

## Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim

Arkadiusz Piechota<sup>1</sup>, Przemysław Sobótka<sup>1</sup>



A. Piechota

P. Sobótka

**Application of the unmanned aircraft vehicle in engineering geology documentation.** *Prz. Geol.*, 69: 861–866; doi: 10.7306/2021.47

*A b s t r a c t.* The article presents the possibilities of using unmanned aerial vehicles (UAV) in engineering geology. The first part compares the method of obtaining products from UAV with airborne laser scanning, showing its limitations and advantages. Then, examples of using the products made from photos obtained from UAV raids (digital surface model – DSM, digital terrain model – DTM and orthophotomosaic) were introduced. The examples are assigned to the individual phases of engineering geology documentation (collecting available information about the site, designing research, performing research and presenting research results). The last part presents an analysis of the accuracy of an exemplary model created from a UAV raid based on control points measured using the GNSS-RTN method. The result of the analysis

was the confirmation of the possibility of obtaining information about the area from the DSM, DTM and orthophotomosaic with high accuracy comparable to classic land surveying methods.

**Keywords:** *unmanned aircraft vehicle (UAV), engineering geology documentation, digital surface model (DSM), digital terrain model (DTM), orthophotomosaic, accuracy analysis*

Revolucja technologiczna w pozyskiwaniu i przetwarzaniu informacji, którą obserwujemy w wielu dziedzinach, objęła także branżę geologiczną. Obecnie geolodzy inżynierscy na każdym etapie swojej pracy korzystają z najnowszych zdobyczy technologicznych, takich jak komputerowe narzędzia graficzne, elektroniczne układy pomiarowe w badaniach polowych oraz laboratoryjnych.

Prace w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim możemy podzielić na osiem faz: 1) zbieranie dostępnych informacji o terenie, 2) projektowanie badań, 3) wykonywanie badań, 4) przetwarzanie, interpretowanie, analizowanie wyników badań, 5) ocena wyników badań, 6) przedstawianie wyników badań, 7) gromadzenie wyników badań, 8) archiwizowanie wyników badań (Majer i in., 2018).

W dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim istotną rolę odgrywają dane geodezyjne i kartograficzne w postaci map. Mapy geodezyjne i topograficzne są wykorzystywane jako podkład lokalizacyjny w pracach geologicznych. Obecnie coraz częściej mapy takie są pozyskiwane także jako bazy danych (np. BDOT10k, BDOT500 itp.). Interaktywność komponentu geodezyjnego (związana głównie z przetworzeniem geodezyjnych danych analogowych w postać cyfrową, tj. wektorową) ułatwia prace związane z dokumentowaniem w środowisku GIS lub BIM (Majer, 2019).

### NOWOCZESNE METODY POZYSKIWANIA DANYCH O TERENIE

Ogromny potencjał do gromadzenia danych o terenie prac geologicznych ma technologia lotniczego skaningu laserowego (LiDAR-ALS), która umożliwia pozyskanie informacji o wysokiej rozdzielczości w stosunkowo krótkim czasie (ryc. 1). W ramach projektu ISOK (Informacyjny System Osłony Kraju) w latach 2011–2014 pomia-

rami objęto obszar niemal całego kraju. Obecnie pomiary są wykonywane na wybranych obszarach w ramach projektu CAPAP (Centrum Analiz Przestrzennych Administracji Publicznej) prowadzonego przez GUGiK (<https://popc.gugik.gov.pl/capap/>).

Produktem podstawowym z LiDAR jest sklasyfikowana chmura punktów (m.in. na klasy: budynki, grunt, zieleń wysoka, średnia i niska), z której można stworzyć numeryczny model pokrycia terenu oraz numeryczny model terenu. Z reguły równoległe do pomiarów LiDAR wykonuje się zdjęcia lotnicze, z których powstaje cyfrowa ortofotomapa. Wszystkie te produkty są kartometryczne i mają georeferencję. Można je bezpośrednio importować do oprogramowania typu GIS i BIM jako podkład geodezyjno-kartograficzny, m.in. do prac projektowych lub do modelowania różnych zjawisk (np. wyznaczania zasięgu terenów zalewowych).

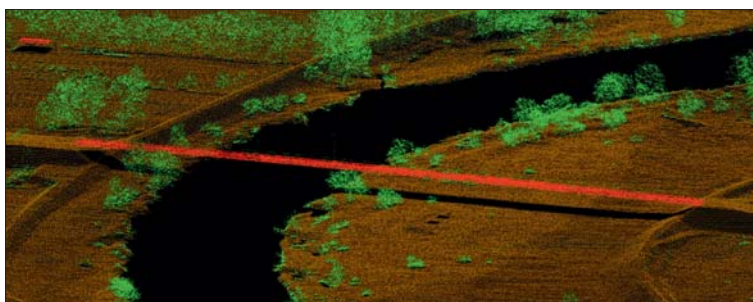
W geologii dane LiDAR są wykorzystywane m.in. w monitorowaniu procesów osuwiskowych oraz w badaniach geomorfologicznych (Węzyk, 2015), mogą być użyte jako źródło danych morfologicznych do modeli obliczeniowych stateczności (Piechota, 2017), a także w geologii kopalnianej do analizy warunków stateczności skarp odkrywkowych.

Wadą metody LiDAR są duże koszty pozyskania danych. Ponadto archiwalne dane LiDAR otrzymane z GUGiK mogą okazać się nieaktualne. Dużo tańszą alternatywą jest pozyskiwanie danych o terenie na potrzeby dokumentowania geologiczno-inżynierskiego za pomocą fotogrametrycznego bezzałogowego statku latającego (ryc. 2).

### BEZZAŁOGOWE STATKI POWIETRZNE

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w zagadnieniach kartometrycznych w ostatnich latach rozwija się bardzo dynamicznie. Obecnie dostępne są na

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; [arkadiusz.piechota@pgi.gov.pl](mailto:arkadiusz.piechota@pgi.gov.pl); [przemyslaw.sobotka@pgi.gov.pl](mailto:przemyslaw.sobotka@pgi.gov.pl)



**Ryc. 1.** Chmura punktów pozyskana z pomiarów LiDAR-ALS  
**Fig. 1.** Point Cloud from LiDAR-ALS measurements



**Ryc. 2.** Bezzałogowy statek powietrzny (BSP) na terenie badań  
**Fig. 2.** Unmanned aerial vehicle (UAV) on the investigation site

rynku drony wyposażone w kamery cyfrowe, system pozycjonowania GNSS oraz oprogramowanie do lotów autonomicznych. W ciągu kilku minut dron jest w stanie pozyskać dane fotogrametryczne dla kilkunastokrotnego obszaru badań. Sterowanie oraz planowanie misji wykonywane są z poziomu telefonu komórkowego z dedykowaną aplikacją.

Na podstawie pozyskanych zdjęć o odpowiednim pokryciu podłużnym i poprzecznym, za pomocą oprogramowania fotogrametrycznego na komputerze osobistym, możemy pozyskać chmurę punktów (którą można sklasyfikować), numeryczny model terenu (NMT), numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) oraz cyfrową ortofotomozaikę (Kędzierski, 2014). Produkty te (analogiczne do produktów LiDAR) posiadają georeferencję i są kartometryczne. Można z nich korzystać w oprogramowaniu typu GIS i BIM.

Metoda ta jest znacznie tańsza od skaningu laserowego, jednak ma ograniczenia. Nie sprawdza się w terenach silnie zadrzewionych i zakrzewionych (nie uzyskuje się m.in. numerycznego modelu terenu). Miarodajnych zdjęć nie można uzyskać przy silnym wietrze lub padającym deszczu. Jednakże zalety tej metody przewyższają jej wady.

Zastosowanie w geologii bezzałogowych statków powietrznych jest związane np. z monitoringiem ruchów masowych na osuwiskach (Karwacki, 2019), a także z obliczaniem ilości kopaliny wydobytej ze złożeń w kopalniach odkrywkowych (Markiewicz, 2019).

## ZASTOSOWANIE BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH W GEOLOGII INŻYNIERSKIEJ

W nawiązaniu do podziału na etapy dokumentowania geologiczno-inżynierskiego zaprezentowanego na wstępie, można przedstawić zakres stosowalności BSP dla wybranych faz. Na etapie zbierania danych archiwalnych o terenie badań często stwierdzamy, że materiały kartograficzne, jakimi dysponujemy, pochodzą sprzed wielu lat i informacja w nich zawarta może przez to znacząco odbiegać od stanu faktycznego.

Aktualność kartograficznych materiałów archiwalnych jest weryfikowana podczas wizji terenowej. Jej celem jest m.in. sprawdzanie zgodności morfologii terenu (w tym form antropogenicznych, jak hałdy czy wykoppy), lokalizacja miejsc występowania procesów geodynamicznych (osuwiska, podmycia skarp), ocena aktualnego stopnia zagospodarowania terenu (nowe budynki, drogi itp.) oraz weryfikacja możliwości wykonania wstępnie planowanych punktów badawczych.

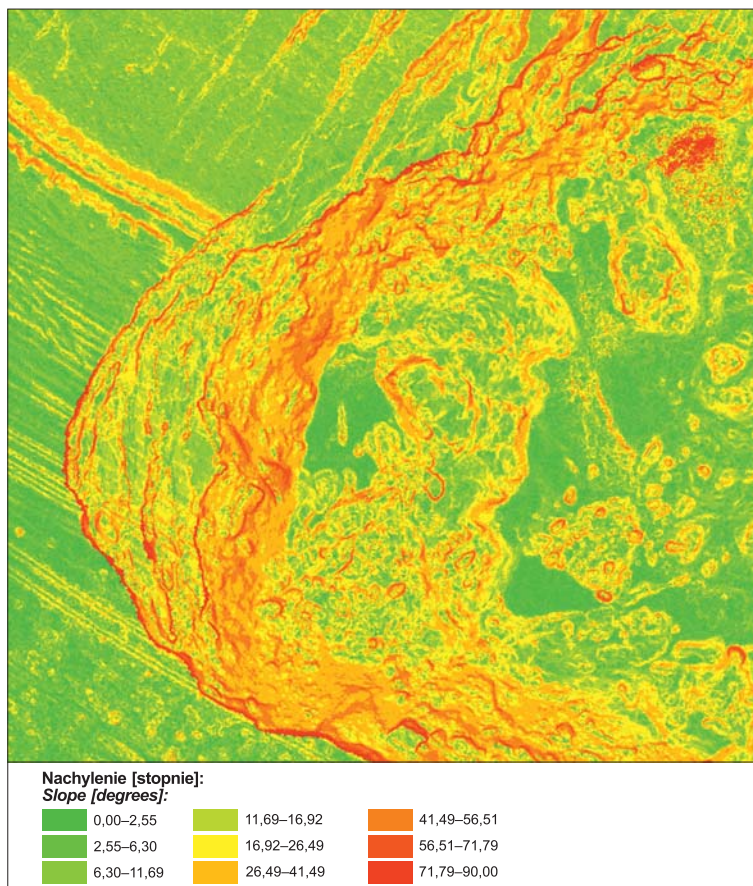
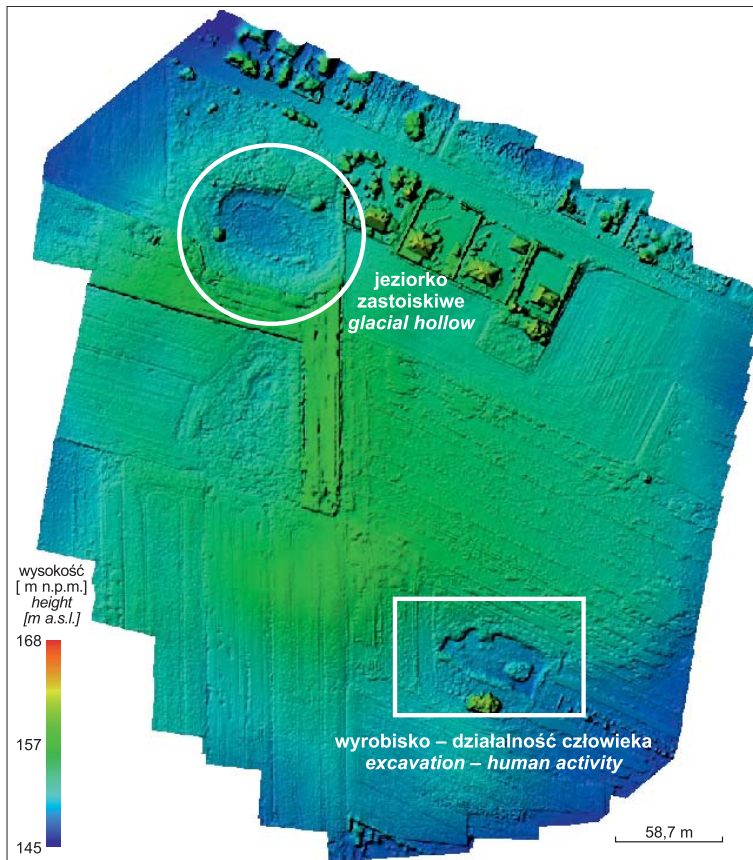
W fazie pierwszej bezzałogowy statek powietrzny jest bardzo przydatny. Za jego pomocą można wykonać dokumentację fotograficzną w trakcie wizji terenowej (nawet w miejscach niedostępnych). Ponadto za pomocą nalotu fotogrametrycznego można uzyskać informację na temat nowej infrastruktury i nieudokumentowanych form zagospodarowania terenu bez potrzeby wejścia na niekiedy niedostępny teren (ryc. 3).

Aktualny podkład w formie ortofotomozajki pozwala także zweryfikować aktualność archiwalnych materiałów kartograficznych, dokonać analizy obecnej morfologii terenu, określić zasięg występowania wód powierzchniowych oraz zlokalizować miejsca występowania procesów geodynamicznych. Jest on pomocny w opisie zmian



**Ryc. 3.** Porównanie aktualności ortofotomapy z portalu PZGiK ze zdjęciem terenu z BSP  
**Fig. 3.** Comparison of timeliness of the orthophotomap from PZGiK portal with a photo of the area from UAV





Ryc. 5. Przykładowa mapa spadków terenu wykonana z nalotu BSP  
Fig. 5. Sample map of slopes, created from UAV

←

Ryc. 4. Identyfikacja form morfologicznych z nalotu BSP

Fig. 4. Identification of morphological forms from UAV

związanych z antropopresją środowiska naturalnego (identyfikacja nielegalnych wysypisk, zasięg niedokumentowanych niwelacji terenu oraz nasypów niekontrolowanych).

W trakcie projektowania badań (faza druga) ważnym elementem jest odpowiedni podkład kartograficzny. Ortofotomozaika oraz numeryczny model terenu pozyskane w trakcie wizji lokalnej usprawniają proces projektowania badań. Są one zgodne z aktualnym stanem faktycznym oraz posiadają odpowiednio dobraną rozdzielczość (z zasady wyższą od materiałów zamówionych z portalu PZGiK). Ułatwia to projektowanie punktów i ciągów badawczych wzdłuż założonych linii przekrojów oraz pozwala na weryfikację ich położenia pod kątem dostępności terenu dla sprzętu badawczego.

W trakcie kartowania geologiczno-inżynierskiego (faza trzecia – wykonywanie badań) bezzałogowy statek powietrzny może służyć jako narzędzie do dokumentowania fotograficznego m.in. odsłoneń naturalnych i antropogenicznych, procesów geodynamicznych i niekorzystnych zjawisk geologicznych, terenów szkód górniczych i budowlanych oraz podtopień. Pozyskane dane po przetworzeniu mogą pomóc w identyfikacji form morfologicznych, których genezę trudno jest jednoznacznie określić z poziomu terenu (ryc. 4).

Niewątpliwą zaletą bezzałogowych statków powietrznych jest także ogromny potencjał wizualizacyjny (możliwość tworzenia modeli 3D wybranych obiektów i zjawisk w oparciu o szereg zdjęć fotograficznych). Ponadto można wykonywać ujęcia filmowe obrazujące dane zjawisko lub obiekt.

Ortofotomozaika może służyć do projektowania marszrut oraz kartowania zasięgu wybranych form geologicznych (np. zasięg osuwiska, podtopienia, hałdy, wykopu itp.). Numeryczny model terenu pomaga w identyfikacji i określeniu granic form morfologicznych, a także może być źródłem informacji na temat przestrzennego zorientowania obszarów ze spadkami o niebezpiecznym kącie nachylenia, np. powyżej  $10^\circ$  (ryc. 5).

W przypadku wykonywania badań uzupełniających w trakcie trwającej inwestycji, gdzie brak jest dokładnej inwentaryzacji geodezyjnej (brak aktualnych podkładów mapowych), BSP staje się pomocnym narzędziem do bieżącej





Ryc. 6. Fragment terenu badań w trakcie budowy drogi  
Fig. 6. Part of the investigation area during road construction

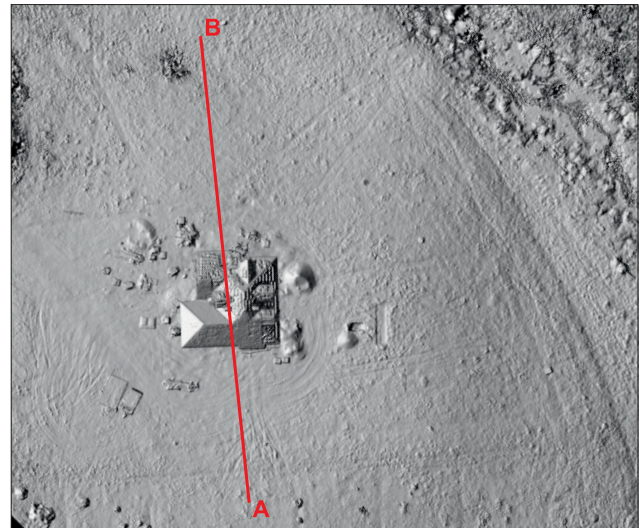
inwentaryzacji terenu prac (ryc. 6). Dzięki zaprojektowanemu nalotowi można wykonać ortofotomozaikę oraz numeryczny model terenu, a następnie wykorzystać powstałe modele do prac polowych i dokumentacyjnych.

Materiały pozyskane z nalotów BSP wspomagają sporządzenie modelu geologicznego oraz określenie warunków geologiczno-inżynierskich.

Dzięki danym pozyskanym z numerycznego modelu terenu możemy otrzymać aktualną morfologię na potrzeby modelowania 2D lub 3D. Numeryczny model pokrycia terenu pozwala także na analizę sposobu zagospodarowania (ryc. 7). Ponadto dzięki precyzyjnie określonej morfologii powierzchni terenu możemy dokonywać pomiarów nachylenia stoków oraz tworzyć modele do obliczeń np. stateczności skarp (ryc. 8).

Dane z BSP są pomocne przy waloryzacji geologiczno-inżynierskiej, m.in. analizie zmian warunków geomorfologicznych, hydrologicznych (ryc. 9), antropogenicznych i innych.

W trakcie przedstawiania wyników badań (faza szosta) produkty takie jak ortofotomozajka i numeryczny model terenu mogą posłużyć za kartometryczny podkład pod mapy dokumentacyjne oraz mapy tematyczne (ryc. 10). Dzięki zakodowanej georeferencji wraz z wykorzystaniem oprogramowania GIS lub BIM tworzenie map na podstawie tego rodzaju podkładów staje się łatwiejsze i mniej pracochłonne.



Ryc. 7. Numeryczny model pokrycia terenu z linią przekroju A–B poprowadzoną przez nowy obiekt budowlany

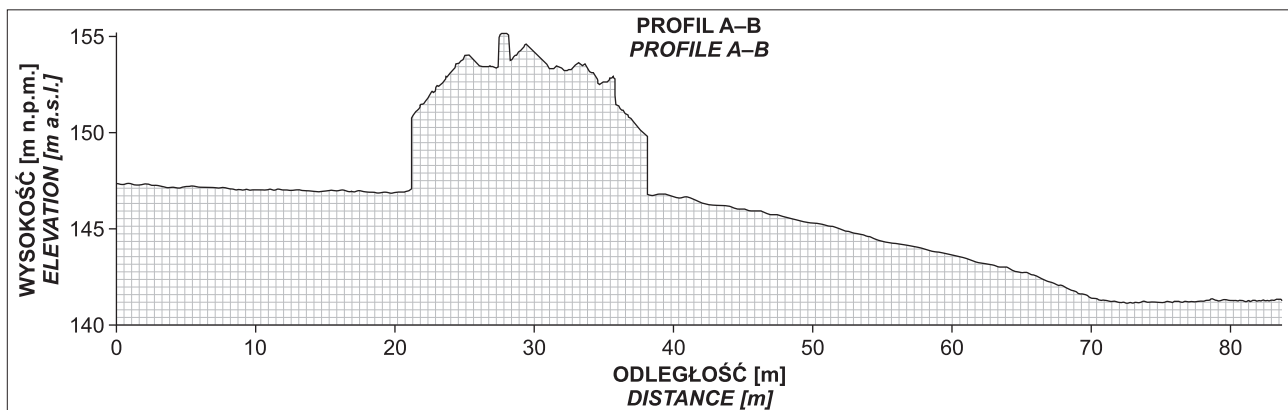
Fig. 7. Digital surface model with cross-section A–B drawn through a new building object

#### ANALIZA DOKŁADNOŚCI DANYCH PRZESTRZENNYCH POZYSKANYCH Z PRZYKŁADOWEGO NALOTU BSP

W celu przeprowadzenia analizy dokładności przykładowych produktów powstałych ze zdjęć z nalotu bezzałogowym statkiem powietrznym wykonano próbny nalot na terenie ok. 9 ha na wysokości 50 m dronem z kamerą o rozdzielczości  $4000 \times 3000$  pikseli. Pozyskano łącznie 138 zdjęć z pokryciem podłużnym i poprzecznym na poziomie 80%. Ze zdjęć wygenerowano gęstą chmurę punktów, a następnie numeryczny model pokrycia terenu o rozdzielczości 8 cm/piksel oraz ortofotomozaikę o rozdzielczości 2 cm/piksel w oprogramowaniu firmy Agisoft.

Na potrzeby zadania pomierzono geodezyjnie osiem punktów osnowy fotogrametrycznej oraz siedem punktów kontrolnych użytych następnie do przeprowadzenia analizy dokładności finalnych produktów. Pomiar przeprowadzono zestawem do geodezyjnych pomiarów satelitarnych metodą GNSS-RTN w państwowym układzie współrzędnych płaskich PL-1992 i układzie wysokości Kronsztad'86.

Punkty kontrolne wykonano w miejscach o ograniczonej widoczności (utrudnione warunki terenowe). Były to środki płyt betonowych zamieszczonych w prefabrykowa-



Ryc. 8. Przekrój A–B przez skarpe z uwzględnieniem nowego obiektu budowlanego  
Fig. 8. Cross-section A–B through the slope and new building object



nych kręgach studziennych (ryc. 11). Celem eksperymentu było sprawdzenie, z jaką dokładnością możemy pozyskiwać dane przestrzenne (współrzędne geodezyjne płaskie oraz rzędne wysokościowe) z nalotów BSP na potrzeby dokumentowania geologiczno-inżynierskiego w warunkach ograniczonej widoczności.

Analizę dokładności przeprowadzono na podstawie punktów kontrolnych. Porównano współrzędne pozyskane z pomiaru bezpośredniego GNSS-RTN z pomiarami na modelu powstałym z nalotu dronem (numeryczny model pokrycia terenu i ortofotomozaika). Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Charakterystyka dokładnościowa dla zaprezentowanego przykładu przedstawia się następująco:

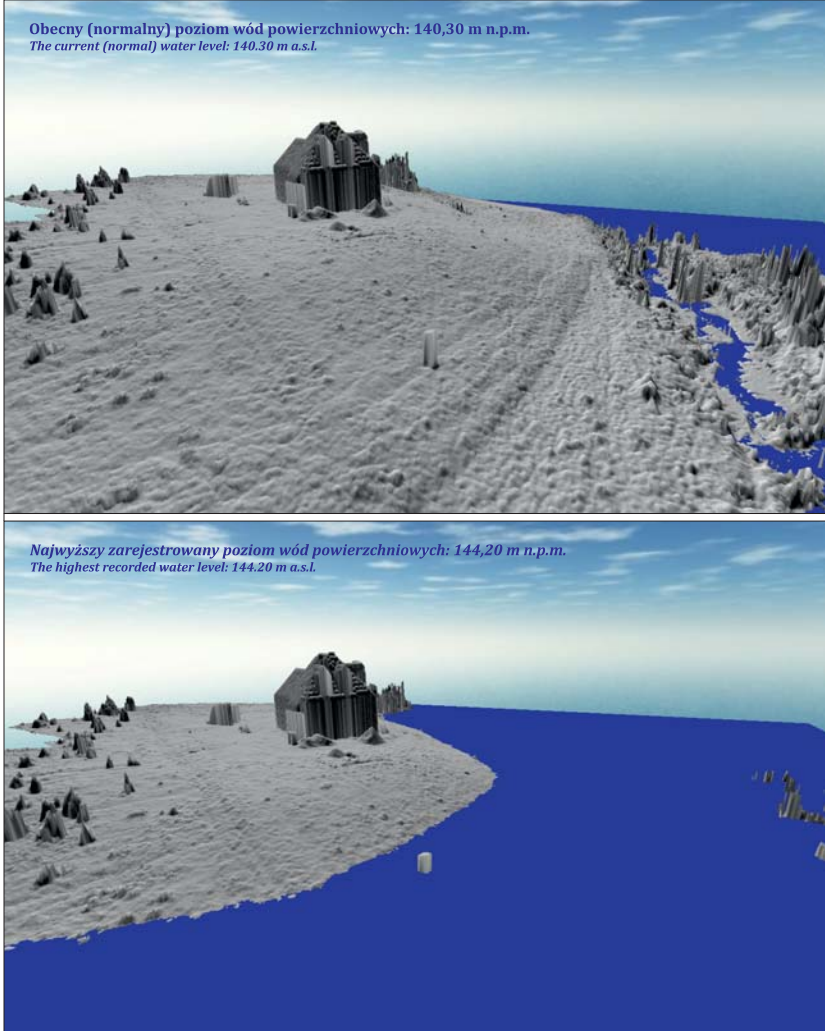
- maksymalne różnice współrzędnych płaskich (XY) wynoszą od  $-0,09$  do  $0,06$  m, maksymalne różnice wysokości (H) wynoszą od  $-0,09$  do  $0,01$  m;
- średnia wartość odchyłki dla współrzędnych płaskich (XY) wynosi  $-0,02$  m dla współrzędnej X oraz  $-0,05$  m dla współrzędnej Y. Natomiast dla wysokości  $-0,05$  m
- średni błąd pomiaru na modelu powstałym z nalotu BSP w stosunku do pomiarów GNSS-RTN dla współrzędnych płaskich to:  $0,04$  m dla współrzędnej X oraz  $0,07$  m dla współrzędnej Y. Natomiast dla rzędnej wysokościowej błąd średni wynosi  $0,07$  m.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że na modelach utworzonych ze zdjęć pozyskanych z nalotów bezzałogowym statkiem powietrznym możemy wykonywać pomiary kartometryczne z dokładnością powyżej  $0,1$  m. Wyniki takie możemy uzyskać poprzez dobranie odpowiednich parametrów lotu (m.in. wysokości i prędkości lotu oraz procentowego pokrycia

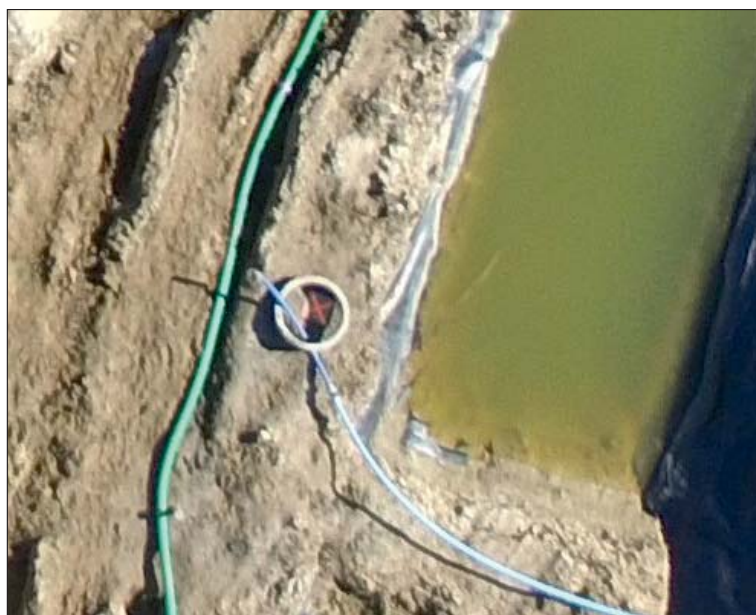
←

**Ryc. 9.** Symulacja zmiany warunków hydrologicznych (dane morfologiczne pozyskane z nalotu BSP)

**Fig. 9.** Simulation of changes in hydrological conditions (morphological data from UAV)



**Ryc. 10.** Przykłady map z zastosowaniem produktów z BSP  
**Fig. 10.** Examples of maps using UAV products



Ryc. 11. Zdjęcie punktu kontrolnego z nalotu BSP  
Fig. 11. Photo of the control point from the UAV raid

Table 1. Analiza dokładności modelu pozyskanego ze zdjęć z BSP (NMPT i ortofotomozaika)  
Tab. 1. Accuracy analysis of the model obtained from UAV photos (DSM and orthophotomosaic)

Numer Number	Współrzędne pomierzone GNSS Coordinates measured by GNSS			Współrzędne pozyskane z produktów UAV Coordinates acquired from UAV products			Odchyłki Deviations		
	X_1992N	Y_1992E	H_KRON86	X_1992N	Y_1992E	H_KRON86	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta H$
	[m]								
K1	709583,59	573981,67	74,26	709583,62	573981,73	74,25	-0,03	-0,06	0,01
K2	709514,82	573994,98	75,24	709514,87	573995,03	75,30	-0,05	-0,05	-0,06
K3	709465,95	574000,40	74,84	709465,99	574000,48	74,86	-0,04	-0,08	-0,02
K4	709391,80	574003,90	74,55	709391,81	574003,98	74,64	-0,01	-0,08	-0,09
K5	709366,88	574004,29	74,72	709366,89	574004,38	74,78	-0,01	-0,09	-0,06
K6	709493,01	574025,79	75,18	709493,04	574025,73	75,24	-0,03	0,06	-0,06

poprzecznego i podłużnego zdjęć), a także rozdzielczości kamery. Obecnie programy do lotów autonomicznych w czasie rzeczywistym pokazują nam, z jaką rozdzielczością wykonywany będzie nasz zaplanowany lot. Pozwala to na przeprowadzenie misji z finalną dokładnością modelu wynikowego odpowiednią do założonego zadania geologicznego.

### PODSUMOWANIE

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w geologii inżynierskiej ma ogromny potencjał. Niesie za sobą wiele ułatwień związanych z dokumentacją fotograficzną w terenie oraz korzyści w postaci produktów pochodnych takich jak ortofotomozaika czy numeryczny model terenu o rozdzielczości odpowiadającej potrzebom.

Naloty BSP pozwalają w szybki i tani sposób dokonać inwentaryzacji obszaru badań, a następnie wykorzystać pozyskane dane w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim (nawet z kilkucentymetrową dokładnością). Dynamiczny rozwój tej technologii w powiązaniu z jej postępującą powszechnością sprawi, że w przyszłości będzie ona częściej wykorzystywana w pracach geologiczno-inżynierskich.

W tym miejscu chcielibyśmy podziękować Recenzentom za poświęcony czas oraz pomoc i merytoryczne uwagi do artykułu.

### LITERATURA

- KARWACKI K. 2019 – Zastosowanie bezzałogowego statku latającego (UAV) w monitoringu powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Kasince Małej (Beskid Wyspowy, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie). *Prz. Geol.*, 67 (5): 339–350.
- KĘDZIERSKI M. (red.). 2014 – Opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu. WAT, Warszawa: 75–97.
- MAJER E. (red.) 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego. Państw. Inst. Geol., Warszawa: 21–25.
- MAJER E. i in. 2019 – Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1: Wytyczne badań podłoża budowlanego w budownictwie. <https://www.gddkia.gov.pl/pl/-3812/Rok-2019>
- MARKIEWICZ J. i in. 2019 – Ocena dokładności opracowania fotogrametrycznego wyrobisk odkrywkowych z wykorzystaniem UAV. *Zesz. Streszczeń XIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej”*. Wyd. Geod. i Kartogr. PW, Chęciny: 35.
- PIECHOTA A. 2017 – Lotniczy skaning laserowy (LiDAR-ALS) jako źródło danych do obliczeń stateczności skarp na terenach zadrzewionych i zakrzewionych. *Prz. Geol.*, 65 (10/2): 811–816.
- WEŹYK P. (red.) 2015 – Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. Warszawa: 168–177.

Praca wpłynęła do redakcji 30.05.2021 r.  
Akceptowano do druku 10.09.2021 r.