INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

No II/1/2018, POLISH ACADEMY OF SCIENCES, Cracow Branch, pp. 377-392
Commission of Technical Rural Infrastructure

DOI: https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2018.2.1.025

OCENA PRZYDATNOŚCI BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW LATAJĄCYCH DO KONTROLI PROCESÓW EROZYJNYCH WZDŁUŻ SZLAKÓW TURYSTYCZNYCH W ASPEKCIE KARTOWANIA GEOMORFOLOGICZNEGO

Paweł Ćwiąkała, Rafał Kocierz, Edyta Puniach, Stanisław Szombara, Michał Nędzka, Dawid Mrocheń, Witold Niewiem, Paweł Wiącek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

ASSESSMENT OF THE USEFULNESS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO INSPECTION OF EROSIVE PROCESSES ALONG TOURIST TRAILS IN TERMS OF GEOMORPHOLOGICAL MAPPING

Streszczenie

Niniejszy artykuł jest próbą określenia przydatności bezzałogowych statków latających (BSL) do opracowań geomorfologicznych. Badania przeprowadzono w Tatrzańskim Parku Narodowym (zielony szlak z Myślenickich Turni na Kasprowy Wierch). Jest to obszar, na którym procesy morfogenetyczne zachodzą z duża intensywnością. Efektem są liczne formy erozyjne. Do pomiarów został użyty wielowirnikowiec wyposażony w niemetryczną kamerę światła widzialnego. Pozyskane dane wykorzystano do wygenerowania wysokorozdzielczej ortofotomapy oraz numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT). W ramach prac terenowych przeprowadzono również kartowanie geomorfologiczne badanego obszaru. Na tej podstawie możliwa była ocena przydatności wygenerowanych NMPT do badań geomorfologicznych oraz ich korelacja z naziemnym kartowaniem geomorfologicznym. Opierając się na pozyska-

This is an open access article under the Creative Commons BY-NC-ND license
(http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/4.0/)

nych materiałach, podjęto próbę oceny skutków i intensywności erozji szlaków turystycznych w tej części Tatr. Do analiz wykorzystano wygenerowaną ortofotomapę i NMPT (dane aktualne) oraz dane archiwalne pochodzące z lotniczego skanowania laserowego przeprowadzonego w 2012 r. Interpretacja ww. materiałów pozwoliła stwierdzić, że produkty utworzone na podstawie danych pozyskanych z BSL są bardzo pomocne w opracowaniach geomorfologicznych. Korzystając z nich, można z dużą dokładnością określić stopień erozji na szlakach oraz ich zmiany przestrzenne, a także ocenić wizualnie i ilościowo stopień przekształceń terenu (m.in. określić objętości usuniętych pokryw zwietrzelinowych i materiału glebowego). Możliwe jest również wyciągnięcie wniosków o dalszym przebiegu procesów erozyjnych i wyznaczenie obszarów, które erozją mogą być objęte w niedalekiej przyszłości. To z kolei pozwoli na takie planowanie przebiegu szlaków oraz ich remontów, aby zminimalizować wpływ antropopresji spowodowany przez wzmożony ruch turystyczny.

Słowa kluczowe: bezzałogowe statki latające, fotogrametria niskopułapowa, erozja, kartowanie geomorfologiczne

Abstract

The paper is an attempt to determine the suitability of unmanned aerial vehicles (UAV) for geomorphological studies. The research was carried out in the Tatra National Park (green trail from Myślenickie Turnie to Kasprowy Wierch). Morphogenetic processes occur with high intensity in this area and give rise to numerous erosive form. A multirotor equipped with a non-metric visible light camera was used for measurements. The acquired data was used to generate a high resolution orthophotomap and a digital surface model (DSM). As part of the in-field data capture, geomorphological mapping of the research area was carried out as well. On this basis, it was possible to assess the suitability of the generated DSM for the geomorphological research. Moreover, the correlation between the DSM and the terrestrial geomorphological mapping is evaluated. In virtue of obtained data, effects and the intensity of tourist trails erosion were assessed in this part of the Tatra Mountains. The analysis involved the orthophotomap and the DSM (current data) as well as archival data from aerial laser scanning (ALS) conducted in 2012. Interpretation of above-mentioned results allowed to conclude that the data originating from UAV is very helpful in geomorphological studies. It is possible to determine the level of trails erosion and their spatial changes with high accuracy. Furthermore it allows to assess visually and quantitatively the extend of the land transformations (e.g. determine the volume of removed rock waste and soil). In conclusion, it

is also possible to prescribe the further course of erosion processes and identify areas that might be suffered by erosion in the near future. This in turn will allow to change trails planning strategy, in order to minimize the impact of anthropogenic effect caused by intensified tourist flows.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, low altitude photogrammetry, erosion, geomorphological mapping*

WSTĘP

Tatry Zachodnie zbudowane są głównie ze skał osadowych, wśród których dominują wapienie, dolomity, piaskowce, mułowce i łupki ilaste (Passendorfer 1978). Z racji swojej budowy geologicznej są szczególnie narażone na zjawiska erozyjne. Naturalne procesy morfogenetyczne, w połączeniu z silną antropopresją skutkują stopniową degradacją szlaków. Przekształcanie rzeźby związane jest z przebiegiem procesów sekularnych oraz ekstremalnych, które w bardzo krótkim czasie powodują przeobrażenie rzeźby i rozwój licznych nowych form zarówno erozyjnych, jak i akumulacyjnych (Gorczyca, Krzemień 2005). Najbardziej jest to widoczne w obrębie pięter leśnego i krioniwalnego. Procesy te mają charakter punktowy, liniowy lub powierzchniowy.

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 obnażania i rozluźniania podłoża, a więc ruchy masowe, spłukiwanie, 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 (Kotarba i in. 1987). Procesy antropopresji są silnie związane z ruchem turystycznym. Rozpoczynają się one od niszczenia roślinności, usuwania wierzchniej warstwy gleby i uruchamiania pokryw zwietrzelinowych. Obszar pozbawiony roślinności jest szczególnie wrażliwy na działanie sił morfogenetycznych. Dochodzi wtedy do rozluźniania i rozkruszania litej skały oraz przemieszczania grawitacyjnego rumoszu skalnego (Kotarba 1976; Migoń 2006; Fidelus 2008; Rączkowska, Kozłowska 2010). Wymienione wyżej procesy denudacyjne skutecznie powstrzymują dalszą sukcesję roślinności, co w konsekwencji przyczynia się do pogłębienia i poszerzania stref dróg i szlaków turystycznych i do dalszej ich de-

gradacji. Ponadto w strefach zniszczonej roślinności następuje zwielokrotnienie intensywności procesów denudacyjnych (Gorczyca 2000).

Procesy denudacyjne zachodzą z różną intensywnością w zależności od pór roku. Pierwszą porą, w której procesy te są najsilniejsze, jest pora niweopluwialna, czyli pora zanikania pokrywy śnieżnej. Drugim okresem intensyfikacji zjawisk jest czas nawalnych i intensywnych deszczy. W obydwu tych przedziałach czasowych 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 (Kłapa 1980). Częste przejścia temperatury przez 0°C powodują 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 znaczącym stopniu przyczyniają się do dalszego rozpadu materiału skalnego. Efektami tych przemian są pokrywy zwietrzelinowe, czyli luźne niezwiązane masy skalne. Wymienione wyżej procesy denudacyjne skutecznie powstrzymują także sukcesję roślinności, co w konsekwencji przyczynia się do pogłębienia i poszerzania stref dróg i szlaków turystycznych i do dalszej ich degradacji. Ponadto w strefach zniszczonej roślinności następuje zwielokrotnienie intensywności procesów denudacyjnych (Gorczyca 2000).

Tradycyjne metody badania zmian rzeźby terenu obejmują kartowanie geomorfologiczne z wykorzystaniem prostych technik pomiarowych (Fidelus 2008; Rączkowska, Kozłowska 2010; Fidelus 2012). Jednak jest to zajęcie bardzo czasochłonne, często realizowane tylko dla wybranych, niewielkich obszarów. Z kolei nowoczesne technologie pomiarowe (fotogrametria naziemna i lotnicza, naziemny i lotniczy skaning laserowy czy zobrazowania satelitarne) pozwalają monitorować zmiany na rozległych obszarach (Kaab 2002; Perroy i in. 2010). Ich wadą jest natomiast wysoka kosztochłonność. W ostatnim czasie coraz większą popularnością cieszą się bezzałogowe statki latające (BSL), które również umożliwiają pozyskiwanie danych przestrzennych. Ich przydatność do inwentaryzacji szlaków turystycznych w warunkach wysokogórskich potwierdzają badania zrealizowane w Tatrzańskim Parku Narodowym (TPN) (Ćwiąkała i in. 2017; Ćwiąkała i in. 2018).

Najważniejszym celem przedstawionych badań jest określenie przydatności BSL oraz generowanych na podstawie materiałów pomiarowych wysokorozdzielczych Numerycznych Modelów Porycia Terenu i/lub Numerycznych Modelów Terenu (NMPT/NMT) do badania stopnia erozji szlaków turystycznych w TPN w aspekcie kartowania geomorfologicznego.

MATERIAŁY I METODY

Badania zostały zrealizowane w Tatrzańskim Parku Narodowym we wrześniu 2017 roku. Inwentaryzacji poddano zielony szlak turystyczny o długości 6,4 km prowadzący z Kuźnic (1025 m n.p.m.) przez Myślenickie Turnie (1360 m n.p.m.) na szczyt Kasprowego Wierchu (1987 m n.p.m.). Rejon Kasprowego Wierchu należy do najczęściej odwiedzanych miejsc w TPN (Gorczyca, Krzemień 2002), co niewątpliwie przyczynia się do wzrostu intensywności procesów erozyjno-denudacyjnych czy akumulacyjnych. Ze względu na silną antropopresję i skomplikowana rzeźbę wzbudzał zainteresowanie badaczy w aspekcie wykorzystania nowoczesnych zdalnych technik pomiarowych (Wężyk i in. 2008).

Inwentaryzację szlaku w pasie 25 m po obu stronach wykonano metodą fotogrametryczną z bezzałogowego statku latającego. W tym celu wykorzystano 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 gimbala Zenmuse Z15-A7.

Plany lotów bezzałogowego statku powietrznego zostały dostosowane do charakteru obszaru opracowania przy uwzględnieniu występujących wzdłuż szlaków deniwelacji terenu. Dla poszczególnych odcinków projekty misji zakładały nalot w dwóch szeregach równoległych względem siebie i osi szlaku. W ten sposób zaprojektowano 5 misji o długościach od 3,0 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 BSL 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 BSL nigdy nie znalazł się poniżej wysokości punktu startu.

W trakcie prac terenowych, przed rozpoczęciem każdego zaprojektowanego nalotu BSL, należało wytyczyć, zamarkować oraz pomierzyć współrzędne przestrzenne fotopunktów w granicach obszaru objętego daną misją fotogrametryczną.

Pomiar fotopunktów (sztucznych i naturalnych) zrealizowano metodą RTK GNSS w nawiązaniu do jednej z własnych stacji bazowych, które zostały

tymczasowo ustawione: w Kuźnicach (przy dolnej stacji kolejki), na Myślenickich Turniach i na Kasprowym Wierchu. Do pomiaru wykorzystano odbiorniki Javad TRIUMPH-1. W sumie pomierzono 89 fotopunktów. Ich współrzędne wyznaczono w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych PL-2000 strefa 7 (PL-ETRF2000) oraz w układzie wysokości normalnych Kronsztad86 (PL--KRON86-NH) w oparciu o quasi geoidę niwelacyjną PL-geoid-2011. Dokładność wyznaczonych współrzędnych jest na poziomie 2-3 cm.

W trakcie pomiarów wykonano 1650 fotografii, które posłużyły do wyrównania bloków zdjęć. Ostateczne średniokwadratowe błędy współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej zestawiono w tabeli 1. Średnie wartości tych parametrów obliczone dla wszystkich misji wynoszą: m_x = 20 mm, m_y = 17 mm i m_h = 24 mm, co odpowiada błędowi położenia sytuacyjnego punktu m_{xy} = 26 mm i błędowi położenia przestrzennego m_{xyh} = 35 mm.

Tabela 1. Błędy współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej
Table 1. Errors of points coordinates of the photogrammetric control

Obszar	m_x [mm]	m_y [mm]	m_h [mm]	m_{xy} [mm]	m_{xyh} [mm]
1. Kuźnice – Myślenickie Turnie	17	15	21	22	31
2. Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	23	19	26	30	40

W dalszym etapie prac wygenerowano poszczególne produkty fotogrametryczne tj. gęstą chmurę punktów, NMPT oraz ortofotomapę, których podstawowe parametry zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry produktów wynikowych na podstawie zdjęć
Table 2. The parameters of final products generated on the basis of photographs

Obszar	Liczba punktów wiążących (*Tie Points*)	Liczebność chmury punktów	Rozmiar piksela ortofotomapy	Rozmiar siatki NMPT
1. Kuźnice – Myślenickie Turnie	587 015	809 605 131	20 mm	40 mm
2. Myślenickie Turnie – Kasprowy Wierch	1 510 834	1 039 351 322	15 mm	30 mm

Dane archiwalne wykorzystane podczas badań pochodzą z 2012 roku z projektu ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami. Materiały obejmują swoim zasięgiem cały park narodowy, w tym obszary objęte niniejszym opracowaniem. Pozyskane dane charakteryzują się błędem średnim wysokości punktów w przedziale do 0,2 m, a gęstość punktów

wynosi minimum 4 pkt/m^2 (wg Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej). Na podstawie otrzymanych chmur punktów wygenerowano dla obszarów opracowania NMPT oraz NMT (na podstawie klasyfikacji wykonanej przez CODGiK) w postaci rastrowej o rozdzielczości 35 cm. Wygenerowane produkty stanowiły dane wejściowe do dalszych opracowań.

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.

REZULTATY I WNIOSKI

Jednym z głównych celów prowadzonych prac było określenie stopnia przydatności BSL do oceny intensywności erozji szlaków turystycznych w aspekcie kartowania geomorfologicznego. W wyniku kartowania opisano łącznie 14 obszarów, na których zachodzi intensywna erozja lub jest duże potencjalne zagrożenie erozją w przyszłości. Rezultaty oraz rozmieszczenie stanowisk przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 1.

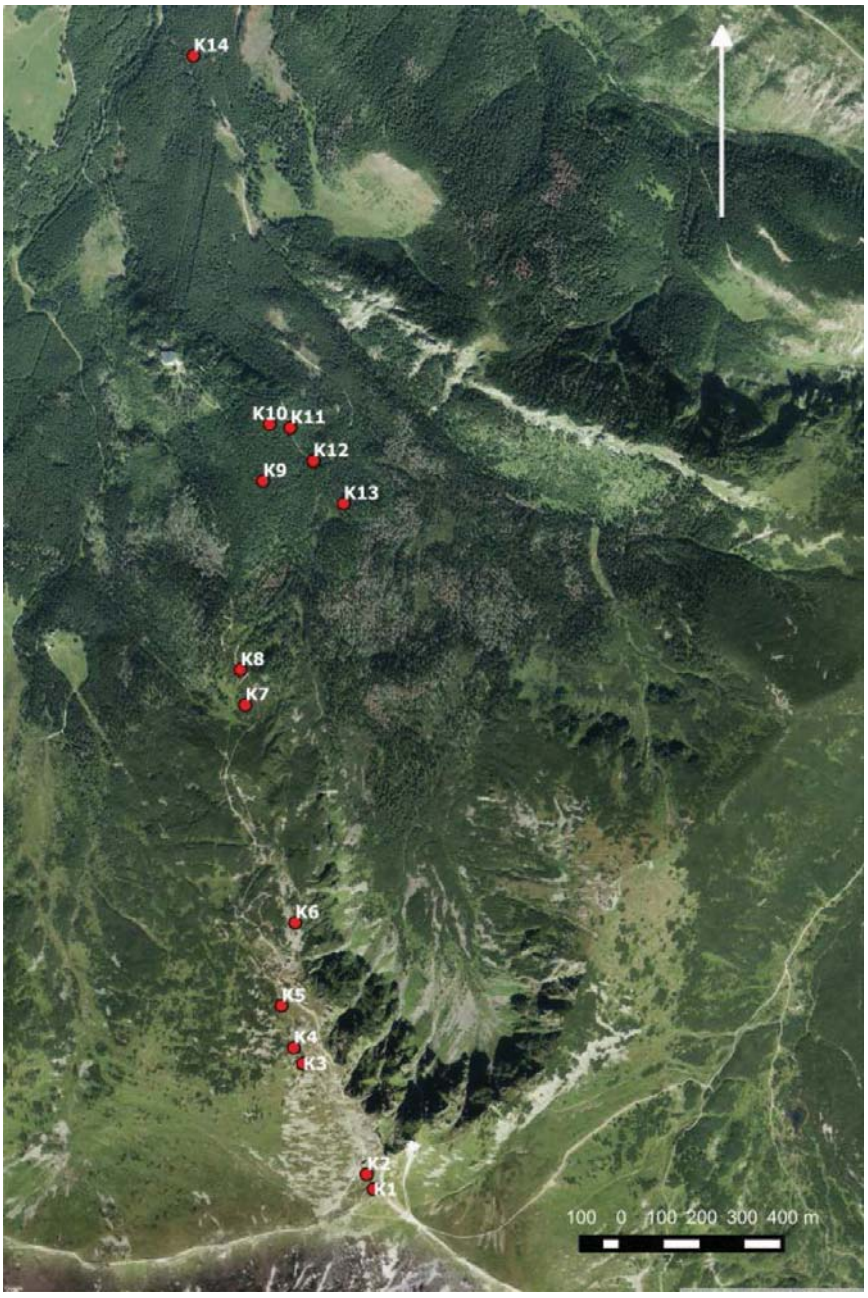
Tabela 3. Zestawienie obszarów objętych kartowaniem geomorfologicznym
Table 3. List of areas covered by geomorphological mapping

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.

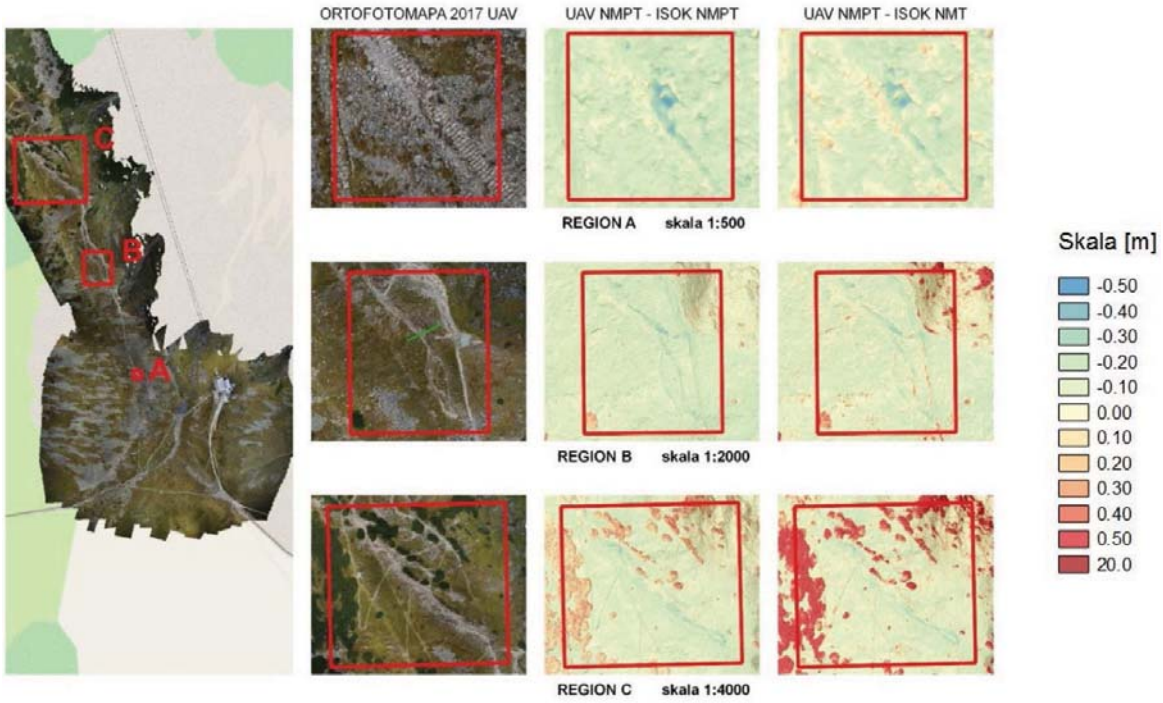
Symbol	Współrzędne	Opis procesów i form
K7	N49° 14,693’ E19° 58,557’	Bruzdy erozyjne, liczne luźne kamienie, intensywne procesy spłukiwania pokrywy glebowej, dawny skrót wydeptany przez turystów.
K8	N49° 14,740’ E19° 58,547’	Górna granica lasu, obszar, w którym zjawiska wietrzenia mrozowego, odpadania 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 cieku w bezpośredniej okolicy szlaku, widoczne intensywne wymywanie materiału i lepiszcza pokryw zwietrzelinowych. Duże niebezpieczeństwo uszkodzenia szlaku podczas nawalnych opadów deszczu.

Na odcinku od Kuźnic do Myślenickich Turni przeważają głównie powolne ruchy masowe (soliflukcja i spełzywanie), co jest doskonale widoczne po charakterystycznym łukowatym wygięciu drzew. Mimo, że spełzywanie pokryw nie zagraża bezpośrednio szlakom, istnieje zagrożenie, że w momencie wystąpienia nawalnych 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 cieku wodnego, co wiąże się z zagrożeniem podmywania brzegu i wymywania materiału glebowego i w efekcie może doprowadzić do osunięcia się pokryw. Na odcinku zielonego szlaku od Myślenickich Turni na Kasprowy Wierch przeważają gwałtowne procesy morfogenetyczne. Z racji tego, że szlak na tym odcinku przebiega powyżej górnej gra-

nicy 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 nawalnych opadów deszczu transportowane są okruchy skalne i materiał glebowy.



Rysunek 1. Lokalizacja stanowisk kartowania geomorfologicznego
Figure 1. Location of geomorphological mapping stations

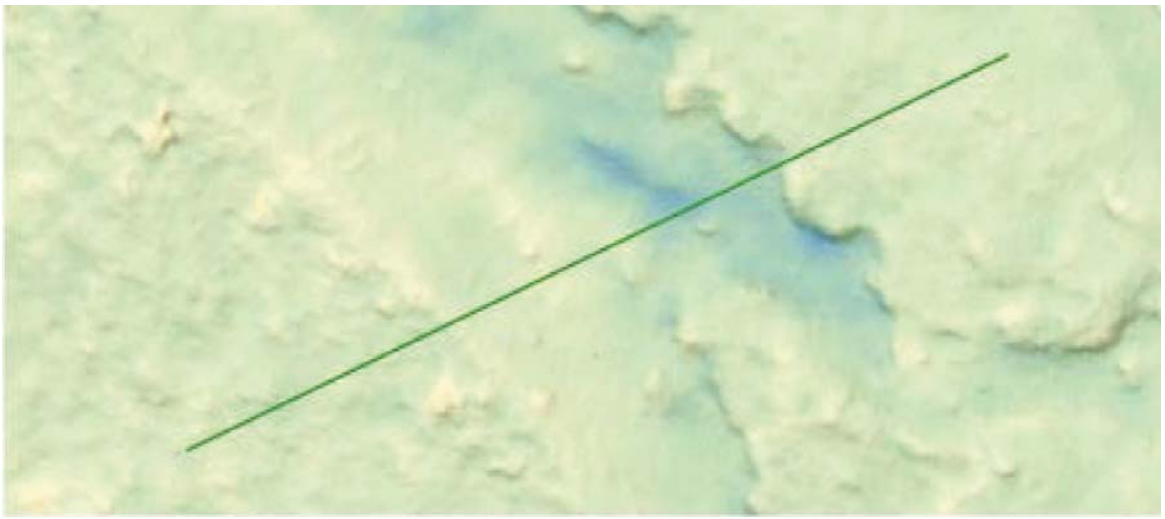


Rysunek 2. Zmiany rzeźby terenu w okolicach Kasprowego Wierchu
Figure 2. Changes in the relief in the vicinity of Kasprowy Wierch

Wyniki kartowania geomorfologicznego wykorzystano do sprawdzenia, czy produkty wygenerowane na podstawie danych pozyskanych z pokładu BSL mogą służyć do oceny intensywności erozji szlaków turystycznych. W tym celu wykorzystano wykonaną w ramach badań ortofotomapę oraz NMPT (dane aktualne), a także dane ISOK (dane archiwalne). Na ich podstawie opracowano mapy różnic ukształtowania terenu pomiędzy stanem aktualnym a archiwalnym. 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).

Na rysunku 2 zaprezentowano wyniki uzyskane dla trzech obszarów w pobliżu kopuły szczytowej Kasprowego Wierchu, 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 4a i 4b pokazano profil terenowy w obszarze B zaznaczonym na rysunku 3, który odpowiada obszarowi K3 w tabeli 3. Koryto szlaku zostało pogłębione, a różnice wysokości wynoszą nawet 40 cm.

a) ortofotomapa – BSL 2017 rok
a) orthophotomap – UAV 2017

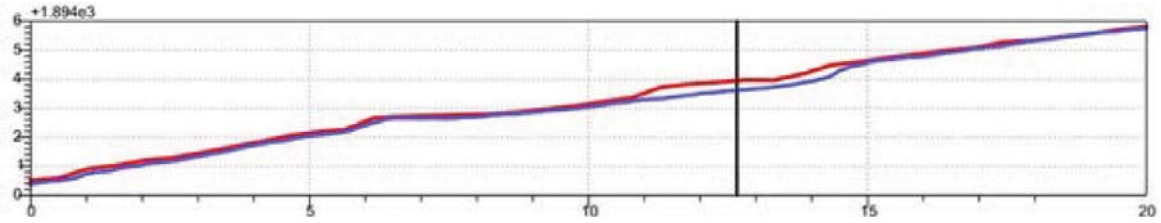


b) mapa różnic BSL 2017 rok – ISOK NMPT (skala barwna zgodna z Rysunkiem 2)
b) map of differences UAV 2017 – ISOK DTM (color scale according to Figure 2)

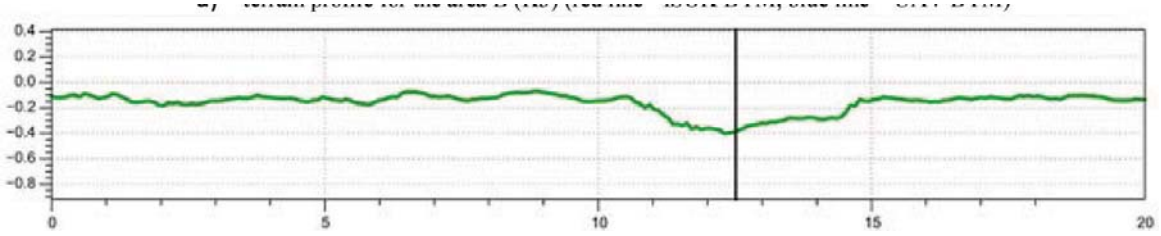
Rysunek 3. Profil terenowy dla obszaru B (K3)
Figure 3. Field profile for area B (K3)

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono kolejne przykłady zastosowania BSL w aspekcie wspomagania kartowania geomorfologicznego. Na rysunku 5 zaprezentowano gołoborze w rejonie szczytu Kasprowego Wierchu (obszar K2 w tabeli 3). Na ortoobrazie 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 (rysunek 6) prezentuje możliwość wykorzystania NMPT.

W terenie oznaczono trzy ostańce podlegające procesom erozyjnym (punkt K6 w tabeli 3). Uzyskane dane wysokościowe również pozwalają na identyfikację tej formy terenu.



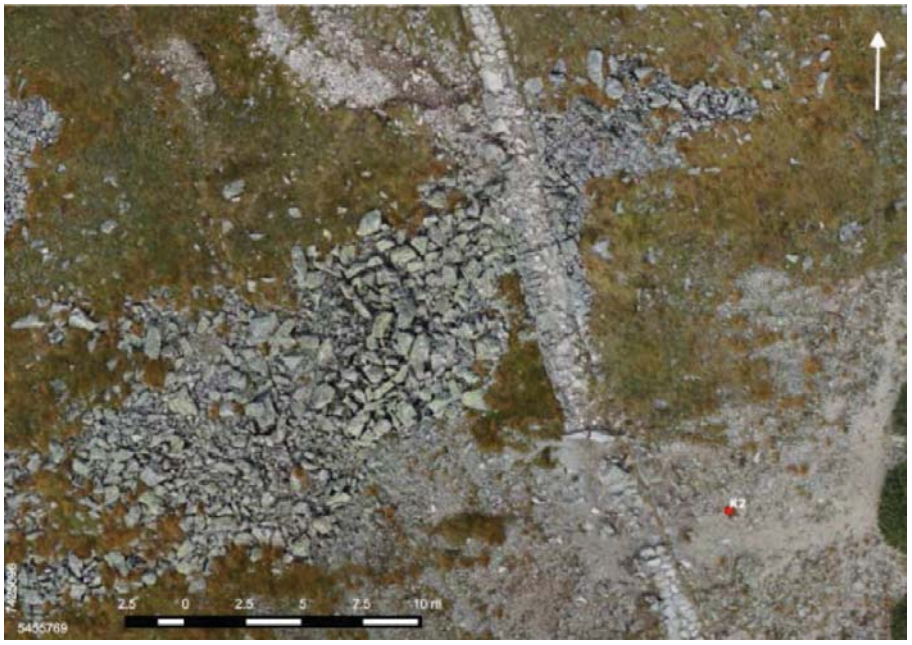
a) profil terenu dla obszaru B (K3) (linia czerwona – ISOK NMPT, linia niebieska – BSL NMPT)
a) terrain profile for the area B (K3) (red line – ISOK DTM, blue line – UAV DTM)



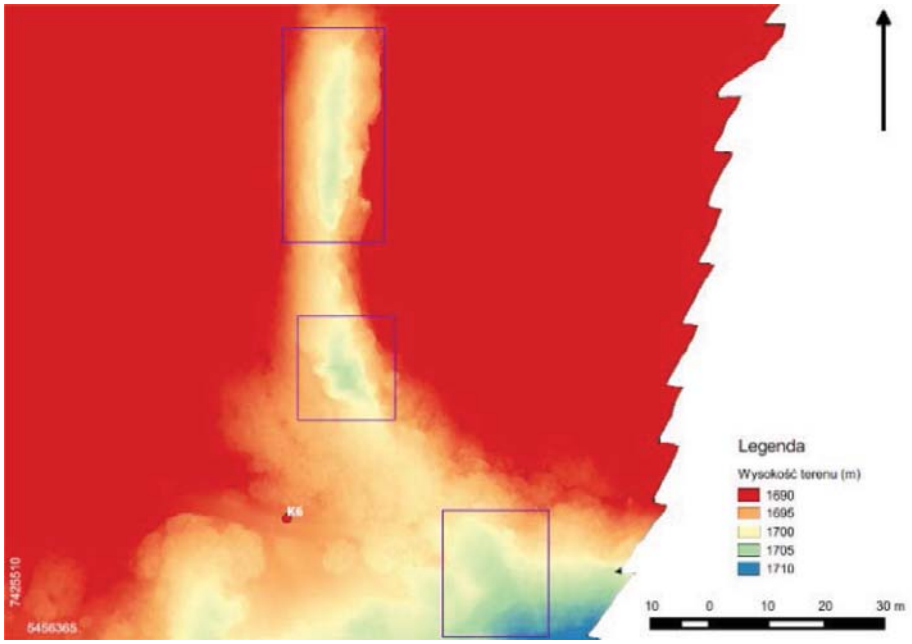
b) różnice wysokości profilu terenowego ISOK NMPT i BSL NMPT
b) height differences of the ISOK DTM and UAV DTM field profile

Rysunek 4. Ocena stopnia erozji szlaku w obszarze B (K3)
Figure 4. Assessment of the degree of erosion of the route in area B (K3)

Przedstawione przykłady wykorzystania produktów pozyskanych z pomiarów BSL wykazują ich dużą przydatność w pracach związanych z kartowaniem geomorfologicznym. Na ich podstawie jest możliwa wizualna oraz ilościowa ocena stopnia i przyczyn zjawisk erozyjnych w obrębie szlaków w obszarach zalesionych i niezalesionych. W oparciu o wygenerowane NMPT możliwe jest również szacunkowe określenie objętości usuniętego materiału glebowego. Dodatkowo na podstawie zdjęć lub ortoobrazu można śledzić zmiany przebiegu szlaków, zmiany szerokości, jak również ocenić potencjalne miejsca zagrożone erozją lub wymagające bieżących remontów. Należy jednak pamiętać, że wykorzystane dane archiwalne 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.



Rysunek 5. Ortofotoobraz 2017 r. położenie obszaru K2 kartowania geomorfologicznego – Kasprowy Wierch
Figure 5. Ortofoto picture of the 2017 location of the K2 area of geomorphological mapping – Kasprowy Wierch



Rysunek 6. NMPT 2017 r. położenie punktu K6 kartowania geomorfologicznego – Kasprowy Wierch
Figure 6. DTM 2017 location of point K6 of geomorphological mapping – Kasprowy Wierch

PODZIĘKOWANIA

Badania i publikacja zostały zrealizowane w ramach projektu "Ocena zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż szlaków turystycznych w zależności od stanu szlaków" sfinansowanego ze środków funduszu leśnego Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe przekazanych Tatrzańskiemu Parkowi Narodowemu w 2017 roku.

LITERATURA

Ćwiąkała, P., Kocierz, R., Puniach, E., Nędzka, M., Mamczarz, K., Niewiem, W., Wiącek, P. (2018). *Assesment of the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the documentation of hiking trails in alpines areas.* Sensors, 18(1): 1-28.

Ćwiąkała, P., Kocierz, R., Puniach, E., Nędzka, M., Mamczarz, K., Niewiem, W., Wiącek, P. (2017). *Documentation of hiking trails and wooden areas using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Tatra National Park.* Infrastructure and Ecology of Rural Areas, 4(2): 1545-1561.

Fidelus, J. (2008). *Skutki przekształceń antropogenicznych rzeźby w obrębie ścieżek i dróg turystycznych na wybranych obszarach Tatr Zachodnich*. Landform Analysis, 9: 276–279.

Fidelus, J., Rogowski, M. (2012). *Geomorfologiczne skutki turystycznego użytkowania grzbietów górskich na przykładzie ścieżek pieszych w Tatrach Zachodnich i górach Bucegi (Rumunia)*. Landform Analysis, 19: 29–40.

Gorczyca, Z. (2000). *Wpływ ruchu turystycznego na przekształcanie rzeźby wysokogórskiej na przykładzie masywu Czerwonych Wierchów i regli zakopiańskich (Tatry Zachodnie)*. Prace Geogr., Kraków: Instytut Geografii UJ, Kr (105): 369–389.

Gorczyca, E., Krzemień, K. (2002). *Wpływ ruchu turystycznego na rzeźbę Tatrzańskiego Parku Narodowego.* (w:) Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr, Kraków-Zakopane: TPN-PTPNoZ, 389, 393.

Gorczyca, E., Krzemień, K. (2005). *Wpływ turystyki pieszej na przekształcanie rzeźby Tatr* (w:) Domański B., Skiba S., (red.) Geografia i Sacrum, Kraków: IGiGP, 77-85.

Kaab, A. (2002). *Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air – and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data.* ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 57: 39-52.

Kłapa, M. (1980). *Morphogenetic processes and their connection with seasonal weather changes in the environment of Hala Gąsienicowa in the Tatra Mountains*. Wrocław: Zakład Narodowy im. Ossolińskich.

Kotarba, A. (1976). *Współczesne modelowanie węglanowych stoków wysokogórskich.* Prace Geogr. IGiPZ PAN.

Kotarba, A., Kaszowski, L., Krzemień, K. (1987). *High-mountain denudational system of the Polish Tatra Mountains*. Ossolineum: Wrocław.

Migoń, P. (2006). *Geomorphology*. Warszawa: PWN.

Passendorfer, E. (1978). *Rozwój poglądów na budowę geologiczną Tatr w okresie powojennym*. Pr. Muz. Ziemi, 28: 3-33.

Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A. (2010). *Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California.* Geomorphology, 118: 288-300.

Rączkowska, Z., Kozłowska, A. (2010). *Wpływ turystyki na rzeźbę i roślinność przy ścieżkach w otoczeniu Kasprowego Wierchu* (w:) Krzan Z., (red.) Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem, TPN-PTPNoZ Kraków-Zakopane, 3: 21–28.

Wężyk, P., Borowiec, N., Szombara, S., Wańczyk, R. (2008). *Generowanie numerycznych modeli powierzchni oraz terenu w tatrach na podstawie chmury punktów*. Arch. Fotogram. Kartogr. i Teledetekcji, 18: 651–661.

Autor do korespondencji: dr inż. Paweł Ćwiąkała
dr inż. Rafał Kocierz
dr inż. Edyta Puniach
mgr inż. Paweł Wiącek
AGH Akademia Górniczo Hutnicza
Katedra Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Tel. (+48) 12 617 44 86
Email: pawelcwi@agh.edu.pl
kocierz@agh.edu.pl
epuniach@agh.edu.pl
pwiacek@agh.edu.pl

dr inż. Stanisław Szombara
AGH Akademia Górniczo Hutnicza
Katedra Geodezji Zintegrowanej i Kartografii
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Tel. (+48) 12 617 23 05
Email: szombara@agh.edu.pl

mgr Michał Nędzka
AGH Akademia Górniczo Hutnicza
Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Tel. (+48) 12 617 22 61
Email: mnedzka@agh.edu.pl

mgr inż. Dawid Mrocheń
AGH Akademia Górniczo Hutnicza
Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Tel. (+48) 12 617 22 87
Email: dawid.mrochen@gmail.com

mgr inż. Witold Niewiem
AGH Akademia Górniczo Hutnicza
Katedra Geoinformatyki, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Tel. (+48) 12 617 38 26
Email: wniewiem@agh.edu.pl

Wpłynęło: 05.03.2018
Akceptowano do druku: 15.04.2018