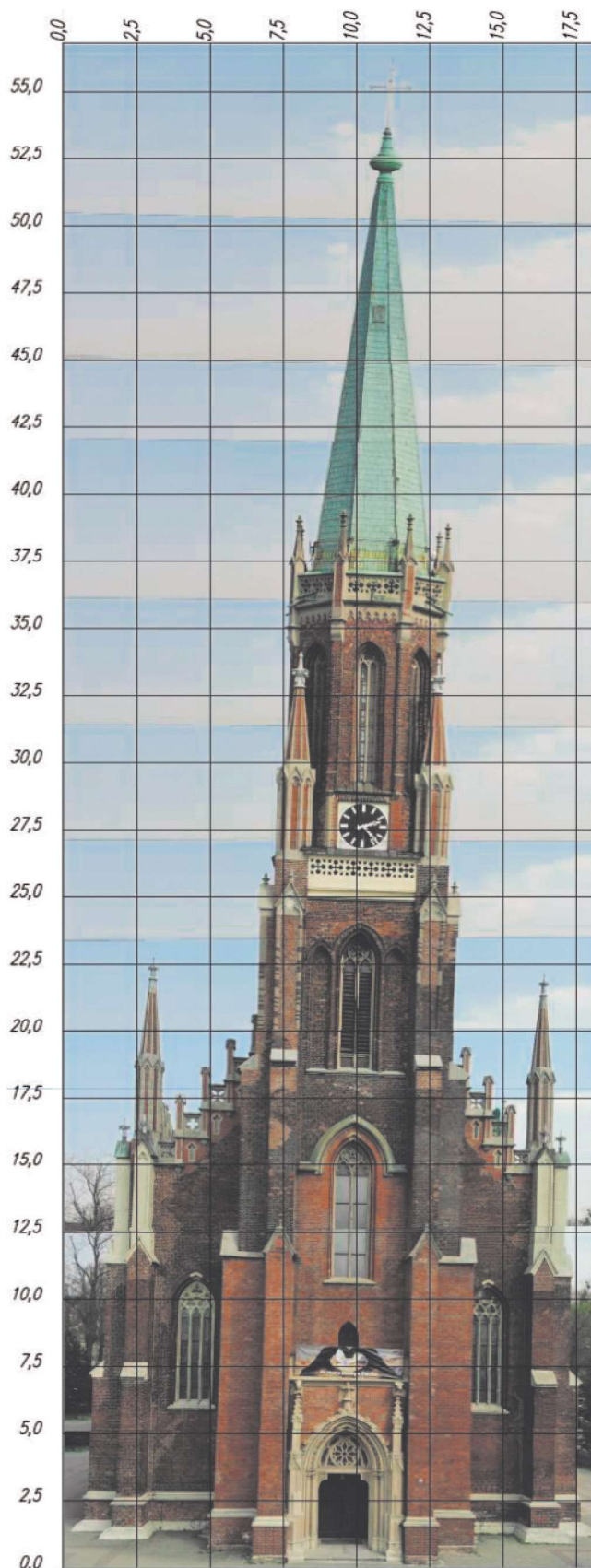
Po wykonaniu analizy otrzymanego zobrazowania można zauważyć, iż budynek na przestrzeni lat był poddawany wielu robotom naprawczym i zabezpieczającym (rys. 9). W górnej jego części widać tzw. ankrowanie, czyli kotwienie ścian za pomocą ściągow. Zadaniem takiego ankrowania jest powiązanie ścian budynku, narażonych na wychylenia powstałe wskutek działania sił poziomych. Na elewacji kościoła można dostrzec liczne pęknięcia, powstałe w wyniku podziemnej eksploatacji górniczej. Najwięcej szczelin jest w prawej części ściany. Przeważają szczeliny pionowe, co wskazuje na przejście pod budynkiem wypukłej niecki eksploatacyjnej. Największa szczelina ma długość ok. 1 m i szerokość ok. 4 cm (rys. 10). Łącznie zinventaryzowano 65 pęknięć – 19 poziomych, 29 pionowych oraz 17 skośnych. Występujące uszkodzenia Kościoła przedstawiono na rysunku 10.

6. Podsumowanie

Z pozyskanych informacji wynika, że Kościół pw. Św. Krzyża na przestrzeni lat, od 1927 roku, obniżył się o ok. 20 m. Pokazuje to ogromny wpływ eksploatacji na powierzchnię terenu, a także nieustanną potrzebę monitorowania obiektów budowlanych poddawanych wpływom eksploatacji. W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania bezzałogowego statku powietrznego do monitorowania uszkodzeń zewnętrznej elewacji budowli na przykładzie kościoła pw. Św. Krzyża w Bytomiu w dzielnicy Miechowice. W tym celu wykonano serię zdjęć, do których użyto drona DJI Mavic Air. Po opracowaniu wyników uzyskano ortofotomapę, na której widoczne są liczne pęknięcia elewacji kościoła. Największe szczeliny mają długość ok. 1 m oraz szerokość ok. 4 cm.

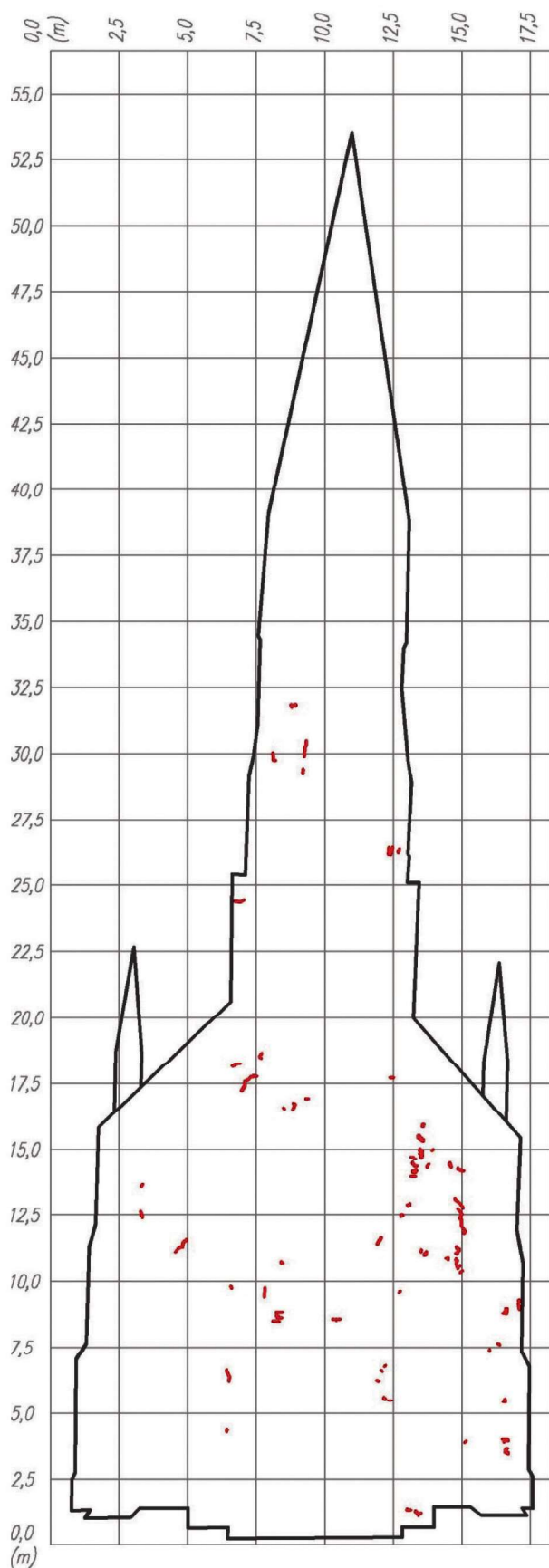
Uzyskanie informacji na temat pęknięć elewacji, a także lokalizacji oraz rozmiarów tych pęknięć, tradycyjnymi technikami geodezyjnymi byłoby utrudnione z uwagi na gabaryty badanego obiektu. Cykliczne wykonywanie nalotów fotograficznych pozwoli na analizę przyrostów uszkodzeń w czasie. Następnym tego może być powiązanie powstawania uszkodzeń z postępowaniem frontu eksploatacyjnego, co stanowiłoby bardzo dobre uzupełnienie dokumentacji określającej deformacje obiektów budowlanych. Dodatkowym atutem przedstawionej metody jest szybkość i łatwość realizacji.

W artykule został opisany przypadek pomiaru tylko jednej strony budowli. W celu bliższego poznania metody należałoby przeprowadzić pomiar każdej ściany danej budowli, co pozwoli osiągnąć dokładniejszy obraz uszkodzeń budynku, a także wychylenia wieży Kościoła w różnych płaszczyznach. Należy również pamiętać o osiąganych dokładnościach, które zależne są m.in. od stabilizacji statku powietrznego w czasie lotu, deklarowanej przez producenta sprzętu, a co za tym idzie także siły wiatru. Czynniki te mogłyby być wyeliminowane np. poprzez precyzyjne zaplanowanie daty pomiaru. Opisane



Rys. 9. Widok kościoła uzyskany z połączenia zdjęć (źródło własne)

Fig. 9. View of the church obtained from a combination of photos (own source)



Rys. 10. Schemat szczelin występujących na frontowej ścianie Kościoła (źródło własne)

Fig. 10. A diagram of cracks located on the front wall of the church (own source)

uwagi będą przedmiotem kolejnych rozważań na temat możliwości wykorzystania bezałogowych statków powietrznych.

Literatura

- DJI 2018 Mavic Air, User Guide
 KAWULOK M. 2015 - Szkody górnicze w budownictwie. Wyd. ITB, Warszawa.
 KOWALSKI A. 2015 - Deformacje powierzchni w górnośląskim zagłębiu węglowym. Wyd. GIG, Katowice.
 KWIATEK J. 1997 - Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. GIG, Katowice.
 KWIATEK J. 2002 - Obiekty budowlane na terenach górniczych. Wyd. GIG, Katowice.
 MIKA W., FERENCA., CZAJA S. 2018 - Monitoring obiektów budowlanych z zastosowaniem drona. „Przeгляд Górnicy” nr 1, s. 21 – 26.
 POPIOLEK E. 2009 - Ochrona terenów górniczych. Wyd. AGH, Kraków.
Prawo geologiczne i górnicze. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. (Dz. U. z 2011 r., nr 163, poz. 981).
Prawo lotnicze. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. (Dz. U. z 2012 r. poz. 933, z późn. zm.).

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2019
 Artykuł akceptowano do druku – 25.01.2020