



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



Ocena zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż szlaków turystycznych w zależności od stanu szlaków

Raport z realizacji projektu sfinansowanego ze środków funduszu
leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe
przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku

Wykonawcy:

dr inż. Paweł Cwiakała – kierownik
dr inż. Rafał Kocierz
dr inż. Edyta Puniach
dr inż. Stanisław Szombara
mgr Michał Nędzka
mgr inż. Dawid Mrocheń
mgr inż. Witold Niewiem
mgr inż. Paweł Wiącek
mgr inż. Katarzyna Więch

Kraków, 2017 r.

SPIS TREŚCI

1	Cel opracowania	1
2	Procesy erozyjne na obszarze opracowania.....	2
3	Obszar opracowania	4
4	Metodyka pozyskania danych pomiarowych.....	5
4.1	Opis prac przygotowawczych.....	6
4.2	Opis prac terenowych	7
4.3	Kartowanie geomorfologiczne.....	9
5	Metodyka opracowania danych pomiarowych	10
5.1	Wyznaczenie współrzędnych fotopunktów	10
5.2	Opracowanie danych fotogrametrycznych pozyskanych z bezzałogowego statku powietrznego (zdjęcia RGB).....	10
5.3	Opracowanie zdjęć wielospektralnych pozyskanych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego	13
6	Charakterystyka danych archiwalnych.....	15
7	Ocena zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż badanych szlaków turystycznych	16
7.1	Porównanie danych aktualnych (UAV) względem danych archiwalnych (ISOK) 16	
7.1.1	Przygotowanie danych pozyskanych z UAV.....	16
7.1.2	Przygotowanie danych z projektu ISOK oraz generowanie modeli TIN	16
7.1.3	Przedstawienie wyników w formie rastrowej.....	17
7.1.4	Oszacowanie dokładności wyników	17
7.1.5	Interpretacja wykrytych zmian przestrzennych na obszarze szlaków	19
7.2	Wnioski	21
7.3	Porównanie danych aktualnych (UAV) względem danych archiwalnych (UAV) 21	
7.3.1	Porównanie aktualnych modeli wysokościowych (UAV) względem modeli archiwalnych (UAV).....	26
7.4	Porównanie danych aktualnych (UAV) względem danych aktualnych z kartowania geomorfologicznego	28
8	Ocena możliwości wykorzystania pozyskanych danych do inwentaryzacji terenów zalesionych.....	30
8.1	Charakterystyka znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji	30
9	Zestawienie i opis udostępnionych materiałów	34

1 CEL OPRACOWANIA

Projekt „Ocena zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż szlaków turystycznych w zależności od stanu szlaków”, finansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 r., miał na celu określenie zasięgu i stopnia erozji postępującej w rejonie wybranych szlaków turystycznych w Tatrach Wysokich oraz Tatrach Zachodnich. W ramach zadania przeprowadzono również analizy mające na celu określenie kondycji roślinności.

Najważniejszym zadaniem zrealizowanym w ramach projektu była inwentaryzacja liniowych szlaków turystycznych na odcinkach od regła dolnego do najwyżej położonych odcinków w piętrach hal. Pomiar aktualnego stanu szlaków wykonano metodą fotogrametryczną (z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego). Uzyskane dane, po ich porównaniu z danymi archiwalnymi dostarczonymi przez Tatrzański Park Narodowy lub danymi pozyskanymi w kolejnych seriach pomiarowych, są cenną informacją pozwalającą na:

- badanie stopnia erozji szlaków w obszarach zalesionych i niezalesionych,
- badanie postępu sukcesji leśnej,
- badanie zmiany górnej granicy lasu,
- badanie wpływu denudacji antropogenicznej na zmiany granicy lasu w obszarach granic pięter roślinności w terenie bezpośrednio przylegającym do szlaków turystycznych.

W wyniku realizacji projektu stworzono Numeryczne Modele Pokrycia Terenu i/lub Numeryczne Modele Terenu w dwóch okresach: pierwotnym i wtórnym. Model aktualny został wykonany na podstawie danych pozyskanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających. Natomiast źródłem informacji do stworzenia modelu pierwotnego były dane z lotniczego skanowania laserowego (ALS) dostarczone przez Tatrzański Park Narodowy.

Warto dodać, że w dłuższej perspektywie wykonanie kolejnych serii pomiarowych na tym samym obszarze pozwoli na przeprowadzenie szczegółowych analiz wpływu ruchu turystycznego na stan środowiska przyrodniczego. Cześć inwentaryzowanych szlaków turystycznych to obiekty, które w ostatnich latach były remontowane. Pozyskane dane umożliwią przeprowadzenie oceny wykorzystania wyremontowanych nawierzchni jak i sprawdzenie, czy remonty spełniły stawiane wobec nich oczekiwania.

Wszystkie prace w ramach projektu zostały wykonane przez pracowników i studentów Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, pod kierownictwem dr inż. Pawła Ćwiąkały.

2 PROCESY EROZYJNE NA OBSZARZE OPRACOWANIA

Obszar Tatr Wysokich jak i Zachodnich z racji swojej budowy geologicznej jest szczególnie narażony na zjawiska erozyjne. Procesy te zachodzą w podobny sposób zarówno w Tatrach Zachodnich i Wysokich. Natomiast ich natężenie jest inne, wyraźnie większe w Tatrach Wysokich. W analizie procesów wietrzeniowych na obszarze Tatr Wysokich ważne jest uwzględnienie plejstoceniowego etapu rozwoju rzeźby. W piętrach zimnych plejstocenu powstały formy i osady związane z rozwojem zlodowacenia górskiego, natomiast na obszarach pozbawionych lodu miało wówczas miejsce intensywne wietrzenie fizyczne w warunkach peryglacjalnych. W wyniku połączenia (sedymentacji osadów glacialnych oraz wietrzenia fizycznego) powstały grubofrakcyjne pokrywy morenowe w dolinach oraz zwietrzelinowe pokrywy stokowe, które mają charakter bądź pokryw ziarnistych, bądź grubofrakcyjnych pokryw stokowych – gładzowych i blokowych.

Bezpośrednim przejawem działania wietrzenia fizycznego jest cofanie się ścian skalnych w wyniku odpadania. Efektem tych zjawisk są piarżyska i luźne bloki skalne o średnicy nierzadko przekraczającej 2 m, znajdujące się u podnóża ścian skalnych. Zjawisko to prowadzi do rozdrobnienia skał, głównie granitoidów na okruchy poliminerálne. Mechanicznemu rozpadowi podlegają zarówno odporne na wietrzenie minerały takie jak kwarc, ale również minerały mniej odporne takie jak skalenie i biotyt. Rezultatem tych procesów jest zwietrzelina charakteryzująca się występowaniem słabo obtoczonych i ostrokrawędzistych okruchów skalnych. W Tatrach Wysokich, w piętrze alpejskim, procesy te potęguje wietrzenie mrozowe. Częste przejścia temperatury przez 0°C powoduje zamarzanie i rozmarzanie wody w szczelinach skalnych i materiale zwietrzelinowym, co skutkuje znacznym przyspieszeniem dezintegracji litych skał. W szczelinach zakorzeniają się dodatkowo rośliny, które także w dużym stopniu przyczyniają się do dalszego rozpadu materiału skalnego. Efektami tych przemian są pokrywy zwietrzelinowe, luźnych niezwiązanych mas skalnych. Jest to szczególnie widoczne w okolicach kopuły szczytowej Kasprowego Wierchu.

Naturalne procesy morfogenetyczne, w połączeniu z silną antropopresją skutkują stopniową degradacją szlaków. Najbardziej jest to widoczne w obrębie pięter leśnego i krionivalnego. Procesy te mają charakter punktowy, liniowy lub powierzchniowy. Proces antropopresji zaczyna się od niszczenia roślinności i wierzchniej warstwy gleby. Obszar pozbawiony roślinności jest szczególnie wrażliwy na działalność sił morfogenetycznych. Dochodzi wtedy do rozluźniania i rozkruszania litej skały oraz przemieszczania grawitacyjnego rumoszu skalnego.

Procesy denudacyjne zachodzą z różną intensywnością w zależności od pór roku. Pierwszym okresem, w którym erozja jest najsilniejsza to pora niweopluwialna, czyli moment zaniknięcia pokrywy śnieżnej. Drugim natomiast jest czas nawałnych i intensywnych deszczy. W obydwu okresach główną rolę destrukcyjną odgrywa erozja wodna. Powstają wówczas liczne rozcięcia erozyjne, kotły eworsyjne oraz stożki napływowe. Dochodzi także do powstawania lawin błotnych oraz intensywnego wymywania rumoszu skalnego. Dodatkowo w okresie zimowym ma miejsce intensywne wietrzenie mrozowe (zamarzanie i rozmarzanie litej skały).

Naturalne procesy morfogenetyczne modelujące strefę drogi czy też szlaku turystycznego można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą procesy autogeniczne, związane

z istnieniem drogi czy szlaku, których występowanie lub duże natężenie jest skutkiem obciążenia i rozluźniania podłoża, a więc ruchy masowe, splukiwanie, procesy kriogeniczne oraz deflacja. Do drugiej należą procesy allogeniczne niezwiązane z istnieniem drogi czy szlaku, ale mające wpływ na ich morfologię. Do tej grupy należą procesy pluwiograwitacyjne i morfologiczna działalność śniegu.

Z tego względu pewne strefy są bardziej narażone na degradację, czyli intensywniejsze modelowanie. Należą do nich obszary o dużej koncentracji wody płynącej po stoku, strefy z drobnym materiałem podlegające intensywnemu działaniu lodu włóknistego, a także powierzchnie odsłonięte, wrażliwe na działanie wiatru, szczególnie w obrębie przełęczy.

Wszystkie te procesy skutecznie powstrzymują sukcesję roślinności, co w konsekwencji przyczynia się do pogłębienia i poszerzenia stref dróg i szlaków turystycznych oraz do ich dalszej degradacji. Ponadto w strefach zniszczonej roślinności następuje zwielokrotnienie intensywności procesów denudacyjnych.

Na badanym obszarze największe zniszczenia związane z ruchem turystycznym występują na kopułach szczytowych, szlakach grzbietowych oraz szlakach o znacznym nachyleniu:

- Kuźnice – Myślenickie Turnie – w tej części zielonego szlaku przeważają głównie wolne ruchy masowe (soliflukcja i spelzwanie), co jest doskonale widoczne po charakterystycznym łukowatym wygięciu drzew. Mimo, że spelzwanie pokryw nie zagraża bezpośrednio szlakom, istnieje zagrożenie, że w momencie wystąpienia nawałnych opadów deszczu lub gwałtownych roztopów może dojść do katastrofalnych osunięć ziemi szczególnie na stokach o nachyleniu powyżej 30 stopni. W kilku miejscach szlak przebiega bardzo blisko cieków wodnych, co wiąże się z zagrożeniem podmywania brzegu i wymywania materiału glebowego i w efekcie może doprowadzić do osunięcia się pokryw;
- Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch – na tym odcinku szlaku przeważają gwałtowne procesy morfogenetyczne. Z racji tego, że większość szlaku przebiega powyżej górnej granicy lasu, teren jest podatny głównie na gwałtowne ruchy masowe (obrywanie, odpadanie), które potęguje erozja mechaniczna (mrozowa). Pokrywy są słabo zastabilizowane przez roślinność, szczególnie w rejonie szczytowym Kasprowego Wierchu. Duży ruch turystyczny, powoduje dodatkowo w kilku miejscach poszerzenie szlaku w taki sposób, że powstają liczne formacje liniowe bruzd erozyjnych, z kociołkami eworsyjnymi, którymi podczas nawałnych opadów deszczu transportowane są okruchy skalne i materiał glebowy;
- Jaszczurówka – Olczyńska Polana – w obrębie szlaku występują liczne wykroty, z których wymywany jest materiał glebowy, natomiast wzdłuż szlaku miejscami są widoczne bruzdy, w których okresowo płynie woda;
- Olczyńska Polana – polana w całości porośnięta roślinnością, dobra stabilizacja pokryw, małe nachylenie terenu, brak ruchów masowych. Jedynie w kilku miejscach, na ścieżkach wydeptanych przez turystów, utworzyły się niewielkie bruzdy erozyjne.
- Polana Rusinowa – Gęsia Szyja – mimo dużego nachylenia stoków, pokrywy dość dobrze zastabilizowane przez roślinność trawiastą, w kilku miejscach słabo widoczne efekty spelzwania pokryw w postaci jezorów i niecek.

W celu spowolnienia procesów erozyjnych w rejonach kopuł szczytowych i szlaków grzbietowych konieczne stało się rozłożenie mat z geowłókniny, które w dużym stopniu

unieruchamiają materiał skalny, zapobiegają wywiewaniu drobnych cząstek oraz pozwalają na zakorzenie się roślinności. Szlaki o dużym nachyleniu, gdzie najbardziej widoczna jest erozja wgłębna są stabilizowane poprzez montaż drewnianych belek, żerdzi i odpowiednim stabilizowaniu luźnych głazów.

3 OBSZAR OPRACOWANIA

Przedmiotem opracowania były liniowe szlaki turystyczne w Tatrach Wysokich i Tatrach Zachodnich wskazane przez pracowników Tatrzańskiego Parku Narodowego. Zinventaryzowano około 28,7 km szlaków, w tym:

1. niebieski szlak turystyczny z Palenicy Białczańskiej na Rusinową Polanę o długości 2,1 km i przewyższeniu 230 m;
2. zielony szlak turystyczny z Wierchu Porońca na Rusinową Polanę o długości 3,2 km i przewyższeniu 110 m;
3. niebieski szlak turystyczny z Doliny Filipka na Rusinową Polanę o długości 2,7 km i przewyższeniu 270 m;
4. zielony szlak turystyczny z Rusinowej Polany na Gęsią Szyję o długości 1,2 km i przewyższeniu 280 m;
5. zielony szlak turystyczny z Gęsiej Szyi na Rówień Waksmundzką o długości 0,9 km i przewyższeniu 85 m;
6. czerwony szlak turystyczny z Równi Waksmundzkiej na Psią Trawkę o długości 3,3 km i przewyższeniu 220 m;
7. czarny szlak turystyczny z Brzezina na Psią Trawę o długości 2,3 km i przewyższeniu 180 m;
8. czarny szlak turystyczny z Psiej Trawki do schroniska Murowaniec na Hali Gąsienicowej o długości 4,1 km i przewyższeniu 315 m;
9. zielony szlak turystyczny z Jaszczurówki na Olczyską Polanę o długości 2,0 km i przewyższeniu 155 m;
10. fragment żółtego szlaku z Olczyskiej Polany na Przełęcz Nosalową o długości 0,7 km i przewyższeniu 200 m;
11. zielony szlak turystyczny z Kuźnic na Myślenickie Turnie o długości 3,1 km i przewyższeniu 335 m;
12. zielony szlak turystyczny z Myślenickich Turni na Kasprowy Wierch o długości 3,1 km i przewyższeniu 630 m.

Ponadto zinventaryzowano dwa obiekty powierzchniowe:

1. obszar Rusinowej Polany o powierzchni około 20 ha;
2. obszar Olczyskiej Polany o powierzchni około 8 ha.

Obszar opracowania o gwarantowanej dokładności określonej w zamówieniu obejmuje pas o szerokości 25 m po obu stronach wyżej wymienionych szlaków. Zleceniodawcy przekazano cały pozyskany materiał pomiarowy, przy czym poza zdefiniowanym zakresem opracowania dokładność wykonanych produktów może być niższa. Z tego względu mogą być one wykorzystywane wyłącznie do celów interpretacyjnych/poglądowych.

Przeprowadzone badania są kontynuacją badań pt. „Ocena zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż szlaków turystycznych w zależności od stanu szlaków” zrealizowanych w roku

2016. Był to projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2016 roku. W ubiegłym roku zinwentaryzowano następujące szlaki turystyczne:

1. zielony szlak turystyczny ze schroniska PTTK na Hali Kondratowej do Przełęczy pod Kopą Kondracką;
2. czerwony szlak turystyczny z Przełęczy pod Kopą Kondracką do Kondrackiej Kopy;
3. żółty szlak turystyczny z Kondrackiej Przełęczy do Kondrackiej Kopy;
4. czerwony szlak turystyczny z Małołączniaka do Kondrackiej Kopy;
5. czerwony szlak turystyczny z Krzesanicy do Małołączniaka;
6. niebieski szlak turystyczny z Kobylarza do Małołączniaka;
7. czerwony szlak turystyczny z Ciemniaka do Krzesanicy;
8. czerwony/zielony szlak turystyczny z Chudej Przełączki do Ciemniaka;
9. czerwony szlak turystyczny z Zahradzisk do Chudej Przełączki;
10. czarny/czerwony szlak turystyczny z Cudakowej Polany do Zahradzisk;
11. zielony szlak turystyczny z Trzydniowiańskiego Wierchu do Kończystego Wierchu;
12. czerwony szlak turystyczny z Jarzączej Doliny do Trzydniowiańskiego Wierchu;
13. czerwony/żółty szlak turystyczny z Polany Chochołowskiej do Jarzączej Doliny;
14. zielony/czerwony szlak turystyczny z Polany Chochołowskiej do odejścia szlaku zielonego na Polanie Chochołowskiej;
15. żółty szlak turystyczny ze schroniska PTTK na Polanie Chochołowskiej do odejścia na Bobrowiecką Przełęcz;
16. żółty/niebieski szlak turystyczny z odejścia na Bobrowiecką Przełęcz do Grzesia;
17. szlaki turystyczne wychodzące z Przysłopu Miętusiego;
18. fragment niebieskiego szlaku turystycznego pomiędzy Przysłopem Miętusim a Kobylarzem;
19. fragment żółtego szlaku turystycznego z Wielkiej Polany w Dolinie Małej Łąki w kierunku Kondrackiej Przełęczy;
20. fragment żółtego szlaku turystycznego pomiędzy Potokiem Bystra a Przełęczą między Kopami w obszarze Jaworzynka – Sidłowa Perć (tzw. Łokcie);
21. fragment żółtego szlaku turystycznego z Olczyskiej Polany w kierunku Nosalowej Przełęczy;
22. ścieżki poza wyznaczonym szlakiem turystycznym na wschodnich stokach Kondrackiej Kopy pomiędzy szlakiem czerwonym i żółtym.

Obszar, na którym dotychczas realizowano badania, stanowi jedynie część obszaru Tatrzańskiego Parku Narodowego. W związku z tym zaleca się, aby praca była wykonywana także w kolejnych latach w celu inwentaryzacji pozostałych odcinków szlaków.

4 METODYKA POZYSKANIA DANYCH POMIAROWYCH

Inwentaryzację liniowych szlaków turystycznych na całym obszarze opracowania wykonano metodą fotogrametryczną z bezzałogowego statku powietrznego (UAV). Urządzenie wykorzystane do pomiarów to wielowirnikowiec firmy DJI, model S1000+. Na bezzałogowym statku latającym został zamontowany aparat Sony Alfa A7R z obiektywem Sony Zeiss Sonnar T* FE 35 mm F2.8 ZA, którego położenie było stabilizowane za pomocą gimbała Zennuse Z15-A7. Dodatkowo podczas wybranych misji urządzenie było wyposażone

w kamerę wielospektralną Parrot SEQUOIA, która pozwala na rejestrację obrazów w czterech dodatkowych kanałach spektralnych: Green (zielony, 530÷570 μm), Red (czerwony, 640÷680 μm), Red Edge (czerwony brzegowy, 730÷740 μm), Near Infrared (kanał podczerwony, 770÷810 μm).

Prace terenowe zostały zrealizowane w dniach 27-30.08.2017 r. i 13-15.09.2017 r. oraz obejmowały:

- pozyskanie zdjęć RGB dla całego obszaru opracowania przy zastosowaniu bezzałogowego statku powietrznego,
- wykonanie zobrazowań wielospektralnych z pokładu bezzałogowego statku powietrznego dla zielonego szlaku turystycznego z Jaszczurówki na Olczyšką Polanę, fragmentu żółtego szlaku z Olczyńskiej Polany na Przełęcz Nosalową, całego obszaru Olczyńskiej Polany oraz zielonego szlaku turystycznego z Myślenickich Turni na Kasprowy Wierch,
- pomiar fotopunktów klasycznymi metodami geodezyjnymi (RTK GNSS),
- wykonanie kartowania geomorfologicznego dla zielonego szlaku turystycznego z Kuźnic do Myślenickich Turni oraz zielonego szlaku turystycznego z Myślenickich Turni do Kasprowego Wierchu.

4.1 OPIS PRAC PRZYGOTOWAWCZYCH

Pomiary terenowe z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego zostały poprzedzone opracowaniem planów lotów UAV. Projektowanie misji fotogrametrycznych przeprowadzono na podstawie danych uzyskanych z Tatrzańskiego Parku Narodowego (pliki *shapefile* z zakresem opracowania oraz Numeryczny Model Terenu wykonany na podstawie chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego wykonanego w ramach projektu ISOK), specyfikacji użytego sprzętu oraz zakładanego rozmiaru piksela terenowego, który wynosił:

- 15 mm na terenach niezalesionych,
- 20 mm na terenach porośniętych wysoką roślinnością.

W związku z tym przy planowaniu nalogów przyjęto następujące założenia:

- wysokość lotu UAV nad powierzchnią terenu na obszarach niezalesionych – 100 m,
- wysokość lotu UAV nad powierzchnią terenu na obszarach zalesionych – 150 m,
- pokrycie poprzeczne między zdjęciami w sąsiednich szeregach – 70%,
- pokrycie podłużne między zdjęciami w szeregu – 85%.

Plany lotów bezzałogowego statku powietrznego zostały dostosowane do charakteru obszaru opracowania przy uwzględnieniu występujących wzdłuż szlaków deniwelacji terenu. Dla poszczególnych odcinków projekty misji zakładały nalog w dwóch szeregach równoległych względem siebie i osi szlaku. W ten sposób zaprojektowano 27 misji o długościach od 2,0 km do 4,1 km, które ostatecznie zostały przygotowane w oprogramowaniu DJI Ground Station.

Zakres prac przygotowawczych obejmował również wykonanie projektu rozmieszczenia fotopunktów wzdłuż tras przelotu UAV oraz wskazanie optymalnych miejsc startu i lądowania urządzenia. Założenia projektowe zakładały rozmieszczenie fotopunktów w odległości około 100 m od siebie. Przy czym ze względu na trudne warunki terenowe założenia te zostały wstępnie zweryfikowane na podstawie ortofotomapy oraz NMT, aby uniknąć

terenów zadrzewionych (brak widoczności z powietrza) oraz niedostępnych ze względu na duże nachylenie stoków (potencjalne niebezpieczeństwo dla pomiarowego). Z kolei położenie lądowisk dobierano tak, aby były one łatwo dostępne ze szlaku, oddalone od przeszkód terenowych, tj. wysokich drzew czy ścian skalnych, oraz aby w trakcie wykonywania nalotu UAV nigdy nie znalazł się poniżej wysokości punktu startu.

Sporządzone plany lotów, których szkice zamieszczono w załączniku nr 1 (G:\Załączniki\Załącznik nr 1_Plany lotów), zawierają sytuacyjną trasę przelotu UAV oraz projektowane rozmieszczenie fotopunktów. Zaprezentowano je na podkładzie ortofotomapy pozyskanej za pomocą usługi WMS z serwisu mapy.geoportal.gov.pl.

4.2 OPIS PRAC TERENOWYCH

Naloty bezzałogowym statkiem latającym przeprowadzono w dniach 28-30.08.2017 r. oraz 13 i 15.09.2017 r. W trakcie prac terenowych zrealizowano 27 zaprojektowanych misji fotogrametrycznych, które swoim zasięgiem obejmowały cały obszar opracowania (por. załącznik nr 1). Dodatkowo równolegle wykonano 8 misji w celu pozyskania danych wielospektralnych przy pomocy kamery Parrot SEQUOIA. Wszystkie operacje lotnicze były wykonywane zgodnie z projektem przez osoby posiadające świadectwo kwalifikacji UAVO (operatora Bezzałogowego Statku Powietrznego), z zachowaniem wysokich standardów bezpieczeństwa, w warunkach VLOS (Visual Line of Sight – operacje w zasięgu wzroku operatora).

W trakcie prac terenowych, przed rozpoczęciem każdego zaprojektowanego nalotu UAV, należało wytyczyć, zamarkować oraz pomierzyć współrzędne przestrzenne fotopunktów w granicach obszaru objętego daną misją fotogrametryczną (por. załącznik nr 1). Wygląd sztucznego fotopunktu na przykładowym zdjęciu wykonanym w ramach niniejszego zlecenia zamieszczono na rysunku 1. Należy zaznaczyć, że w ramach niniejszego zlecenia wykorzystywano również fotopunkty naturalne. Były to charakterystyczne szczegóły terenowe, jednoznacznie identyfikowalne na zdjęciach (rys. 2).

Pomiar fotopunktów (sztucznych i naturalnych) zrealizowano w dniach 27-30.08.2017 r. oraz 13-15.09.2017 r. metodą RTK GNSS w nawiązaniu do jednej z własnych stacji bazowych, które zostały tymczasowo ustawione: na Palenicy Białczańskiej, na Rusinowej Polanie (2 bazy), na Wierch Porońcu, w Brzezinach, na Gęsiej Szyi, na Psiej Trawce, w okolicach schroniska Murowaniec na Hali Gąsienicowej, na Polanie Olczyskiej, w okolicach Jaszczurówki, w Kuźnicach (przy dolnej stacji kolejki), na Myślenickich Turniach i na Kasprowym Wierchu.

Do pomiaru wykorzystano odbiorniki Javad TRIUMPH-1. W sumie pomierzono 324 fotopunkty.

Po zakończeniu prac terenowych wszystkie tarcze sygnalizujące fotopunkty zostały zebrane z terenu Tatrzańskiego Parku Narodowego.



Rysunek 1. Sztuczny fotopunkt na zdjęciu wykonanym z UAV (okolice Kasprowego Wierchu)



Rysunek 2. Naturalny fotopunkt na zdjęciu wykonanym z UAV (szlak z Myślenickich Turni na Kasprowy Wierch)

4.3 KARTOWANIE GEOMORFOLOGICZNE

Dla szlaku zielonego z Kuźnic na Kasprowy Wierch przeprowadzono kartowanie geomorfologiczne form terenu. Skupiono się na obszarach, gdzie procesy geomorfologiczne w największym stopniu wpływają na kształt i przebieg szlaków turystycznych. W wyniku kartowania w tabeli 1 opisano łącznie 14 obszarów, na których zachodzi intensywne erozja lub jest duże potencjalne zagrożenie erozją w przyszłości.

Tabela 1. Zestawienie obszarów objętych lub zagrożonych erozją

Symbol	Współrzędne	Opis procesów i form
K1	N49° 14,046' E19° 58,819'	Luźny rumosz skalny, większość głazów niezwiązana z podłożem. Średnica 20÷30 cm. Wyraźnie widoczne ruchy masowe (odpadanie, obrywanie). Spełzywanie pokryw prawie niewidoczne. Roślinność kserotermiczna, bardzo rzadka, pojedyncze kosówki. Granica pietra alpejskiego i subalpejskiego. Umiarkowane procesy deflacji (wywiewanie luźnego materiału glebowego). W miejscach gdzie występuje roślinność słabo widoczna działalność lodu włóknistego.
K2	N49° 14,066' E19° 58,805'	Wyraźnie widoczne ruchy masowe, duża ilość niezwiązanych głazów (gołoborze) luźne kamienie, bez roślinności.
K3	N49° 14,214' E19° 58,675'	Bruzda erozyjna o długości 3 m, szerokości ok. 30 cm i głębokości 15÷20 cm. Silne wymywanie wierzchniej warstwy gleby. Erozja potęgowana przez skąpą roślinność piętra subalpejskiego.
K4	N49° 14,235' E19° 58,656'	Liczne bruzdy erozyjne, luźne kamienie, pojedyncze kosówki.
K5	N49° 14,291' E19° 58,631'	Wyraźnie widoczne osuwisko skalne. Początki ruchów masowych, silne punktowe i liniowe wymywanie pokryw zwietrzelinowych. Pojedyncze luźne głazy o średnicy 50÷70 cm.
K6	N49° 14,402' E19° 58,659'	3 ostańce, wyraźnie widoczne wietrzenie mrozowe powodujące odpadanie mas skalnych, dodatkowo spotęgowane przez erozję biologiczną.
K7	N49° 14,693' E19° 58,557'	Bruzdy erozyjne, liczne luźne kamienie, intensywne procesy splukiwania pokrywy glebowej, dawny skrót wydeptany przez turystów.
K8	N49° 14,740' E19° 58,547'	Górna granica lasu, obszar, w którym zjawiska wietrzenia mrozowego, odpadania i obrywania skał ustępują miejsca wielkoobszarowym, powolnym ruchom masowym (soliflukcja i spełzywanie).
K9	N49° 14,992' E19° 58,593'	Na dużym obszarze po obu stronach szlaku zachodzi soliflukcja i spełzywanie pokryw glebowych. Proces ten zachodzi ciągle, w długim okresie, na co wskazuje jednoznacznie charakterystyczne łukowate wygięcie drzew. Procesy te zachodzą z różną intensywności w zależności od rodzaju podłoża. Im średnica ziaren w utworach powierzchniowych mniejsza (>0,2 mm), tym większe prawdopodobieństwa wystąpienia soliflukcji. Takie podłoże jest też w większym stopniu narażone na przekroczenie warunków brzegowych i płynięcie podczas nawalnych opadów deszczu w porze letniej.

K10	N49° 15,068' E19° 58,607'	Rynna erozyjna o szerokości 3,5 m i długości około 15 m prostopadle do szlaku, aktywne ruchy masowe powodujące osiadanie fragmentu szlaku. Widoczne ślady po opadach nawalnych w postaci licznych, małych bruzd. Duże nachylenie >45°.
K11	N49° 15,063' E19° 58,649'	Rynna erozyjna o szerokości 4 m i długości około 20 m, prostopadle do szlaku, aktywne ruchy masowe powodujące osiadanie fragmentu szlaku. Duże nachylenie >45°
K12	N49° 15,019' E19° 58,696'	Dość głęboka, bardzo aktywna bruzda erozyjna (1 m). Wokół intensywne procesy soliflukcji.
K13	N49° 14,962' E19° 58,758'	Stożek piargowy z luźnym materiałem skalnym wypełnionym zwietrzeliną, nachylenie około 15°, u podnóża widoczny wymyty materiał glebowy.
K14	N49° 15,560' E19° 58,451'	Zewnętrzny meander ciek w bezpośredniej okolicy szlaku, widoczne intensywne wymywanie materiału i lepiszcza pokryw zwietrzelinowych. Duże niebezpieczeństwo uszkodzenia szlaku podczas nawalnych opadów deszczu.

5 METODYKA OPRACOWANIA DANYCH POMIAROWYCH

5.1 WYZNACZENIE WSPÓLRZĘDNYCH FOTOPUNKTÓW

Współrzędne punktów pomierzonych metodą RTK GNSS wyznaczano w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych PL-2000 strefa 7 oraz w układzie wysokości normalnych PL-KRON86-NH w oparciu o quasi geoidę niwelacyjną PL-geoid-2011.

W pierwszym etapie wyznaczono współrzędne 14 stacji bazowych zlokalizowanych na obszarze opracowania. Obliczenia przeprowadzono w programie Leica Geo Office 8.4 metodą postprocessingu statycznego w nawiązaniu do stacji referencyjnych NWT1 (Nowy Targ), ZYWI (Żywiec), NWSC (Nowy Sącz) i GANP (Poprad). Na tej podstawie obliczono następnie ostateczne współrzędne punktów pomiarowych (fotopunktów).

Dokładność uzyskanych współrzędnych kształtuje się na poziomie 2÷3 cm, a szczególne informacje o współrzędnych poszczególnych punktów znajdują się w załączniku nr 3 (G:\Załączniki\Załącznik nr 3_Raporty RTK GNSS).

5.2 OPRACOWANIE DANYCH FOTOGRAMETRYCZNYCH POZYSKANYCH Z BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO (ZDJĘCIA RGB)

W wyniku wykonanych nalotów UAV uzyskano szeregi zdjęć cyfrowych (G:\Załączniki\Załącznik nr 2_Dane pomiarowe\Zdjęcia RGB), które poddano obróbce fotogrametrycznej w programie Agisoft PhotoScan Professional 1.3.4. Na wspomniane opracowanie składały się następujące etapy:

1. Wstępne łączenie zdjęć – na tym etapie zdjęcia zostały zaimportowane do oprogramowania oraz nadawano im wstępną orientację poprzez dodanie przybliżonych współrzędnych środków rzutów. Łączenie zdjęć przeprowadzono w sposób automatyczny przy limicie 4000 punktów wiążących na parę. Łączenie zdjęć wykonano przy parametrach analizujących obraz na poziomie pojedynczych pikseli (parametr określający dokładność łączenia zdjęć zawsze ustawiano na opcji *High*).
2. Po połączeniu zdjęć wskazywano fotopunkty na pojedynczych zdjęciach. Czynność tę poprzedzono zaimportowaniem do programu współrzędnych naziemnej osnowy fotogrametrycznej. Każdy obfotografowany fotopunkt oznaczono na wszystkich zdjęciach, na których był widoczny. W tabeli 2 zestawiono listę tzw. *chunków* (misji fotogrametrycznych połączonych w grupy) wraz z liczbą zdjęć i fotopunktów, które posłużyły do ich wyrównania. Łącznie w opracowaniu wykorzystano 7558 zdjęć.

Tabela 2. Zestawienie liczby zdjęć i fotopunktów w poszczególnych misjach fotogrametrycznych

Misja	Liczba zdjęć	Liczba fotopunktów	Liczba zdjęć na jeden fotopunkt
Palenica Białczańska – Polana Rusinowa	874	32	27,3
Wierch Poroniec – Polana Rusinowa	738	34	21,7
Dolina Filipka – Polana Rusinowa	530	22	24,0
Polana Rusinowa – Psia Trawka_część 1	677	34	19,9
Polana Rusinowa – Psia Trawka_część 2	676	21	32,2
Brzeziny – Psia Trawka	626	20	31,3
Psia Trawka – Murowaniec	872	32	27,2
Jaszczurówka – Olczykiska Polana	915	41	22,3
Kuźnice – Myślenickie Turnie	685	35	19,6
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	965	54	17,9

Dodatkowy parametr, jaki przedstawiono w tabeli 2, to średnia liczba zdjęć przypadająca na jeden fotopunkt. Wartość ta wynika z założonej odległości pomiędzy fotopunktami, która wynosiła około 100 metrów. Wynikiem tego było pokrycie jednego fotopunktu około 25 zdjęciami. W misjach, które nie spełniają tego założenia, nie było możliwości zastabilizowania większej liczby fotopunktów ze względu na warunki terenowe.

3. Mając do dyspozycji tak przygotowany blok zdjęć dla każdej misji, przystąpiono do jego wyrównania. Wyrównywanie bloku zdjęć przeprowadzano łącznie z wyznaczeniem parametrów kalibracyjnych aparatu. W procesie tym wyznaczane były: stała ogniskowa (f), położenie środka rzutów na matrycy (c_x i c_y) oraz parametry dystorsji ($k1$, $k2$ oraz $p1$ i $p2$). W wyniku wyrównania bloku zdjęć otrzymano odchyłki współrzędnych na fotopunktach, których zestawienie znajduje się w tabeli 3. Średnie wartości tych parametrów obliczone dla wszystkich misji wynoszą: $m_x = 18$ mm, $m_y = 17$ mm i $m_h = 20$ mm, co odpowiada błędowi położenia sytuacyjnego punktu $m_{xy} = 25$ mm i błędowi położenia przestrzennego $m_{xyh} = 32$ mm.

Tabela 3. Odchyłki współrzędnych fotopunktów

Misja	m_x [mm]	m_y [mm]	m_h [mm]	m_{xy} [mm]	m_{xyh} [mm]
Palenica Białczańska – Polana Rusinowa	19,5	23,0	25,7	30,0	39,6
Wierch Poroniec – Polana Rusinowa	21,7	18,7	25,8	28,7	38,5
Dolina Filipka – Polana Rusinowa	9,1	13,0	9,4	15,9	18,4
Polana Rusinowa – Psia Trawka_część 1	13,5	14,7	21,3	20,0	29,2
Polana Rusinowa – Psia Trawka_część 2	9,5	10,9	9,4	14,5	17,2
Brzeziny – Psia Trawka	15,4	13,1	9,6	20,2	22,4
Psia Trawka – Murowaniec	14,6	18,3	18,8	23,4	30,0
Jaszczurówka – Olczyńska Polana	29,4	20,3	19,4	35,7	40,6
Kuźnice – Myślenickie Turnie	16,9	14,8	20,6	22,5	30,5
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	23,1	19,2	26,1	30,1	39,8
Średnia	18,3	17,0	19,7	25,0	31,8

4. Kolejnym krokiem było wygenerowanie gęstej chmury punktów z wykorzystaniem funkcji gęstego *matchingu*. Wygenerowano 3262,4 milionów punktów we wszystkich misjach. W tabeli 4 przedstawiono wielkości chmur punktów dla poszczególnych *chunków*. Dodatkowo podano liczbę punktów wiążących, jakie zostały wygenerowane w punkcie 1.
5. Po wygenerowaniu chmur punktów dla każdej misji przystąpiono do łączenia ich w większe grupy, tzw. *chunki*. Krok ten miał na celu wygenerowanie jak największych obszarów opracowania w spójnych blokach.
6. Kolejnymi krokami było tworzenie produktów wynikowych, które stanowiły dane wejściowe do dalszych opracowań. W pierwszej kolejności tworzono Numeryczny Model Pokrycia Terenu, na podstawie którego wykonana została ortorektyfikacja zdjęć oraz tworzenie ortofotomapy.
7. W ostatnim etapie wyeksportowano gotowe produkty, które dołączono do raportu w postaci załącznika nr 6 (G:\Załączniki\Załącznik nr 6_Pliki wynikowe). W wymienionym katalogu znajdują się foldery odpowiadające nazwom obszarów opracowania, gdzie zamieszczono wyeksportowane z programu Agisoft PhotoScan produkty. Mimo że wszystkie opracowania były realizowane w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych PL-2000/7, to chmury punktów zostały wyeksportowane w układzie PL-1992, a NMPT i ortofotomapy w układzie PL-2000/7. W tabeli 4 przedstawiono rozdzielczości produktów wynikowych. Należy dodać, że przed ostatecznym wygenerowaniem ortofotomapy przeprowadzono proces jej czyszczenia z artefaktów takich jak ludzie w ruchu.

Projekty z programu Agisoft PhotoScan dołączono do raportu w załączniku nr 4 (G:\Załączniki\Załącznik nr 4_Projekty Agisoft Photoscan\Zdjęcia RGB). Natomiast raporty z obliczeń zamieszczono w załączniku nr 5 (G:\Załączniki\Załącznik nr 5_Raporty Agisoft Photoscan\Zdjęcia RGB).

Tabela 4. Podstawowe parametry produktów wynikowych wygenerowanych na podstawie zdjęć

Misja	Liczba punktów wiążących (<i>Tie Points</i>)	Liczebność chmury punktów	Rozmiar piksela ortofotomapy	Rozmiar siatki DEM
Palenica Białczańska – Polana Rusinowa	1 070 302	705 384 239	20 mm	40 mm
Wierch Poroniec – Polana Rusinowa	704 489	818 479 630	20 mm	40 mm
Dolina Filipka – Polana Rusinowa	248 415	669 899 952	20 mm	40 mm
Polana Rusinowa – Psia Trawka część 1	429 556	871 238 946	20 mm	40 mm
Polana Rusinowa – Psia Trawka część 2	266 821	841 800 540	20 mm	40 mm
Brzeziny – Psia Trawka	406 441	695 723 363	20 mm	40 mm
Psia Trawka – Murowaniec	488 884	988 760 897	20 mm	40 mm
Jaszczurówka – Olczyska Polana	897 787	759 392 252	20 mm	40 mm
Kuźnice – Myślenickie Turnie	587 015	809 605 131	20 mm	40 mm
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	1 510 834	1 039 351 322	15 mm	30 mm

5.3 OPRACOWANIE ZDJĘĆ WIELOSPEKTRALNYCH POZYSKANYCH Z POKŁADU BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO

W wyniku wykonanych nalołów UAV obok zdjęć wykonanych w paśmie widzialnym (RGB) dla wybranych obszarów otrzymano również zdjęcia z kamery wielospektralnej Parrot SEQUOIA o następujących widmach: Green, Red, Red Edge i NIR (G:\Załączniki\Załącznik nr 3_Dane pomiarowe\Zdjęcia wielospektralne). Zdjęcia te poddano obróbce fotogrametrycznej w programie Agisoft PhotoScan Professional 1.3.4. Na wspomniane opracowanie składały się następujące etapy:

1. Wstępne łączenie zdjęć – na tym etapie zdjęcia w każdym z 4 kanałów, zaimportowano do oprogramowania oraz nadano im wstępną orientację poprzez dodanie przybliżonych współrzędnych środków rzutów. Łączenie zdjęć przeprowadzono w sposób automatyczny przy limicie 4000 punktów wiążących na parę. Łączenie zdjęć wykonano przy parametrach analizujących obraz na poziomie pojedynczych pikseli (parametr określający dokładność łączenia zdjęć zawsze ustawiano na opcji *High*).
2. Po połączeniu zdjęć wskazano fotopunkty na pojedynczych zdjęciach. Czynność ta została poprzedzona zaimportowaniem do programu współrzędnych naziemnej osnowy fotogrametrycznej. Każdy fotopunkt, który obfotografowano został oznaczony na wszystkich zdjęciach, na jakich był widoczny. W tabeli 5 zestawiono listę tzw. *chunków* (misji fotogrametrycznych połączonych w grupy) wraz z liczbą zdjęć i fotopunktów, które posłużyły do ich wyrównania. Łącznie w opracowaniu wykorzystano 755 zdjęć.

Tabela 5. Zestawienie liczby zdjęć i fotopunktów w poszczególnych misjach fotogrametrycznych

Misja	Liczba zdjęć	Liczba fotopunktów
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	164	17
Jaszczurówka – Olczyska Polana	219	19
Olczyska Polana	372	18

3. Mając do dyspozycji tak przygotowany blok zdjęć dla każdej misji, przystąpiono do jego wyrównania. Wyrównywanie bloku zdjęć przeprowadzono łącznie z wyznaczeniem parametrów kalibracyjnych kamery. W procesie tym wyznaczane były: stała ogniskowa (f), położenie środka rzutów na matrycy (c_x i c_y) oraz parametry dystorsji ($k1$, $k2$ oraz $p1$ i $p2$). W wyniku wyrównania bloku zdjęć otrzymano odchyłki współrzędnych na fotopunktach, których zestawienie znajduje się w tabeli 6. Średnie wartości tych parametrów obliczone dla wszystkich misji wynoszą: $m_x = 19$ mm, $m_y = 18$ mm oraz $m_h = 29$ mm, co odpowiada błędowi położenia sytuacyjnego punktu $m_{xy} = 26$ mm i błędowi położenia przestrzennego $m_{xyh} = 39$ mm.

Tabela 6. Odchyłki współrzędnych fotopunktów

Misja	m_x [mm]	m_y [mm]	m_h [mm]	m_{xy} [mm]	m_{xyh} [mm]
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	17,0	18,3	32,1	25,0	40,7
Jaszczurówka – Olczyska Polana	21,6	21,0	34,8	30,2	46,0
Olczyska Polana	17,1	13,9	18,6	22,0	28,8
Średnia	18,7	18,0	29,4	26,0	39,2

4. W kolejnym kroku wygenerowano gęste chmury punktów z wykorzystaniem funkcji gęstego *matchingu*. Wygenerowano 25,7 milionów punktów we wszystkich misjach. W tabeli 7 przedstawiono wielkości chmur punktów dla poszczególnych *chunków*. Dodatkowo podano liczbę punktów wiążących, jakie zostały wygenerowane w punkcie 1.

Tabela 7. Podstawowe parametry produktów wynikowych wygenerowanych na podstawie zdjęć

Misja	Liczba punktów wiążących (<i>Tie Points</i>)	Liczebność chmury punktów	Rozmiar piksela ortofotomapy
Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	325 137	7 785 045	100 mm
Jaszczurówka – Olczyska Polana	663 450	8 085 895	135 mm
Olczyska Polana	909 841	9 817 478	112 mm

5. Na podstawie połączonych zdjęć i chmury punktów utworzono ortofotomapę dla wszystkich 4 kanałów (Green, Red, Red Edge i NIR). W celu stworzenia ortofotomapy ze wskaźnikiem NDVI użyto kalkulatora rastra. Zastosowano formułę (1),

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (1)$$

oraz standardową skalę dla NDVI (Tetracam, zakres: -0,32, +0,54). Dla skali NDVI zastosowano interpolację pikseli. Tak przygotowane ortofotomapy załączono do raportu w katalogu UAV NDVI, w katalogach odpowiadających nazwom obszarów opracowania stanowiących załącznik nr 6 (G:/Załączniki/Załącznik nr 6_Pliki wynikowe).

Projekty z programu Agisoft PhotoScan dołączono do raportu w załączniku nr 4 (G:\Załączniki\Załącznik nr 4_Projekty Agisoft Photoscan\Zdjęcia wielospektralne). Natomiast raporty z obliczeń zamieszczono w załączniku nr 5 (G:\Załączniki\Załącznik nr 5_Raporty Agisoft Photoscan\Zdjęcia wielospektralne).

6 CHARAKTERYSTYKA DANYCH ARCHIWALNYCH

Tatrzański Park Narodowy przekazał Zleceniobiorcy dane archiwalne w postaci plików *.las zawierających chmurę punktów pochodzącą z lotniczego skanowania laserowego (ALS). Udostępnione dane pozyskano w 2012 roku, w ramach projektu ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami. Materiały obejmują swoim zasięgiem cały Park Narodowy, w tym obszary objęte niniejszym opracowaniem. Wszystkie dane wysokościowe są podane w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych PL-1992, a wysokości odnoszą się do układu wysokości normalnych Kronsztadt 86.

Dane ALS zostały sklasyfikowane zgodnie z formatem LAS. Wydzielono następujące klasy punktów:

1. punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane;
2. punkty leżące na gruncie;
3. punkty reprezentujące niską roślinność, tj. w zakresie 0,00÷0,40 m;
4. punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0,40÷2,00 m;
5. punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2,00 m;
6. punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie;
7. szum;
8. punkty reprezentujące obszary pod wodami.

Zgodnie z informacjami podanymi przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK) poprawność klasyfikacji punktów jest nie mniejsza niż 95%.

Oprócz współrzędnych i informacji o klasie danego punktu, pliki *.las zawierają informację o intensywności odbicia w trzech zakresach widzialnej części promieniowania elektromagnetycznego, odpowiadających barwom czerwonej, zielonej i niebieskiej (wartości RGB), pozyskanych ze zdjęć lotniczych.

Gęstość punktów wynosi minimum 4 pkt/m² (standard I), a błąd średni wysokości zawiera się w przedziale do 0,2 m (wg CODGiK).

Na podstawie otrzymanych chmur punktów wygenerowano dla obszarów opracowania Numeryczne Modele Pokrycia Terenu oraz Numeryczne Modele Terenu (na podstawie klasyfikacji wykonanej przez CODGiK) w postaci rastrowej o rozdzielczości 35 cm.

Oba powyższe opracowania zostały wykonane w programie CloudCompare 2.9.1. Dołączono je do raportu w folderach o nazwie *ISOK NMT_NMPT*, które znajdują się w katalogach odpowiadających nazwom obszarów opracowania w załączniku nr 6 (G:\Załączniki\Załącznik nr 6_Pliki wynikowe). Pozyskane dane wykorzystano również do wykonania analiz zmian zachodzących na obszarach szlaków (rozdz. 7).

7 OCENA ZASIĘGU I NASILENIA EROZJI WZDŁUŻ BADA- NYCH SZLAKÓW TURYSTYCZNYCH

Jednym z głównych celów prowadzonych prac było określenie zasięgu i intensywności erozji szlaków turystycznych. W tym celu wykorzystano chmury punktów pozyskane z UAV oraz z projektu ISOK. Tego typu dane charakteryzują się przede wszystkim dużą gęstością oraz wiarygodnością przestrzenną, dzięki czemu na ich podstawie możliwe jest określanie zmian ukształtowania powierzchni terenu w kolejnych epokach pomiarowych.

W ramach tego opracowania wykonano następujące analizy porównawcze dla całego obszaru opracowania:

- porównanie chmur punktów pozyskanych z UAV względem danych archiwalnych z lotniczego skanowania laserowego w ramach projektu ISOK,
- porównanie chmur punktów pozyskanych z UAV względem danych archiwalnych pozyskanych z UAV w 2016 roku.

Na podstawie wyników tych analiz wygenerowano rastrowe mapy różnicowe, które pozwalają na wizualną oraz ilościową ocenę stopnia i przyczyn zjawisk erozyjnych. Należy jednak pamiętać, że w bieżącym opracowaniu dane archiwalne w przeważającej mierze pochodzą z projektu ISOK. Charakteryzują się one znacznie mniejszą rozdzielczością przestrzenną, co powoduje, że część charakterystycznych obiektów przestrzennych tj. koryta szlaków, pojedyncze głazy czy leje erozyjne mogły ulegać generalizacji. Jednocześnie dane te charakteryzują się mniejszą dokładnością przestrzenną, co może się objawiać w stałym przesunięciu względem danych aktualnych.

Wyniki przeprowadzonych analiz zamieszczono w folderach *UAV_ISOK porównania* i *UAV 2016_2017 porównania*, które znajdują się w załączniku nr 6 (G:\Załączniki\Załącznik nr 6_Pliki wynikowe\nazwa obszaru opracowania).

7.1 PORÓWNANIE DANYCH AKTUALNYCH (UAV) WZGLĘDEM DANYCH ARCHIWALNYCH (ISOK)

Analizy wykonano w programie CloudCompare 2.9.1 w układzie współrzędnych płaskich PL-1992 oraz układzie wysokości normalnych Kronsztad 86.

7.1.1 Przygotowanie danych pozyskanych z UAV

Pierwszy etap opracowania polegał na zaimportowaniu do programu CloudCompare chmur punktów wygenerowanych w programie Agisoft Photoscan. Następnie, aby usprawnić obliczenia numeryczne, poddano je procesowi *resamplingu*, nadając kryterium minimalnej odległości pomiędzy punktami równej 3 cm. W ten sposób znacząco obniżono ilość punktów poddawanych analizie, jednocześnie nie obniżając wiarygodności prowadzonych analiz.

7.1.2 Przygotowanie danych z projektu ISOK oraz generowanie modeli TIN

Kolejny etap opracowania polegał na zaimportowaniu odpowiednich arkuszy chmur punktów pozyskanych w wyniku lotniczego skanowania laserowego w ramach projektu ISOK. Dane te importowano w dwóch wersjach:

- pierwsza zawierała wszystkie klasy punktów i tym samym reprezentowała ukształtowanie terenu wraz z pokryciem (NMPT ISOK),
- druga zawierała jedynie punkty sklasyfikowane jako *ground*, reprezentujące jedynie ukształtowanie terenu (NMT ISOK).

Następnie, aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki porównań, dla danych ISOK wykonywano modele TIN (siatkę nieregularnych trójkątów). W ten sposób wyznaczone odległości liczone były wzdłuż wektorów normalnych do wygenerowanych trójkątów, dzięki temu uzyskiwano informacje o kierunku zmiany ukształtowania terenu (ubytek/przyrost) oraz wyeliminowano wpływ różnicy gęstości danych pomiarowych na dokładność wyznaczonych odległości.

7.1.3 Przedstawienie wyników w formie rastrowej

W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano dla każdego punktu ze zbioru pozyskanego z UAV wartości przemieszczenia pomiędzy NMPT i/lub NMT pochodzącym z danych archiwalnych a stanem aktualnym. Ponieważ przeglądanie wyników w formie punktowej wymaga odpowiedniego oprogramowania oraz dużej ilości pamięci RAM postanowiono uzyskane wyniki przedstawić w postaci rastrowej, która umożliwia wygodne przeglądanie materiałów w środowisku GIS. W tym celu, bazując na chmurach UAV oraz wyznaczonych wartościach różnic, wygenerowano rastry o rozdzielczości 5 cm.

7.1.4 Oszacowanie dokładności wyników

W celu oszacowania dokładności uzyskiwanych wyników porównań danych archiwalnych ISOK z aktualnymi danymi UAV wykonano analizę różnic dla obiektów stałych tj. połaci dachowych budynków (rys. 3). Ponieważ są to obiekty trwałe, wyznaczone różnice świadczą o ich dokładności, a nie faktycznych zmianach.

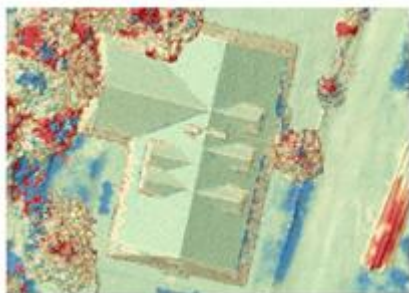
Na podstawie tych porównań można przede wszystkim zaobserwować, że dla wszystkich obiektów występuje stała różnica o wartości około -20 cm, co świadczy o stałym przesunięciu pomiędzy oboma zbiorami danych. Przesunięcie to wynika najprawdopodobniej z niedokładności nadania georeferencji (położenia bezwzględnego). Jednocześnie fakt, że na wszystkich obiektach uzyskano bardzo zbliżone wartości pomimo różnego położenia na obszarze opracowania, świadczy o dużej wewnętrznej zgodności pozyskanych danych.

Kolejnym elementem, który możemy zaobserwować na rysunku 3a i 3b są zaburzenia w rejonach krawędzi dachów. Są to ewidentnie błędnie wyznaczone różnice wynikające z niedokładności modelu wysokościowego UAV oraz generalizacji modelu wysokościowego ISOK.

Dodatkowo w celu lepszego zobrazowania wyznaczonych wartości wykonano profil (rys. 3c i 3d) dla budynku górnej stacji kolejki linowej na Kasprowy Wierch. Na profilu widoczne są wyraźne różnice między modelami wysokościowymi w oparciu o dane UAV oraz ISOK. Na połaciach różnice wahają się między -10 cm a -20 cm, natomiast w pobliżach krawędzi dachu różnice są mocno zaburzone i wynoszą od -60 cm do +10 cm

Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku

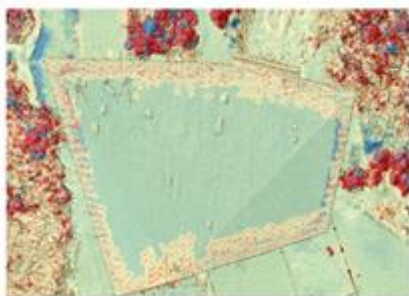
Porównanie UAV - ISOK NMPT



ortofotomapa UAV 2017



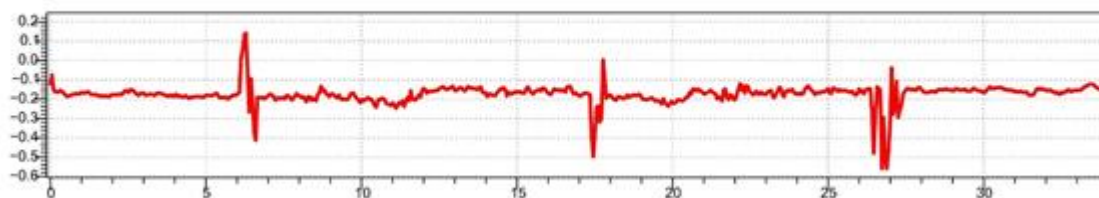
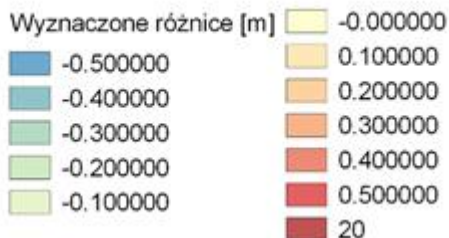
a) budynek Hostelu Energetyk



b) stacja kolejki linowej Myślenickie Turnie



c) górna stacja kolejki linowej na Kasprowy Wierch; czerwoną linią zaznaczono profil przez budynek



d) różnice wysokości wzdłuż profilu dla modeli wysokościowych UAV i ISOK

Rysunek 3. Ocena dokładności względnej UAV – ISOK

7.1.5 Interpretacja wykrytych zmian przestrzennych na obszarze szlaków

Właściwa interpretacja wyników wymaga poprawnej charakterystyki produktów pozyskanych z wykorzystaniem obu metod. Należy pamiętać, że dane z lotniczego skanowania laserowego uzyskane w ramach projektu ISOK w stosunku do danych pozyskanych z wykorzystaniem bezzałogowego statku latającego charakteryzują się:

- niższą rozdzielczością przestrzenną, w zależności od regionu od 0,3 m do 1,0 m, przez co produkty generowane na podstawie tych danych mogą charakteryzować się większym stopniem generalizacji ukształtowania terenu, a w szczególności takich obszarów jak koryta szlaków, pojedyncze głazy czy rynny erozyjne,
- niższą dokładnością przestrzenną, przez co dla poszczególnych obszarów może występować stałe przesunięcie pomiędzy zbiorami danych (patrz punkt 7.1.4), oraz
- wykorzystanie systemów laserowych (LiDAR) pozwala na wyznaczenie rzeczywistej wysokości terenu nawet w miejscach występowania wegetacji (model NMT).

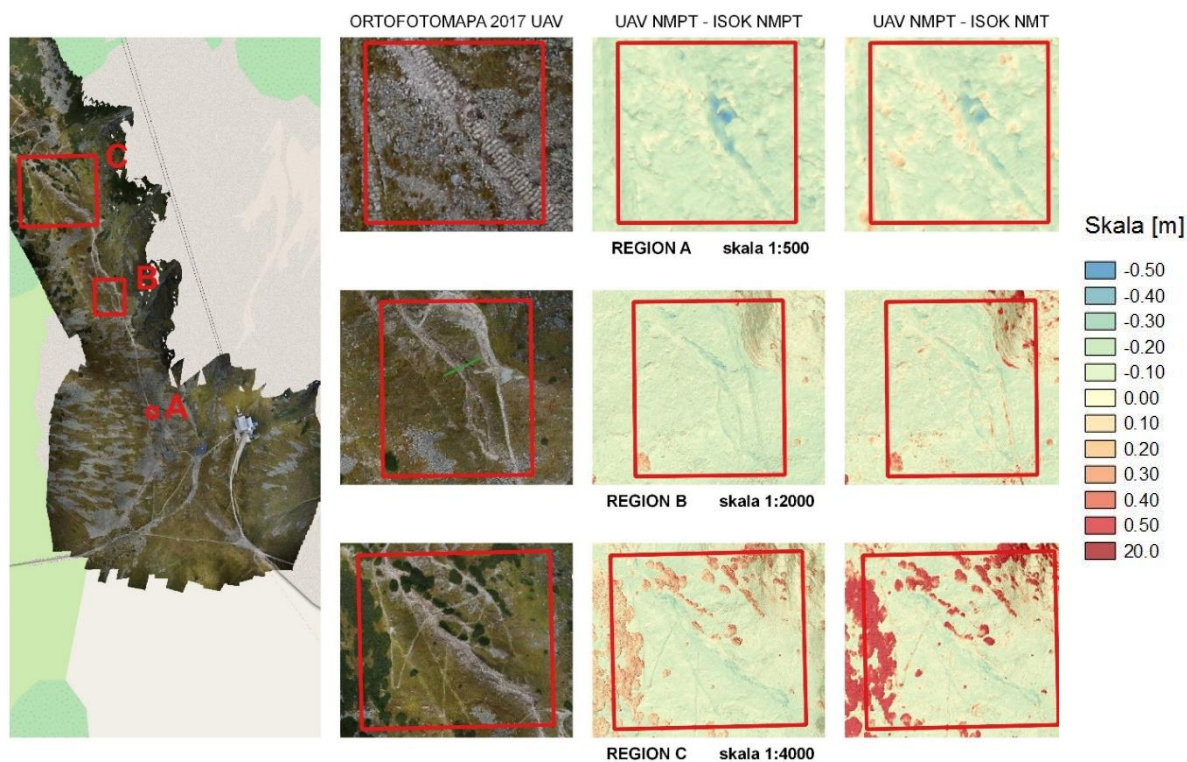
Z kolei modele wysokościowe wyznaczone na podstawie zdjęć pozyskanych z UAV charakteryzują się:

- bardzo dużą rozdzielczością przestrzenną (poniżej 5 cm), dzięki czemu pozwalają na odtworzenie ukształtowania powierzchni terenu nawet dla niewielkich obiektów np. pojedyncze głazy,
- występowaniem zaburzeń w miejscach dużych różnic wysokości takich jak drzewa czy krawędzie budynków, oraz ścian skalnych,
- pomiarowi podlega teren wraz z pokryciem (wegetacja, budynki itp.) w wyniku, czego opracowywany jest model pokrycia terenu, który zależy od chwilowego stanu wegetacji. W szczególności zmienna w czasie wysokość traw i krzewów w pobliżu szlaku może utrudniać interpretację uzyskiwanych wyników.

Dlatego właściwa interpretacja wyznaczanych różnic na obszarze szlaków turystycznych powinna polegać na zlokalizowaniu lokalnych zaburzeń wartości różnic i porównaniu ich z obrazem na wysokorozdzielczej ortofotomapie. Dzięki takiemu postępowaniu można określić przyczynę powstałych zmian lub stwierdzić, że związana jest ona z błędami pomiarowymi (np. turyści znajdujący się na szlaku w trakcie wykonywania pomiaru albo zmiana wysokości wegetacji).

Poniżej przedstawiono analizę porównawczą dla obszaru zielonego szlaku w pobliżu Kasprowego Wierchu. Na rysunku 4 zaprezentowano wyniki dla trzech regionów, w których zaobserwowano istotne zmiany erozyjne. Pokazują one wyraźnie, że zastosowane technologie pomiarowe i porównawcze pozwalają na wyznaczenie obszarów podlegających zintensyfikowanym procesom erozyjnym. Dodatkowo na rysunku 5 i 6 pokazano profil terenowy w obszarze B zaznaczonym na rysunku 4. Koryto szlaku zostało pogłębione, a różnice wysokości wynoszą nawet 40 cm.

Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku



Rysunek 4. Zmiany terenowe w okolicach Kasprowego Wierchu

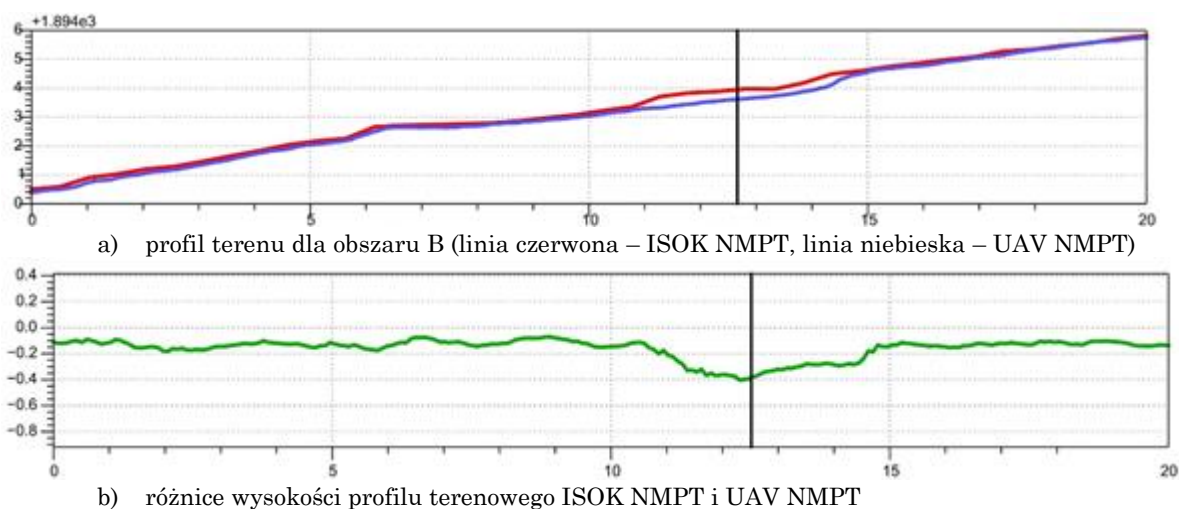


a) ortofotomapa – UAV 2017 r.



b) mapa różnic UAV 2017 r. – ISOK NMPT (skala barwna zgodna z rys. 4)

Rysunek 5. Linia profilu terenowego w okolicy Kasprowego Wierchu



Rysunek 6. Szczegółowa analiza ilościowa erozji szlaku dla obszaru B

7.2 WNIOSKI

Analiza chmur punktów oparta o zbiory danych charakteryzujące się różną dokładnością i rozdzielczością umożliwia interpretację zmian zachodzących w obrębie szlaków oraz wyznaczenie obszarów podlegających procesom erozji lub akumulacji.

Analiza map różnicowych wymaga wyznaczenia miejsc o lokalnie zaburzonych wartościach różnic. Miejsca te należy poddać dodatkowej analizie na wysokorozdzielczych ortofotomapach, aby wyeliminować czynniki mogące zaburzać wyniki analiz tj. przyrost wegetacji czy obecność turystów na szlaku w trakcie pomiaru.

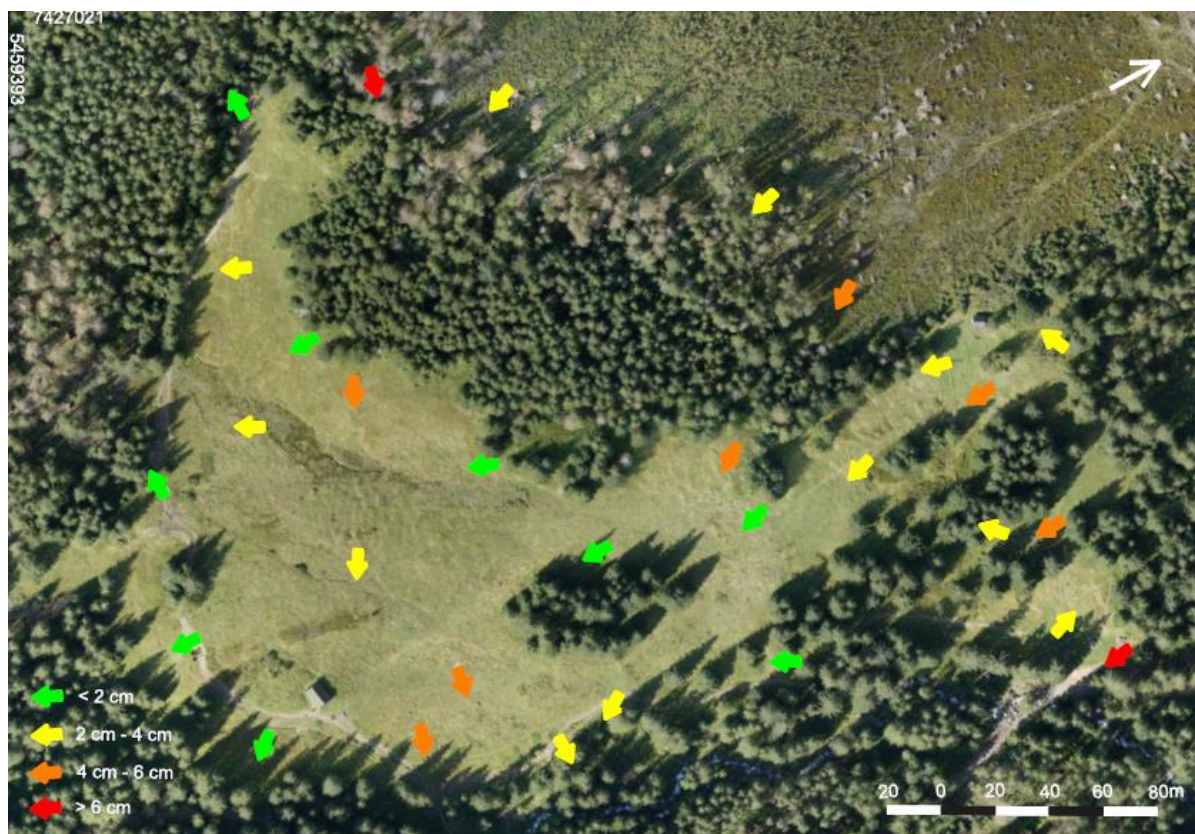
Przy wyznaczaniu ilościowych parametrów zmian należy pamiętać, że analizowane modele terenowe obciążone są błędem dokładności wyznaczenia pozycji bezwzględnej, co powoduje, że są one wzajemnie przesunięte o stałą wartość wynoszącą około -20 cm.

7.3 PORÓWNANIE DANYCH AKTUALNYCH (UAV) WZGLĘDEM DANYCH ARCHIWALNYCH (UAV)

Obszarem, który podlegał inwentaryzacji fotogrametrycznej przy użyciu zdjęć pozyskanych z pokładu UAV zarówno w roku 2016, jak i w roku 2017 był rejon Olczyskiej Polany. Dzięki temu możliwa była ewaluacja dokładności geometrycznej produktów fotogrametrycznych oraz ocena zmian naturalnych i antropogenicznych w obrębie wymienionego wyżej obszaru. Etap walidacji przydatności technologii pomiarowej w kontekście analizy wieloczasowej jest szczególnie istotny.

Pracę rozpoczęto od określenia dokładności geometrycznej ortofotomapy na podstawie różnic współrzędnych punktów znajdujących się na ortobrazach w obu epokach pomiarowych. Na potrzeby analizy zaadaptowano naturalne punkty, których położenie ze względu na charakter obiektów uznano za na najbardziej jednoznaczny i niezmienny w czasie. Zważywszy na niewielką liczbę obiektów antropogenicznych oraz różnice radiometryczne między obrazami spowodowane zmianami w oświetleniu wybór punktów kontrolnych nie był

trywialnym zadaniem. Były to głównie większe skały z identyfikowalnymi charakterystycznymi pęknięciami. W sumie odnaleziono 30 par punktów. Na podstawie wyznaczonych bezwzględnych różnic odległości między tymi punktami na ortofotomapie wykonanej w 2016 roku i 2017 roku obliczono błąd średniokwadratowy odchyłki liniowej, który wyniósł 4,3 cm. Na mapie (rys. 7) widać położenie punktów kontrolnych. Zwrot strzałek oznacza kierunek odchyłki w ujęciu chronologicznym, natomiast kolor moduł tej odchyłki. Największe odchyłki zaobserwowane zostały na granicy obszaru opracowania.



Rysunek 7. Odchyłki liniowe zaobserwowane między ortofotoobrazami z 2016 r. i 2017 r. – Polana Olczyńska

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że część odchyłek liniowych jest spowodowana przekształceniami terenu w czasie lub nierozróżnialnością punktów charakterystycznych na ortoobrazach. Oceniając jakość geometryczną produktu, stwierdzono wysoką dokładność. Należy przy tym zwrócić uwagę, że wyrównanie sieci zdjęć przeprowadzono, opierając się na fotopunktach pomierzonych techniką RTK GNSS, których dokładność wyznaczenia wynosi przeciętnie 3 cm. Dokładność produktów wygenerowanych dla analizowanego obszaru na podstawie nalotów UAV w 2017 r. oszacowano na 41 mm (por. tabela 3), natomiast dokładność produktów wygenerowanych na podstawie nalotów UAV w 2016 r. oszacowano na 38 mm. W związku z tym otrzymane odchyłki mieszczą się w granicach dokładności wyznaczenia różnic położenia analizowanych punktów na ortofotomapach z 2016 r. i 2017 r.

W kolejnym kroku przeanalizowano radiometrię uzyskanych ortoobrazów. Jakość radiometryczna ortoobrazów utrzymana została na akceptowalnym poziomie, odnosząc się do ogólnego celu badań. Największe znaczenie w tym przypadku mają warunki meteorologiczne i pora dnia. Ze względu na trudną dostępność rejonu badań i zmienne warunki

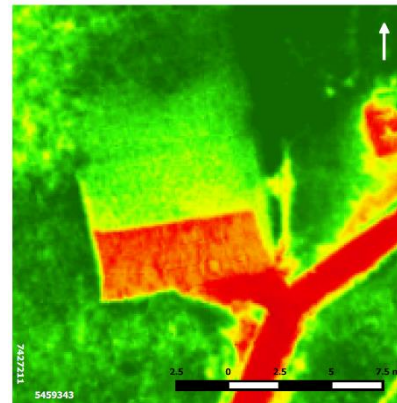
pogodowe dane pozyskiwane na potrzeby inwentaryzacji szlaków turystycznych są rejestrowane w różnych warunkach oświetleniowych. Korekcja radiometryczna zdjęć pozwala jednak na minimalizację wpływu zmiennej ekspozycji już w trakcie realizacji nalogu UAV, za pomocą oprogramowania kamery fotogrametrycznej. Pewne zniekształcenia związane głównie z balansem bieli nie mogą być całkowicie usunięte. Na załączonych rysunkach porównawczych (rys. 8 i 9) można zauważyć te różnice. Niemniej jednak, te rozbieżności nie stanowią przeszkody we właściwej interpretacji i analizie ortoobrazów.



Rysunek 8. Ortofotobraz – Polana Olczyska 2016 r.



Rysunek 9. Ortofotobraz – Polana Olczyska 2017 r.



Rysunek 10. Wskaźnik wegetacji NDVI – Polana Olczyska 2017 r.

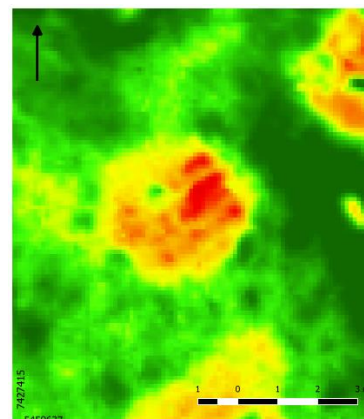
Przekształcenia terenu, które zaszły na obszarze objętym badaniami, mogą być bardzo łatwo zinwentaryzowane. Do najbardziej widocznych i zachodzących najszybciej należą przekształcenia antropogeniczne. W okresie pomiędzy pomiarem pierwotnym (2016 r.) i wtórnym (2017 r.) wyremontowana została część szlaku oraz regulacji uległ potok płynący wzdłuż niego. Na wykonanych w ramach zlecenia mapach (por. załącznik nr 6) z łatwością możemy zauważyć te zmiany. Należy zwrócić uwagę na rejon znajdujący się między ławką i szalaszem, gdyż zaszły tam relatywnie duże zmiany (rys. 8 i 9). Dla porównania umieszczono także mapę przedstawiającą wskaźnik wegetacji NDVI oparty na ortoobrazach pozyskanych podczas drugiej serii pomiarowej (rys. 10). Skala barwna dość dobrze wskazuje poziom intensywności wegetacji, jednak do części wyników należy podchodzić z większą ostrożnością. Widać błędną interpretację północnej połaci dachowej szalasu. Dzięki bardzo wysokiej rozdzielczości danych możliwa jest analiza czasowa przemieszczania się nawet pojedynczych skał. Warto także zauważyć pojawienie się nowej ławki w północnej części polany (rys. 11 i 12). Pojawienie się nowej infrastruktury potwierdzają też dane uzyskane w paśmie podczerwieni, użyte do obliczenia wskaźnika wegetacji (rys. 13). Wszystkie zmiany spowodowane działalnością człowieka zostały zinwentaryzowane i stanowią źródło wiedzy dla specjalistów w dziedzinie ochrony terenów naturalnych i zarządców obszaru.



Rysunek 11. Ortofotobraz – Polana Olczyska 2016 r.



Rysunek 12. Ortofotobraz – Polana Olczyska 2017 r.



Rysunek 13. Wskaźnik wegetacji NDVI – Polana Olczyska 2017 r.

Oprócz zmian antropogenicznych Olczyska Polana podlega także zmianom związanym z przekształceniami pokrywy roślinnej. Na obszarze Olczyskiej Polany można zauważyć stopniowe zarastanie starego szlaku (rys. 14 i 15). Na mapach widać wyraźnie, że ruch turystyczny przeniósł się na nowo wytyczony szlak. W przyszłości prognozuję się całkowite zarosnięcie nieużytkowanego szlaku. Zaproponowana technologia daje precyzyjne i szybkie narzędzie służące do analiz sukcesji roślinności, a także jej obumierania. Rozpatrując zakres opracowania, zauważamy wiele zmian tego typu. Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono obszar objęty wywózką drewna, silnie przekształcony przez działalność ludzką. Można zaobserwować, że roślinność stopniowo powraca w miejsca zniszczone przez ciężki sprzęt. Istotna jest także stopniowa sukcesja wyższej roślinności na terenie objętym wiatrolomami.



Rysunek 14. Ortofotobraz pozyskany przed remontem szlaku w 2016 r. – Polana Olczyska



Rysunek 15. Ortofotobraz pozyskany po remoncie szlaku w 2017 r. – Polana Olczyska

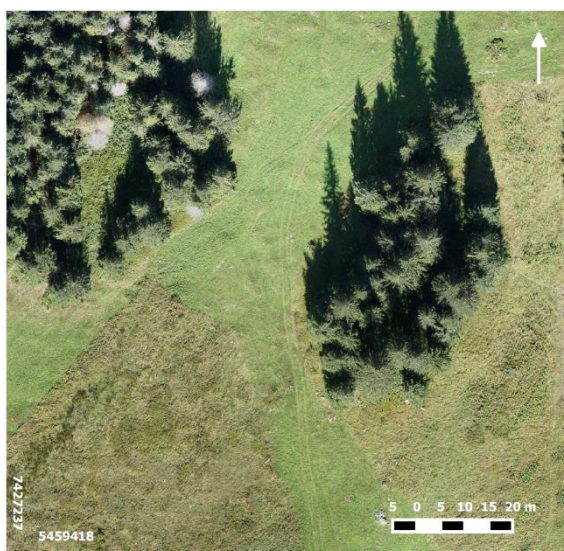


Rysunek 16. Ortofotobraz – Polana Olczyńska 2016 r.

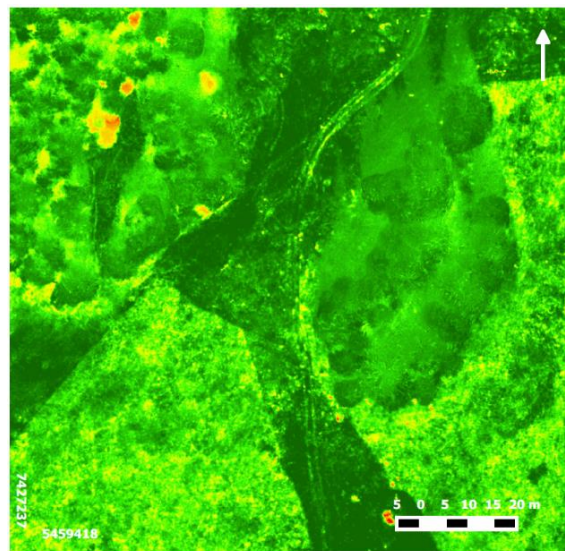


Rysunek 17. Ortofotobraz – Polana Olczyńska 2017 r.

W zagadnieniach dotyczących monitoringu środowiska cenne są informacje pochodzące z sensorów obrazujących w zakresie podczerwonym. Należy zwrócić uwagę, że metoda ze względu na wciąż postępującą miniaturyzację i popularyzację kamer wielospektralnych aplikowana jest także na platformach bezzałogowych. Monitoring za pomocą bliskiej podczerwieni dostarcza danych o aktualnym stanie roślinności. Celem projektu było sprawdzenie możliwości i ograniczeń tej technologii. Różnice w oświetleniu silnie wpływają na wiarygodność produktów opartych na podczerwieni. Jednak na terenach odkrytych metoda sprawdza się znakomicie. Na rysunku 18 przedstawiono częściowo skoszoną Polanę Olczyńską. Identyfikacja odrastającej trawy nie jest trudnym zadaniem, dzięki zastosowaniu indeksu roślinności (rys. 19). W ten sposób monitoring środowiska naturalnego staje się bardziej wydajny.



Rysunek 18. Ortofotobraz – Polana Olczyńska 2017 r.



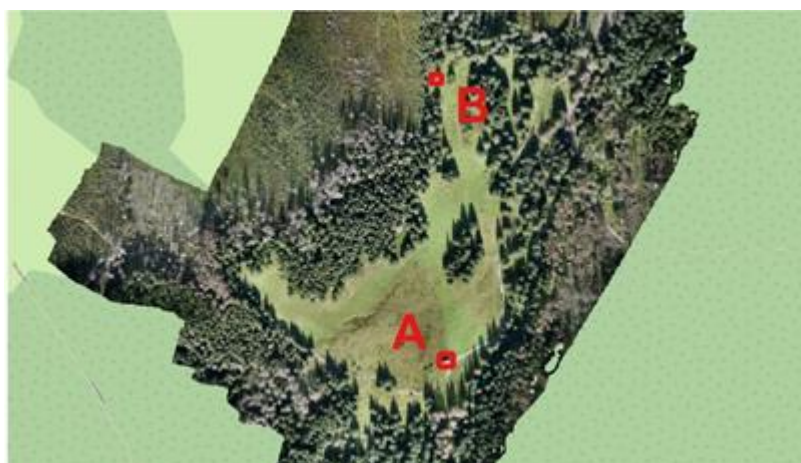
Rysunek 19. Wskaźnik roślinności NDVI – Polana Olczyńska 2017 r.

7.3.1 Porównanie aktualnych modeli wysokościowych (UAV) względem modeli archiwalnych (UAV)

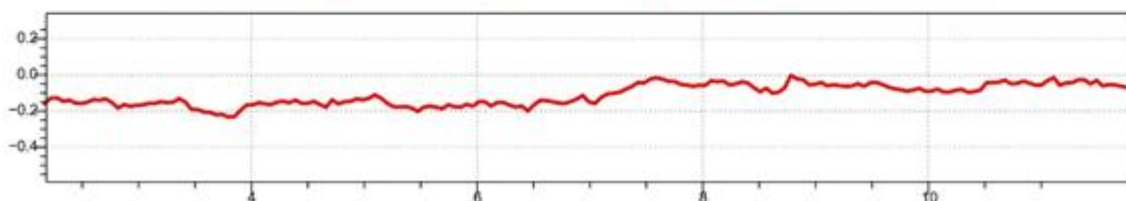
Jak wspomniano, obszar Olczyskiej Polany podlegał pracom pomiarowym w roku 2016, jak również w roku 2017. Dzięki temu możliwe było nie tylko porównanie pozyskanych ortobrazów, ale również wykonanie analiz porównawczych modeli wysokościowych pozyskanych z wykorzystaniem systemów bezzałogowych.

Omawiane analizy wykonano w programie QGIS 2.8.9. Porównano pozyskane w obu kampaniach warstwy rastrowe przedstawiające Numeryczny Model Pokrycia Terenu. Takie działanie było możliwe ze względu na fakt, że oba opracowania charakteryzowały się taką samą rozdzielczością przestrzenną.

W pierwszej kolejności przeanalizowano wyniki uzyskane na połaciach dachowych szałasów (rys. 20) w celu oszacowania dokładności pozyskanych materiałów. Ich wyniki (rys. 21 i 22) pokazują, że różnice pomiędzy kolejnymi epokami pomiarowymi wynoszą około -15 cm.

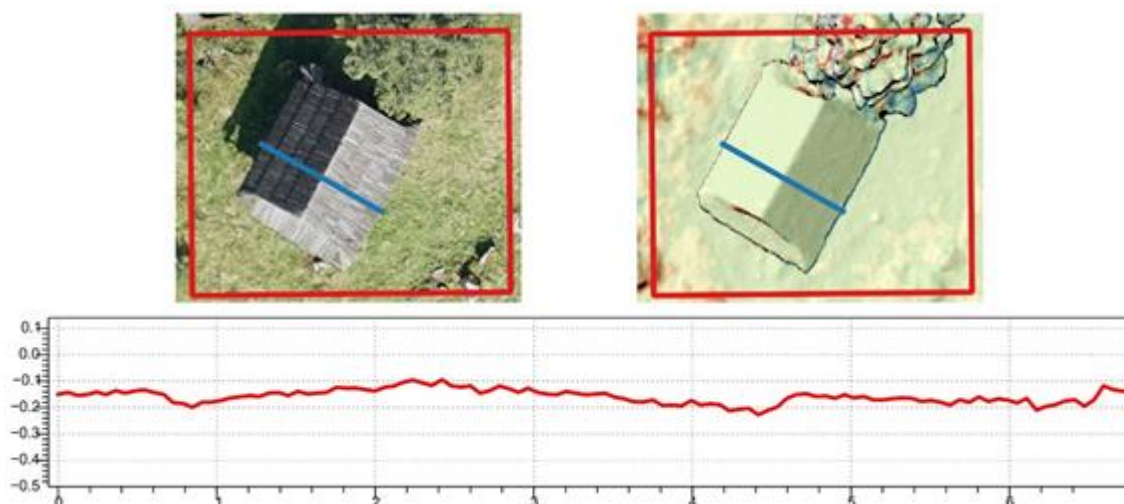


Rysunek 20. Rozmieszczenie szałasów na Olczyskiej Polanie



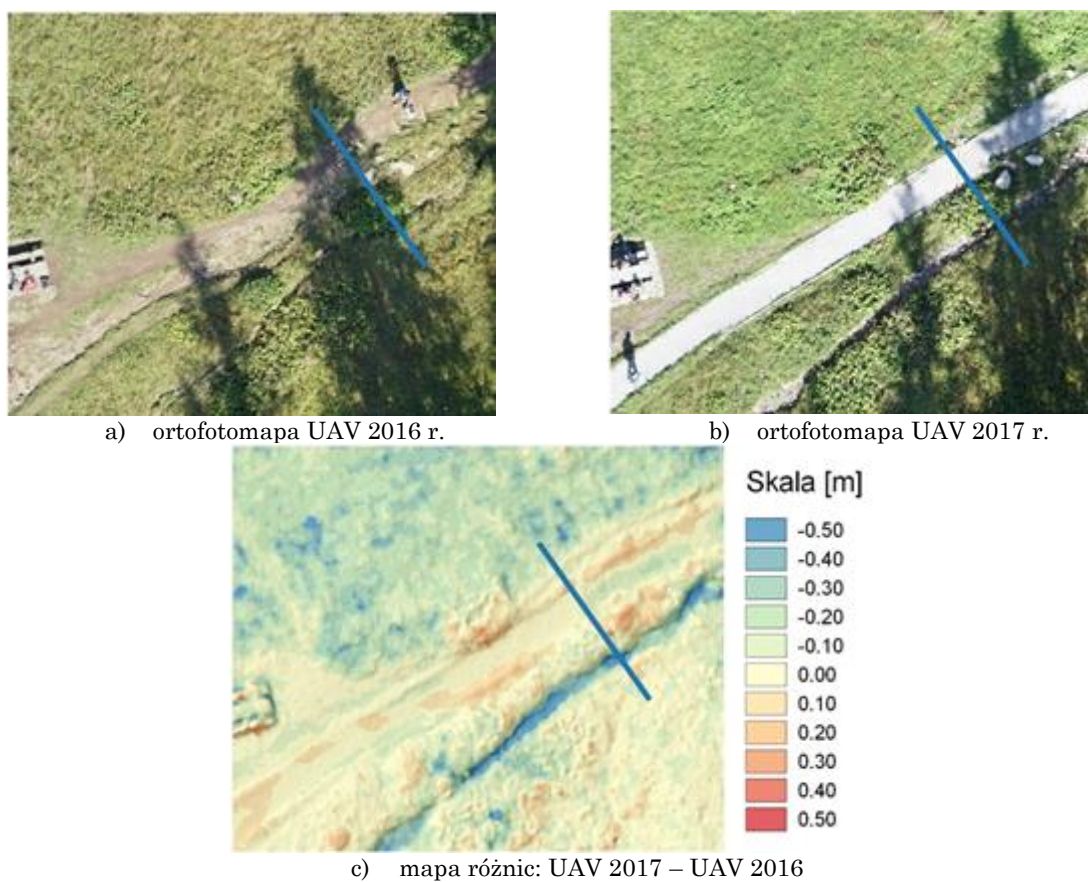
Rysunek 21. Ocena dokładności danych z UAV z 2016 r. i 2017 r. – szałas A

Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku



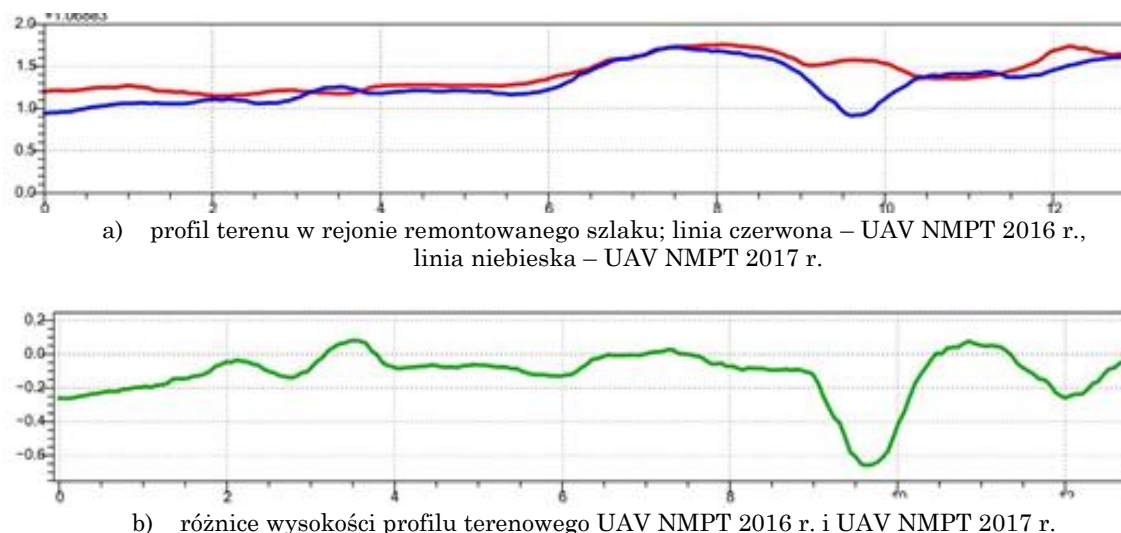
Rysunek 22. Ocena dokładności danych z UAV z 2016 r. i 2017 r. – szłaś B

Kolejne opracowania (rys. 23 i 24) pokazują przykłady szczegółowej analizy ilościowej zmian terenowych dla obszaru remontowanego szlaku. Na jej podstawie możemy zaobserwować, że w wyniku przeprowadzonego remontu powoli zaczynają pojawiać się procesy akumulacyjne na obszarze starego koryta szlaku oraz bardzo intensywne procesy erozyjne w rynnach wzdłuż nowego szlaku.



Rysunek 23. Analiza zmian ukształtowania terenu w rejonie remontowanego szlaku

Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku



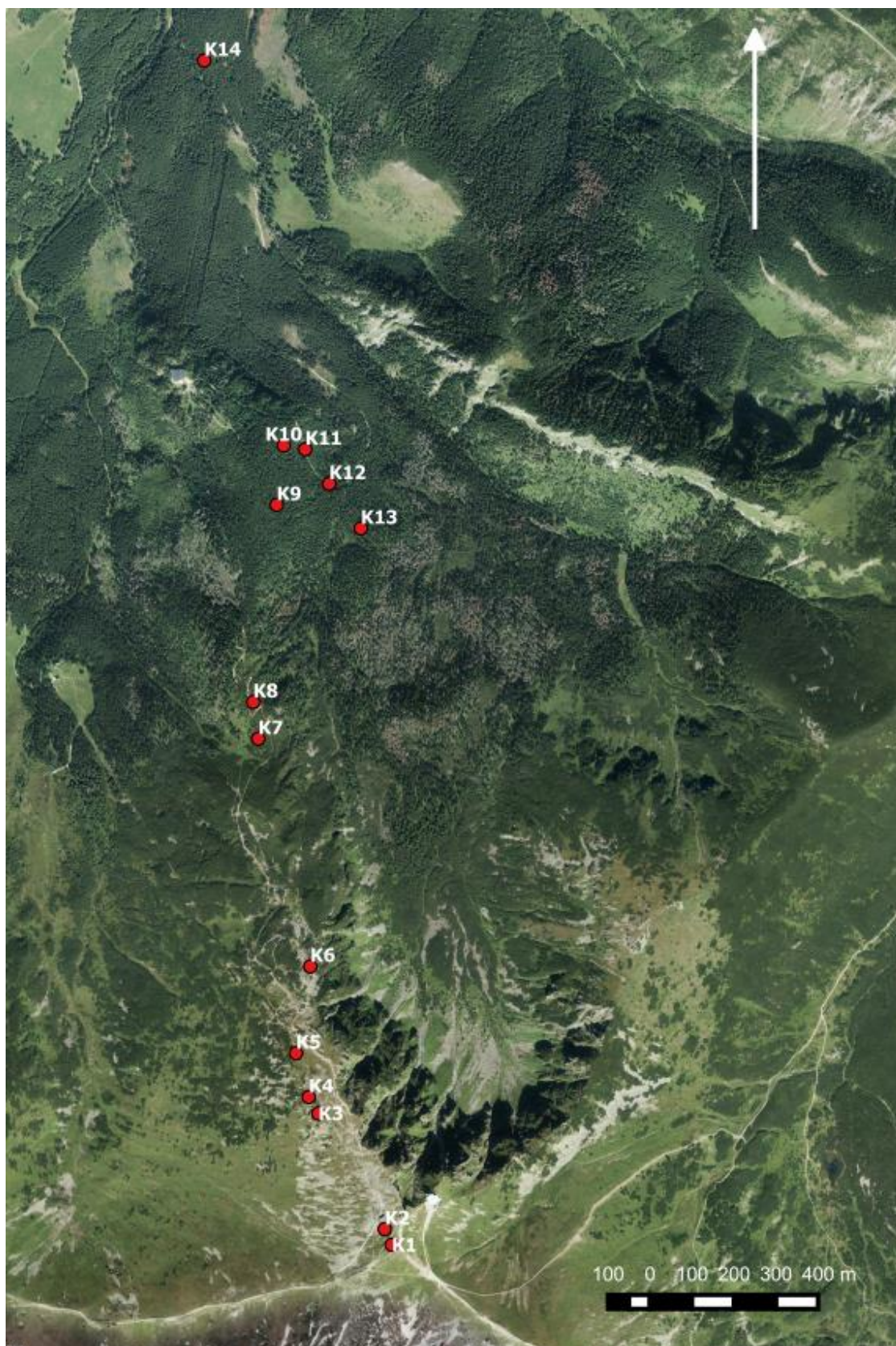
Rysunek 24. Szczegółowa analiza zmian ukształtowania terenu w rejonie remontowanego szlaku

7.4 PORÓWNANIE DANYCH AKTUALNYCH (UAV) WZGLĘDEM DANYCH AKTUALNYCH Z KARTOWANIA GEOMORFOLOGICZNEGO

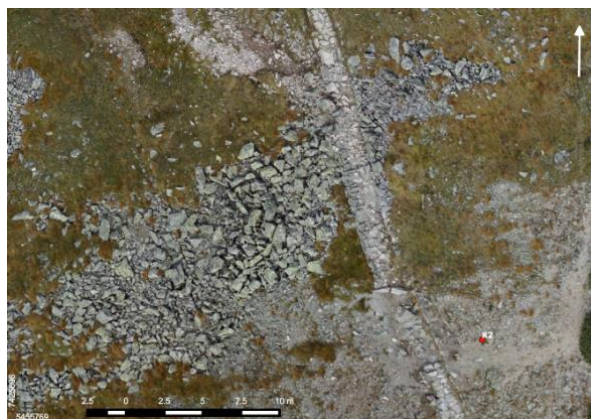
Punkty zaznaczone podczas kartowania geomorfologicznego zostały przedstawione na rysunku 25. Dzięki znajomości współrzędnych punktów zebranych w tabeli 1 (rozdz. 4.3) możliwe jest porównanie kartowania terenowego z wynikami otrzymanymi przy pomocy UAV. Łącznie skartowano 14 stanowisk terenowych lokalizujących w sposób przybliżony występowanie określonych form geomorfologicznych.

Możliwości porównawcze oględzin terenowych z danymi UAV są bardzo szerokie. Na rysunkach 26 i 27 przedstawiono przykładowe efekty takiej weryfikacji. W pierwszym przypadku zaprezentowano zaobserwowane w terenie gołoborze (punkt K2 w tab. 1). Dzięki wysokorozdzielczej ortofotomapie możliwa jest również identyfikacja tej formy. Na ortobrazie (rys. 26) widać wyraźnie, że luźne okruchy skalne nie są związane z podłożem, a także brak zastabilizowania pokryw przez roślinność. Takie zobrazowanie daje dużo bardziej szczegółowy obraz zachodzących zmian w terenie. Drugi przykład bazuje na NMPT wykonanym na podstawie zdjęć pozyskanych z pokładu UAV. W terenie oznaczono trzy ostańce podlegające procesom erozyjnym (punkt K6 w tab. 1). Uzyskane dane wysokościowe również pozwalają na identyfikację tej formy terenu. Na mapie (rys. 27) fioletowymi ramkami zaznaczone trzy wspomniane ostańce.

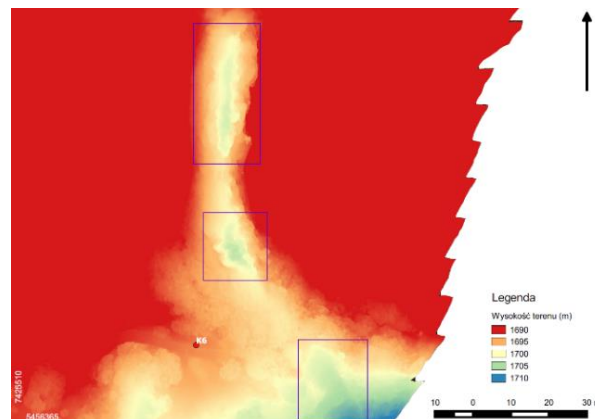
Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku



Rysunek 25. Szkic punktów charakterystycznych terenu pozyskanych podczas kartowania geomorfologicznego na podkładzie ortofotomapy Google Satellite – Kasprowy Wierch i Myślenickie Turnie



Rysunek 26. Ortofotobraz 2017 r. położenie punktu K2 kartowania geomorfologicznego – Kasprowy Wierch



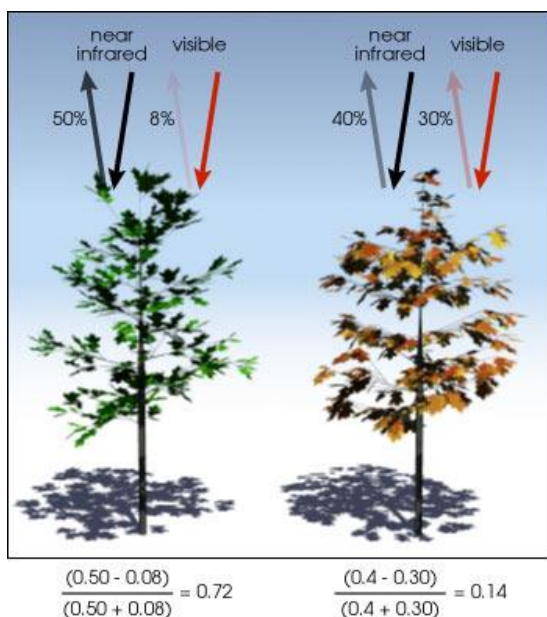
Rysunek 27. NMPT 2017 r. położenie punktu K6 kartowania geomorfologicznego – Kasprowy Wierch

8 OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POZYSKANYCH DANYCH DO INWENTARYZACJI TERENÓW ZALESIONYCH

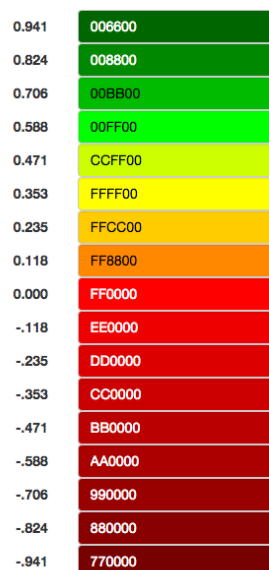
8.1 CHARAKTERYSTYKA ZNORMALIZOWANEGO RÓŻNICOWEGO WSKAŹNIKA WEGETACJI

Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI (ang. Normalized Difference Vegetation Index) jest to wskaźnik pozwalający określić stan rozwojowy, natężenie fotosyntezy, ilość biomasy oraz kondycję roślinności. NDVI bazuje na kontraście między największym odbiciem w paśmie bliskiej podczerwieni (NIR) a absorpcją w paśmie czerwonym (Red; rys. 28; równanie 1, rozdz. 5.3).

Rośliny zielone pochłaniają promieniowanie słoneczne w zakresie $0,4 \div 0,7 \mu\text{m}$. Promieniowanie o falach dłuższych ($0,7 \div 1,1 \mu\text{m}$) absorbowane jest w niewielkim stopniu. Wskaźnik na obszarach o bujnej i zdrowej roślinności przyjmuje wartości od 0,3 do 0,8 (rys. 29). Wartości w granicach $0,0 \div 0,3$ wskazują na bardzo słabą fotosyntezę, dlatego też łączy się je z roślinnością chorą, zaatakowaną przez szkodniki lub z niedoborem mikroelementów, głównie azotu. Wskaźnik przyjmujący wartość poniżej 0 to obszary bez roślinności lub z roślinnością martwą. Może być to np. posusz w lasach lub suche obszary trawiaste.



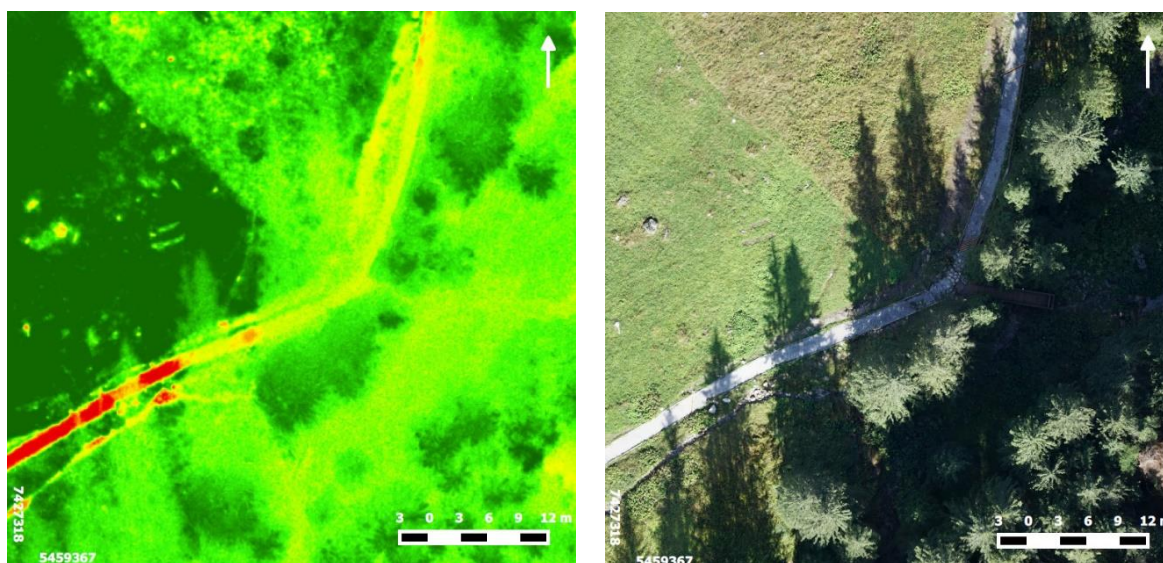
Rysunek 28. Sposób obliczania wskaźnika NDVI



Rysunek 29. Skala barwna dla wskaźnika NDVI, wspólna dla całego opracowania

Mimo że wskaźnik ten jest szeroko stosowany i jest niewątpliwie pomocny w określe-
niu kondycji roślinności ma niestety kilka wad.

Przy pozyskiwaniu materiału wejściowego bardzo ważne są warunki atmosferyczne. Najlepiej zdjęcia wykonywać przy jednolitym pokryciu chmurami, aby uniknąć przekła-
mań w odbiciu w obszarach zacienionych. Przykład takich przekłamań zaprezentowano
na rysunku 30. Jeżeli zdjęcia wykonuje się w słoneczny dzień warto planować naloty w mo-
mencie, kiedy słońce jest w najwyższym punkcie horyzontu. Dzięki temu ogranicza się
przekłamanie w obszarach silnie zacienionych lub nasłonecznionych.



a)

b)

Rysunek 30. a) Wskaźnik NDVI fragmentu obszaru opracowania (przekłamanie wskaźnika NDVI w miej-
scach zacienionych), b) Ortofotomapa w kolorach RGB dla tego samego fragmentu obszaru opracowania
(widoczne zacienione miejsca).

Stopień odbicia w przypadku gleb silnie zależy ich wilgotności. Im zawartość wody w glebie wyższa, tym współczynnik NDVI jest niższy. Im bardziej wilgotna gleba tym wyższe parowanie i ewapotranspiracja, która również zakłóca pomiar stopnia odbicia. Dlatego zdarza się na obszarach o bujnej roślinności, że wskaźnik przyjmuje niższe wartości niż wynikałoby to z procesów samej fotosyntezy.

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na pomiary jest efekt anizotropii. Każda powierzchnia czy to naturalna czy sztuczna odbija promienie w różnych kierunkach. Stopień anizotropii jest zależny od widma, nawet jeśli ogólna tendencja może być podobna w tych dwóch pasmach spektralnych (Red i NIR). W rezultacie wartość NDVI może zależeć od konkretnej anizotropii obiektu, a także od geometrii kątowej oświetlenia i obserwacji.

Ostatnim czynnikiem jest typ i czułość sensora kamery wielospektralnej. Ponieważ każdy sensor ma swoją własną charakterystykę i parametry, w szczególności w odniesieniu do położenia, szerokości i kształtu pasm widmowych, pojedyncza formuła, taka jak NDVI, daje różne wyniki pomiarów uzyskanych przez różne instrumenty.

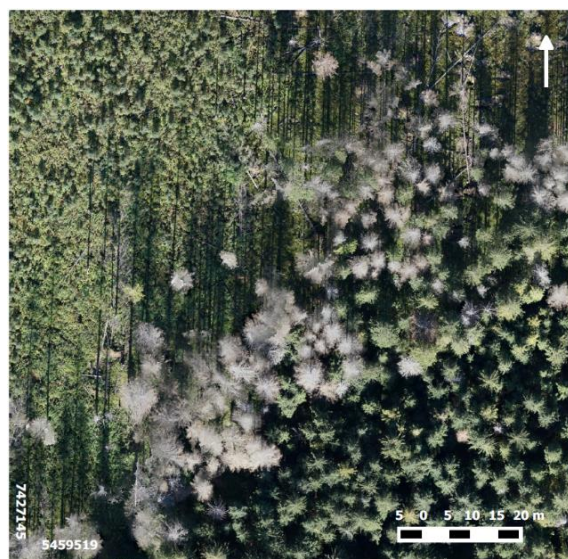
W celu minimalizacji lub wykluczenia wpływ wyżej wymienionych czynników przed każdą misją wykonywano kalibrację sensora. Kalibrację przeprowadzano osobno dla każdego widma oraz czujnika światła kamery wielospektralnej.

Dzięki pozyskaniu wysokorozdzielczych danych w paśmie światła widzialnego i podczerwonego możliwe jest monitorowanie środowiska naturalnego w bardziej wydajny sposób. Zastosowanie UAV do inwentaryzacji szlaków turystycznych i oceny stopnia erozji pozwala ocenić skuteczność prowadzonych prac naprawczych i profilaktycznych oraz stanowi narzędzie wspomagające przewidywanie zmian środowiskowych.

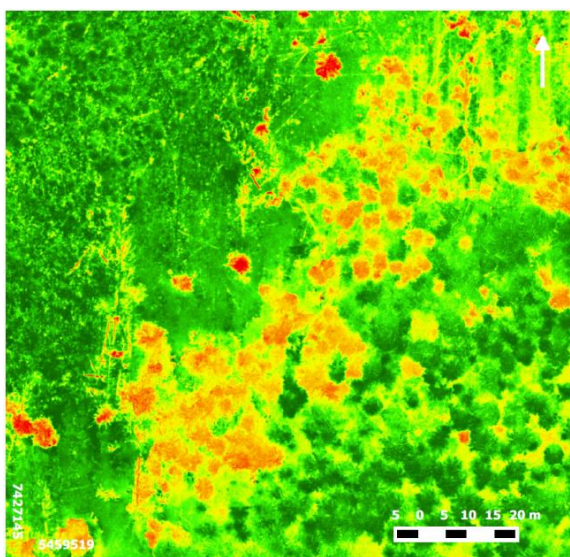
Porównanie danych z dwóch epok pomiarowych umożliwia ocenę zmian w zalesieniu obszaru. Na rysunkach 31 i 32 zidentyfikowano drzewa, których stan pogorszył się pomiędzy pomiarem pierwotnym (2016 r.), a wtórnym (2017 r.). Dane RGB są wsparte dodatkowo danymi pochodzącymi z kamery wielospektralnej. Pozwala to na utworzenie współczynnika wegetacji NDVI (rys. 33). Na rysunkach 31 i 32 można zaobserwować, że część drzew będących w 2016 roku w początkowej fazie obumierania, w roku 2017 jest całkowicie sucha. Dodatkowo część drzew widocznych na ortofotoobrazie pozyskanym podczas serii pierwotnej może być podejrzewana o zachodzące w nich zmiany na podstawie różnic kolorystycznych. Poprzez użycie metody *decorrelation stretching* możliwa jest identyfikacja zagrożonych części lasu (rys. 34).



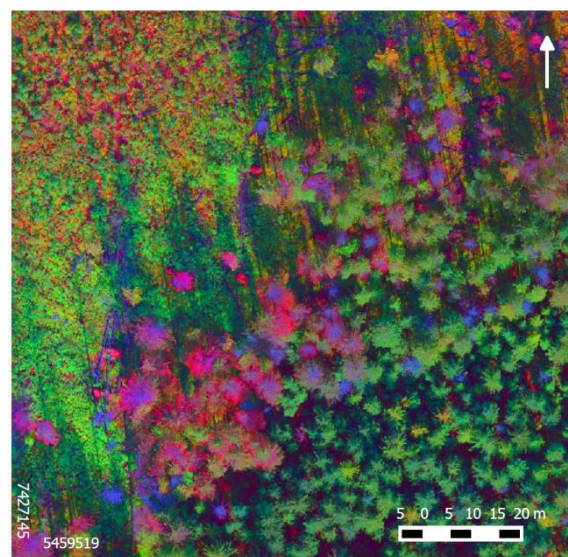
Rysunek 31. Ortofotobraz, stan drzew w 2016 r. – Polana Olczyska



Rysunek 32. Ortofotobraz, stan drzew w 2017 r. – Polana Olczyska

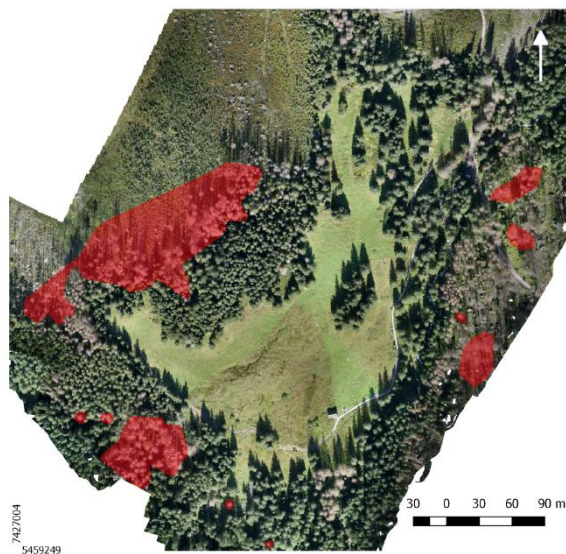


Rysunek 33. Wskaźnik wegetacji NDVI 2017 r. – Polana Olczyska

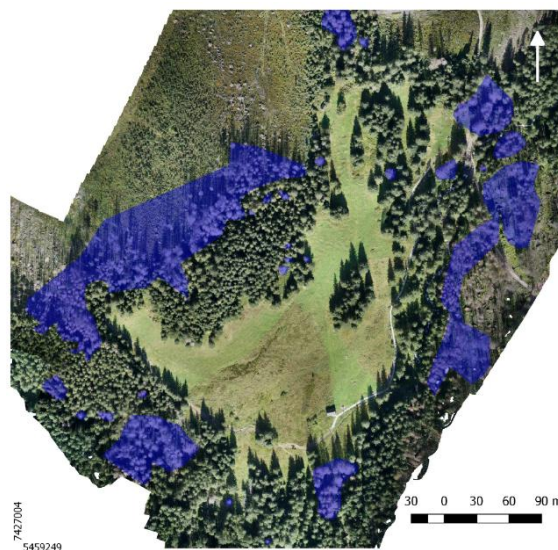


Rysunek 34. Decorrelation Stretching ortofobrazu RGB z 2016 r. – Polana Olczyska

Dokonano również ilościowej oceny obumierania drzew. Rozpoczęto od wektoryzacji obszarów jednoznacznie zidentyfikowanych na ortofotomapach RGB, jako tych objętych usychaniem. Na rysunkach 35 i 36 przedstawiają te obszary na podkładzie aktualnej ortofotomapy. Obliczono również pola powierzchni tych obszarów. Zakres obumierającego lasu powiększył się w roku 2017 względem roku 2016 o około 280% na obszarze Polany Olczyskiej.



Rysunek 35. Obszary objęte obumieraniem drzew w 2016 r. – Polana Olczyska



Rysunek 36. Obszary objęte obumieraniem drzew 2017 r. – Polana Olczyska

9 ZESTAWIENIE I OPIS UDOSTĘPNIONYCH MATERIAŁÓW

Integralną częścią raportu są załączniki udostępnione w wersji elektronicznej. Zestaw przekazanych materiałów obejmuje:

1. Załącznik nr 1 (G:\Załączniki\Załącznik nr 1_Plany lotów)

Załącznik nr 1 zawiera szkice z planami lotów bezzałogowego statku powietrznego, które zaprezentowano na podkładzie ortofotomapy pozyskanej za pomocą usługi WMS z serwisu mapy.geoportal.gov.pl. Na szkicach przedstawiono również projektowane rozmieszczenie fotopunktów.

2. Załącznik nr 2 (G:\Załączniki\Załącznik nr 2_Dane pomiarowe)

W załączniku nr 2 zamieszczono wszystkie surowe (nieprzetworzone) dane pomiarowe, które podzielono na trzy katalogi:

- GNSS – katalog zawiera pliki obserwacyjne wraz z niezbędnymi danymi do wykonania obliczeń GNSS,
- zdjęcia RGB – katalog zawiera zdjęcia wykonane w paśmie widzialnym (RGB) zarejestrowane z pokładu UAV dla całego obszaru opracowania oraz pliki tekstowe z przybliżonymi elementami orientacji zewnętrznej zdjęć (EOZ); dane w katalogu uporządkowano, dzieląc je na osobne zbiory danych dotyczące kolejnych obszarów opracowania:
 - Palenica Białczańska – Polana Rusinowa,
 - Wierch Poroniec – Polana Rusinowa,
 - Dolina Filipka – Polana Rusinowa,
 - Polana Rusinowa,

- Polana Rusinowa – Psia Trawka,
- Brzeziny – Psia Trawka,
- Psia Trawka – Murowaniec,
- Jaszczurówka – Olczyńska Polana,
- Olczyńska Polana,
- Kuźnice – Myślenickie Turnie,
- Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch,
- zdjęcia wielospektralne – katalog zawiera zdjęcia wielospektralne pozyskane z pokładu UAV; dane w katalogu uporządkowano, dzieląc je na osobne zbiory danych dotyczące następujących obszarów:
 - Jaszczurówka – Olczyńska Polana,
 - Olczyńska Polana,
 - Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch;
 zdjęcia w każdym katalogu odpowiadającym nazwie obszaru opracowania podzielono dodatkowo na osobne zbiory danych dla czterech zarejestrowanych kanałów spektralnych:
 - Green,
 - NIR,
 - Red,
 - RedEdge).

3. Załącznik nr 3 (G:\Załączniki\Załącznik nr 3_Raporty RTK GNSS)

W załączniku nr 3 zamieszczono raporty z pomiarów RTK GNSS, które obejmują:

- raporty z obliczeń współrzędnych stacji bazowych,
- dzienniki pomiarów RTK GNSS,
- ostateczny wykaz współrzędnych fotopunktów.

4. Załącznik nr 4 (G:\Załączniki\Załącznik nr 4_Projekty Agisoft Photoscan)

Załącznik nr 4 zawiera pliki projektów programu Agisoft PhotoScan z podziałem na rodzaj opracowywanych danych i obszar opracowania zgodnie ze schematem:

- Zdjęcia RGB:
 - Tatry Wysokie – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszarów:
 - Palenica Białczańska – Polana Rusinowa (z Polaną Rusinową włącznie),
 - Wierch Poroniec – Polana Rusinowa,
 - Dolina Filipka – Polana Rusinowa,
 - Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.I,
 - Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.II,
 - Brzeziny – Psia Trawka,
 - Psia Trawka – Murowaniec,
 - Olczyńska Polana – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszarów:
 - Jaszczurówka-Olczyńska Polana (z Olczyńską Polaną włącznie),
 - Kasprowy Wierch – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszarów:
 - Kuźnice-Myślenickie Turnie,
 - Myślenickie Turnie-Kasprowy Wierch,
- Zdjęcia wielospektralne:

- Jaszczurówka – Olczyńska Polana – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszaru zgodnego z nazwą katalogu,
- Olczyńska Polana – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszaru zgodnego z nazwą katalogu,
- Myślenickie Turnie-Kasprowy Wierch – katalog obejmuje projekt, w którym opracowane są dane dla obszaru zgodnego z nazwą katalogu.

5. Załącznik nr 5 (G:\Załączniki\Załącznik nr 5_Raporty Agisoft Photoscan)

W załączniku nr 5 znajdują się raporty z obliczeń wykonanych w programie Agisoft PhotoScan. Załączone dokumenty zostały podzielone na dwa katalogi:

- Zdjęcia RGB, w którym zamieszczono raporty z opracowania zdjęć wykonanych w paśmie widzialnym (RGB) z podziałem na obszary:
 - Palenica Białczańska – Polana Rusinowa (z Polaną Rusinową włącznie),
 - Wierch Poroniec – Polana Rusinowa,
 - Dolina Filipka – Polana Rusinowa,
 - Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.I,
 - Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.II,
 - Brzeziny – Psia Trawka,
 - Psia Trawka – Murowaniec,
 - Jaszczurówka – Olczyńska Polana (z Olczyńską Polaną włącznie),
 - Kuźnice – Myślenickie Turnie,
 - Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch,
- Zdjęcia wielospektralne, w którym zamieszczono raporty z opracowania zdjęć wielospektralnych z podziałem na obszary:
 - Jaszczurówka – Olczyńska Polana,
 - Olczyńska Polana,
 - Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch.

6. Załącznik nr 6 (G:\Załączniki\Załącznik nr 6_Pliki wynikowe)

Pliki wynikowe z przeprowadzonych analiz zamieszczono w załączniku nr 6. Struktura katalogu zakłada podział na części dotyczące obszarów opracowania, a w każdej z nich znajdują się katalogi z danymi zgodnie ze schematem:

- Palenica Białczańska-Polana Rusinowa:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
 - ISOK NMT_NMPT – Numeryczny Model Terenu i Numeryczny Model Pokrycia Terenu z danych ISOK,
 - UAV_ISOK porównania – porównania produktów pozyskanych z UAV i ALS w formie rastrowej,
- Wierch Poroniec – Polana Rusinowa:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Dolina Filipka – Polana Rusinowa:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,

- UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
- UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.I:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Polana Rusinowa – Psia Trawka_cz.II:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Brzeziny – Psia Trawka:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Psia Trawka – Murowaniec:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
- Jaszczurówka – Olczyńska Polana:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
 - UAV NDVI – ortofotomapa ze wskaźnikiem NDVI wykonana na podstawie zdjęć wielospektralnych z UAV,
 - ISOK NMT_NMPT – Numeryczny Model Terenu i Numeryczny Model Pokrycia Terenu z danych ISOK,
 - UAV 2016_2017 porównania – porównania produktów pozyskanych z UAV w 2016 r. i 2017 r. w formie rastrowej,
- Kuźnice – Myślenickie Turnie:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
 - ISOK NMT_NMPT – Numeryczny Model Terenu i Numeryczny Model Pokrycia Terenu z danych ISOK,
 - UAV_ISOK porównania – porównania produktów pozyskanych z UAV i ALS w formie rastrowej,
- Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch:
 - UAV chmury punktów – chmury punktów z UAV w formacie *.las,
 - UAV NMPT – Numeryczny Model Pokrycia Terenu wykonany na podstawie danych z UAV,
 - UAV ortofotomapa – ortofotomapa pozyskana z UAV,
 - UAV NDVI – ortofotomapa ze wskaźnikiem NDVI wykonana na podstawie zdjęć wielospektralnych z UAV,

Projekt sfinansowany ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku

- ISOK NMT_NMPT – Numeryczny Model Terenu i Numeryczny Model Pokrycia Terenu z danych ISOK,
- UAV_ISOK porównania – porównania produktów pozyskanych z UAV i ALS w formie rastrowej.