

## **Analiza rzeźby stoliwa Szczelińca Wielkiego w Górach Stołowych na podstawie numerycznego modelu terenu z danych LiDAR**

*LiDAR DEM-based analysis of geomorphology of the Szczeliniec Wielki mesa  
in Poland's Stołowe Mountains*

**PIOTR MIGOŃ, MAREK KASPRZAK**

Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski  
50-137 Wrocław, pl. Uniwersytecki 1;  
piotr.migon@uni.wroc.pl, marek.kasprzak@uni.wroc.pl

**Zarys treści.** Szczeliniec Wielki w Górach Stołowych (Sudety Środkowe) jest unikatowym na obszarze Polski przykładem stoliwa zbudowanego z masywnych piaskowców zalegających na skałach drobnoziarnistych, znanym głównie z obecności „skalnego miasta” na powierzchni szczytowej. Rzeźba masywu Szczelińca odzwierciedla różne uwarunkowania litologiczne, związane z rodzajem skał i ich niejednakową wytrzymałością, oraz strukturalne, związane z obecnością powierzchni nieciągłości – uskoków, spękań oraz powierzchni warstwowania. W artykule opisano główne cechy rzeźby powierzchni szczytowej i stoków, ujawnione na cyfrowym modelu wysokości o dużej rozdzielczości pochodzącym z danych LiDAR. Pozwoliło to, wnioskując o procesach na podstawie wynikowych form, dokonać charakterystyki systemu morfogenetycznego Szczelińca Wielkiego i odtworzyć rozwój rzeźby w przeszłości.

**Słowa kluczowe:** rzeźba strukturalna, ruchy masowe, numeryczne modele wysokości, Góry Stołowe.

### **Wstęp**

Stoliwo Szczelińca Wielkiego w Górach Stołowych w Sudetach Środkowych jest geomorfologicznym unikatem w skali Polski, podobnie jak i Góry Stołowe są jedynym w Polsce przykładem rzeźby płytowej, powstałej na drodze morfologicznej ewolucji tektonicznie wydzwigniętej struktury płytowej. Najwyższy w tym paśmie masyw Szczelińca jest doskonałym, niemal podręcznikowym przykładem ilustrującym przebieg i zasady rozwoju rzeźby terenu w nawiązaniu do budowy geologicznej: struktury i litologii. Dumanowski (1961) uznał go za „miniaturę Gór Stołowych” i uważał, że większość problemów geomorfologicznych tego

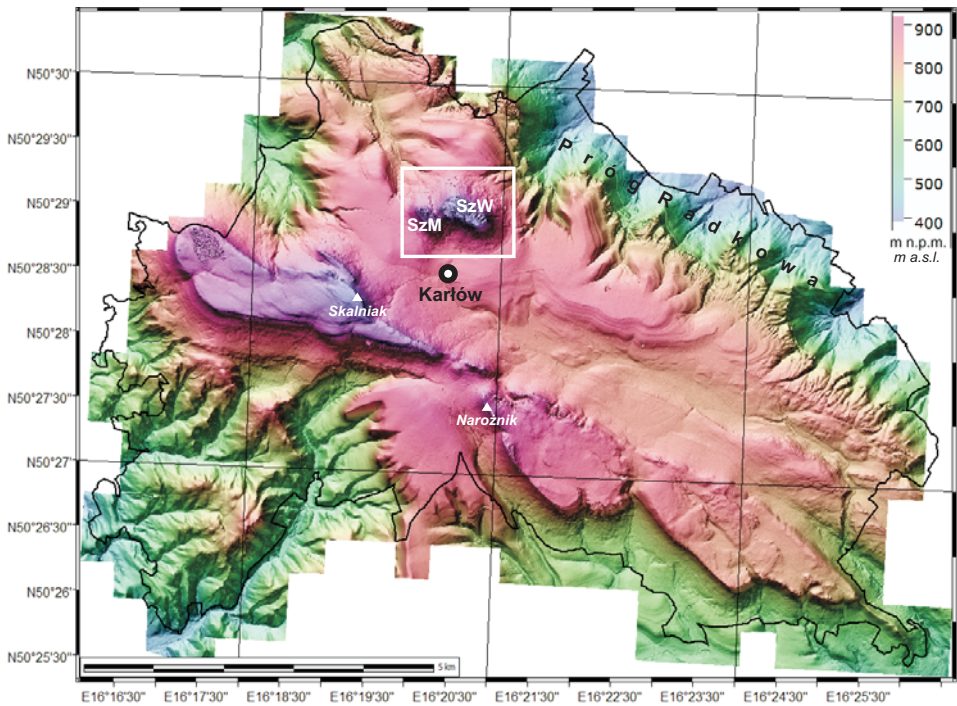
pasma można rozwiązać, prowadząc badania właśnie na Szczelińcu. Wyjątkowość Szczelińca Wielkiego sprawia, że stał się on wdzięcznym poligonem edukacyjnym dla nauk o Ziemi, jest też od ponad 200 lat jedną z największych atrakcji turystycznych ziemi kłodzkiej.

Morfologia i morfogeneza Szczelińca Wielkiego były kilkakrotnie w przeszłości przedmiotem studiów geomorfologicznych (Czeppe, 1949, 1952; Dumanowski, 1961; Pulinowa, 1989), ale z reguły studia te miały charakter cząstkowy i były prowadzone w ramach szerszych badań rzeźby całych Gór Stołowych. Brakowało kompleksowego opracowania geomorfologicznego tego unikatowego w skali Sudetów wzniesienia. Celem niniejszego artykułu jest częściowe wypełnienie tej luki, a impulsem do podjęcia badań było pozyskanie przez dyrekcję Parku Narodowego Gór Stołowych i udostępnienie do celów naukowych numerycznego modelu terenu o submetryjnej rozdzielczości oraz łatwa dostępność wielu algorytmów służących analizie rzeźby terenu w ramach Systemów Informacji Geograficznej. Pozwoliły one na spojrzenie na cechy morfologii masywu w sposób wcześniej niedostępny, bardziej obiektywny, zarówno w zakresie geomorfometrii, jak i możliwości wykonania kartowania terenowego. Analizy geomorfometryczne zostały uzupełnione badaniami terenowymi, a w niniejszym artykule najbardziej charakterystyczne elementy rzeźby stoliwa zilustrowano fotografiami naziemnymi.

### **Szczeliniec Wielki na tle Gór Stołowych**

Izolowane stoliwo Szczelińca Wielkiego jest położone w północno-zachodniej części Gór Stołowych, 2 km na północ od centrum Karłowa (fot. 1, ryc. 1). Podawana na mapie topograficznej Polski 1:10 000 wysokość jego kulminacji,





Ryc. 1. Główne rysy rzeźby Gór Stołowych – wizualizacja numerycznego modelu terenu (NMT) wykonanego na podstawie danych LiDAR. Białą ramką oznaczono obszar przedstawiony na ryc. 2. Czarną linią oznaczono granice Parku Narodowego Gór Stołowych; SzW – Szczeliniec Wielki, SzM – Szczeliniec Mały

Opracowanie własne, podobnie jak pozostałe ryciny.

Main geomorphic features of the Stołowe Mountains – visualisation of DEM derived from LiDAR data. The white rectangle indicates the area shown in Fig. 2, while the black solid line denotes the boundary of the Stołowogórski National Park; SzW – Mt. Szczeliniec Wielki, SzM – Mt. Szczeliniec Mały

Author's own elaboration, as well as other figures.

którym jest szczytowa powierzchnia skałki Tron Pradziada, wynosi 919 m n.p.m. Od zachodu towarzyszy mu znacznie mniejszy i nieco niższy ostańiec Szczelińca Małego (896 m), oddzielony płytką przełęczą położoną na wysokości około 852 m n.p.m. Obniżenie morfologiczne rozdzielające oba ostańcowe wzniesienia ma azymut 155°. Oba Szczelińce wznoszą się ponad rozległą płaskowyż będący



Fot. 1. Widok ogólny masywu Szczelińca od strony północno-zachodniej. Szczeliniec Wielki w głębi po lewej, bliżej urwiska Szczelińca Małego

General view of the Szczeliniec Massif from the north-west. Mt. Szczeliniec Wielki is in the background to the left, while the sandstone cliffs of Mt. Szczeliniec Mały are in the foreground

Fot. (wszystkie) / Photo (all of them): P. Migoń

przewodnim rysem rzeźby Gór Stołowych i określany jako II horyzont morfologiczny lub poziom morfostrukturalny (Rogaliński i Słowiok, 1958; Pulinowa, 1989; Migoń, 2008). W okolicach Karłowa wysokość tego płaskowyżu wynosi 700-750 m n.p.m., po czym konsekwentnie obniża się on ku wschodowi, w kierunku Polanicy-Zdroju. Ponad powierzchnię tego płaskowyżu wznosi się po jego południowej stronie stoliwo Skalniaka (915 m) – Narożnika (851 m), długie na około 10 km i rozdzielone na dwie części obniżeniem Lisiej Przełęczy. Tworzy ono najwyższy, I horyzont morfologiczny Gór Stołowych. Masyw Szczelińca Wielkiego i Małego, oddalony od stoliwa Skalniaka 3 km na północ, jest uważany za górę-świadek – pozostałość najwyższego horyzontu, odseparowaną od reszty stoliwa, ale wskazującą na jego minimalny dawny zasięg. Z kolei płaskowyż tworzący środkowy poziom Gór Stołowych jest od północy podcięty przez wyraźny próg morfologiczny, zwany progiem Radkowa (Pulinowa, 1989; Migoń i Zwiernik, 2006), a jego szerokość na wschód od Szczelińca Wielkiego, ponad źródłowym amfiteatrem Pośny, jest znacznie zredukowana. Wysokość względna Szczelińca Wielkiego w stosunku do zrównania okolic Karłowa wynosi około 150 m.

### **Budowa geologiczna**

Pod względem geologicznym budowa Szczelińca Wielkiego jest stosunkowo prosta. Jest on częścią struktury płytowej Gór Stołowych, w której kolejne serie skalne wieku późnokredowego leżą subhoryzontalnie na sobie, częściowo wyklinowując się w kierunku południowym. Powierzchnię szczytową tworzą tzw. górne piaskowce ciosowe (Jerzykiewicz, 1966, 1968a), określane także jako piaskowce Szczelińca – Skalniaka (Wojewoda, 2008). W ich obrębie można wyróżnić dwa poziomy (Jerzykiewicz, 1966). Poziom dolny o grubości blisko 40 m tworzą bardzo grubolawicowe piaskowce, prawie poziomo warstwowane. Poziom górny jest zbudowany z piaskowców warstwowanych przekątnie, występujących w ławicach o grubości do 2 m. Całkowita zachowana grubość tego poziomu wynosi 13 m. Piaskowce składają się niemal wyłącznie z kwarcu (powyżej 95% objętości szkieletu ziarnowego), a substancję wypełniającą tworzą tlenki żelaza, minerały ilaste, chalcedon i miazga kwarcowa (Jerzykiewicz, 1968a). Ich wiek jest późnoturoński, choć niewykluczone, że w najwyższej części mogą one pochodzić z wczesnego koniaku. Całkowita grubość górnych piaskowców ciosowych w części odsłoniętej na powierzchni terenu wynosi około 50 m, choć jest zapewne nieco większa, do 70-80 m (Wojewoda, 1997), a kontakt ze skałami niżej leżącymi znajduje się na wysokości około 850 m n.p.m. i jest przykryty rumowiskiem blokowym. Poniżej piaskowców zalega gruby kompleks skał drobnoziarnistych, złożony z margli, mułowców wapnistych, piaskowców wapnistych i glaukonitowych oraz ilowców. Budują one środkowe i dolne odcinki stoków Szczelińca Wielkiego, występują także w obrębie zrównania Karłowa. Sięgający w pobliże wschodniego podnóża Szczelińca Wielkiego próg Radkowa jest zbudowany w górnej części

z grubego pakietu środkowych piaskowców ciosowych. Pod względem litologicznym są to piaskowce subarkozowe, z większą zawartością skałeni.

Charakterystyczną cechą górnych piaskowców ciosowych jest ich regularny system spękań. Główne kierunki spękań mają przebieg  $35^\circ$  i  $120\text{--}130^\circ$  (Dumanowski, 1961; Jerzykiewicz, 1968b). Gęstość spękań jest zróżnicowana, od mniej niż 1 m do 3-4 m. Wraz ze strukturami warstwowania przekątnego, cios determinuje rozwój wielu form rzeźby w średniej i małej skali (Pulinowa, 1989).

## Metody badań

Podstawą prowadzonych prac były dane cyfrowe udostępnione do celów badawczych przez Dyрекcję Parku Narodowego Gór Stołowych. Wśród nich znajdowały się materiały powstałe w wyniku laserowego skanowania powierzchni Ziemi prowadzonego z powietrza (ALS – *Airborne Laser Scanning* lub inaczej LiDAR – *Light Detection and Ranging*) z przeciętną rozdzielczością 4 punktów na  $\text{m}^2$ . Z uwagi na brak dokumentacji dotyczącej danych źródłowych, ich precyzję można określić na podstawie analogii do innych danych tego typu, np. powstałych na potrzeby Informatycznego Systemu Osłony Kraju przed Nadzwyczajnymi Zagroženiami (ISOK, *Raport dostawy...*, 2011). Dokładność skaningu laserowego jest duża, średnie błędy pomiarowe wysokości wynoszą 0,05-0,15 m, a błąd maksymalny nie przekracza 0,3 m. W analizie morfometrycznej wykorzystano jeden z produktów postprocessingu danych LiDAR: numeryczny model terenu (NMT) przedstawiający powierzchnię gruntu (model typu *bare ground*), a więc powstały po odfiltrowaniu/wyeliminowaniu punktów odbitych od roślinności i antropogenicznych obiektów terenowych. Model ten, zapisany w postaci chmury punktów (pliki XYZ), został przetworzony do postaci rastrowej (plik ASC) o rozdzielczości  $0,6 \times 0,6$  m. W tej postaci posłużył do wydzielenia obszaru stoliwa (odciętej automatycznie ponad wysokość 870 m n.p.m.), pomiarów morfometrycznych powierzchni, modelowania pierwotnych i wtórnych parametrów topograficznych, tj. wysokości, nachylenia, krzywizny profilowej, lokalnych zagłębień (depresji), wyznaczaniu granic zlewni oraz w celu wizualizacji obszaru. Wszystkie wymienione działania prowadzono, wykorzystując oprogramowanie Global Mapper, SAGA GIS i MicroDEM. Z uwagi na ograniczenie objętości tekstu, szerszą charakterystykę wykorzystanych parametrów topograficznych czytelnik znajdzie w publikacjach poświęconych tym zagadnieniom (np. Urbański, 2008; Olaya, 2009; Olaya i Conrad, 2009; Kasprzak i Traczyk, 2010; Kasprzak, 2012).

Wykorzystanie danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego do poprawnego odwzorowania powierzchni terenu ma swoje ograniczenia. Pomijając błędy pomiarowe, które w rozpatrywanej skali są niewielkie i nie mają znaczącego wpływu na wynikowy NMT, największe odstępstwa odwzorowania od rzeczywistej rzeźby wynikają z dużego zasłonięcia gruntu przez korony drzew i gęste poszycie leśne. Jakość odwzorowania zależy także od dokładności urządzeń nawigacyjnych

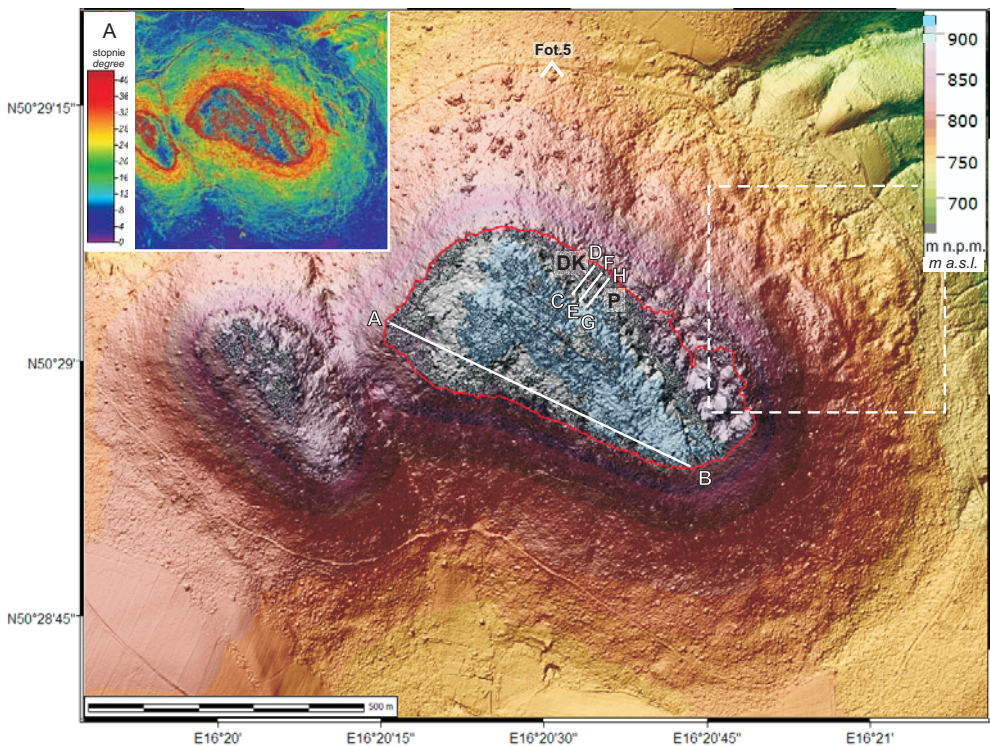
na pokładzie samolotu, łączenia danych uzyskanych podczas nalotu, wybranej metody filtrowania zbędnych punktów pomiarowych (np. *interpolation-based filter*, *slope-based filter*, *morphological filter* i inne) oraz interpolacji (Sithole i Vosselman, 2004; Willers *et al.*, 2008; Liu, 2008). Z tego względu potencjalnie największe z zauważalnych błędów systematycznych i losowych pojawiają się na NMT w miejscach łączenia pasów skanowania (artefakty liniowe) oraz na obszarach leśnych, gdzie powierzchnia gruntu reprezentowana jest tylko przez nieliczne punkty odbicia lasera, który zdołał przeniknąć między liśćmi, konarami i pniami drzew. W analizowanym przypadku dodatkową trudnością jest istnienie rozpadlin skalnych, których dno może być spenetrowane jedynie przez wiązkę laserową padającą niemal prostopadle do powierzchni Ziemi. Opisywane trudności sprawiły, że labirynt skalny Szczelińca Wielkiego odwzorowany na modelu pochodzącym z danych LiDAR przedstawia ukształtowanie terenu w sposób przybliżony.

Analizowany NMT został porównany z modelem wykonanym na potrzeby programu ISOK i dystrybuowanym przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. Powstał on na podstawie pomiarów o podobnym standardzie próbkowania (4 pkt/m<sup>2</sup>). Na tej podstawie można stwierdzić, że w wyniku postprocessingu danych i ich interpolacji, na badanym obszarze najgorzej odwzorowana została wschodnia część labiryntu Szczelińca, zasłonięta stosunkowo gęstym lasem. Istotne różnice między NMT dotyczą także rozmieszczenia bloków skalnych na stokach poniżej ścian Szczelińca. Fakt ten wynika wprost z filtracji obiektów terenowych i odmiennego klasyfikowania poszczególnych odbić lasera. Z uwagi na wymienione problemy interpretację NMT i jego pochodnych przeprowadzono uwzględniając także rezultaty własnych obserwacji terenowych, prowadzonych zarówno w labiryncie skalnym, jak i na stokach poniżej ścian skalnych, w latach 2010-2013.

## Główne rysy morfologiczne i geomorfometryczne stoliwa Szczelińca Wielkiego

**Powierzchnia i zarys stoliwa.** Stoliwo Szczelińca Wielkiego jest wydłużone w kierunku NW–SE (azymut 124°) i ma maksymalną rozciągłość 630 m. Szerokość w najszerszym miejscu, w zachodniej części stoliwa, wynosi 325 m i maleje ku wschodowi. Powierzchnia szczytowa, której zarys wyznaczają wyraźne załomy stoku na krawędzi ścian skalnych na wysokości 885-895 m n.p.m., zajmuje około 16,8 ha. Wyznaczenie jej zasięgu jest jednak problematyczne w części wschodniej, gdzie została ona obniżona o 15-20 m (ryc. 2) wzdłuż czystelnej, prostoliniowej krawędzi o kierunku 155° i długości około 300 m. Ta niżej położona część, zajmująca powierzchnię około 2,8 ha, czyli 1/6 stoliwa, wyraźnie różni się morfologicznie od pozostałego obszaru stoliwa.

Model terenu o wysokiej rozdzielczości pokazał, że faktyczny zarys stoliwa jest nieco odmienny niż przedstawiano to wcześniej. Dotychczasowe opracowania kartograficzne reprodukowały w zasadzie plan L. Pernarowskiego (Czeppe,



Ryc. 2. Masyw Szczelińca odwzorowany na numerycznym modelu terenu o rozdzielczości  $0,6 \times 0,6$  m. A – mapa spadków. Czerwoną obwiednią zakreślono stoliwo Szczelińca Wielkiego wyniesione ponad 870 m n.p.m. i przedstawione na ryc. 4. Linie wyznaczają profile zaprezentowane na ryc. 5 i 6. Biała ramka oznacza obszar osuwiska wizualizowanego na ryc. 7;

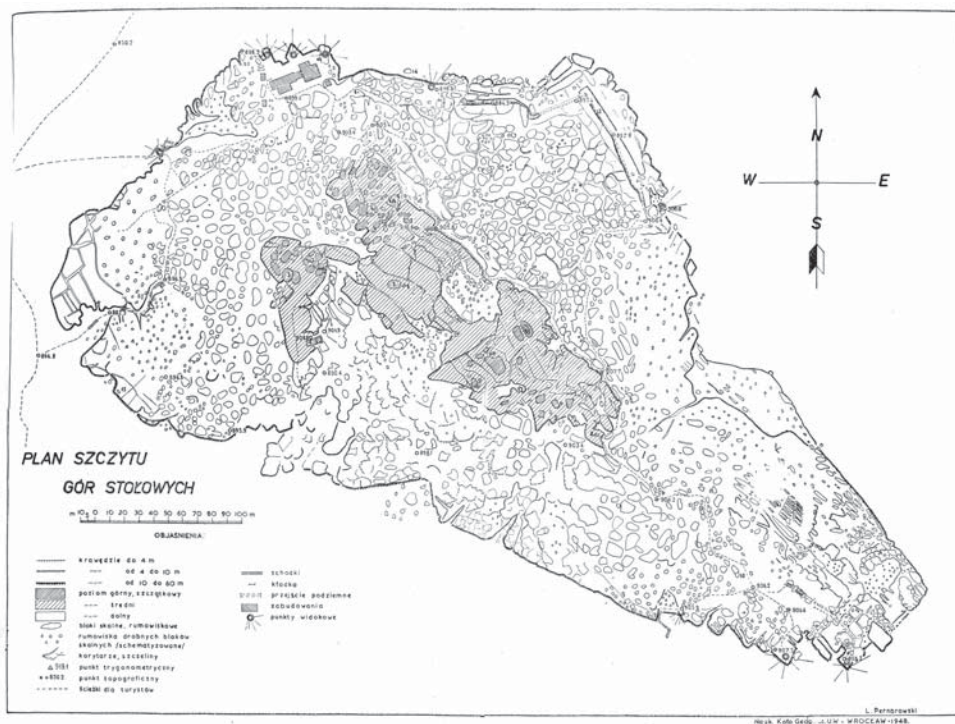
P – Piekiełko; DK – Diabelska Kuchnia, Fot. 5 – bloki przedstawione na fot. 5

The Szczeliniec Massif shown as visualized DEM of  $0.6 \times 0.6$  m resolution. A – slope-angle map. Red closed line indicates the part of the mesa elevated above 870 m a.s.l., as presented in Fig. 4. The locations of the cross-sections from Figs. 5 and 6 are indicated.

The white rectangle shows the area visualised in Fig. 7. P – *Piekiełko* ('Little Hell'),

DK – *Diabelska Kuchnia* ('Devil's Kitchen'), Plate 5 – blocks shown in Plate 5

1949), wykonany na podstawie pomiarów przeprowadzonych przez członków Naukowego Koła Geografów Studentów Uniwersytetu Wrocławskiego w 1948 r. (ryc. 3). Na planie tym przedstawiono dwudzielność północnej krawędzi stoliwa, z odcinkiem zachodnim o rozciągłości W–E i odcinkiem wschodnim o rozciągłości NW–SE. Jedną z najbardziej znanych mniejszych form rzeźby Szczelińca Wielkiego – rozpadlina Piekiełka – była zaznaczana jako równoległa do wschodniego odcinka północnej krawędzi, zatem także o rozciągłości NW–SE. Z kolei rozpadlina Diabelskiej Kuchni miała na tych mapach przebieg W–E. Mapy te nie uwzględniały też skrajnie wschodniej, obniżonej części powierzchni stoliwa.



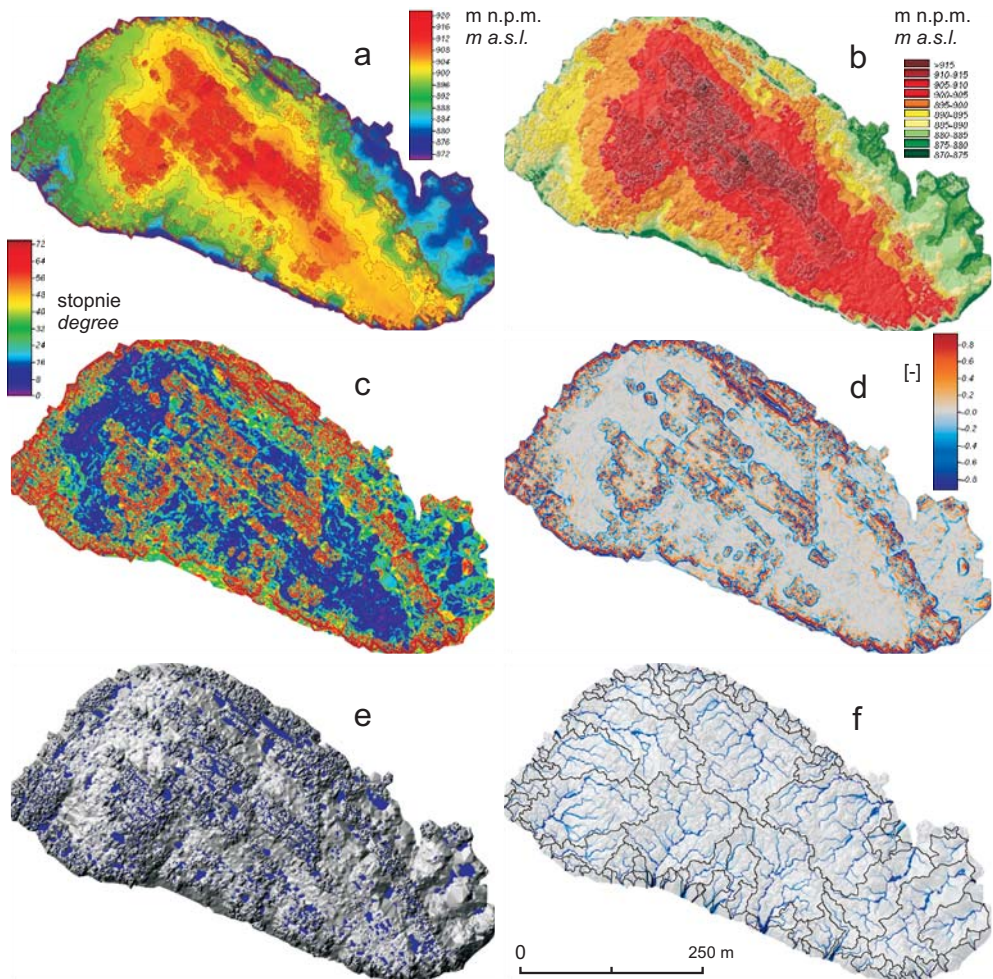
Ryc. 3. Oryginalny plan labiryntu skalnego na Szczęlińcu Wielkim, wykonany przez członków Naukowego Koła Geografów Studentów Uniwersytetu Wrocławskiego pod kierunkiem Z. Czeppego. Zdjęcie terenowe wykonano w drugiej połowie sierpnia 1948 r. Plan autorstwa L. Pernarowskiego ukazał się drukiem w czasopiśmie *Wierchy* w 1949 r. (Czepe, 1949) i przez dziesięciolecia był w różnych modyfikacjach reprodukowany jako jedyny obraz kartograficzny stoliwa (przedruk za zgodą redakcji „Wierchów”).

Original map of the rock labyrinth on Mt Szczęliniec Wielki, prepared by members of the Scientific Club of Geographers of the University of Wrocław under the supervision of Z. Czepe. Field work carried out in the second half of August 1948. The map, authored by L. Pernarowski, was published in the *Wierchy* journal in 1949 (Czepe, 1949) reproduced many times, in various modifications, in subsequent decades – as the only cartographic representation of the mesa morphology (reproduced with the permission of the editor of *Wierchy*).

W rzeczywistości północna krawędź stoliwa ma dość konsekwentny kierunek  $125^\circ$ , a obie wspomniane przykrawędziowe rozpadliny mają tę samą orientację.

**Zróznicowanie morfologiczne i wysokościowe** powierzchni szczytowej. Powierzchnia szczytowa Szczęlińca Wielkiego nie jest jednorodna pod względem morfologicznym, co wyraźnie ujawniają mapy hipsometrii i spadków wygenerowane z danych LiDAR (ryc. 4). Obszar najwyższej położony, o wysokościach powyżej 900 m n.p.m., znajduje się w centralno-zachodniej części stoliwa i zajmuje powierzchnię około 7,3 ha (43,5% wydzielonej powierzchni stoliwa). Jego





Ryc. 4. Modele powierzchni stoliwa Szczelińca Wielkiego, obejmujące obszar powyżej 870 m n.p.m.

a – mapa hipsometryczna (dodano poziomicę co 2,5 m); b – mapa hipsometryczna z cięciem co 5 m; c – mapa spadków; d – mapa krzywizny profilowej; e – rozmieszczenie lokalnych zagłębień (parametr *closed depression*); f – hipotetyczny odpływ powierzchniowy oraz granice lokalnych zlewni wyznaczone w sposób automatyczny (*drainage basins*)

Models of the surface of the Mt Szczeliniec Wielki mesa, above the altitude of 870 m. a – hypsometry (contour lines with 2.5 m spacing added); b – hypsometry in 5 m intervals; c – slope angles; d – profile curvature; e – occurrence of closed depressions (based on the ‘closed depression’ parameter in SAGA GIS); f – hypothetical surface outflow paths and local drainage basins (generated automatically)

ogólna rozciągłość NW–SE ogólnie naśladuje wydłużenie całego stoliwa w tym kierunku. Zarys tej ostańcowej partii jest nieregularny, niemniej ograniczającą ją progi wyraźnie nawiązują do nieciągłości (spękań) o kierunku 130°. W wielu miejscach ich zwartość jest jednak przerwana przez obniżenia zatokowo wnijkające w najwyższy poziom, a fragment południowo-zachodni został już niemal całkowicie odcięty od pozostałej, większej części. Najwyższy fragment stoliwa nie jest jednak jednorodną płytą, ale uległ fragmentacji na wiele mniejszych bloków rozdzielonych linijnymi obniżeniami (korytarzami) o kierunkach 35° i 130°, krzyżującymi się pod kątem prawie prostym. Badania terenowe wykazały, że geneza tych korytarzy jest dwójaka. Niektóre powstały wskutek selektywnego wietrzenia stref gęściej spękanych, inne są konsekwencją ruchów masowych i otwierania spękań wskutek odsuwania i przechylania bloków piaskowcowych (fot. 2). W południowo-wschodniej części stoliwa występują całkowicie odseparowane fragmenty tego poziomu.



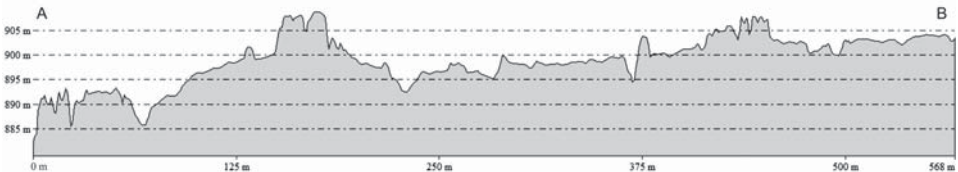
Fot. 2. Wybrane elementy morfologiczne powierzchni stoliwa Szczelińca Wielkiego  
 A – przejścia (korytarze) pomiędzy blokami piaskowca poszerzające się wskutek grawitacyjnych przemieszczeń bloków skalnych; B – Wielbłąd – jedna z ostańcowych form skałkowych, z bogatą mikrorzeźbą wietrzeniową

Selected morphological facets of the summit surface of Mt. Szczeliniec Wielki  
 A – corridors between sandstone blocks, widened due to gravity displacements of rock blocks; B – *Wielbłąd* ('the Camel') – one of the residual tors, with extensively developed weathering microrelief

Większość powierzchni morfologicznej Szczelińca Wielkiego znajduje się w poziomie wysokościowym 895-905 m n.p.m., który otacza ze wszystkich stron ostańcową partię najwyższą. Powierzchnia ta nie jest jednak całkowicie płaska. Wysokości względne wynoszą 3-6 m, co odpowiada wysokości bloków piaskowca

wydzielonych przez główne pionowe i poziome spękania. Zróznicowanie rzeźby rośnie w kierunku krawędzi stoliwa i jest największe w pasie przylegającym bezpośrednio do krawędzi. Jego szerokość jest najmniejsza (20-30 m) wzdłuż krawędzi południowej, największa (do 60 m) – po stronie północno-wschodniej i zachodniej.

Godnym uwagi elementem rzeźby powierzchni szczytowej są wyraźne obniżenia wnikające w nią od strony południowej krawędzi (ryc. 5). Największe i najdłuższe z nich (około 130 m długości) znajduje się w części skrajnie zachodniej (jest częściowo wykorzystywane przez szlak turystyczny prowadzący do schroniska na Szczelińcu), kolejne są krótsze i mniej wyraźne. Obniżenie położone najdalej na wschód jest już nie tyle liniowym obniżeniem w obrębie powierzchni stoliwa, ile zatokowym cofnięciem ściany skalnej. Na podkreślenie zasługuje praktycznie identyczna rozciągłość tych obniżeń wzdłuż kierunku 35°, zgodnym z jednym z dwóch głównych kierunków spękań.



Ryc. 5. Profil terenowy ilustrujący obniżenia wnikające w powierzchnię szczytową Szczelińca Wielkiego od strony południowej krawędzi stoliwa, wygenerowany z danych LiDAR w programie Global Mapper. Przebieg linii profilowej oznaczono na ryc. 2

Cross-section along the southern part of the mesa surface shows trough features extending from the escarpment (profile generated from the LiDAR data using Global Mapper software). Location of the cross-section on Fig. 2

**Morfologiczne uwarunkowania odpływu powierzchniowego.** NMT, wykorzystany do parametryzacji hydrologicznej obszaru, pozwolił na automatyczne wyróżnienie zamkniętych obniżeń (funkcja *closed depression* SAGA GIS), będących lokalnymi pułapkami sedimentacyjnymi dla odprowadzanych przez wodę produktów wietrzenia piaskowców. Miejsca takie są wypełnione piaskiem i namulami o miąższości przekraczającej 0,5 m. Ich rozmieszczenie nie jest regularne (ryc. 4e). W formie wydłużonej występują w rozpadlinach skalnych przy zachodniej i północnej stronie stoliwa oraz w jego centrum. Lokalne depresje o największych powierzchniach i koncentrycznych zarysach zostały wykryte w północno-wschodniej, obniżonej części stoliwa. Ich powszechna obecność na Szczelińcu Wielkim wskazuje na istotny udział odwodnienia podpowierzchniowego, przez system nieciągłości w górnym piaskowcu ciosowym.

Lokalne depresje w procesie modelowania hydrologicznego GIS są zazwyczaj pomijane, aby możliwe było wyznaczenie kierunków spływu i granic głównych zlewni. Na podstawie takiej procedury można było stwierdzić, że powierzchnia

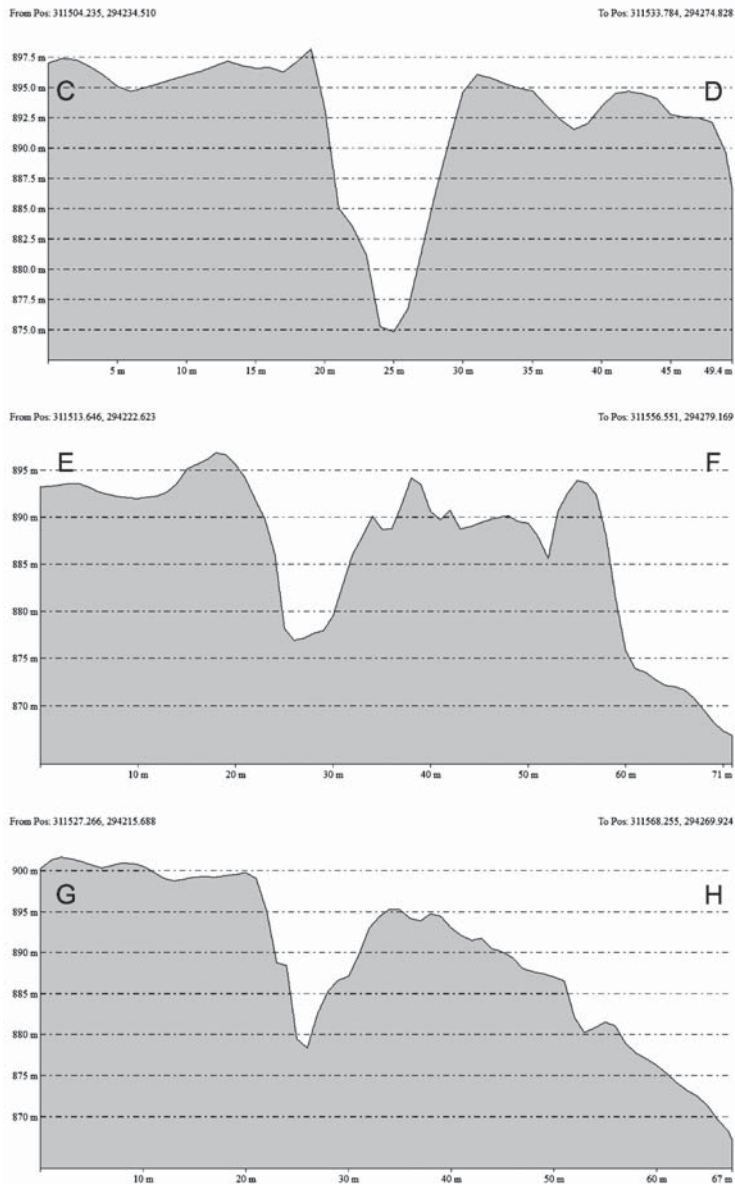
stoliwa odwadniana w zasadzie radialnie, natomiast poszczególne małe zlewnie cząstkowe cechują się układem zbliżonym do dendrytycznego (ryc. 4f). W przypadku dwóch największych zlewni z wylotem przy północnej krawędzi stoliwa ich powierzchnie sięgają 1,8 i 1,6 ha. Granice najmniejszych zlewni cząstkowych wyznaczane są przez ściany skalne na krawędzi stoliwa. Wododział rozdzielający fragmenty stoliwa odwadniane ku północy i południu przebiega mniej więcej przez środek powierzchni wierzchowinowej.

**Morfologia strefy przykrawędziowej.** Mimo niewielkiej powierzchni stoliwa, rzeźba strefy przykrawędziowej, obejmującej pas o szerokości do 50 m od krawędzi, jest zróżnicowana przestrzennie. Najbardziej urozmaicona jest ona w części północnej, gdzie strefa ta jest równocześnie najszersza. Wyjątkowym w skali całych Gór Stołowych elementem rzeźby są tu głębokie rozpadliny o rozciągłości równoległej do krawędzi stoliwa. Ich związek z grawitacyjnymi ruchami masowymi był już podkreślany w starszych publikacjach (Dumanowski, 1961; Pulinowa, 1989). Dwie z nich – Piekielko i Diabelska Kuchnia (Fot. 3) – są na tyle szerokie, a przy tym ogólnie płaskodenne, że można było nimi poprowadzić ścieżkę turystyczną. Na NMT wymienione rozpadliny są stosunkowo dobrze odwzorowane (ryc. 6), aczkolwiek ich kształt jest jedynie zbliżony do rzeczywistości. Według



Fot. 3. Rozpadliny w północnej, przykrawędziowej części Szczelinca Wielkiego (A – Diabelska Kuchnia, B – Piekielko)

Deep clefts in the northern, near-edge part of Mt. Szczeliniec Wielki (A – *Diabelska Kuchnia* (the 'Devil's Kitchen'), B – *Piekielko* ('Little Hell'))



Ryc. 6. Profile poprzeczne przez największą z rozpadlin skalnych (Piekielko), wygenerowane z danych LiDAR. Z uwagi na ograniczenia pomiarowe, dane cyfrowe nie oddają w pełni rzeźmowistego kształtu rozpadliny, pokazują jednak skalę zjawiska otwierania się spękań w strefie przykrawędziowej.

Cross-sections of the deepest rock cleft (*Piekielko* – ‘Little Hell’), generated from LiDAR data. Note that data accuracy precludes faithful representation of details concerning cleft relief, though it is sufficient to indicate the scale of the joint-opening phenomenon in the near-edge part of the mesa.

NMT głębokość rozpadlin przekracza lokalnie 20 m, a szerokość ich dna sięga kilku metrów. W ich sąsiedztwie występują jednak dalsze rozpadliny, o szerokości 1-2 m, słabo odwzorowujące się na modelu cyfrowym nawet przy wysokiej rozdzielczości danych, często wypełnione gładzami i blokami. Rozciągłość tych rozpadlin jest wyznaczona przez kierunek  $130^\circ$ , a łączność między nimi zapewniają wąskie otwarte, niekiedy sklepione szczeliny o rozciągłości  $35^\circ$ . Na zewnątrz od Piekielka masyw piaskowcowy traci zwartość i strefa krawędziowa stoliwa przyjmuje charakter nieuporządkowanego rumowiska, dobrze widocznego z punktu widokowego Niebo na krawędzi stoliwa. W przypadku Diabelskiej Kuchni strefa przykrawędziowa jest bardziej zwarta. Na tym odcinku krawędzi występują też nieznane w pozostałych miejscach kolumny, niemal całkowicie odseparowane od zwartej ściany skalnej. Najbardziej znana jest kolumna zwieńczona formą skalną określaną jako Małpolud (fot. 4), mająca wysokość blisko 30 m, szerokość podstawy 9 m i wykazująca odchylenie od pionu o około  $6^\circ$ .



Fot. 4. Małpolud – oddzielona od progu stoliwa kolumna piaskowcowa po północnej stronie płaskowyżu – A – w całości: widok od podstawy ściany skalnej, B – partia szczytowa, z wyraźnymi śladami zmian wietrzeniowych

*Małpolud* ('the Ape Man') is a free-standing sandstone column detached from the cliff on the northern side of the mesa – A – general view from below, B – summital part, clearly moulded by surficial weathering

W części północno-zachodniej, południowej i południowo-wschodniej morfologia strefy krawędziowej jest znacznie prostsza. Niemal płaska powierzchnia morfologiczna, lokalnie z kilkumetrowej wysokości ostańcowymi skałkami wymodelowanymi przez wietrzenie i naśladująca horyzontalne powierzchnie uławiczenia, nagle przechodzi w pionowe urwiska o wysokości 20-30 m. Zarys krawędzi w planie jest prostokątny, nawiązujący do dwóch głównych kierunków spękań:  $35^\circ$  i  $130^\circ$ . Taka konfiguracja rzeźby pozwoliła na zagospodarowanie wybranych fragmentów krawędzi w formie tarasów widokowych. Większe urozmaicenie cechuje zachodnie zakończenie płaskowyżu, silnie rozczłonkowane wzdłuż prostopadłych do siebie spękań należących do wyżej wspomnianego systemu. Część ta sąsiaduje bezpośrednio z obniżeniem rozdzielającym Szczeliniec Wielki i Szczeliniec Mały, a wysokość ograniczającej stoliwo ściany skalnej jest tu najmniejsza, do 10 m.

Na powyższym tle wyróżnia się strefa krawędziowa wschodniej części stoliwa, obniżonej w stosunku do jego pozostałej części. Można wyróżnić tu dwie strefy krawędziowe. Jedna z nich – wewnętrzna – oddziela część obniżoną od reszty stoliwa i ma długość ponad 300 m, przy rozciągłości  $155^\circ$ . Jest niemal prostoliniowa, o wysokości 10-15 m i ma postać dość zwartej ściany skalnej. Należy jednak odnotować obecność kilkumetrowej głębokości obniżen na jej zapleczu. Druga jest krawędzią zewnętrzną i wyznacza przejście górnej powierzchni stoliwa w powierzchnię stokową masywu Szczelińca Wielkiego, gdzie w podłożu występują już serie skalne zalegające pod górnymi piaskowcami ciosowymi. Nie naśladuje ona żadnego wyraźnego kierunku strukturalnego, ma przebieg zakrzywiony, a w małej skali – kręty. Wizja terenowa pokazała, że nie ma ona charakteru zwartej ściany skalnej, tylko rumowiska bloków piaskowca znacznych rozmiarów (do 10 m długości). Tego typu morfologią – z chaotycznie rozmieszczonymi blokami różnych rozmiarów i głębokimi rozpadlinami pomiędzy nimi – cechuje się cała obniżona część powierzchni szczytowej i jest wskutek tego praktycznie nie do spenetrowania.

## Morfologia powierzchni stokowych

**Cechy geomorfometryczne.** Stoki Szczelińca Wielkiego mają na ogół dość prostą strukturę (ryc. 2). Poniżej ściany skalnej rozciąga się segment o długości 60-80 m i nachyleniu w przedziale  $30-40^\circ$ , aczkolwiek lokalnie może ono być nieco większe (do  $50^\circ$ ) lub mniejsze (do  $25^\circ$ ). Jest on obecny także poniżej wschodniego, obniżonego fragmentu stoliwa, a nie występuje tylko po stronie zachodniej, nad przełączką rozdzielającą oba ostańce Szczelińców. Dość wyraźny (na mapie) załom wklęsły stanowi granicę z kolejnym segmentem, o mniejszym nachyleniu rzędu  $15-20^\circ$  i podobnej długości 50-80 m. Najniższym członem powierzchni stokowej jest odcinek o stopniowo malejącym nachyleniu, od  $15^\circ$  w części wyższej do  $5^\circ$  w najniższej, przechodzący bez wyraźnego zało-

mu w niemal równą powierzchnię środkowego horyzontu morfologicznego Gór Stołowych. Powyżej przedstawiony, ogólnie wklęsły profil podłużny stoku był przyrównywany do „modelowego” stoku w rozumieniu L. Kinga (1953) i interpretowany jako dowód na pedyplanacyjną genezę głównych rysów rzeźby Gór Stołowych (Rogaliński i Słowiak, 1958).

Mapa nachyleń wykonana na podstawie danych LiDAR (ryc. 2A) pokazuje jednak, że takie postrzeganie stoków Szczelińca Wielkiego jest uproszczeniem. Po pierwsze, rzeźba najniższego segmentu stoku jest dużo bardziej urozmaicona, a w jej obrębie występują odcinki o różnym nachyleniu oraz linijne obniżenia. Po drugie, zdecydowanie odmiennie od pozostałych fragmentów przedstawia się rzeźba stoków poniżej wschodniego krańca stoliwa. W miejsce ogólnie wklęsłego profilu stoku pojawiają się tu łukowate w planie segmenty o większym nachyleniu, nawet do 40°. W środkowej części stoku łuki te są wygięte amfiteatralnie ku górze, w części dolnej – ku dołowi, na podobieństwo łobów. Interpretacja genetyczna tego obszaru zostanie przedstawiona w dalszej części.

**Pokrywy blokowe.** Charakterystyczną cechą stoków Szczelińca Wielkiego jest powszechna obecność bloków piaskowca różnej wielkości, od 1-2 m do gigantycznych obiektów o długości ponad 20 m. Są one doskonale widoczne w terenie, a rozmiary największych z nich sprawiły, że odzwierciedliły się one również na modelu wysokościowym (ryc. 2). Odzworowanie to, a dokładniej rzeczywista obecność bloków, musi być jednak weryfikowana ze względu na algorytmy filtrujące i eliminację niektórych elementów podczas postprocessingu, o czym wspomniano w rozdziale „Metody badań”. W górnym i częściowo środkowym segmencie stoku występują one w dużej zawartości, tworząc ciągłe pokrywy blokowe, miejscami (stok północno-wschodni) z racji wielkości tworzących je bloków praktycznie niemożliwe do spenetrowania. W niższych segmentach duże bloki występują w większym rozproszeniu, aczkolwiek także tu można zidentyfikować ich skupienia (np. w kilku miejscach przy szosie prowadzącej do Pasterki). Wielkość bloków w dolnych częściach stoku jest mniejsza niż bezpośrednio poniżej ściany skalnej, niemniej pojedyncze obiekty osiągają długość 10 m i wysokość 4-5 m (fot. 5). Pojedyncze duże bloki występują nawet w strefie przejściowej do powierzchni zrównania środkowego horyzontu rzeźby, w odległości ponad 400 m od ściany skalnej. Maksymalne oddalenie bloków od krawędzi piaskowcowego stoliwa odnotowano po jego północnej, północno-wschodniej i południowo-wschodniej stronie, gdzie zasięg pokrywy blokowej sięga spłaszczeń podstokowych i obniżeń dolinnych.

**Osuwisko na wschodnich stokach Szczelińca.** Wyżej wspomniane urozmaicenie rzeźby stoku po wschodniej stronie stoliwa, wyrażające się obecnością łukowatych zestromień stoku, zostało zinterpretowane jako efekt ruchów masowych typu osuwiskowego. Istnienie osuwiska w tym miejscu sygnalizowała M. Pulinowa (1989), a bardziej szczegółowy opis zawiera praca P. Migonia i M. Kasprzaka (2011). Skarpa niszy osuwiskowej znajduje się na wysokości

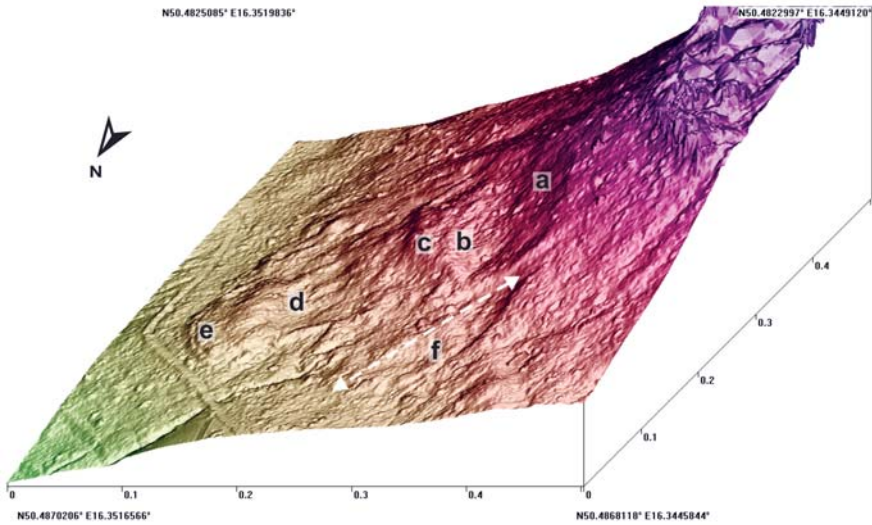




Fot. 5. Bloki piaskowca przy szosie do Pasterki. Położenie powierzchni warstwowania wskazuje na rotację bloku po prawej o blisko 90°

Sandstone blocks at the footslope of Mt Szczeliniec Wielki, along the road to Pasterka. The position of bedding planes indicates considerable (near-90°) rotation of the right block

790-830 m n.p.m. i ma rozciągłość około 200 m, przy nachyleniu 30-40° (ryc. 7, element oznaczony literą 'a'. Poniżej znajduje się spłaszczenie (nachylenie 8-15°) o szerokości do 70 m – (b), kończące się wyraźnie bardziej stromym stopniem terenowym o wysokości do 10 m – (c). Poniżej rozciąga się kolejne spłaszczenie – (d), a dolną granicę osuwiska wyznacza łukowate czoło o wysokości 5-7 m i nachyleniu do 30° – (e). Szerokość całego zespołu lobów wynosi 230 m. Długość osuwiska to 310 m. Podobna, ale mniej wyraźna i mniejsza forma przylega do omówionej wyżej od północy – (f). Jeszcze mniej wyraźne, łukowato wygięte w dół stoku fragmenty występują dalej ku północnemu zachodowi, ale nie towarzyszą im czytelne nisze powyżej. Na czołach lobów powszechne są duże bloki piaskowca, nawet do 5 m długości. Formy rzeźby osuwiskowej występują już w tej części stoku, gdzie w podłożu znajdują się skały kompleksu drobnoziarnistego, w tym utwory ilaste. Elementy piaskowcowe na powierzchniach jeziorów są zatem ewidentnie allochtoniczne. Za symptomatyczne uznano występowanie rzeźby osuwiskowej wyłącznie w tej części masywu Szczelińca Wielkiego, w strefie bezpośrednio poniżej obniżonego fragmentu powierzchni stoliwa, co wskazuje na pewien związek przyczynowo-skutkowy.



Ryc. 7. Morfologiczne efekty ruchów masowych typu osuwiskowego na wschodnim stoku Szczelińca Wielkiego: a – skarpa niszy osuwiskowej, b – spłaszczenie, c – stopień terenowy, d – spłaszczenie, e – czoło osuwiska (materiał koluwalny), f – mniejsze osuwisko  
 Morphological effects of mass movements of the landslide type on the eastern slope of Mt Szczelińca Wielki: a – landslide head scarp, b – upper bench, c – terrain step, d – lower bench, e – landslide toe built of colluvial materials, f – minor landslide

## Uwarunkowania strukturalne

Pogłębiona analiza rzeźby masywu Szczelińca Wielkiego w pełni uzasadnia jego traktowanie jako elementu rzeźby strukturalnej, czyli takiej, której rysy przewodnie wprost nawiązują do budowy geologicznej, a uwarunkowania litologiczno-strukturalne decydują o przebiegu procesów powierzchniowych.

Ogólne rysy morfologiczne – wyrównana (w dużej skali) powierzchnia szczytowa, ściany skalne, wklęsłe profile stoków poniżej – odzwierciedlają zróżnicowanie litologiczne następstwa skał kredowych Gór Stołowych i jej subhoryzontalne zaleganie. Szczelińca Wielki jest typowym przykładem góry stołowej, której partię szczytową tworzy warstwa skały odporniejszej (ang. *caprock*), chroniącej skały niżej leżące przed denudacją. Kontrast sztywnej, ale spękanej płyty piaskowcowej z miękkim, podatnym na deformację podłożem zbudowanym ze skał drobnoziarnistych tłumaczy występowanie obserwowanych na Szczelińcu ruchów masowych, takich jak otwieranie spękań, odsuwanie pakietów skalnych, osiadanie, czy osuwanie w jednorodnych skałach drobnoziarnistych. Są one generalnie związane z czynnikiem strukturalnym (Dikau i inni, 1996).

Zróznicowanie strukturalne piaskowców (Jerzykiewicz, 1966, 1968a) znajduje odzwierciedlenie w cechach rzeźby najwyższej części stoliwa. Dolny człon tworzy pionowe urwiska wyznaczające krawędzie Szczelińca Wielkiego, a jego strop wyznacza główną powierzchnię morfologiczną na wysokości około 900-905 m n.p.m. Ubóstwo wyraźnych struktur warstwowania w tym członie sprawia, że przejawy selektywnego wietrzenia powierzchni skalnych są mało widoczne. Powszechna obecność powierzchni uławicenia i warstwowania w górnym członie stworzyła natomiast bardzo dobre warunki do selektywnego niszczenia, a jego rezultatem są liczne formy skałkowe o osobliwych kształtach, tworzące szczytowy labirynt o charakterze „skalnego miasta”.

Z kolei zdecydowana większość drobniejszych form rzeźby w obrębie stoliwa nawiązuje kształtem i orientacją do dwóch głównych kierunków spękań:  $35^\circ$  i  $130^\circ$ , wspólnie tworzących system spękań ciosowych. Należą do nich zewnętrzne krawędzie „skalnego miasta” na wierzchowinie, obniżenia (korytarze) w obrębie labiryntu, rozpadliny przykrawędziowe i szczeliny je łączące, bastiony piaskowcowe na krawędzi stoliwa i wypełnione blokami nieckowate dolinki w południowej części. Nieciągłości o tych przebiegach ukierunkowują działanie procesów wietrzeniowych, grawitacyjnych i sufozyjnych.

Na podkreślenie zasługuje obecność dwóch elementów morfologicznych, związanych z kierunkiem  $155^\circ$  – obniżenia oddzielającego stoliwo Szczelińca Wielkiego od Szczelińca Małego oraz krawędzi wyznaczającej granicę między głównym a obniżonym fragmentem stoliwa w części wschodniej. Kierunek ten nie jest związany z ciosem i nie ujawnia się w pozostałych obszarach stoliwa. Odzwierciedla on istnienie uskoków o przebiegu NNW–ESE, wykazanych na najnowszej mapie geologicznej Gór Stołowych przez J. Wojewodę i innych (2011).

## Rozwój rzeźby

Rozpoznanie systemu morfogenetycznego Szczelińca Wielkiego musi z konieczności bazować na wnioskowaniu o procesach i relacjach między nimi na podstawie współcześnie obserwowanych form rzeźby terenu. W obrębie masywu nie był prowadzony monitoring procesów powierzchniowych, z wyjątkiem monitoringu geodezyjnego względnych ruchów bloków w obrębie masywu skalnego (Cacoń i inni, 2008), jednak jego rezultaty z racji krótkiej skali czasowej są trudne do jednoznacznej interpretacji. Z tych względów podejście przedstawione w tej pracy nie różni się od tego, które przyjęli wcześniejsi autorzy piszący o stoliwie Szczelińca (Czeppe, 1952; Dumanowski, 1961; Pulinowa, 1989). Istotną różnicą jest baza faktograficzna. Analiza rzeźby przy użyciu cyfrowego modelu wysokości zbudowanego z danych LiDAR pozwoliła na znacznie bardziej precyzyjny opis, wzbogacony danymi ilościowymi, po drugie zaś ujawniła istnienie form i powiązań przestrzennych, które nie były wcześniej prezentowane. Przykładowo, możliwe było wyróżnienie na stoku poniżej ściany skalnej kilku różnią-

cych się nachyleniem segmentów, podczas gdy B. Dumanowski (1961) uważał, że nie ma podstaw do takiego podziału.

W ślad za Dumanowskim (1961), w obrębie masywu Szczelińca Wielkiego można wyróżnić dwie podstawowe domeny morfogenetyczne: powierzchni szczytowej i stoków (Migoń i inni, 2011). Nie są one jednak całkowicie od siebie niezależne, a w szczególności rozwój stoku wpływa na rzeźbę powierzchni stoliwa i jej przekształcenia, zwłaszcza w partiach przykrawędziowych. W ogólnym ujęciu w obrębie pierwszej domeny przeważa rozczłonkowanie i obniżanie powierzchni, w drugiej – cofanie stoków.

**Powierzchnia szczytowa.** Rozwój rzeźby powierzchni szczytowej dokonuje się przede wszystkim za sprawą wietrzenia, którego produkty są następnie grawitacyjnie przemieszczane w dół. Natura form rzeźby w obrębie stoliwa prowadzi do wniosku, że selektywność jest głównym atrybutem wietrzenia piaskowców i jest uwarunkowana obecnością różnorodnych struktur w skale: spękań, powierzchni warstwowania i powierzchni granicznych ławic (wielozestawów). Intensywniejsze wietrzenie wzdłuż spękań pionowych prowadzi do rozczłonkowania płyty, rozwoju podłużnych obniżzeń (korytarzy) między pakietami skalnymi i fragmentacji stoliwa na mniejsze fragmenty. W ten sposób rozwija się „skalne miasto” w najwyższej części stoliwa, a także w części północno-zachodniej. Z kolei szybsze wietrzenie wzdłuż poziomych powierzchni nieciągłości powoduje powiększanie nisz i przewieszek, prowadząc do zachwiania równowagi całego bloku i jego przewrócenia lub osunięcia. W mniejszej skali prowadzi ono do powstania różnych drobnych mikroform wietrzeniowych wzdłuż powierzchni nieciągłości i warstwowania (fot. 2b). W dalszej kolejności wietrzenie działa najbardziej intensywnie na ostrych krawędziach, prowadząc do ich stopniowego zaokrąglenia i nadając ostańcowym skałkom fantastyczne kształty, które dały podstawy do nadania osobliwych, głównie zoomorficznych nazw własnych (Wielbłąd, Kwoka, Żółw, Świątynia Indyjska). Na obecnym etapie rozpoznania rzeźby Gór Stołowych nie jest jednak możliwe określenie, które mechanizmy wietrzenia odgrywają najważniejszą rolę.

Drugim istotnym procesem, którego wagę jako pierwszy podkreślił Dumanowski (1961), jest denudacja wnętrza masywu przy udziale wody opadowej infiltrującej w spękania (tzw. sufozja mechaniczna). Na potencjalnie znaczenie tego procesu wskazuje powszechne występowanie zagłębień bezodpływowych na powierzchni stoliwa (ryc. 4e). Obecność słabo przepuszczalnego podłoża pod płytą piaskowcową, ale także wyraźnych subhoryzontalnych powierzchni granicznych warstw, wymusza lateralny ruch wody, co z kolei za sprawą mechanicznych i chemicznych interakcji woda–skała, w tym rozkładu spoiwa (Pulinowa, 1989), przyczynia się do stopniowego usuwania materiału z wnętrza płyty. Widocznymi dowodami wypłukiwania szkieletu ziarnowego z piaskowców są piaszczyste stożki napływowe przy wylotach szczelin przecinających ściany skalne oraz otwory ujściowe rur i kanałów przecinające ściany skalne. Usuwanie materiału z wną-

trza masywu prowadzi do zachwiania równowagi wyżej położonych partii, które osiadają i osuwają się do powiększających się wolnych przestrzeni. Na działanie tego mechanizmu zwrócił uwagę Dumanowski (1961), a powstające formy nazwał „dolinami subpiaskowcowymi”. Ich lokalizacja przedstawiona na szkicu dołączonym do jego pracy (s. 317, rys. 5) została jednak skorygowana. W ten sposób powstały (i pewnie nadal się rozwijają) chaotyczne nagromadzenia wielkich bloków wypełniające formy nieckowate, których istnienie jest najbardziej ewidentne wzdłuż południowej krawędzi stoliwa. Największe z takich nagromadzeń, nieodnotowane przez Dumanowskiego (1961), znajduje się obok szlaku do schroniska. Wielkoskalowe obniżenie wschodniej części stoliwa jest prawdopodobnie także częściowo efektem podobnych procesów, zachodzących na jeszcze większą skalę przestrzenną. Znamienne jest bowiem, że obniżona część nie ma postaci zwartego pakietu, ale jest chaotycznym nagromadzeniem wielkich bloków, wyruszonych ze swojego oryginalnego położenia.

**Stoki.** Mechanizmy rozwoju morfologicznego stoków są odmienne dla ściany skalnej i niżej leżących segmentów, o nachyleniu poniżej 40°. W obrębie ściany skalnej można wskazać trzy podstawowe procesy. Pierwszym jest odpadanie pojedynczych bloków, aczkolwiek należy podkreślić, że z okresu historycznego brak doniesień o zdarzeniach tego typu. Jest to dość zaskakujące, zwłaszcza jeśli wziąć pod uwagę obecność kanciastych bloków w wielu miejscach bezpośrednio pod ścianą skalną (sugerujących wyglądem niedawne zdarzenia) oraz niemal ciągłe występowanie pokrywy głazowo-blokowej. Taka sytuacja prowadziła do rozważań nad optymalnymi warunkami mechanicznej dezintegracji ścian i wskazywania plejstocenu jako okresu, gdy rozwój progów skalnych i blokowisk był znacznie intensywniejszy niż obecnie (Rogaliński i Słowiok, 1958; Dumanowski, 1961). W kilku miejscach zaobserwowano także osuwanie się kolumn piaskowca w dół stoku.

Drugim procesem, a właściwie grupą procesów, jest oddzielanie większych, zwartych pakietów piaskowca od reszty stoliwa i ich postępująca dezintegracja. Fazą inicjalną jest grawitacyjne otwieranie spękań pionowych, szczególnie efektywne w strefach przykrawędziowych, gdy ich kierunek jest zgodny z ogólną orientacją krawędzi. Zewnętrzne pakiety są następnie odsuwane, co wskazuje na plastyczną deformację podłoża piaskowców (ang. *lateral spreading*). Ten etap można obserwować w Diabelskiej Kuchni. W dalszym etapie zewnętrzny pakiet jest stopniowo odchylany od pionu, a rozpadlina powiększa się, co można zobaczyć w Piekielku. Przechylenie (ang. *toppling*) może ostatecznie doprowadzić do przewrócenia się całego pakietu i jego dezintegracji przy upadku, jednak niezbędnym warunkiem realizacji takiego scenariusza jest brak podparcia od strony zewnętrznej. Obecność szerokiej strefy rumowiskowej na zewnątrz od Piekielka pozwala przypuszczać, że do przewrócenia nie dojdzie tak długo, jak długo wietrzenie nie spowoduje dezintegracji tej strefy. Przewrócenie jest natomiast bardziej prawdopodobne w przypadku kolumny z Małpoludem, odchylonej od pionu

i niczym nie podpartej. Znaczące odsunięcie pakietu skalnego, a zwłaszcza jego przewrócenie stwarza warunki do rozwoju kolejnej rozpadliny, co także można obserwować przy Diabelskiej Kuchni.

Rozmieszczenie form rzeźby na Szczelińcu Wielkim wskazuje, że zgodnie z wyżej opisanym mechanizmem odsuwania i przechylania rozwija się krawędź północna, której orientacja jest zbliżona do orientacji jednego z dwóch głównych kierunków spękań. W pozostałych partiach krawędzi ten mechanizm wydaje się nie odgrywać roli, a ściana skalna jest kształtowana przez odpadanie, ewentualnie z udziałem osuwania kolumn piaskowca. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na stabilność ściany skalnej jest wcześniej omawiana sufozja mechaniczna, której wynikiem są piaszczyste stożki i płyty u podnóża.

Mechanizmy rozwoju niżej położonej powierzchni stokowej są niejasne. Szczególnie intrygujący jest znaczny zasięg bloków piaskowca pochodzących ze ściany skalnej. Prosty model wiążący daleko leżące bloki z transportem grawitacyjnym inicjowanym oderwaniem jest mało prawdopodobny z racji generalnie niewielkiej wysokości ściany (maksymalnie 30 m) w stosunku do całej wysokości stoku, pokroju bloków odrywających się do ściany, znacznej szorstkości powierzchni stoku poniżej i obecności rumowiska z licznymi obniżeniami (pułapkami dla przemieszczanych bloków). Postulowane przez Dumanowskiego (1961) „staczanie” bloków po stoku jest wątpliwe. Z podobnych powodów trudno uznać powolne przemieszczanie bloków po etapie oderwania za uniwersalny mechanizm tłumaczący ich rozprzestrzenienie. Nigdzie też nie stwierdzono śladów rynien czy spiętrzeń, typowych dla tzw. wędrujących głazów, również wielkość bloków wokół Szczelińca Wielkiego znacznie przekracza typowe rozmiary takich głazów (rzędu 0,5-2,0 m). W szczególnych sytuacjach mógł zachodzić dalszy transport bloków na powierzchni jeziorów osuwiskowych, ale osuwiska stwierdzono tylko na wschodnich stokach. Innym lokalnym mechanizmem mogła być lawina kamienna (ang. *rock avalanche*) o dużej energii, ale nie ma jednoznacznych dowodów na obecność takich zdarzeń. Być może nie należy zatem wiązać całości pokrywy blokowej wokół Szczelińca ze współczesnym położeniem ściany skalnej, a raczej traktować ją jako zapis bardzo długiego rozwoju rzeźby, podobnie jak przypuszczali J. Pašek i M.Z. Pulinowa (1976). Elementy pokrywy blokowej byłyby wówczas różnowiekowe – hipoteza ta będzie w przyszłości testowana.

Powyższa analiza morfologii i morfogenezy Szczelińca Wielkiego znacząco poszerza wiedzę o tym masywie w stosunku do obrazu rysującego się we wcześniejszych opracowaniach. Z. Czepe (1952) przedstawił raczej ogólny opis rzeźby Gór Stołowych i w niewielu miejscach wspominał o rzeźbie Szczelińca Wielkiego, aczkolwiek wskazał na niszczenie krawędzi wskutek aktywności źródeł warstwowych u podstawy ściany skalnej i na drodze pęknięcia płyty wzdłuż kierunków równoległych do krawędzi. J. Rogaliński i G. Słowiok (1958) praktycznie nie odnosili się do morfologii Szczelińca Wielkiego, natomiast B. Dumanowski (1961) uczynił masyw Szczelińca głównym przedmiotem swojego zaintereso-

wania. Część jego poglądów zachowuje aktualność, szczególnie uwypuklenie procesów denudacyjnych działających we wnętrzu masywu, dla których ramy strukturalne stwarza regularna sieć otwartych spękań. W ten sposób stoliwo Szczelińca jest niszczone w części niezależnie od procesów kształtujących ściany skalne. Było to zupełnie nowe spojrzenie na problem, zaprezentowane w czasach, gdy przedmiotem zainteresowania geomorfologii były praktycznie tylko procesy powierzchniowe. Inne stwierdzenia okazały się natomiast mocno dyskusyjne (zagadnienie ruchu bloków po stoku) bądź były wypowiedziane bez przedstawienia dowodów, jak na przykład pogląd o odmienności pokrywy blokowej na stokach o południowej i północnej ekspozycji.

### Podsumowanie

Geomorfologiczne studia Szczelińca Wielkiego przy wykorzystaniu danych z wysokorozdzielczego powietrznego skaningu laserowego powierzchni terenu prowadzą do konkluzji i wniosków dwojakiego rodzaju. W pierwszej kolejności odnoszą się one do cech rzeźby stoliwa Szczelińca i procesów, które tę rzeźbę kształtowały i kształtują. Niezależnie od tego, mają one także wydźwięk metodyczny i pozwalają wypowiedzieć się na temat przydatności danych LiDAR do badań geomorfologicznych w bardzo specyficznym środowisku, w którym rolę kluczowych elementów odgrywają pionowe ściany skalne, a cały obszar ma gęstą pokrywę roślinną.

Najważniejsze spostrzeżenia dotyczące się rzeźby Szczelińca Wielkiego i jego systemu morfogenetycznego można ująć następująco:

- układ form w obrębie stoliwa jest nieco odmienny niż przedstawiały to starsze opracowania kartograficzne, a wschodnia część stoliwa jest obniżona w stosunku do reszty;
- ewidentne są uwarunkowania litologiczne i strukturalne rzeźby stoliwa, szczególnie wyraźna jest zależność morfologii od dwóch głównych kierunków spękań;
- cechy rzeźby powierzchni szczytowej wskazują na istotny udział odwodnienia podpowierzchniowego i sufozji mechanicznej w niszczeniu stoliwa, co potwierdza przypuszczenia Dumanowskiego (1961);
- rzeźba stoków poniżej ścian skalnych jest bardziej złożona niż przypuszczano, a wschodnie stoki były kształtowane przez duże osuwiska.

Wizualizacja wysokorozdzielczego NMT oraz stworzonych na jego podstawie modeli pozwoliła spojrzeć na rzeźbę masywu Szczelińca w sposób niedostępny dla autorów wcześniejszych opracowań geomorfologicznych. Oczywiście ograniczenia wynikające z procesu tworzenia i obróbki danych cyfrowych nie pozwalają na stwierdzenie, że rozpatrywany NMT całkowicie wiernie oddaje rzeźbę powierzchni terenu. Największe zastrzeżenia budzi odwzorowanie układu mniejszych form ostańcowych w obrębie stoliwa Szczelińca, szczególnie na obszarach osło-

niętych zwartym lasem. Podobnie, dane LiDAR nie pokazały dokładnego rozmieszczenia wielkich bloków na stokach i u ich podnóża, podczas gdy ma ono bardzo istotne znaczenie dla odtworzenia dróg rozwoju stoku. Poprawa jakościowa musiałaby się wiązać ze zwiększeniem gęstości próbkowania podczas powietrznego skaningu laserowego i uważnym przetworzeniem tak otrzymanych danych lub też uzupełnieniami przez skanowanie naziemne. Mimo tych zastrzeżeń, za pomocą NMT możliwe było kompleksowe zbadanie głównych założeń rzeźby masywu, precyzyjne wyróżnienie poziomów morfologicznych, załomów morfologicznych oraz innych form mikrorzeźby stoków, ujawniające ich złożony kształt.

\*

Badania realizowane były ze środków na naukę, początkowo w ramach projektu badawczego PBR NR09-0029-04/2008, później ze środków statutowych 1015/S/IGRR. Autorzy dziękują Dyrekcji Parku Narodowego Gór Stołowych za udostępnienie danych cyfrowych i zgodę na prowadzenie prac terenowych oraz redakcji rocznika „Wierchy” za zgodę na reprodukcję oryginalnej mapy Szczelińca Wielkiego z 1949 r. Panu dr. hab. Jurandowi Wojewodzie dziękujemy za wiele wnikliwych uwag do pierwszej wersji artykułu.

### Piśmiennictwo / References

- Cacoń S., Košťák B., Mąkolski K., 2008, *Współczesne ruchy masowe Szczelińca Wielkiego*, [w:] A. Witkowski, B. M. Pokryszko, W. Ciężkowski (red.), *Przyroda Parku Narodowego Gór Stołowych*, Wydawnictwo Parku Narodowego Gór Stołowych, Kudowa-Zdrój, s. 114-127.
- Czepe Z., 1949, *Labirynt skalny na szczycie Gór Stołowych*, Wierchy, 19, s. 44-57.
- Czepe Z., 1952, *Z morfologii Gór Stołowych*, Ochrona Przyrody, 20, s. 236-252.
- Dikau R., Brunnsden D., Schrott L., Ibsen M.-L., 1996, *Landslide Recognition*, Wiley, Chichester.
- Dumanowski B., 1961, *Zagadnienie rozwoju stoku na przykładzie Gór Stołowych*, Czasopismo Geograficzne, 32, 3, s. 311-324.
- Jerzykiewicz T., 1966, *Środowisko sedymentacyjne piaskowców Szczelińca*, Acta Geologica Polonica, 16, s. 413-444.
- Jerzykiewicz T., 1968a, *Sedymentacja górnych piaskowców ciosowych niecki śródsudeckiej (górną kreda)*, Geologia Sudetica, 4, s. 409-462.
- Jerzykiewicz T., 1968b, *Uwagi o orientacji i genezie ciosu w skałach górnokredowych niecki śródsudeckiej*, Geologia Sudetica, 4, s. 465-478.
- Kasprzak M., 2012, *Relief of the Stołowe Mountains – a test area for studies in geomorphometry*, [w:] M. Kasprzak, P. Migoń (red.), *Góry Stołowe, Geology, Landforms, Vegetation Patterns and Human Impact*, Instytut Geografii i Rozwoju regionalnego UW, Wrocław, s. 55-73.
- Kasprzak M., Traczyk A., 2010, *Geomorfometria granitowej części Karkonoszy*, Landform Analysis, 13, s. 33-46.
- King L.C., 1953, *Canons of landscape evolution*, Bulletin of the Geological Society of America, 64, s. 721-752.
- Liu X., 2008, *Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues*, Progress in Physical Geography 32, 1, s. 31-49.



- Migoń P., 2008, *Rzeźba i rozwój geomorfologiczny Gór Stołowych*, [w:] A. Witkowski, B.M. Pokryszko, W. Ciężkowski (red.), *Przyroda Parku Narodowego Gór Stołowych*, Wydawnictwo Parku Narodowego Gór Stołowych, Kudowa-Zdrój, s. 49-69.
- Migoń P., Kasprzak M., 2011, *Morfologiczny zapis ruchów masowych na progach morfologicznych Gór Stołowych w świetle numerycznego modelu wysokości o dużej rozdzielczości*, *Przyroda Sudetów*, 14, s. 115-124.
- Migoń P., Zwiernik M., 2006, *Strukturalne uwarunkowania rzeźby północno-wschodniego proggu Gór Stołowych*, *Przegląd Geograficzny*, 78, 3, s. 319-338.
- Migoń P., Latocha A., Parzóch K., Kasprzak M., Owczarek P., Witek M., Pawlik Ł., 2011, *Współczesny system morfogenetyczny Gór Stołowych*, [w:] T. Chodak, C. Kabała, J. Kaszubkiewicz, P. Migoń, J. Wojewoda (red.), *Geoekologiczne warunki środowiska przyrodniczego Gór Stołowych*, Wind, Wrocław, s. 1-52.
- Olaya V., 2009, *Basic Land-Surface Parameters*, [w:] T. Hengl, H.I. Reuter (red.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, *Developments in Soil Science*, 33, Elsevier, s. 141-169.
- Olaya V., Conrad O., 2009, *Geomorphometry in SAGA*, [w:] T. Hengl, H.I. Reuter (red.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, *Developments in Soil Science*, 33, Elsevier, s. 293-308.
- Pašek J., Pulinowa M.Z., 1976, *Block movements of Cretaceous sandstones in the Stolowe Gory Mts., Poland*, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13, s. 79-82.
- Pulinowa M.Z., 1989, *Rzeźba Gór Stołowych*, *Prace Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*, 1008.
- Rogaliński J., Słowiak G., 1958, *Rzeźba Gór Stołowych w świetle teorii pedyplanacji*, *Czasopismo Geograficzne*, 29, 4, s. 473-496.
- Raport dostawy*, ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, Część Nr 3, Etap Nr 03, 2011-09-12.
- Sithole G., Vosselman G., 2004, *Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, s. 85-101.
- Urbański J., 2008, *GIS w badaniach przyrodniczych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Willers J., Jin M., Eksioglub B., Zusmanisc A., O'Harad Ch., Jenkins J., 2008, *A post-processing step error correction algorithm for overlapping LiDAR strips from agricultural landscapes*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 64, s. 183-193.
- Wojewoda J., 1997, *Upper Cretaceous littoral-to-shelf succession in the Intrasedetic Basin and Nysa Trough, Sudety Mts.*, [w:] J. Wojewoda (red.), *Obszary źródłowe: zapis w osadach*, Wind, Wrocław, s. 81-96.
- Wojewoda J., 2008, *Budowa geologiczna obszaru PNGS*, [w:] A. Witkowski, B.M. Pokryszko, W. Ciężkowski (red.), *Przyroda Parku Narodowego Gór Stołowych*, Wydawnictwo Parku Narodowego Gór Stołowych, Kudowa-Zdrój, s. 24-37.
- Wojewoda J., Białek D., Bucha M., Głuszyński A., Gotowała R., Krawczewski J., Schutty B., 2011, *Geologia Parku Narodowego Gór Stołowych – wybrane zagadnienia*, [w:] T. Chodak, C. Kabała, J. Kaszubkiewicz, P. Migoń, J. Wojewoda (red.), *Geoekologiczne warunki środowiska przyrodniczego Gór Stołowych*, Wind, Wrocław, s. 53-96.

PIOTR MIGOŃ, MAREK KASPRZAK

LIDAR DEM-BASED ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGY OF THE SZCZELINIEC  
WIELKI MESA IN POLAND'S STOŁOWE MOUNTAINS

Szczeliniec Wielki (meaning 'Great Fissured Hill') is the name given to a sandstone-capped mesa in Poland's Stołowe Mountains, a part of the Middle Sudetes mountain range present in the south west of the country. It represents a unique example of this type of landform in Poland and, thanks mainly to the presence of an extensive tract of ruiniform relief on its top, has been popular among visitors since the end of the 18th century. However, only limited geomorphological research has been carried out here previously, and the few existing publications are based on field observations, rather than any more objective characterisation of the mesa morphology (the latter actually difficult to achieve due to rocky terrain and dense vegetation). However, the availability of high-resolution elevation data collected by airborne laser scanning (LiDAR ALS) has now allowed us to re-examine the geomorphology of Mt Szczeliniec Wielki, and in this way to identify a number of landforms unaccounted for before. This has in turn provided a background for the deciphering by means of process-from-form reasoning of the pathways along which the mesa evolved in geomorphic terms.

Mt Szczeliniec Wielki is a part of a sandstone/mudstone tableland underlain by Upper Cretaceous shallow marine sedimentary formations. The mesa cap is built of a massive quartz sandstone, widely jointed, and deposited in packages which show different types of bedding. Below the sandstones are fine-grained sediments such as marls, mudstones, and fine-grained calcareous sandstones. The thickness of the cap is c. 70 m, of which c. 50 m is exposed, whilst the relative elevation of the mesa in respect to the adjacent plateau level is c. 150 m.

Geomorphologically, the mesa can be divided into two units. These are: (1) the top surface with its ruiniform relief, sandstone residuals (tors), and widened clefts reflecting preferential weathering or block collapses; and (2) slopes, whose morphology can be further subdivided into sandstone cliffs on the upper slope and concave mantled hillslopes below, covered by a massive talus of sandstone blocks. Some of the latter attain colossal dimensions, more than 15 m long. Among notable geomorphic features in the near-margin NE part of the mesa are deep open clefts, more than 15 m deep, with outer walls leaning outwards. Their presence indicates deep-seated gravitational deformations at the sandstone/mudstone interface, leading to forward toppling and massive rock-wall collapses. Elsewhere, however, cliff retreat is accomplished by block-by-block disintegration, whilst in the eastern sector sandstone blocks have been carried further down by landslides initiated in the fine-grained sedimentary unit, loaded by the massive caprock. Boulder-filled depressions in the southern part of the mesa are also noteworthy. They are interpreted as products of gradual subsidence of the sandstone cap into voids and cavities produced by subsurface erosion and piping.

This study also identifies challenges for the future. A question unanswered so far concerns the origin of huge sandstone blocks at the foot of the mesa. These are definitely allochthonous and derived from the caprock, but the mechanisms of downslope transport remain mysterious. Neither direct fall for such a distance nor subsequent sliding or creep seem plausible. It is possible that the boulders testify to a time when the mesa covered a greater area than it does today.

