



Maciej Kossowski

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej
E-mail: maciej.kossowski@geo.uni.lodz.pl



Zastosowania dronów w badaniach rzeźby terenu, struktury i tekstury osadów na przykładach z Polski Środkowej

The use of drones in the study of relief, structure and texture of sediments on examples from Central Poland

Zarys treści

Drony (bezzałogowe statki powietrzne – BSP) wraz z rozwojem technologii są coraz częściej wykorzystywane do rozwiązywania problemów naukowych. Dotyczy to w szczególności nauk o Ziemi i środowisku, w tym geomorfologii, geologii strukturalnej i sedymentologii. Obok kwestii sprzętowo-technicznych, równoległy rozwój programów fotogrametrycznych oraz systemów służących do zwiększania precyzji pomiarów przebiegu lotu dronów, przyczyniają się do możliwości tworzenia zarówno map terenu, jak i modeli 3D o coraz większej dokładności. W niniejszej pracy opisano możliwości wykorzystania dronów wyposażonych w niemetryczną kamerę RGB lub sensor termalny do badania przemian morfologicznych terenu na podstawie analizy zdjęć, ortofotomap i modeli 3D. Badania testowe przeprowadzono w dolinach Warty i Pilicy w rejonie sztucznych zbiorników oraz na wysoczyznach morenowych i płaskowyżach – głównie w kopalniach odkrywkowych. Wynika z nich, że odpowiednie zaplanowanie lotu i konfiguracja pracy kamery statku powietrznego gwarantują uzyskanie właściwych danych niezbędnych do późniejszej obróbki w oprogramowaniu, np. GIS. Do najważniejszych parametrów zaliczono: określenie obszaru planowanego nalotu, wysokość lotu nad poziomem gruntu, prędkość statku powietrznego, prędkość powtarzalności kamery oraz dokładność generowanego materiału.

Słowa kluczowe

BSP, RTK, GPS, mezoformy terenu, litologia, geologia, Jeziorsko, Zbiornik Sulejowski, fotogrametria, ortofotomapy, antropopresja, prawo lotnicze.

Abstract

Drones (UAV, unmanned aerial vehicles), along with the development of technology, are more and more used to solve scientific problems. This is particularly true for Earth and environmental sciences, including geomorphology, structural geology and sedimentology. In addition to hardware and technical issues, the parallel development of photogrammetric programs and systems for increasing the precision of drone flight path measurements are contributing to the ability to create land maps as well as 3D models with increasing accuracy. This paper describes the possibility of using drones carrying a non-metric RGB camera or thermal sensor, for the study of morphological changes of terrain based on the analysis of photographs, orthophotos and 3D models. Test studies were carried out in the valleys of the Warta and Pilica rivers in the area of artificial reservoirs, as well as on moraine uplands – mainly in open-pit mines. The results of these tests show that proper flight planning and configuration of the aircraft's camera work guarantee obtaining the right data necessary for later processing in software, such as GIS. The most important parameters included: determination of the area of the planned raid, flight altitude above ground level, aircraft speed, camera repetition rate and accuracy of the generated material.

Keywords

UAV, RTK, GPS, relief mezoforms, litology, geology, Jeziorsko, Sulejowski Reservoir, photogrammetry, orthophotos, anthropopressure, aviation law.

1. Wprowadzenie

Techniki fotogrametrii i teledetekcji (niegdyś fotointerpretacji) od wielu lat z powodzeniem były stosowane w naukach o Ziemi (Olędzki 2007). Dynamiczny rozwój techniki fotogrametrycznej oraz dronów, przyczynił się do rozwoju fotogrametrii niskiego pułapu (*low-altitude aerial photogrammetry*) (Bernasik, Mikrut 2007; Bakuła, Ostrowski 2012; Pyka i in. 2020). Technika ta pojawiła się w latach 70. i 80. XX w., kiedy zaczęto stosować pojęcie „teledetekcja cyfrowa” głównie w odniesieniu do przetwarzania obrazów satelitarnych (Ciołkosz, Kęsik 1989; Kowalewski 2000). Wraz z postępującą miniaturą

ryzującą systemów cyfrowych i pomiarowych, technika pomiarów z bezzałogowych statków powietrznych (BSP) (Będkowski, Piekarski 2017) najpierw znalazła powszechne zastosowania w geodezji. Obecnie jest wykorzystywana również w innych dziedzinach, w tym coraz częściej w badaniach nad przemianami rzeźby terenu (Fernández-Lozano, Gutiérrez-Alonso 2016; Taddia i in. 2020). Prace fotogrametryczne wykonywane z drona, w porównaniu do fotogrametrii średniego i wysokiego pułapu (przy użyciu samolotów oraz satelitów), charakteryzują się niższym kosztem wykonania opracowań, możliwością wykonania nalotów ze znaczną powtarzalnością (nawet codziennie) oraz indywidualnymi ustaleniami

parametrów opracowania, takich jak piksel terenowy (GSD – *Ground Sampling Distance*), ramy czasowe i miejsce wykonywania pomiaru oraz dokładne określenie granic obszaru badawczego (Budiharto i in. 2021). Prowadząc badania fotogrametryczne z drona należy określić stopień ryzyka lotu. Służy do tego wybór odpowiedniej kategorii. Na potrzeby przedstawianych badań geomorfologicznych zostały opisane dwie kategorie – otwarta oraz szczególna, zgodnie z aktualnymi przepisami (*Ustawa z dnia 3 lipca 2002 roku – Prawo lotnicze*). Obraz terenu uzyskany z dronów jest dokładniejszy niż w przypadku lotów realizowanych na większych wysokościach, dla których często należy stosować dodatkowe korekcje ze względu na stan zapylenia lub zamglenia powietrza.

2. Metody badań

Metody pracy z dronami dla celów pomiarów geomorfologicznych podobnie jak w geodezji, powinny gwarantować uzyskanie wyników o możliwie jak najwyższej dokładności. Naloty dronami zostały zmodyfikowane na potrzeby badań geomorfologicznych i geologicznych. Mapy i modele 3D zostały wykonane dzięki zastosowaniu drona DJI Phantom 4 RTK wyposażonego w niemetryczną kamerę światła widzialnego posiadającą mechaniczną migawkę, która skutecznie zapobiega efektowi *rolling shutter* (efekt rozmycia obrazu mogący nastąpić podczas wyzwiania migawki elektronicznej). A w przypadku zdjęć termalnych zastosowano drona DJI Matrice 210 wyposażonego w bolometr cyfrowy DJI Zenmuse XT S.

W terenie przeprowadzono testy na przydatność dronów i sensorów do badania zmian objętości oraz powierzchni małych form rzeźby, ustalenia parametrów elementów struktury oraz tekstury skał (głównie frakcji głazowej i żwirowej). Powtarzanie nalołów i ujęć służyło sprawdzeniu z jaką precyzją można udokumentować zasięg i rodzaj lokalnej antropopresji oraz zakres dynamicznych zmian morfologii terenu, które zachodzą w krótkim czasie, np. w ciągu kilku dni, a nawet kilku godzin. Praktyka wykonywania pomiarów fotogrametrycznych ukazuje zasadność prowadzenia badań w oparciu o punkty kontrolne oraz fotopunkty (Remzi i in. 2021). W przypadku zastosowania BSP wyposażonych jedynie w odbiorniki GPS/GNSS dokładność otrzymanych danych jest znacznie niższa niż w przypadku korzystania z drona z modułem RTK lub użycia fotopunktów w terenie (Sanz-Ablanedo Enoc i in. 2018).

Planując badania geomorfologiczno-geologiczne z użyciem drona należy przed lotem uwzględnić: 1) aktualne wymogi formalno-prawne (w tym zgody na prowadzenie badań); 2) dokładne sprawdzenie warunków atmosferycznych; 3) oceny ryzyka; 4) wyznaczenie celów.

Do analizy wykorzystano zdjęcia w formacie jpg wykonane z BSP z wysokości 60–120 m powyżej poziomu gruntu. Fotografie przetworzono w programach fotogrametrycznych DJI Terra na ortofotomapę. Za geolokalizację zdjęć odpowiada system nawigacyjny GPS, którego pomiary zostały dodatkowo skorygowane przez system

RTK, co daje wysoką skuteczność pozycjonowania w czasie rzeczywistym (Czarnecki 2010; Bakuła, Przechodziński 2013). Korekcja lokalizacji systemu RTK była niezbędna, by opracowanie nieposiadające fotopunktów cechowała odpowiednia precyzja, natomiast brak wykonania pomiarów fotopunktów na powierzchni kartowanego terenu był podyktowany tym, że badania były prowadzone nad gruntem niestabilnym.

3. Cel pracy

Głównym celem artykułu jest przedstawienie przydatności popularnych dronów wyposażonych w odbiornik GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) lub odbiornik sygnału GNSS wraz z systemem RTK (*Real Time Kinematic*) do badań geomorfologiczno-geologicznych w oparciu o wyniki badań testowych.

Jako podstawę do prowadzenia tego typu badań opisano na początku wymogi prawne oraz wybrane zagadnienia metodologiczne związane z fotogrametrią niskiego pułapu, które mogą być przydatne dla osób planujących tego typu studia.

4. Zarys wymogów prawnych, warunków przyrodniczych i technicznych użytkowania dronów w badaniach geomorfologicznych

Przed startem drona należy skupić się na kwestiach prawnych oraz bezpieczeństwem planowanego lotu. Szacuje się, że obecnie w Polsce jest użytkowanych ok. 100 tys. dronów o masie startowej od 0,25 kg do 600 kg (Ostrichansky, Szmigiero 2020). Zgodnie z aktualnymi przepisami, każdy kto lata dronem, nie będącym zabawką, jest zobowiązany do przejścia szkolenia, zdobycia odpowiednich uprawnień oraz pozwolenia na planowany lot. Na stronie internetowej Urzędu Lotnictwa Cywilnego zamieszczono szczegółowy opis, jakimi parametrami charakteryzują się drony-zabawki (<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq/496-sprzet/5518-czy-moj-dron-zalicza-sie-do-zabawek>). Obecnie na rynku raczej trudno znaleźć drona-zabawkę, który umożliwiłby przeprowadzenie badań terenowych, w czasie których często konieczne jest korzystanie z lotu poza zasięgiem wzroku. Wymaga to odpowiedniego, sprawdzonego sprzętu, a przede wszystkim zezwolenia na lot w odpowiedniej kategorii (otwartej lub szczególnej) i zgodnej z adekwatnym scenariuszem (patrz podrozdziały 4.1 i 4.2). Wybór opisywanych zasad i wymogów prawnych został przeprowadzony dla wykonania lotów BSP typu multirotor (wielowirnikowiec) o maksymalnej masie startowej do 25 kg dla celów badań geomorfologicznych.

4.1. Kategoria otwarta

Loty w kategorii otwartej to prace niskiego ryzyka, wymagające jedynie zalogowania się (*check in*) w aplikacji Droneradar (<https://droneradar.eu>). Loty te można realizować tylko w zasięgu wzroku pilota lub obserwatora

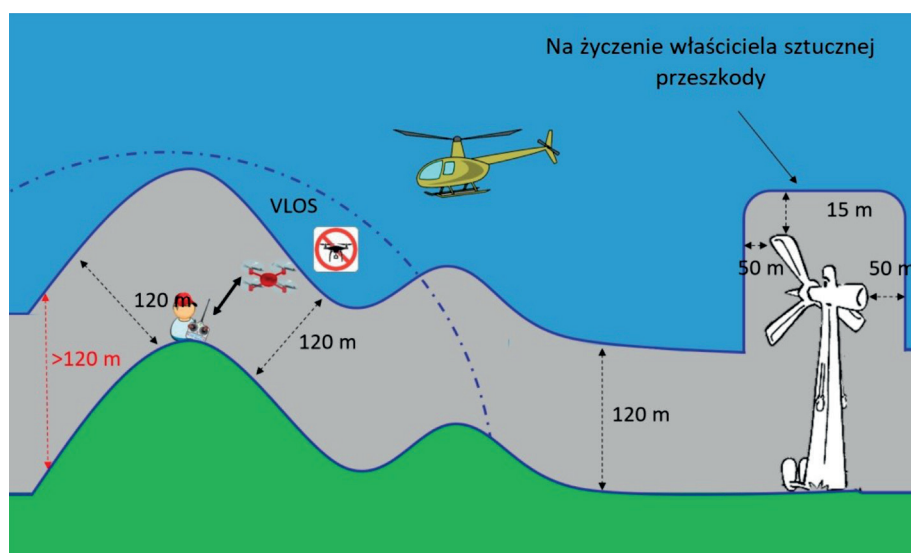
w odległości maksymalnie 120 m od najbliższego punktu powierzchni terenu. Maksymalna masa drona nie może przekraczać 25 kg.

Użytkownicy dronów mogą wybrać jedną z trzech podkategorii utworzonych ze względu na ograniczenia operacyjne oraz warunki jakim muszą sprostać piloci BSP i drony:

- A1 – dopuszczalny jest lot nad osobami postronnymi (z niektórymi ograniczeniami), zabronione jest jednak latanie nad zgromadzeniami osób (sytuacja, w której zagęszczenie osób uniemożliwia im przemieszczanie się);
- A2 – zabronione jest wlatywanie nad pojedyncze osoby i zgromadzenia ludzkie. Najmniejsza odległość pozioma od osób wynosi 30 m albo 5 m, jeśli BSP posiada funkcję ograniczającą prędkość lotu;
- A3 – zabronione jest wlatywanie nad pojedyncze osoby i zgromadzenia ludzkie. Loty dronem są dozwolone w bezpiecznej odległości, wynoszącej co najmniej 150 m w odległości poziomej od zabudowań mieszkalnych, użytkowych, rekreacyjnych lub przemysłowych.

Zezwolenie na wykonanie lotu w kategorii otwartej pozwala na lot dronem w zasięgu wzroku w miejscach oddalonych od grup ludzkich oraz zabudowań. O ile strefa lotnicza, w której wykonujemy lot, nie wymaga wykonywania misji w kategorii szczególnej lub certyfikowanej, z powodzeniem możemy używać drona do inspekcji wizualnych rzeźby terenu, a nawet wykonać niewielki nalot fotogrametryczny tworząc cyfrową mapę lub model 3D formy terenu. Jednak obiekty linearne, takie jak odcinki rzek, klify, wybrzeża, a także formy wymagające wielohektarowych nalotów, np. delty, jeziora, rozległe kopalnie odkrywkowe wymagają uprawnień do przeprowadzania misji poza zasięgiem wzroku (BVLOS), czyli w kategorii szczególnej lub certyfikowanej.

W kategorii otwartej maksymalna wysokość lotu nie może przekraczać 120 m ponad gruntem. Wyjątek stanowi lot, w czasie którego pilot omija przeszkodę o wysokości co najmniej 105 m, kiedy BSP może wzbić się na wysokość 15 m powyżej przeszkody zachowując od niej dystans w poziomie mniejszy niż 50 m (rys. 1).



Rys. 1. Ogólne zasady wykonywania operacji w zasięgu wzroku (VLOS) w kategorii otwartej na podstawie <https://ulc.gov.pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>

Fig. 1. General rules for carrying out operations in the visual light of sight (VLOS) in open category based on <https://ulc.gov.pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>

4.2. Kategoria szczególna

Kategoria szczególna służy do wykonywania bardziej zaawansowanych lotów dronami o średnim ryzyku. Niezbędna jest rejestracja wszystkich operatorów systemów BSP bez względu na masę używanego drona, a loty odbywają się w oparciu o Krajowe Scenariusze Standardowe (NSTS). W przyszłości planowane jest zastąpienie ich przez Scenariusze Standardowe (STS). Kluczowym warunkiem jest uzyskanie zezwolenia na prowadzenie badań terenowych za pomocą operacji lotniczej od ULC (Urzędu Lotnictwa Cywilnego). Jednym z warunków otrzymania zgody jest przedstawienie ryzyka planowanej misji. Metoda SORA (*Specific operations risk assessment*), opiera się

na przedłożeniu wniosku z oceną ryzyka wraz z metodami zapobiegawczymi oraz przedstawieniu wytycznych dotyczących przestrzegania bezpieczeństwa operacyjnego do ULC (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>). Kolejną metodą jest predefiniowana ocena ryzyka (PDRA – *predefined risk assessment*) – uproszczona forma oceny ryzyka zaproponowana przez EASA (European Union Aviation Safety Agency). Jeśli planowana misja jest objęta wykazem PDRA, dopuszcza się postępowanie zgodnie z instrukcjami, a odpowiednią dokumentację należy złożyć do Urzędu Lotnictwa Cywilnego (tab. 1). W przypadku stosowania krajowych scenariuszy (NSTS) istnieje możliwość ubiegania się o zezwolenie na lot w oparciu o uproszczoną procedurę bezpieczeństwa.

Tabela 1. Wykaz PDRA na podstawie dokumentu Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>, s. 39–40)

Table 1. PDRA list based on Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>, pp. 39–40)

PDRA	Charakterystyka statku powietrznego	BVLOS/VLOS	Obszar przelotu	Największy dystans od pilota drona	Maksymalna wysokość	Rodzaj przestrzeni powietrznej
PDRA-S01	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i masa startowa do 25 kg	VLOS	kontrolowany obszar gruntu, który może być położony w zaludnionym obszarze	w zasięgu wzroku	150 m	kontrolowana lub niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-S02	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i masa startowa do 25 kg	BVLOS	kontrolowany obszar gruntu, który jest w całości położony w słabo zaludnionym obszarze	2 km z obserwatorem lub 1 km bez obserwatora	150 m	kontrolowana lub niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-G01	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	bez obserwatora do 1 km	150 m	niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-G02	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	nie dotyczy	jak ustalono dla zarezerwowanej lub wydzielonej przestrzeni powietrznej	zarezerwowana lub wydzielona dla lotu drona
PDRA-G03	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	nie dotyczy	50 m od ziemi, chyba że w zarezerwowanej lub wydzielonej przestrzeni powietrznej	kontrolowana lub niekontrolowana przestrzeń powietrzna, jeżeli wysokość jest poniżej 50 m, w przeciwnym razie zarezerwowana lub wydzielona przestrzeń powietrzna

Poniżej przedstawiono cztery z dziewięciu istniejących scenariuszy standardowych wraz z przykładami ich praktycznego zastosowania. Pozwalają one na loty najpopularniejszymi obecnie dronami do 4 kg oraz wielowirnikowcami do 25 kg.

NSTS 01 – Scenariusz stosuje się głównie do lotów w zasięgu wzroku (VLOS) i maksymalnej wysokości 120 m powyżej poziomu gruntu oraz BSP o masie startowej do 4 kg. Dopuszcza się oderwanie wzroku od drona w celu skontrolowania ustawień aparatury oraz posilkowanie się tak zwanym obserwatorem, który ma za zadanie cały czas śledzić lot drona. Dozwolone są loty nad ludźmi oraz zwierzętami, jednak pilot ponosi zawsze odpowiedzialność za bezpieczeństwo. Scenariusz ten jest przydatny przy wykonywaniu pomiarów i obserwacji niewielkich powierzchniowo obiektów, np. nalotów fotogrametrycznych fragmentów ozów, sandrów, pojedynczych form skalnych, małych jezior, fragmentów brzegów, jednostek warstwowania lub poziomów glebowych. Formalna możliwość lotu nad ludźmi i zwierzętami będzie też przydatna podczas wykonywania wieloosobowych ekspedycji naukowych oraz badań terenowych na stanowiskach dokumentacyjnych (https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/69/akt.pdf).

NSTS 02 – Scenariusz podobny do NSTS 01, ale dotyczący jedynie dronów wielowirnikowych (MR) i platform latających o maksymalnej masie startowej do 25 kg, które mogą przenosić bardziej skomplikowane urządzenia pomiarowe, takie jak LiDAR, georadar, kamery multispektralne oraz zaawansowane kamery fotogrametryczne. Umożliwia również przeprowadzenie pomiarów meteorologicznych oraz stanu zapylenia atmosfery (https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/70/akt.pdf).

NSTS 05 – Scenariusz ten zezwala na loty i misje dronami do 4 kg poza zasięgiem wzroku, do 2 km od pilota i do maksymalnej wysokości 120 m. Prowadząc badania geomorfologiczne można wykonywać badania fotogrametryczne na znacznie większym obszarze, nawet do kilku kilometrów kwadratowych, np. jezior, delt, dużych form krasowych lub polodowcowych, rozległych zbczy dolin lub kotlin. Warunkuje to optymalizacja miejsca startu i lądowania drona względem trasy wykonywanego nalotu oraz kątów widzenia kamery. Loty poza zasięgiem wzroku są szczególnie niebezpieczne, gdyż pilot może liczyć jedynie na wskazania kontrolera drona. Ponadto istnieje możliwość utraty połączenia drona z aparaturą sterującą wskutek zbyt dużej odległości od operatora, bariery oro-

graficznej (pagórki i inne wzniesienia), drzew, zabudowań, a w szczególności metalowych konstrukcji oraz urządzeń nadawczo-odbiorczych (https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/73/akt.pdf).

NSTS 06 – Scenariusz pozwala na wykonywanie lotów poza zasięgiem wzroku do 2 km od pilota oraz wysokości do 120 metrów nad powierzchnią terenu wielowirnikowcem o masie startowej do 25 kg. Zgodnie z tym scenariuszem można wykonywać prace badawcze nad znaczną powierzchnią terenu dronami wyposażonymi w specjalistyczne urządzenia pomiarowe. Należy jednak pamiętać o niezbędnych procedurach bezpieczeństwa, unikaniu zbliżania drona do ludzi, zwierząt oraz innych użytkowników przestrzeni powietrznej (https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/74/akt.pdf).

Dodatkowo należy zapoznać się z występowaniem tzw. stref geograficznych, które zdefiniowano na potrzeby utworzenia aktualnych przepisów dotyczących lotów dronami. Rozporządzenie wykonawcze Komisji UE 2019/947 z dnia 24 maja 2019 roku zawiera zapis: „Strefa geograficzna dla bezzałogowych systemów powietrznych oznacza część przestrzeni powietrznej wyznaczoną przez właściwy organ, która ułatwia, ogranicza lub wyklucza operacje z użyciem bezzałogowych systemów powietrznych, aby wyeliminować zagrożenia związane z bezpieczeństwem, prywatnością, ochroną danych osobowych, ochroną lub środowiskiem wynikające z operacji z użyciem tych systemów” (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0947-20200606&from=PL>).

BSP powinien posiadać również numer pilota nadany podczas rejestracji w systemie elektronicznym na stronie <https://drony.ulc.gov.pl/>.

4.3. Warunki przyrodnicze

Przed lotem należy dobrze rozpoznać warunki lokalne w jakich prowadzone będą badania oraz skorzystać ze sprawdzonych serwisów pogodowych. Normy eksploatacji BSP, takie jak siła wiatru, opady atmosferyczne oraz nieprzekraczalna temperatura są określone w instrukcji obsługi.

Należy sprawdzić aktywność geomagnetyczną w postaci wskaźnika KP (ang. *K-Index*). Parametr ten określa natężenie radiacji cząstek słonecznych, które przenikając przez atmosferę oddziałują na pole magnetyczne Ziemi. Za wzrost wskaźnika KP odpowiadają erupcje słoneczne powodujące wzmożone promieniowanie, co może powodować pogorszenie samopoczucia u ludzi, ale także problemy z łącznością z nadajnikami GPS/GNSS w dronach i innych urządzeniach pomiarowych. Wartość wskaźnika KP waha się od 0 do 9. Wartości 0–3 są bezpieczne dla pilotowania dronów, przy wartości 4 zaleca się szczególną ostrożność oraz pilną obserwację zmian tego parametru, natomiast przy wartości równej lub większej niż 5 loty i misje wykonywane dronem nie są wskazane (Al-Gbory, Al-Ubaidi 2020; Matzka i in. 2021; <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>).

Przed wykonaniem lotu należy dokładnie skontrolować, czy nie występują warunki lub obiekty mogące zakłócić bezprzewodową komunikację kontrolera z dronem. Wysokie drzewa, zabudowania, wzniesienia lub urozmaicona rzeźba, bliskość konstrukcji stalowych, takich jak dachy budynków, maszty lub mosty mogą spowodować pogorszenie zasięgu i jakości sygnału lub nawet jego utratę. Należy zwracać szczególną uwagę na linie transmisyjne, które z pewnej odległości są trudne do zobaczenia przez pilota lub obserwatora drona. Istotnym problemem są również ptaki. Istnieją liczne, udokumentowane przypadki ataków ptaków drapieżnych na niewielkie drony, a jednym z najbardziej „dokuczliwych” gatunków są mewy.

4.4. Aspekty techniczne

Badania geomorfologiczne wykonywane z dronów wykorzystują teoretyczne i praktyczne doświadczenia geodezji, teledetekcji oraz fotointerpretacji z wykonywania nalotów fotogrametrycznych (Bujakiewicz, Preuss 2000), czy prawne związane z użytkowaniem przestrzeni powietrznej przez pilotów BSP (Pyka i in. 2020).

4.4.1. Wybór miejsca startu i lądowania oraz kontrola techniczna drona

Jakość i zasięg sygnału w terenie uzależniony jest od wyboru miejsca startu i lądowania oraz punktu, z którego będzie pilotowany dron. Miejsce startu i lądowania powinno być stabilne i płaskie, najlepiej użyć do tego celu składanej maty dostosowanej do wielkości używanego drona. Przed każdym lotem, a nawet po każdej zmianie baterii, zalecana jest inspekcja drona i użytych akcesoriów. Sprawdzić należy wizualny stan obudowy i śmigieł, a także stan baterii i silników oraz czy dron podczas lotu nie wydaje niepokojących dźwięków. Każde pęknięcie, odkształcenie, przebarwienie, ślady korozji powinny zostać naprawione, usunięte lub wymienione, np. śmigła. Należy przestrzegać warunków transportu oraz eksploatacji BSP, które zalecił producent. Zapewnia to bezpieczeństwo podczas lotu oraz minimalizuje ryzyko zaistnienia niepożądanych sytuacji.

4.4.2. Parametry techniczne lotu

Parametry nalotu fotogrametrycznego mogą być zapisane w formie pliku kml, który dostarczany jest do kontrolera drona. Niektóre systemy BSP pozwalają na konfigurację parametrów nalotu z poziomu aparatury, m.in. DJI Phantom 4 RTK oraz seria Dronów DJI Matrice 210 oraz DJI Matrice 300. Istnieje kilka popularnych programów do projektowania nalotów fotogrametrycznych, np. Pix4Dmapper, atonicMapper, DJI Terra Pro.

W zależności od przyjętego celu badania można wybrać kilka rodzajów nalotu. Nalot z podwójną siatką lub nalot z trybem rejestracji kamery pod różnym kątem rea-

lizuje się przy tworzeniu modelu 3D. Trwa on 2 do 5 razy dłużej niż misja dla ortofotomapy. Dzięki pracy kamery pod różnymi kątami jest możliwa dokładna rekonstrukcja obiektów niedostępnych do precyzyjnego przetworzenia w przypadku nadirowego ustawienia sensora. Do uzyskania mniej wymagających modeli 3D może okazać się wystarczający pojedynczy nalot fotogrametryczny z kamerą skierowaną nadirowo. Zadowalające efekty uzyskuje się ustawiając pokrycie podłużne na poziomie 80% oraz pokrycie poprzeczne co najmniej na 60% (Qin i in. 2013; Gruber 2019). Taki produkt może okazać się mniej precyzyjny w miejscach o pionowym nachyleniu (budynki, skarpy).

Podczas projektowania misji fotogrametrycznej (rys. 2) do wykonania opracowań 2D należy określić najistotniejsze parametry lotu potrzebne do przeprowadzenia badań. Należą do nich:

- **Powierzchnia terenu.** Wielkość obszaru oraz jego ukształtowanie wpływa na czas trwania i bezpieczną wysokość nalotu, ilość potrzebnych pakietów baterii oraz typ pozwoleń na lot.
- **Wysokość lotu.** Od wysokości lotu drona zależy parametr GSD – pixel terenowy określający zdolność rozdzielczą ortofotomapy wyrażaną najczęściej w centymetrach. Im niższy lot, tym szczegółowość opracowania będzie wyższa. Niższy lot oznacza też mniejszą prędkość przelotową ograniczoną głównie szybkością pracy kamery.
- **Czas pracy drona w powietrzu oraz czas zmiany baterii.** Należy uwzględnić wysokość i prędkość lotu, siłę wiatru, odległość miejsca wykonywania zdjęć lub pomiarów od miejsca startu i lądowania, poziom naładowania i stan baterii. Zazwyczaj producent podaje orientacyjny czas w jakim dron może utrzymać się w powietrzu wykorzystując w pełni naładowaną, sprawną baterię.
- **Wpływ warunków meteorologicznych.** Określając szacunkowy czas przebywania drona w powietrzu należy uwzględnić warunki meteorologiczne, w szczególności poziom zachmurzenia oraz nasłonecznienia. Zmieniająca się pogoda może spowodować pojawienie się mozaiki oświetlonych i zacienionych elementów opracowania. Podczas planowania dłuższych, trwających kilka godzin nalogów, należy uwzględnić wybór dnia i porę o jak najmniej zróżnicowanym poziomie ekspozycji słonecznej.
- **Ilość nawrotów BSP.** Ze względu na zużycie energii w dronie należy dążyć do niezbędnego minimum ilości nawrotów.
- **Zakres pokrycia podłużnego oraz poprzecznego.** Pokrycie poprzeczne określa wzajemny stopień pokrycia między sąsiednimi szeregami, niezbędne dla późniejszego połączenia szeregów w spójny oraz możliwy do scalenia blok zdjęć. Pokrycie podłużne określa zdjęcia wykonane w taki sposób, by terenowe zasięgi fotografii częściowo się nakładały.
- **Parametry aparatu: czas otwarcia migawki, ISO oraz przesłona.** Optymalne ustawienie parametrów aparatu gwarantuje odpowiednią ekspozycję zdjęć. Czas otwarcia migawki, zwłaszcza w trakcie wykonywania zdjęć w locie, powinien być na tyle krótki, by zdjęcia nie



Rys. 2. Planowanie misji fotogrametrycznej w programie DJI Terra

Fig. 2. Photogrammetric mission planning in DJI Terra software

były „poruszone”. Zbyt duży parametr ISO najczęściej powoduje „zaszumienie” zdjęć, co nie tylko zmniejsza ich czytelność, ale również powoduje trudności w ich łączeniu w programach fotogrametrycznych. Ustawienie maksymalnego otworu przesłony w wielu kamerach może powodować utratę ostrości zwłaszcza na rogach kadru. Praktyka fotograficzna wskazuje, że najczęściej obiektywy uzyskują swe najlepsze parametry optyczne przy przesłonie domkniętej o jedną lub dwie działki.

5. Wyniki badań testowych

Wyniki badań to zdjęcia, obrazy termalne, opracowania 2D oraz 3D. Pochodzą z przetworzenia fotogrametrycznego geotagowanych zdjęć z BSP oraz późniejszym przetworzeniu w programach ArcMap 10.4.1, DJI Terra oraz DJI Thermal Analysis Tool 3.

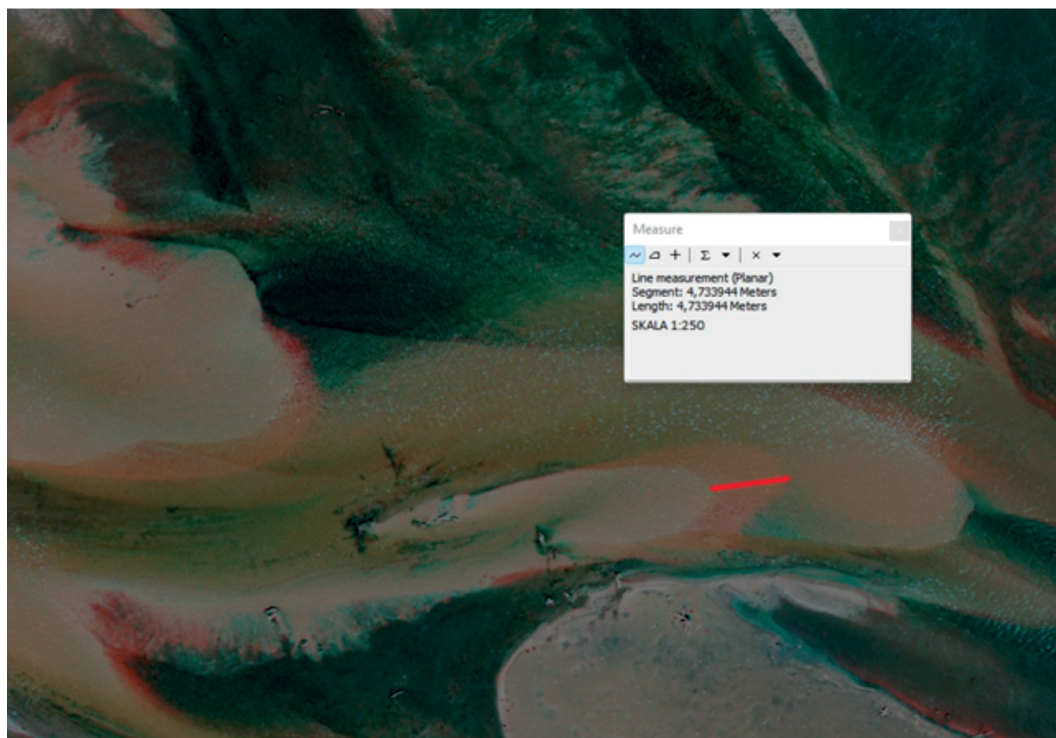
5.1. Badania z zakresu geomorfologii fluwialnej

Najstarsze materiały, które zostały wykorzystane do cyfrowej fotointerpretacji terenów dolin rzecznych pochodzą z lat 50. i 60. XX w. Były to monochromatyczne zdjęcia lotnicze wykonywane z nalotów odbywających się w cyklach rocznych lub kilkuletnich (Kowalewski 2000). Taka powtarzalność badań pozwalała na prześledzenie tylko ogólnej tendencji rozwoju morfologii koryt. Szczegółowe badania transformacji form w poszczególnych porach roku lub zmian zachodzących po zjawiskach ekstremalnych wymagają badań o większej częstotliwości. Liczne czynniki,

z których najistotniejsze są powodzie, długotrwałe susze, nagłe zjawiska meteorologiczne, zmiany antropogeniczne wpływają na kształtowanie się morfologii. Brak zdjęć wykonanych w odpowiednim czasie uniemożliwia zarejestrowanie i prześledzenie dynamicznych przemian wywołanych tymi przyczynami.

5.1.1. Analiza form rzeźby na terenie delty w zbiorniku Jeziersko

W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania fotogrametrii wykonywanej z BSP w badaniach procesów morfodynamicznych zostały wykonane w okresie wiosennym dwa naloty nad fragmentem delty w zbiorniku Jeziersko. Proces napełniania zbiornika w dniach 24 i 26.04.2022 r. zarejestrowano na zdjęciach RGB wykonanych z drona DJI Phantom 4 RTK. Dwie mapy zostały wygenerowane w programie DJI Terra, a następnie przetworzone w programie ArcMap ver.10.4.1. W wyniku regulacji przezroczystości warstw oraz dominanty kolorystycznej zostały na mapach wydodrębnione różnice, które zaszły na danym fragmencie terenu. Dotyczy to zwłaszcza fluwialnego przemieszczania materiału dennego w formie fach przedstawionego na fragmencie w skali 1:250. Zasięg zmian zaznaczono na fotografii czerwoną linią (fot. 1), wielkość transportu dochodziła do 5 m. Raport dotyczący jakości opracowań uzyskany w programie DJI Terra ukazał przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) na poziomie 0,02 m w przypadku nalotu wykonanego w dniu 24.06.2022 r. oraz 0,022 m w przypadku nalotu wykonanego 26.06.2022 r. Każdy z nalotów wraz z przygotowaniem trwał ok. 5,5 godz.



Fot. 1. Fluwialny transport (czerwona linia) materiału dennego w obrębie fach

Photo 1. Fluvial transport (red line) of bed load in bars

Analizowano również niewielkie, efemeryczne zbiorniki występujące licznie w obrębie delty w okresie obniżonego poziomu wody. W wyniku podnoszenia się lustra

wody jedno z nich w okresie dwóch dni zwiększyło swój obszar z 0,57 ha (fot. 2a) do 0,84 ha (fot. 2b). Różnice zostały zobrazowane na opracowaniach w skali 1:250.



Fot. 2. Zmiany powierzchni małego efemerycznego jeziora w obrębie delty w Zbiorniku Jeziorsko: (A) stan z 24.04.2022 r., powierzchnia jeziora ok. 0,057 ha; (B) stan z 26.04.2022 r., powierzchnia jeziora ok. 0,084 ha

Photo 2. Changes of the ephemeral small lake surface within the Jeziorsko reservoir delta: (A) Status as of 24.04.2022, lake area about 0.057 ha; (B) Status as of 26.04.2022, lake area about 0.084 ha

5.1.2. Analiza wysokościowa obszaru delty Zalewu Sulejowskiego

Pomiary fotogrametryczne z BSP mogą służyć do tworzenia mapy powierzchni terenu (DSM, *Digital Surface Model*). Dzięki dokładnym pomiarom pozycji każdego wykonanego zdjęcia istnieje możliwość wykonania mapy hipsometrycznej. Nalot wykonano Dronem DJI Phantom 4 RTK, więc dane zostały dostarczone jedynie z sensora RGB. Przykład przedstawiony na rys. 3 ukazuje wysokość terenu nie tylko ponad wodą, ale także batymetrię. Dzięki użytemu algorytmowi zinterpretowano wartości występujące pod powierzchnią wody w zbiorniku, w którym wyraźnie widoczne są linie nurtu. Taki wynik mógł być uzyskany dzięki nalotowi w sprzyjających warunkach pogodowych, braku bezpośredniej operacji słonecznej, gdyż niebo było równomiernie pokryte chmurami. Przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) wyniósł 0,023 m. Nalot wraz z przygotowaniem trwał około 3,5 godz.

5.1.3. Pomiary objętościowe, powierzchniowe i linearne obiektów wybrzeża klifowego Zbiornika Jeziorsko

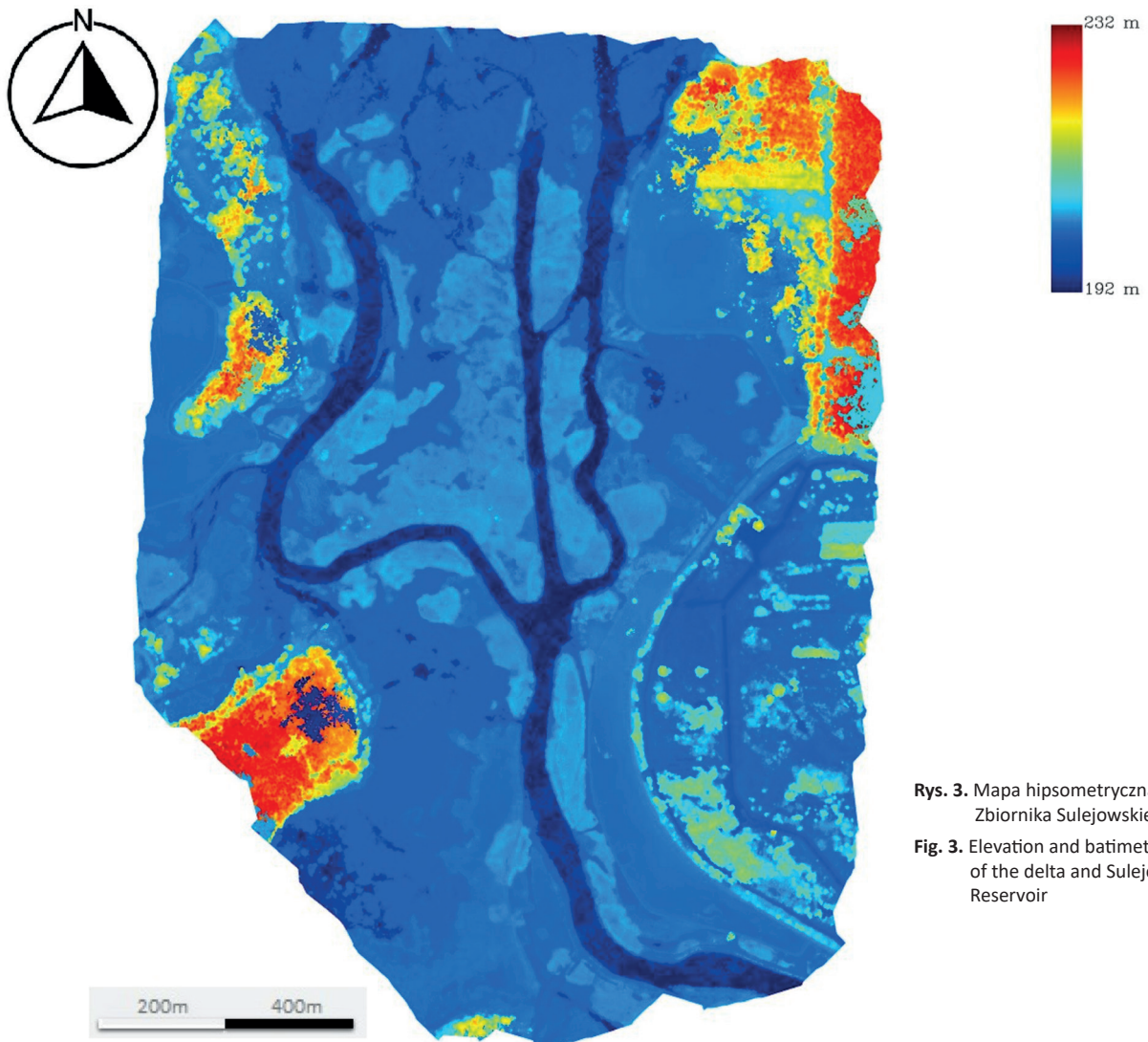
Model 3D fragmentu klifu koło wsi Brodnia-Kolonia nad Zbiornikiem Jeziorsko powstał w wyniku przetworzenia 725 zdjęć wykonanych dronem DJI Phantom 4 RTK z wysokości ok. 60 m nad poziomem gruntu. Przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) wyniósł 0,037 m. Nalot wraz z przygotowaniem trwał około 1,5 godziny. Otrzymany produkt, wygenerowany w programie DJI Terra Pro, można eksportować jako chmurę punktów lub model w kilku popularnych rozszerzeniach, m.in.: .obj, .las, .ply. Na mo-

delu o dużej szczegółowości możliwe jest rozpoznanie pojedynczych form skalnych, szczegółów spękań ściany skalnej oraz pojedynczych drzew. Pozwala to m.in. na analizę objętości pojedynczych dużych klastów o średnicy rzędu kilkudziesięciu cm (fot. 3). Określenie zakresu błęd pomiarowych w zależności od średnicy klastów żwirowych lub głazowych wymaga jeszcze kolejnych testów.

Opracowanie 3D ukazało linię pęknięcia zwięzłych osadów diamiktonowych w obrębie klifu, a także pomiar jej długości (8,94 m) i wysokości (5,46 m) (rys. 4).

5.1.4. Pomiary termalne wybranych elementów Zalewu Sulejowskiego

Analiza termalna wybranych obszarów Zbiornika Sulejowskiego została wykonana przy użyciu drona DJI Matrice 210 v2.0 wraz z dołączonym niechłodzonym bolometrem cyfrowym DJI Zenmuse XT S oraz kamerą światła widzialnego DJI Zenmuse X5S. Przed rozpoczęciem nalotu oraz po jego zakończeniu zostały wykonane pomiary termometrem BOSCH PTD 1. Wybrane miejsca zostały wyselekcjonowane pod względem zróżnicowanych cech termicznych, takich jak piaski, żwiry, roślinność niska, roślinność wysoka, roślinność brzegowa, woda przy brzegu oraz toń zbiornika (rys. 5). Pobrane dane zawierające informacje na temat temperatury odbicia oraz lokalnej wilgotności zostały uśrednione i posłużyły do dokładnej kalibracji parametrów termalnych w programie DJI Thermal Analysis Tool 3. Pomiar został przeprowadzony 26.07.2022 r. ok. godziny 10:30. Pokrycie nieba chmurami nie przekraczało 15%, a temperatura powietrza wynosiła 23°C.



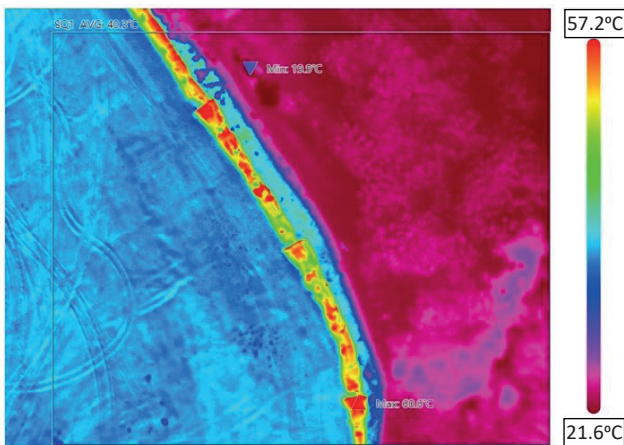
Rys. 3. Mapa hipsometryczna delty Zbiornika Sulejowskiego
Fig. 3. Elevation and bathymetric map of the delta and Sulejów Reservoir



Fot. 3. Pomiar objętości pojedynczej skały
Photo 3. Volume measurement of a single rock



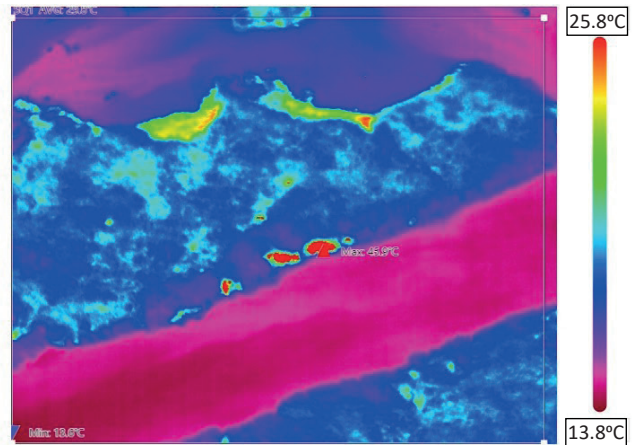
Rys. 4. Fragment modelu klifu z widocznym pęknięciem oraz pomiar jego długości i wysokości
 Fig. 4. Fragment of the cliff model with a broken surface visible



DJI_0136_R.JPG
 2022/07/26 10:44:56

Measurements

SQ1	MIN	19.9°C
	AVERAGE	40.3°C
	MAX	60.6°C



DJI_0040_R.JPG
 2022/07/26 10:34:55

Measurements

SQ1	MIN	13.6°C
	AVERAGE	29.8°C
	MAX	45.9°C

Rys. 5. Obrazy termalne fragmentu delty w Zbiorniku Sulejowskim (zdjęcia skośne obszar ok. 600 m²)
 Fig. 5. Thermal images of the delta fragment in the Sulejów Reservoir (oblique photos area about 600 m²)

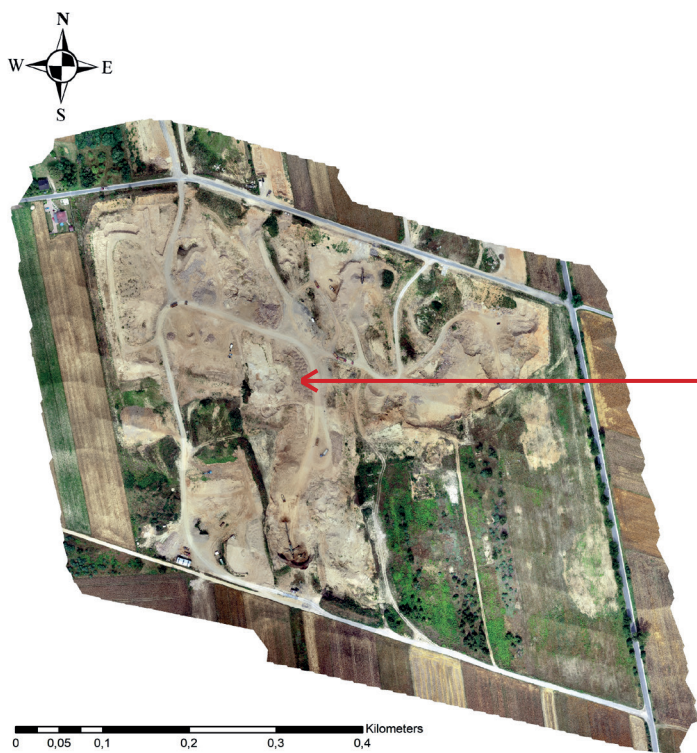
Stwierdzono znaczną różnicę temperatur w obrębie badanego obszaru sięgającą nawet do około 50°C. Najcieplejsze były czarne elementy wałów brzegowych, gdzie temperatura miejscami przekraczała 60°C. Najchłodniejsza okazała się toń wody w głębszych partiach zbiornika, gdzie pomiar wykazał temperaturę około 13–14°C.

5.1.5. Pomiary w żwirowni „Adamów”

W trakcie wykonywania nalołów fotogrametrycznych w obrębie tej kopalni, położonej w pobliżu Radomska, największym problemem okazało się zapewnienie optymalnego zasięgu dron–kontroler lotu oraz jakości sygnału GPS. Opisane niedogodności są charakterystyczne dla startu z wyrobiska, często kilkadziesiąt m poniżej poziomu terenu otaczającego. Aby zachować bezpieczeństwo

i zminimalizować ryzyko utraty sygnału należy wybrać miejsce startu znajdujące się poza obszarem kopalni. Podczas nalołu, który został wykonany 28.07.2021 r., panowała bezchmurna pogoda, co umożliwiło naloł z prędkościami zbliżonymi do maksymalnych dla parametru powtarzalności kamery. Maksymalna prędkość przelotowa wyniosła około 11 m/s.

W wyniku pojedynczego nalołu dronem DJI Phantom 4 RTK na wysokości około 100 m nad poziomem gruntu powstało opracowanie 2D obejmujące obszar całej kopalni, niespełna 0,4 km² (fot. 4). Opracowanie charakteryzuje się rozdzielczością 2,7 cm piksela terenowego (GSD, *Ground Sampling Distance*). Można rozróżnić oraz zmierzyć pojedyncze klasty należące do frakcji gwałowej oraz większe żwiry (mapa 1).



Fot. 4. Obszar kopalni „Adamów”

Photo 4. The area of the min “Adamów”



Mapa 1. Zbliżenie na fragment z widocznymi pojedynczymi klastami

Map 1. Close-up of a section with individual rocks visible

6. Podsumowanie i wnioski

Rozwój fotogrametrii niskiego pułapu i postęp technologiczny w zakresie możliwości wykorzystania BSP otwierają obecnie nowe możliwości badań terenowych z zakresu geomorfologii i geologii. Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność stosowania dronów do badań geomorfologicznych i geologicznych, w zakresie zarówno struktury, jak i tekstury osadów czwartorzędowych.

Badacz przeprowadzający lot BSP podlega jednak restrykcyjnym i często modyfikowanym przepisom prawa lotniczego. Dotyczy to zarówno Polski, jak i innych państw.

Niezbędne jest posiadanie odpowiednich kwalifikacji, pozwoleń na loty oraz przestrzeganie wymogów prawnych.

Testowe badania dynamicznie zmieniających się form fluwialnych w trudno dostępnych terenach doliny Warty (okolice Zbiornika Jeziorsko) oraz doliny Pilicy (Zalew Sulejowski), pozwoliły udokumentować szybkie zmiany morfologiczne form akumulacyjnych w korytach rzecznych i w dnie zbiorników, zmiany wynikające z sukcesji roślinnej, zmiany poziomu wody oraz zmiany antropogeniczne wynikające z użytkowania zbiornika i jego przebudowy.

Mapy obszaru wykonane w odstępie dwóch dni wykazały już możliwość zaobserwowania mierzalnych zmian

w morfologii form dna. Przeprowadzone testy pokazały skuteczność wykorzystania BSP do obserwacji zmian morfologii delt w zbiornikach wodnych i wielu innych obiektów przestrzennych, pomiarów objętościowych pojedynczych mikroform, czy nawet większych klastów, do tworzenia map hipsometrycznych oraz geomorfologicznych.

Praktyka lotów fotogrametrycznych przy użyciu dronów wykazała niebagatelny wpływ warunków atmosferycznych na finalną jakość opracowania. Najlepsze opracowania 2D, jak i 3D uzyskano wykonując loty podczas możliwie jednolitego zachmurzenia lub w przypadku bezchmurnej pogody podczas górowania słońca.

Warunki, takie jak zamglenie, zapylenie oraz zróżnicowany poziom ustępcznienia w ciągu wykonywania jednego nalotu wpływały negatywnie na jakość wykonanego opracowania.

Ilość zdjęć niezbędna do wytworzenia opracowań dwuwymiarowych była ściśle związana z wielkością mapowanej powierzchni, wysokością lotu drona oraz ustawieniami parametru pokrycia podłużnego i poprzecznego. Dla najczęściej stosowanych parametrów nalotów charakteryzujących się pokryciem podłużnym zdjęć wynoszącym 65% oraz pokryciem poprzecznym wynoszącym 75%, wysokością lotu 110 m można przyjąć, że dla niewielkich opracowań wynoszących do 1 ha wystarczy około 180–200 zdjęć. Dla opracowań wielohektarowych, np. dla fragmentów delt rzeki, jednorazowy nalot wymagał wykonania ponad 2 000 zdjęć. Analizy jakościowe wykazały, że tak dobrane parametry zawsze gwarantowały możliwość odpowiedniego połączenia ze sobą zdjęć z poszczególnych szeregów.

Wykonując badania terenowe przy pomocy dronów, mamy istotny wpływ na dokładność oraz rozdzielczość wykonanych prac. Przedstawione opracowania fotogrametryczne charakteryzowały się relatywnie niewielkim błędem georeferencyjnym (RMSE), który mieścił się w przedziale od 0,02 m do 0,037 m. Taka dokładność pozwalała na obserwację i analizę zmian nawet subtelnych szczegółów w zakresie pokrycia terenu. W przypadku analiz termalnych, otrzymane wyniki mogą posłużyć do analiz struktury powierzchni, jak również przemian w użytkowaniu terenu. Użycie fotopunktów, punktów kontrolnych, systemu RTK lub pokrewnych systemów zapewniających zwiększenie precyzji pomiarów, wpływa pozytywnie na dokładność otrzymanych opracowań.

Wyniki badań fotogrametrycznych, których rezultatem były zarówno opracowania 2D jak i 3D można określić danymi ilościowymi. Wybraną cechą terenu lub jej zakres można zmierzyć oraz porównać zmiany występujące w czasie. Badania termalne wykazują w tym względzie cechy badań jakościowych. Umożliwiają one rozróżnienie typu wykorzystywania terenu, w tym przekształcenia antropogenicznego środowiska.

Podziękowania

Autor składa podziękowania recenzentom – prof. Tomaszowi Kalickiemu oraz dr Stanisławowi Krysiakowi za wnikliwe i merytoryczne uwagi.

7. Literatura

- Al-Gbory, M.M., Al-Ubaidi, N.M., 2020. Geomagnetic Kp Index and Planetary Magnetosphere Size Relationship: For Mercury and Jupiter During two Types of Geomagnetic Conditions. *Baghdad Science Journal* 17(3), 806–817. <https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3.0806>
- Bakuła, M., Ostrowski, W., 2012. Zastosowanie cyfrowej kamery niemetrycznej w fotogrametrii lotniczej na wybranych przykładach. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 24, 11–20.
- Bakuła, M., Przeszelski, P., 2013. Technologia wiarygodnego pozycjonowania RTK GPS/GLONASS. *Przegląd Geodezyjny* 7, 3–9.
- Bernasik, J., Mikrut, S., 2007. Fotogrametria inżynierska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, 1–106.
- Będkowski, K., Piekarski, E., 2017. Podstawy fotogrametrii i teledetekcji dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1–154.
- Budiharto, W., Irwansyah, E., Suroso, J.S., Chowanda, A., Ngarianto, H., Agung Santoso Gunawan, A., 2021. Mapping and 3D modelling using quadrotor drone and GIS software. *Journal of Big Data* 8(48), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00436-8>
- Bujakiewicz, A., Preuss, R., 2000. Aspekty kształcenia i badań naukowych na tle wymogów współczesnych technologii fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 10(29), 1–9.
- Ciołkosz, A., Kęsik, A., 1989. Teledetekcja Satelitarna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1–294.
- Czarnecki, K., 2010. Geodezja współczesna w zarysie. Książka i Wiedza/Gall, Katowice, 1–488.
- Fernández-Lozano, J., Gutiérrez-Alonso, G., 2016. The Use of UAVs (Unmanned Air Vehicles) in Geology, [w:] *Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes At Tomsk (Russia)*. Volume: Proceedings (8) – Tomsk CTSI Publishing House, 1–399.
- Gruber, G.W.J., 2019. Review of DJI Phantom 4 RTK for the Surveying Industry. Rozprawa doktorska University of Southern Queensland Faculty of Health, Engineering and Sciences ENG4111/ENG4112 Research Project, 14–73.
- Kowalewski, G., 2000. Fotointerpretacja cyfrowa w badaniach oddziaływania zbiorników zaporowych na środowisko przyrodnicze (na przykładzie Zalewu Koronowskiego). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 10, 48–1: 48–12.
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., Morschhauser, A., 2021. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather* 19. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- Ołędzki, J.R. (red.) 2007. Teledetekcja Środowiska 38: Regiony Geograficzne Polski. Uniwersytet Warszawski, 1–337.
- Ostrihansky, M., Szmigiero, M., 2020. Prawo Dronów. Bezzałogowe statki powietrzne w prawie Unii Europejskiej oraz Krajowym. Wolters Kluwer.
- Pyka, K., Wiącek, P., Guzik, M., 2020. Surveying with Photogrammetric Unmanned Aerial Vehicles. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing* 32, 79–102.
- Qin, R., Gruen, A., Xianfeng, Huang, 2013. UAV-Project-Building a reality-based 3D model. *Coordinates*, IX. 18–26. 21. Post-Processing Kinematic Mode MDPI, Drone Journal.
- Remzi, E., Alkan, E., Aydin, A., 2021. A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types. *European Journal of Forest Engineering* 2021, 12–25. <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J., Ordóñez, C., 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>

Taddia, Y., Stecchi, F., Pellegrinelli, A., 2020. Coastal Mapping using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones* 2020. <https://doi.org/10.3390/drones4020009>

Ustawa z dnia 3 lipca 2002 roku, Prawo lotnicze (Dz.U., 2019, poz. 1580 z późn. zm.).

Źródła internetowe

<https://droneradar.eu/> (dostęp: 30.12.2022).

<https://drony.ulc.gov.pl/> (dostęp: 30.12.2022).

https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/69/akt.pdf (dostęp: 30.12.2022).

https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/70/akt.pdf (dostęp: 30.12.2022).

https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/73/akt.pdf (dostęp: 30.12.2022).

https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/74/akt.pdf (dostęp: 30.12.2022).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0947-20200606&from=PL> (dostęp: 30.12.2022).

<https://ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-szczegolna/5299-kategoria-szczegolna> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq/496-sprzet/5518-czy-moj-dron-zalicza-sie-do-zabawek> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-otwarta-informacje> (dostęp: 30.12.2022).