



Geneza skalnych miast na płaskowyżach piaskowcowych

The origin of 'rock cities' on sandstone plateaus

Filip Duszyński • Piotr Migon

Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego
pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław
filip.duszynski@uwr.edu.pl • piotr.migon@uwr.edu.pl

Zarys treści. W polskiej i zagranicznej literaturze geomorfologicznej pojawia się niekiedy określenie „skalne miasto”, stosowane zwłaszcza do opisu rzeźby erozyjno-denudacyjnej w skałach piaskowcowych. Termin ten, w Polsce używany między innymi w odniesieniu do zespołów form skalnych w Górach Stołowych, nie został nigdy formalnie zdefiniowany i często jest przytaczany w cudzo-słowie, co wskazuje na wątpliwości, czy jest to określenie ścisłe czy potoczne. W artykule została zaproponowana definicja skalnego miasta jako pełnoprawnego terminu naukowego, omówiono także uwarunkowania litologiczno-strukturalne takiego typu rzeźby oraz procesy odpowiedzialne za tworzenie i rozwój skalnych miast.

Słowa kluczowe: geomorfologia strukturalna, rzeźba piaskowcowa, erozja podpowierzchniowa, ruchy masowe.

Wstęp

Obszary zbudowane z poziomo zalegających warstw piaskowca są znane z obecności spektakularnych krajobrazów powstających na skutek selektywnego wietrzenia skał, poszerzania spękań i ruchów masowych różnego typu, niekiedy z dodatkowym udziałem erozji wodnej i rozwojem kanionów rzecznych. Powszechnie znane są płaskowyże, kaniony, góry-świadki i łuki skalne na Wyżynie Kolorado w Stanach Zjednoczonych, chronione w licznych parkach narodowych (Lohman, 1974; Howard i Kochel, 1988; Dixon, 2010). Równie atrakcyjne wizualnie są płaskowyże piaskowcowe Australii w Górach Błękitnych (Blue Mountains) i na Wyżynie Kimberley (np. Young, 1986; Young i Wray, 2015), krajobrazy typu Danxia w mezozoicznych seriach zlepieńcowo-piaskowcowo-mułowcowych w południowo-wschodnich Chinach (Peng i inni, 2015), zespoły masywów i gór wyspowych południowej Jordanii (Goudie i inni, 2002), rozczłonkowane płaskowyże północnej Sahary (Tassili w Algierii, Tadrart Acacus w Libii – np. Zerboni i inni, 2015) czy zespoły rzeźby erozyjno-denudacyjnej na Wyżynie Brazylijskiej (Serra

da Capivara, Sete Cidade – Della Fávera, 1999; Silva Mutzenberg i inni, 2015). Część z nich została wpisana na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO właśnie ze względu na wybitne walory geomorfologiczne i krajobrazowe.

Szczególną odmianą rzeźby erozyjno-denudacyjnej w skałach piaskowcowych są „skalne miasta” – obszary, w których skalne bloki są rozdzielone mniej lub bardziej regularnym systemem głębokich rozpadlin, niekiedy poszerzonych do postaci placów i skalnych uliczek (fot. 1). Wspólnie tworzą one skalne labirynty zajmujące powierzchnię nawet kilku kilometrów kwadratowych. Jednym z regionów stosunkowo częstego występowania „skalnych miast” w piaskowcach jest między innymi Europa Środkowa, a ściślej – położona w jej obrębie struktura geologiczna znana pod nazwą czeskiej płyty kredowej, która swoim zasięgiem obejmuje niewielki fragment Saksonii w Niemczech, równoleżnikowy pas w północnych Czechach na południe od Sudetów i sięga na teren Polski w postaci odizolowanego od reszty płyty masywu Gór Stołowych. „Skalne miasta” i labirynty są najbardziej efektownymi zespołami rzeźby erozyjno-denudacyjnej w tym regionie. Weszły one w skład trzech parków narodowych (po jednym w każdym z wymienionych



Fot. 1. Skalne miasto Prachovské skály w północnych Czechach (Czeski Raj) – charakterystycznymi elementami są wąskie przechodnie korytarze na liniach spękań oraz wieże i mury skalne (fot. P. Migoń)

The Prachovské skály ‘rock city’ in northern Czechia (‘Bohemian Paradise’) – its characteristic elements are narrow, but passable corridors along joints, as well as rock walls and towers

państw) i są chronione w parkach krajobrazowych oraz rezerwach przyrody. Paradoksalnie jednak, geneza tych wyjątkowych zespołów form rzeźby nie została w pełni wyjaśniona, a w opisach regionalnych są one zwykle przedstawiane na dużym poziomie ogólności. Uwaga geomorfologów częściej była skoncentrowana na mniejszych formach wietrzenia i przejawach ruchów masowych, natomiast całościowe ujęcia były nieliczne (Cílek i inni, 2007; Vítek, 2016), a dodatkowo element opisu zdecydowanie przeważał nad rozważaniami genetyczno-wiekowymi (np. Balatka i inni, 1969). Przykłady tego ograniczonego zainteresowania można dostarczyć również z obszaru Polski. Symptomatyczne jest, że labirynt skalny Błędných Skał w Górach Stołowych nie stał się jak dotąd przedmiotem żadnego obszernego opublikowanego studium, a pierwsze kompleksowe opracowanie rzeźby Szczelińca Wielkiego pochodzi dopiero z 2015 r. (Migoń i Kasprzak, 2015). Brakuje między innymi map geomorfologicznych dla obu tych obszarów. W ostatnich latach powstało jednak kilka prac, które przybliżają problem i zawierają nowe propozycje wyjaśnienia genezy labiryntów.

Celem tego artykułu jest prezentacja poglądów na procesy kształtujące labirynty skalne w skałach piaskowcowych, na przykładach z Masywu Czeskiego. Artykuł ma głównie charakter przeglądowy i uwypukla najnowszą literaturę w tym zakresie, zawiera jednak także odniesienia do własnych obserwacji autorów poczynionych na płaskowyżu Gór Stołowych, w przyległej Broumovskiej vrchovinie w Czechach oraz w Czeskim Raju. Przeprowadzono również krótką dyskusję nad terminami, którymi posługują się geomorfolodzy opisujący labirynty skalne.

Definicja „skalnego miasta” i problemy terminologiczne

Biorąc pod uwagę morfologiczną wyrazistość takich obszarów jak wierzchowina Szczelińca Wielkiego czy Adršpašské skalní město w Czechach, zaskakujący jest brak w polskim (i nie tylko) nazewnictwie geomorfologicznym odpowiednich zbiorczych terminów opisujących ten typ rzeźby erozyjno-denudacyjnej. M. Klimaszewski (1981, s. 529) charakteryzuje go następującymi słowami: „W obrębie płyt skalnych budujących powierzchnię i odznaczających się silnym uszczelinieniem oraz dużą przepuszczalnością powstają i rozwijają się wskutek wietrzenia i odpadania, postępującego wzdłuż pionowych i poziomych szczelin, oraz dzięki spłukującej działalności wody deszczowej fantastyczne formy skalne”, po czym określa mianem „skamieniałego miasta” i „labiryntu skalnego”. W obu przypadkach użył cudzysłowu, co pozwala przypuszczać, że nie traktował tych określeń jako pełnoprawne terminy naukowe. Pierwszego z tych określeń użył także do opisu rzeźby Czeskiego Raju, obszaru Vila Velha w południowej Brazylii i Błędných Skał (s. 633). Podobnie P. Migoń (2006, s. 252) określenie „skalne miasto” wzięt w cudzysłów i przedstawił jako synonim labiryntu skalnego. Słownik geologii dynamicznej (Jaroszewski i inni, 1985) w ogóle nie zawiera takiego hasła.

W najstarszych polskich opracowaniach poświęconych rzeźbie Gór Stołowych używano niemal wyłącznie terminu „labirynt skalny” (Czeppe, 1949, 1952; Rogaliński i Słowiak, 1958). Stosowano go w odniesieniu do form znajdujących się na wierzchołkach Szczelińca Wielkiego i Małego, a także do opisu Błędnych Skał. Określenie „skalne miasto” nie było jednak polskim badaczom zupełnie obce, o czym świadczyć może fakt, że Z. Czeppe (1949) nazwał labirynt skalny Szczelińca Wielkiego „odpowiednikiem »Skamieniałego Miasta« w czeskiej części Gór Stołowych”, mając zapewne na myśli Adršpašské skalní město. Terminu tego po stronie polskiej wówczas jednak nie zaadaptowano. Warto wspomnieć, że niektóre obiekty o analogicznej do labiryntów rzeźbie, m.in. z rejonu Białych Ścian czy okolic kulminacji płaskowyżu Skalniaka, Z. Czeppe (1952) nazywał po prostu „zgrupowaniami form skalnych”. Prawdopodobnie odróżniał w ten sposób zespoły mniejsze powierzchniowo (okolice Skalniaka) lub o wyższym stopniu rozproszenia pojedynczych form (rejon Białych Ścian). W późniejszym okresie M. Z. Pulinowa (1989) wyróżniła trzy typy rzeźby w obrębie płaskowyżów piaskowcowych Gór Stołowych: skalne miasta (pisane bez cudzysłowu), powierzchnie o małej liczbie form skalnych oraz powierzchnie bez form skalnych, nie zdefiniowała jednak pierwszego z tych typów.

Odmierna sytuacja panuje w nazewnictwie stosowanym w Czechach, niewątpliwie ze względu na powszechne występowanie labiryntów skalnych w obrębie północnoczeskiej płyty piaskowcowej. Geologiczny słownik naukowy (Svoboda i inni, 1983) zawiera hasło „skalne miasto”, objaśnione następująco: „charakterystyczny, silnie rozczłonkowany element rzeźby terenu uwarunkowany cechami petrograficznymi skały i uszczelinieniem. Wskutek dobrej przepuszczalności skał spływ powierzchniowy wody deszczowej jest nieznaczny, woda szybko wnika pod ziemię i tworzą się głęboko wcięte doliny rozdzielające bloki o pionowych ścianach” (t. 2, s. 445). Termin „skalne miasto” w tym znaczeniu pojawia się także w podręczniku geomorfologii autorstwa J. Demka (1987, s. 94), jest też osobnym hasłem w ilustrowanym atlasie form rzeźby (Rubin i Balatka, 1987). Nieco szerszy zakres pojęciowy „skalnego miasta” przyjęli J. Adamovič i inni (2010). Publikacja ich autorstwa jest *de facto* katalogiem form piaskowcowych różnego rzędu, występujących nie tylko w obrębie skalnych miast zdefiniowanych zgodnie z propozycją J. Svobody i innych (1983), ale także w obszarach z licznymi wychodniami piaskowcowego podłoża w ogólności.

Jak zauważyli V. Cílek i inni (2007), termin „skalne miasto” nie ma odpowiednika w terminologii anglojęzycznej, a pojawiające się w tłumaczeniach określenie *rock city* czy *stone city* jest dosłownym przekładem. Najważniejsze anglojęzyczne publikacje słownikowe i encyklopedyczne terminu takiego nie zawierają (Fairbridge, 1968; Whittow, 1984; Goudie i inni, 2004), aczkolwiek pojawia się on sporadycznie w tytułach artykułów (Millar, 2007). W przeglądowym tekście o morfologii obszarów piaskowcowych D.A. Robinson i R.B.G. Williams (1994) przytoczyli przykłady z północnych Czech, charakteryzując je jako labirynty korytarzy (*passageways*)

rozdzielających masywne wieże zbudowane z piaskowców. Nie zaproponowali jednak jednego terminu dla opisu takiej rzeźby i posłużyli się zwrotem „tak zwane »skalne miasta«” (s. 377). Określenie „skalne miasto/miasto skał” funkcjonuje również jako nazwa własna (Cunningham, 1971; Mueller i Twidale, 1988), ale szczegóły opisu tych miejsc jednoznacznie wskazują, że jest to inny typ rzeźby niż skalne miasta w piaskowcach kredowych północnych Czech. Różnice polegają przede wszystkim na większym rozproszeniu wychodni i mniejszej energii rzeźby. Z analogicznym, nieformalnym określeniem *Felsenstadt* można się spotkać również w kręgu niemieckojęzycznym. Przykładowo, taką nazwą jest określane rozległe skupisko wychodni granitowych w górach Fichtelgebirge w północnej Bawarii – Felsenstadt Luisenburg.

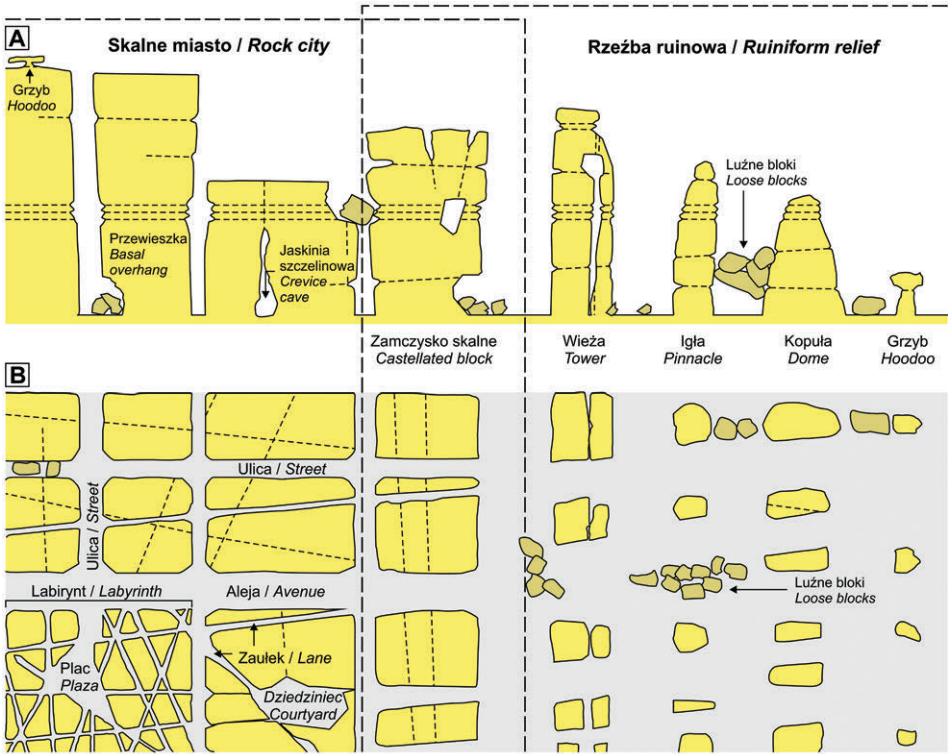
W literaturze francuskojęzycznej skalne labirynty w masywach piaskowcowych północnej Afryki zostały obszernie opisane przez M. Mainguet (1972), która zaproponowała określenie *relief ruiniforme*, treściowo wyraźnie zbliżone do zakresu pojęcia „skalne miasto” w rozumieniu badaczy czeskich. Z takim określeniem obszarów cechujących się obecnością licznych ostańców skalnych, znacząco prze-modelowanych przez procesy wietrzeniowe i stąd cechujących się urozmaiconą morfologią, można się też spotkać w publikacjach anglojęzycznych – są opisywane jako *ruiniform relief* („rzeźba ruinowa”) (Jennings, 1983; Viles i Pentecost, 1994; Grimes, 2012). Tym samym terminem określono rozproszony zespół ostańców Vila Velha w południowej Brazylii (De Melo i Coimbra, 1999). Wyrażeniem *ruiniform relief* posługują się także R. W. Young i inni (2009) omawiając różne typy rzeźby obszarów piaskowcowych, krótko objaśniając go jako „labirynt wież i iglic ograniczonych urwiskami skalnymi”, co jest zbieżne z definicją przyjmowaną w języku czeskim (s. 174). Równocześnie jednak w innym miejscu przywołują przykłady z Europy Środkowej, używając określenia „skalne miasto” (bez cudzysłowu w oryginale, s. 193), co może wskazywać na akceptację takiego terminu.

Znaczeniowo termin „skalne miasto” odpowiadałby również powszechnie stosowanym w terminologii chińskiej określeniom *fengcong* (tłumaczone na język angielski jako *peak cluster*) i *fenglin* (tłumaczone jako *peak forest*). Odpowiadają one następującym sytuacjom morfologicznym: *fengcong* to zespół blisko położonych ostańców, w tym złączonych podstawami, podczas gdy *fenglin* odnosi się do form ostańcowych występujących w większym oddaleniu od siebie, wyrastających z płaskiej powierzchni. Oba te terminy są od wielu lat używane do opisu rzeźby krasowej (odpowiednio – krasu kopiastego i krasu wieżowego) (Ford i Williams, 2007), ale posłużono się nimi także w charakterystyce rzeźby erozyjno-denudacyjnej obszarów zbudowanych ze skał klastycznych, określanych w Chinach jako rzeźba typu Danxia (Peng i inni, 2015). Morfologia niektórych obszarów Danxia, na przykład Taining w prowincji Fujian, w pełni odpowiada zakresowi pojęciowemu „skalnego miasta” w rozumieniu czeskim.

Dalszym problemem terminologicznym w języku polskim jest brak uzgodnionego nazewnictwa mniejszych form w obrębie skalnych miast/labiryntów skalnych,

zarówno dla form wklęsłych, jak i wypukłych. W odniesieniu do tych pierwszych zwykle są przejmowane określenia z języka potocznego, np. „korytarze”, „zaufki”, „place”, te drugie są opisywane w nawiązaniu do ogólnego kształtu („wieża”, „iglica”, „ściana”), co jednak nie oddaje pozycji w obrębie większego zespołu. Pozornie bardziej adekwatne „bloki” czy „masywy” niosą za sobą ryzyko nieporozumienia, jako że „blok” to tradycyjnie element skalny oddzielony od podłoża (Alexandrowicz, 1970), o długości powyżej 1 m (Traczyk, 2009), podczas gdy „masyw” zwyczajowo odnosi się elementów znacznie większych niż ostańce w obrębie skalnych miast. Podobny problem natury terminologicznej pojawia się zresztą w przypadku rzeźby krasowej, gdzie także rozwijają się skalne miasta (Lehmann, 1970; Grimes, 2012), ale mniejsze elementy w ich obrębie pozostają nienazwane, za wyjątkiem „uliczek krasowych” (Pulina, 1999).

Jakkolwiek przedstawienie kompletnej propozycji terminologicznej mieści się poza zakresem tego artykułu, jednoznaczne określenie, czym jest skalne miasto według jego autorów, wydaje się być niezbędne przed przystąpieniem do dalszych rozważań. Proponowana jest zatem następująca definicja: **skalne miasto** – typ rzeźby erozyjno-denudacyjnej, której głównymi elementami są system głębokich, przechodnich i połączonych ze sobą szczelin i uliczek, z rozszerzeniami w miejscach ich krzyżowania, przy czym ich układ w planie naśladuje przebieg nieciągłości w masywie skalnym, oraz położone między nimi wychodnie skalnego podłoża o blokowym pokroju i stromych ścianach (ryc. 1). Jest to definicja opisowa, niewskazująca wprost na genezę takiego typu rzeźby, natomiast podkreślająca lokalne uwarunkowania strukturalne. Nie zawiera także ograniczeń odnośnie litologii skał i relacji do większych struktur geologicznych, jako że cechy morfologiczne uwzględnione w definicji można spotkać zarówno w strukturach płytowych, monoklinalnych, jak też w skałach różnego pochodzenia: osadowych klastycznych, węglanowych, magmowych głębinowych i wylewnych. Może stać się przez to punktem wyjścia do bardziej szczegółowej typologii skalnych miast ze względu na wielkość, głębokość uliczek, relację do struktury itd. Należy natomiast podkreślić, że rzeźba składająca się z występujących w rozproszeniu ostańców skalnych (skałek), której przykładami są Skalne Grzyby w Górach Stołowych (Walczak, 1963) czy Skałki Ciężkowickie na Pogórzu Rożnowskim (Alexandrowicz, 1970) nie spełnia warunków określonych w zaproponowanej wyżej definicji. Odpowiada ona natomiast zakresowi pojęcia „rzeźba ruinowa”, przy czym P. Migoń i inni (2017) podkreślili, że granica pomiędzy skalnymi miastami i rzeźbą ruinową jest nieostra, a formy ruinowe mogą (choć nie muszą) być produktem zaawansowanej degradacji wcześniej istniejących skalnych miast. Dobrym przykładem sytuacji przejściowej jest zgrupowanie skałek piaskowcowych Brimham Rocks w Yorkshire (Anglia), w obrębie których pozostały nieliczne bardziej zwarte partie o cechach skalnego miasta, jednak większość form ostańcowych występuje w oddaleniu od siebie, tworząc rzeźbę ruinową (fot. 2).



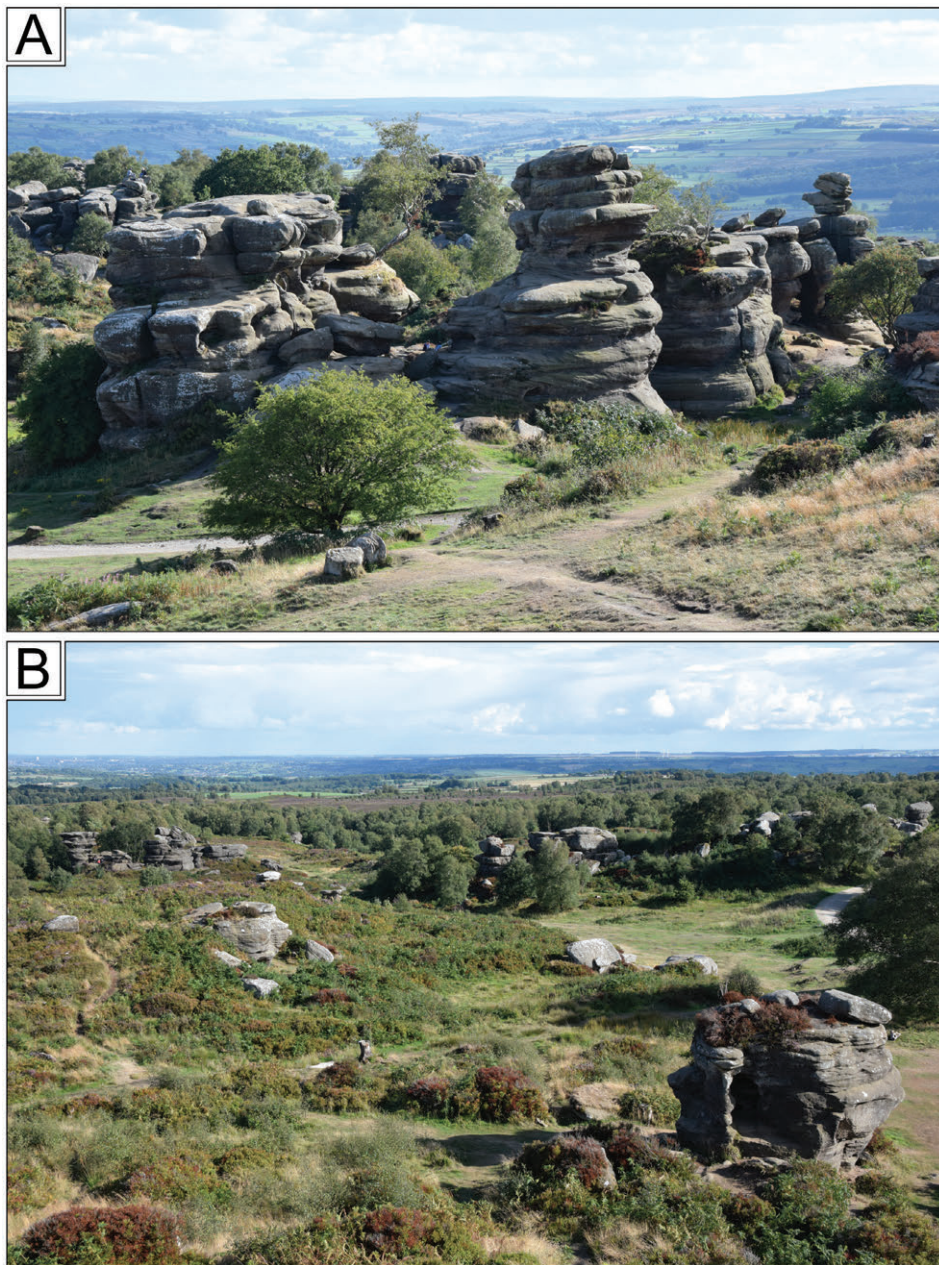
Ryc. 1. Relacja skalnego miasta do rzeźby ruinowej i nazewnictwo form rzeźby niższego rzędu
The relationship between 'rock cities' and ruiniform relief, and the terminology applied to the minor landforms

Opracowanie własne / Own elaboration.

Uwarunkowania litologiczne i strukturalne

Geologiczne uwarunkowania labiryntów i skalnych miast w skałach piaskowcowych należy rozpatrywać w kontekście litologicznym, czyli w odniesieniu do cech skały wynikających z jej składu oraz strukturalnym, czyli uwzględniając sposób ułożenia warstw, ich cechy geometryczne, konfigurację i gęstość spękań oraz innych nieciągłości przecinających masyw skalny.

Przegląd przykładów z czeskiej płyty kredowej wskazuje, że skalne miasta rozwinęły się tylko w niektórych odmianach piaskowców. W Górach Stołowych są to przede wszystkim piaskowce kwarcowe najwyższego poziomu morfostrukturalnego (Pulinowa, 1989) – tzw. górne piaskowce ciosowe, natomiast w piaskowcach poziomu środkowego – tzw. środkowych piaskowcach ciosowych, cechujących się większym udziałem skaleni potasowych i klasyfikowanych jako subarenit kwarcowo-skaleniowy (Wojewoda, 1997) – analogiczne zespoły rzeźby są praktycznie



Fot. 2. Brimham Rocks w północnej Anglii ilustrują przejście od rzeźby skalnego miasta, z ostańcowymi masywami położonymi blisko siebie (A), do rzeźby ruinowej z rozproszonymi formami skałkowymi i rozwaliskami skalnymi (B) (fot. P. Migoń)

Brimham Rocks in northern England illustrate the transition from a 'rock city', with closely spaced castellated sandstone outcrops (A) to a ruiniform relief with dispersed tors and boulder piles (B)

nieobecne. Niemniej, w czeskiej części Gór Stołowych (Broumovskiej vrchovinie) skalne miasta w środkowych piaskowcach ciosowych występują w obrębie zboczy głębokich kanionów rozcinających zaproże kuesty Broumovskich sten i częściowo na wierzchovinie (Vítek, 1979, 2016). Najpełniej rozwinięte skalne miasta Broumovskiej vrchoviny w okolicach miejscowości Teplice i Aadršpach powstały w obrębie piaskowców kwarcowych (Adamovič i inni, 2010), podobnie jest w Czeskim Raju (Adamovič i inni, 2006, Mertlík i Adamovič, 2016) i Czeskiej Szwajcarii (Vařilová, 2016). Opisanie formacje piaskowcowe mają różny wiek i różne nazwy, ale ich cechą wspólną jest zdecydowana dominacja ziaren kwarcu w szkielecie ziarnowym i duży udział frakcji ilastej (głównie kaolinitu) w spoiwie.

Serie piaskowcowe, w których rozwinęły się skalne miasta, jakkolwiek cechują się podwyższoną wytrzymałością mechaniczną w stosunku do skał występujących w otoczeniu (piaskowców wapnistych, opok, mułowców i margli), w kategoriach bezwzględnych nie należą do skał bardzo wytrzymałych. Pomiarów terenowych przy wykorzystaniu młotka Schmidta typu N (Placek, 2006) wykazały, że pojedyncze odczyty rzadko przekraczały wartość 50 w skali urządzenia (Migoń i Zwiernik, 2006; Placek, 2011), a wartości średnie dla niezwiędzłej skały najczęściej wynosiły około 45, co oznacza przynależność tylko do średniej klasy wytrzymałości. Na pozornie trudny do wyjaśnienia związek skalnych miast i wysokich ścian piaskowcowych z podłożem o umiarkowanej wytrzymałości zwrócono uwagę także w odniesieniu do niewielkich powierzchniowo skalnych miast w południowo-wschodniej Anglii (Robinson i Williams, 1994) oraz znacznie rozleglejszych zespołów form tego typu w północnej Australii (Young i inni, 2009). Równocześnie na przykładzie Sudetów warto odnotować, że występują w ich obrębie liczne typy skał o wyższej wytrzymałości (Placek, 2011), w których żadne skalne miasta nie powstały lub zajmują one bardzo niewielką powierzchnię (Michniewicz i inni, 2016).

Rozwiązanie paradoksu występowania ścian skalnych w piaskowcach o umiarkowanej wytrzymałości jest złożone, a znaczenie ma zarówno czynnik litologiczny, jak i strukturalny. Wzrost wytrzymałości, pozwalający na utrzymanie wysokiej ściany skalnej w stanie względnej stabilności, jest przyczynowo związany z rozwojem skorup (pancerzy) powierzchniowych (ang. *surface crust*) na drodze procesów fizykochemicznych i biochemicznych. Ich znaczenie podkreślał R.W. Young (1986, 1987) dla skalnych miast w generalnie mało zwięzłych piaskowcach północnej Australii, następnie D.A. Robinson i R.B.G. Williams (1994) dla południowej Anglii, A. Goudie i inni (2002) dla piaskowcowych urwisk w Jordanii, a ostatnio M. Slavík i inni (2017) dla wychodni piaskowców w północnych Czechach. Skorupy te, tworzące się przez wytrącanie związków żelaza, rekrytalizację krzemionki i wzrost grzybów, porostów i glonów w przestrzeni międzyziarnowej, wzmacniają zewnętrzną powierzchnię skały i ograniczają efektywność procesów wietrzeniowych oddziałujących na piaskowiec. M. Slavík i inni (2017) wykazali, że wytrzymałość skorup biogenicznych na rozciąganie może być nawet dwunastokrotnie większa niż skały pozbawionej takich skorup. Obecność ochronnej skorupy sprawia równocześnie, że degradacja

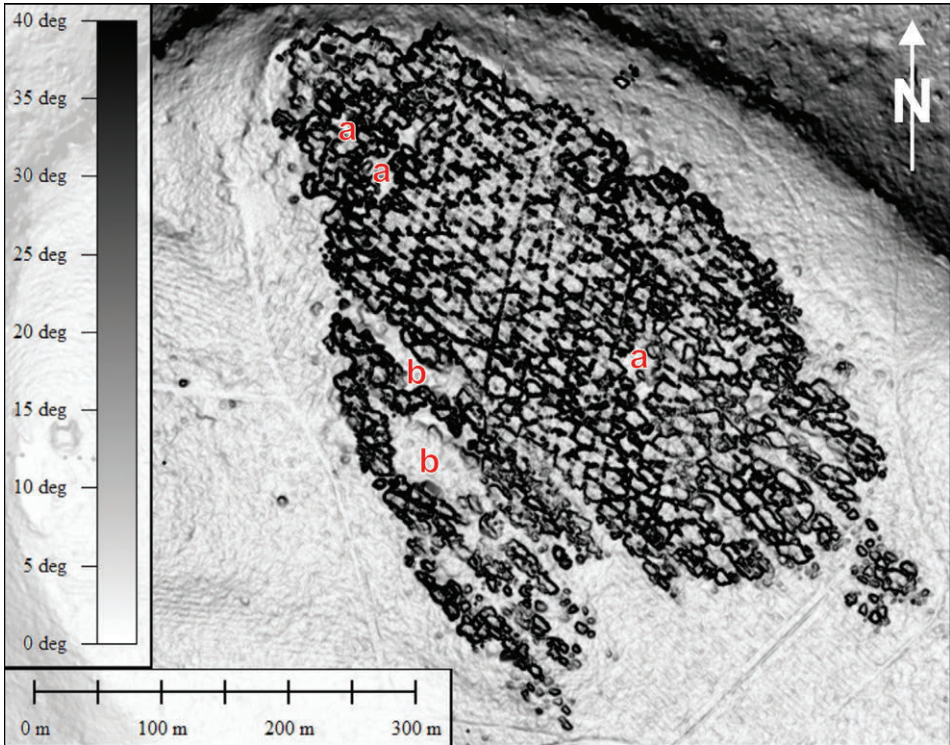
wychodni skalnych zachodzi w mniejszym stopniu poprzez oddzielanie się pojedynczych ziaren, co prowadziłoby do złagodzenia rzeźby (Young i inni, 2009), a częściej przybiera charakter jednorazowych ruchów masowych – obrywania, ześlizgów i przewracania. W rezultacie pionowa ściana skalna, jakkolwiek podlega cofaniu, zachowuje kształt charakterystyczny dla skalnego miasta.

Znaczenie czynnika strukturalnego ujawnia się na dwa główne sposoby: w mezo- i makroskali. W mezoskali kluczową rolę odgrywa dość powszechna w piaskowcach kwarcowych i kwarcowo-skalieniowych duża odległość między kolejnymi powierzchniami nieciągłości – spękaniami i powierzchniami granicznymi ławic (Adamovič i inni, 2010). Wynosi ona typowo od 1–2 m do 4–5 m, ale w wielu miejscach można spotkać się z monolitycznymi fragmentami wydzielanymi przez spękania pionowe o rozstawie powyżej 10 m i subhoryzontalne powierzchnie graniczne rozmieszczone co 3–4 m (fot. 3). Wówczas, mimo tego, że wytrzymałość skały mierzona w punkcie jest tylko umiarkowana, wytrzymałość masywu skalnego (ang. *rock mass strength*) znacząco rośnie, co wpływa stabilizująco na ściany skalne (np. Remisz, 2007). Decydującą cechą w makroskali jest często regularny układ spękań pionowych, dla Gór Stołowych szczegółowo opisany przez T. Jerzykiewicza (1968) (ryc. 2). Niezależnie od obecności dwóch lub trzech kierunków głównych, w obrębie każdego zespołu można zwykle wyróżnić strefy szczególnego



Fot. 3. Masywne piaskowce Teplickiego skalnego miasta w Czechach, z rozstawem głównych spękań pionowych powyżej 10 m (fot. P. Migoń)

Massive sandstones of Teplice Rock City in Czechia, with more than 10 m spacing of major vertical joints



Ryc. 2. Skalne miasto Błędnych Skał w Górach Stołowych, przedstawione za pomocą mapy spadków terenu. Ulice (wąskie korytarze między ścianami skalnymi) odzwierciedlają się jako ciemne linie. Uwagę zwracają place w zachodniej i środkowo-wschodniej części labiryntu (a) oraz duże dziedzińce w części południowej (b)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych wysokościowych z wysokorozdzielczego modelu cyfrowego LiDAR.

The Polish 'rock city' of Błędne Skały in the Stołowe Mountains, shown by means of a slope map.

'Streets' (narrow corridors between rock walls) are reflected as dark lines. Note 'plazas' in the western and east-central parts of the labyrinth (a) and 'courtyards' in the southern part (b)

Source: own elaboration based on data derived from LiDAR high-resolution terrain scanning model.

osłabienia masywu skalnego, objawiające się zagęszczeniem spękań, odpowiadające angielskiemu określeniu *master joints*. Wzdłuż tych stref koncentruje się działanie procesów niszczących i są one stopniowo poszerzane do postaci szerokich ulic i alej, natomiast w miejscach skrzyżowania takich stref powstają większe place i kotlinowate obniżenia. Mniej wydajne niszczenie masywu w linii pojedynczych spękań pionowych prowadzi natomiast do powstania wąskich uliczek łączących większe formy negatywne lub kończących się ślepo.

Dodatkowe znaczenie w kształtowaniu morfologii piaskowcowych skalnych miast może mieć zróżnicowanie gęstości powierzchni uławicenia w profilu pionowym. Występowanie odporniejszej, bardziej masywnej warstwy u góry skutkuje powstaniem okapów w górnej części ściany skalnej, a szerokość ulic skalnego



Fot. 4. Zwężające się ku górze i częściowo sklepione korytarze w skalnym mieście Błędnych Skał w Górach Stołowych. Górne fragmenty ścian są zbudowane z bardziej masywnego piaskowca (fot. P. Migoń)

Corridors in the 'rock city' of Błędne Skały (Stołowe Mountains, Polish Sudetes) narrow higher up and are even partly roofed. The upper sections of rock faces are built of more massive sandstone

miasta rośnie ku dołowi. Prowadzi to do powstania form negatywnych przypominających tunele, a przykładem mogą być liczne korytarze w Błędnych Skałach w Górach Stołowych (fot. 4).

Procesy kształtujące labirynty skalne

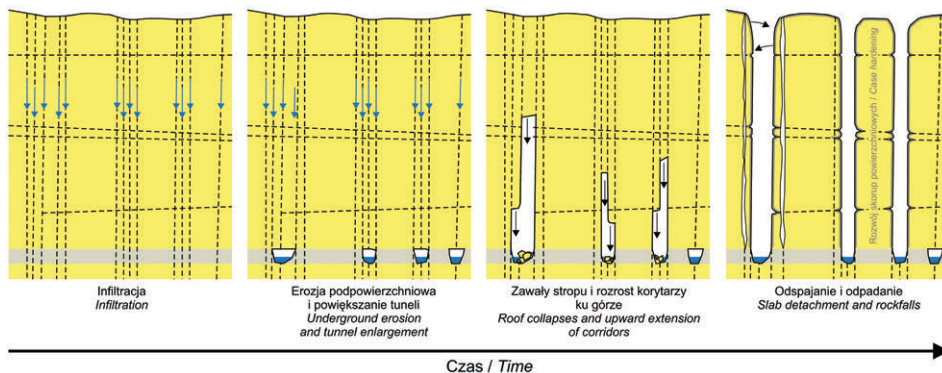
• **Wietrzenie powierzchniowe.** Najbardziej ewidentną grupą procesów odpowiedzialnych za kształtowanie rzeźby labiryntów skalnych w obszarach piaskowcowych jest wietrzenie powierzchniowe. Jego efekty można obserwować we wszystkich skalnych miastach czeskiej płyty kredowej, a zaliczają się do nich takie formy reliefu ścian jak tafoni, struktury typu plastra miodu, przewieszki, gzymsy skalne, czy inne przejawy wietrzenia kawernowego (np. Robinson i Williams, 1994; Adamovič i inni, 2006, 2010; Filippi i inni, 2018). Wiele wskazuje na to, że z rozwojem tego typu mikrorzeźby jest ściśle powiązane istnienie wspomnianych w poprzednim rozdziale skorup wietrzeniowych. Ich powolny rozpad rozpatrywany jest jako efekt zmian wilgotności przypowierzchniowej warstwy piaskowca i krystalizacji soli (np. Robinson, 2007). W miejscach, w których dochodzi do rozpadu skorupy wietrzenio-

wej, tworzą się niewielkie nisze, podlegające stopniowemu pogłębianiu poprzez mechaniczne usuwanie rozluźnionych ziaren piasku. Rozrost kawern powoduje w końcu cofnięcie się pierwotnej powierzchni piaskowca, a skorupa wietrzeniowa zaczyna od tego momentu formować się na nowo (Robinson, 2007). Istnienie podwyższających wytrzymałość skały odpornych pancerzy powierzchniowych – pomijając fakt, czy ich geneza jest biogeniczna, czy też związana z rekrytalizacją bądź wytrącaniem się różnych związków chemicznych – odgrywa równocześnie fundamentalną rolę w utrzymywaniu pionowych ścian skalnych przez długi czas. Właściwość ta jest kluczowa dla ukształtowania się rzeźby charakteryzującej skalne miasta, w której podstawowym elementem są wydzielone pakiety piaskowca o pokroju zbliżonym do prostopadłościennego.

• **Rozkład piaskowców – arenizacja.** O ile zintegrowane działanie wietrzenia kawernowego i tworzenia się skorup powierzchniowych bez wątpienia wpływa na charakter modelowania szczegółów rzeźby miast skalnych, o tyle procesy te nie byłyby w stanie samodzielnie doprowadzić do wycięcia gęstych sieci korytarzy w masywie skalnym. Bogata literatura przedmiotu wskazuje, że kluczowym mechanizmem jest proces chemicznego rozkładu piaskowca kwarcowego, z którego zbudowana jest większość miast skalnych czeskiej płyty kredowej. Proces arenizacji (ang. *arenisation*) – praktycznie nieobecny w polskiej terminologii geomorfologicznej – został rozpoznany i opisany już w latach 70. XX w. przez J.E.J. Martiniego (1979), a następnie był przedmiotem badań J.N. Jenningsa (1983), R.W. Younga (1986, 1988), R. Wray’a (1997, 2009) czy F. Sauro (2014). Chemiczne rozpuszczanie ziaren kwarcu zachodzi w głównej mierze wzdłuż granic pojedynczych minerałów, prowadząc w końcu do rozluźnienia piaskowca i erozyjnego usunięcia tak przygotowanego materiału. Arenizacja działa szczególnie wydajnie w tych strefach masywu skalnego, które charakteryzują się obecnością pierwotnie wąskich szczelin, co pozwala na przedłużony czas reakcji wody z piaskowcem (Piccini, 1995). Kluczową rolę procesu rozpuszczania powierzchni kontaktu ziaren kwarcu podkreślano w szczególności w odniesieniu do rozwoju ogromnych systemów jaskiniowych masywu Roraima w Wenezueli (np. Piccini i Mecchia, 2009; Sauro, 2014), ale tłumaczono tak również powstanie izolowanych wież i miast skalnych w różnych częściach świata (Jennings, 1983; Briceño i Schubert, 1990; Busche i Sponholz, 1992). R.W. Young (1986) dowiódł, że chemiczny rozkład ziaren kwarcu jest niezbędnym czynnikiem, aby mogło dojść do późniejszej fizycznej dezintegracji piaskowca, skutkującej powstaniem skalnego miasta Purnululu. Zaskakującym jest fakt, że problem ten nigdy nie stanowił przedmiotu zainteresowania w odniesieniu do czeskich, niemieckich i polskich obszarów piaskowcowych.

• **Erozja podpowierzchniowa.** Jeżeli chemiczne rozpuszczanie ziaren kwarcu i krzemionkowego spoiwa rzeczywiście odpowiada za stopniową dezintegrację masywu piaskowcowego, musi istnieć mechanizm wydajnego usuwania rozluźnionego materiału (Jennings, 1983; Wray, 1997). Jest nim fizyczny transport ziaren mineralnych, który zachodzi we wnętrzu piaskowcowej płyty. Erozja pod-

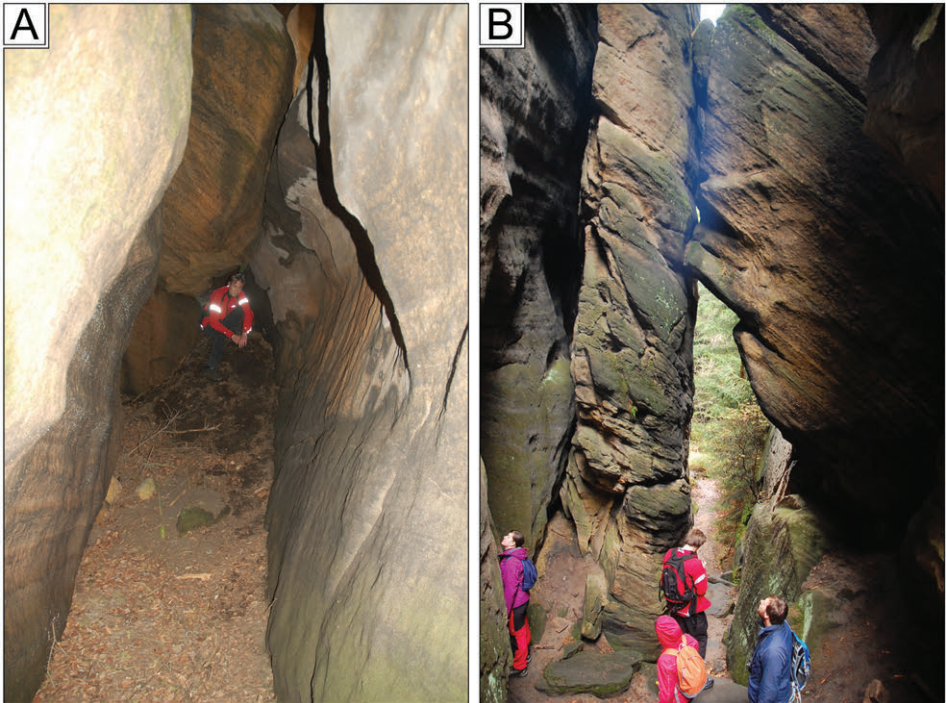
powierzchniowa koncentruje się wzdłuż pierwotnych stref nieciągłości w skale – najczęściej powierzchni warstwowania i spękań ciosowych – i prowadzi do usunięcia zdeintegrowanego materiału poza masyw skalny. L. Piccini i M. Mecchia (2009) dowodzą, że procesy erozyjne we wnętrzu wenezuelskich *tepui* (nazwa własna tamtejszych gór stołowych) cechuje tak znaczna energia, że poza odprowadzeniem odspojonych ziaren mineralnych odpowiadają one, przynajmniej częściowo, za poszerzenie obecnych tam systemów jaskiniowych. W ostatnich latach wykazano, że erozja podpowierzchniowa może być kluczowym procesem dla rozwoju rzeźby miast skalnych czeskiej płyty kredowej. J. Bruthans i inni (2012) nie dopatrzili się wprawdzie istotniejszej roli arenizacji w przygotowaniu materiału, który może zostać usunięty, ale zwrócili uwagę na obecność na dużej głębokości cienkich poziomów piaskowca, które cechuje wysoka podatność na erozję, a także na możliwość wydajnej infiltracji wód opadowych poprzez sieć pionowych spękań w skale. Według zaproponowanego przez tych autorów modelu, ewolucja Adršpašskiego skalnego miasta miałyby postępować w następujący sposób (ryc. 3). Woda po dotarciu do poziomu skał mniej odpornych powoduje jego stopniowe niszczenie, a odpływając horyzontalnie wyprowadza odspojone ziarna na zewnątrz, w efekcie czego w piaskowcu, na linii pionowych powierzchni nieciągłości, rozwijają się puste przestrzenie. Stopniowe zawalanie się ich stropów, zbudowanych z piaskowca o większej odporności, prowadzi do rozrastania się pustek ku górze, a odpadający materiał podlega szybkiej dezintegracji na zawilgoconym dnie pustki i wyprowadzaniu z wodą poza wnętrze masywu. Po czasie owe pustki w skale osiągają poziom górnej powierzchni piaskowca, a pierwotna jaskinia szczelinowa zamienia się w typowy dla skalnego miasta korytarz (fot. 5). Model zaproponowany przez J. Bruthansa i innych (2012) akcentuje rolę grawitacyjnych ruchów masowych (obrywów) i zakłada obecność na pewnym etapie rozwoju skalnego miasta wysokich, sklepionych korytarzy o horyzontalnym prze-



Ryc. 3. Geneza ulic skalnych miast w piaskowcach

The origin of 'streets' in 'rock cities'

Źródło: Bruthans i inni (2012), nieznacznie zmienione / Source: Bruthans et al. (2012), slightly changed.



Fot. 5. Rozwój korytarzy skalnego miasta wskutek zawałów i otwierania szczelin ku górze (przykłady z Broumovských stěn, Czechy). A – stadium początkowe: tunel skalny związany z selektywnym niszczeniem strefy nieciągłości; B – częściowo otwarta ku górze uliczka założona na linii spękań (fot. P. Migoń)

Evolution of corridors in a 'rock city' due to rock collapses and upward opening of clefts (examples from Broumovské stěny, Czechia). A – initial phase: rock tunnel due to selective weathering and erosion along a discontinuity; B – partly-open cleft following a joint

biegu, które jednak należą do rzadkości. Podobny efekt może być osiągnięty przez stopniowe, niekatastrofalne osiadanie bloków do rozwijającej się w głębi masywu skalnego pustki.

Podobne procesy rozpoznano również w Górach Stołowych. Na ich istotne znaczenie, mimo skąpego materiału obserwacyjnego, wskazywali m.in. B. Dumanowski (1961) i M. Z. Pulinowa (1989), stosując w stosunku do nich niezbyt poprawne określenie „sufozja”. F. Duszyński i inni (2016) podkreślali, że erozja podpowierzchniowa prowadzi do powolnego wyprowadzania produktów rozpadu skały wzdłuż powierzchni nieciągłości, w efekcie czego zwarte pakiety piaskowca stają się w końcu bezładnym blokowiskiem skalnym. Tego typu morfologia charakteryzuje znaczną część marginalnych stref płaskowyżów Gór Stołowych, w szczególności w rejonie Urwiska Batorowskiego, południowego progu Naroźnika, czy północnego progu Skalniaka. W tej ostatniej lokalizacji, w miejscu określanym na mapach jako Dziedziniec, procesy erozji podpowierzchniowej doprowadziły

do rozwoju niewielkiego labiryntu skalnego (Duszyński i Migoń, 2017). Za świadectwo niszczenia masywu skalnego od dołu uznano tam między innymi wydzielone wzdłuż spękań ciosowych bloki piaskowca, które obecnie zalegają na dnie głównego korytarza. Jedynym sposobem, aby znalazły się one w takiej pozycji musiało być erozyjne usunięcie mniej odpornego materiału spod spodu. Zauważono ponadto, że duże bloki piaskowca otaczające przylegającą do labiryntu kotlinkę są wyraźnie wychylone od pionu w kierunku jej wnętrza. Zaproponowano, że erozyjne usunięcie mniej odpornych skał spod spodu spowodowało utratę podparcia bloków i ich pochylenie się.

Świadectwa istotnej roli erozji podpowierzchniowej, chociaż nadal nie opracowane wyczerpująco w sposób naukowy, są doskonale widoczne także w najbardziej znanych skalnych miastach polskiej części Gór Stołowych. Popularny wśród turystów labirynt Błędných Skał stanowi nie tylko potwierdzenie preferencyjnego rozwoju tego typu form wzdłuż pionowych powierzchni strukturalnych, ale także rozrostu korytarzy od dołu. W licznych miejscach doskonale widoczne są zawalone bądź przechylone z góry bloki, które utraciły podparcie na skutek wyprowadzenia zdeintegrowanego materiału spod spodu. Podobnie jest na Szczelińcu Wielkim, choć tutaj uwagę zwracają szczególnie trzy inne kwestie. Po pierwsze, kilkudziesięciocentymetrowej szerokości szczeliny w piaskowcu są w wielu miejscach chaotycznie wypełnione materiałem blokowo-gruzowym – takim, który podległ już częściowemu niszczeniu z uwagi na fakt gęstszego pocięcia przez spękania. Część zdeintegrowanego materiału musiała już zostać erozyjnie usunięta. Po drugie, w przykrawędziowych partiach stoliwa, zarówno po stronie południowo-zachodniej, jak i północnej, można obserwować kilkumetrowej głębokości niecki, które ze wszystkich stron otoczone są zwartymi pakietami piaskowca. Ich powszechna obecność została także udokumentowana w trakcie analizy numerycznego modelu terenu Szczelińca Wielkiego (Migoń i Kasprzak, 2015). Jedynym sposobem wydostania się zwietrzeliny z tych miejsc był transport podpowierzchniowy. Po trzecie, południowo-zachodnia krawędź stoliwa, w miejscu, gdzie na płaskowyż poprowadzono czerwony szlak turystyczny, nie posiada ścian skalnej. Zamiast niej występuje ciągnące się w głąb płaskowyżu ogromne blokowisko *in situ*, które jest efektem powolnego osiadania poprzez sukcesywny ubytek materiału spod spodu.

Fakt zachodzenia erozji podpowierzchniowej potwierdzają także świadectwa natury sedymentologicznej. Już J.N. Jennings (1983) pisał o „luźnych łachach białego piasku” w suchych korytach rzek. Na obecność form akumulacji piaszczystej poniżej ścian skalnych zwrócili także uwagę J. Bruthans i inni (2012), a F. Duszyński i inni (2016) opisali ponad 140 stożków zbudowanych z piasku u wylotu pionowych szczelin w ścianach skalnych Gór Stołowych. Zdaniem tych autorów jest to bezpośredni dowód na to, że rozpad piaskowcowego masywu postępuje poprzez wyprowadzanie zdeintegrowanego materiału z wnętrza płyty piaskowcowej. Piasek tworzy też miększe allochtoniczne pokrywy stokowe, dochodzące

do 3 m grubości. Całkowita objętość tych pokryw w obrębie progów najwyższego poziomu morfologicznego Gór Stołowych sięga w przybliżeniu $22 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Duszyński i inni, 2016).

Erozja powierzchniowa odgrywa natomiast stosunkowo niewielką rolę w rozwoju rzeźby skalnych miast. Wynika to z faktu, że większość tego typu obszarów znajduje się w obrębie wyrównanych wierzchowin, w dużym oddaleniu od stałych cieków. Niemniej jednak, w obrębie czeskiej płyty kredowej widoczne są świadectwa procesów fluwialnych. Przez wspomniane już Adršpašské skalní město przepływa potok Metuje, którego niszcząca działalność ujawnia się w postaci podcięć ścian skalnych, będących efektem erozji bocznej w trakcie większych wezbrań. Należy przy tym podkreślić, że współcześnie koryto Metuje ma charakter aluwialny, a procesy erozyjne mają charakter marginalny.

• **Ruchy masowe.** W rozwoju rzeźby skalnych miast istotny udział mają również ruchy masowe. Pomijając grawitacyjne odpajanie się pojedynczych ziaren mineralnych czy odpadanie złuszczonej warstwy powierzchni piaskowca, przemieszczaniu podlegają także znacznie większe pakiety skalne. Znaczenie ruchów masowych ujawnia się w dwóch skalach przestrzennych. W mniejszej skali, odpadanie, przewracanie i obrywy kształtują morfologię ścian skalnych i przylegających obniżzeń, odpowiadając za cofanie tych ścian i poszerzanie rozdzielających je korytarzy i ulic, które same w sobie mogą być różnej genezy. Zachodzą one szczególnie w tych miejscach, które cechują się obecnością dużych przewieszek. Równocześnie, w związku ze znikomym transportem powierzchniowym w dnie suchych i często płaskodennych obniżzeń, zawałone bloki mogą przez bardzo długi czas zalegać w dnie korytarza, w znaczny sposób modyfikując jego rzeźbę i czyniąc go nieprzechodnym. Z Teplickiego skalnego miasta czy zaproża Broumovskich Stěn znane są przypadki, gdy przestrzenie pomiędzy zawałonymi blokami są tak duże, że w ich obrębie rozwinęły się systemy jaskiń rumowiskowych o długości kilkuset metrów (Vítek, 1979; Mlejnek i inni, 2010).

W większej skali, za specyficzną rzeźbę miast skalnych mogą odpowiadać zupełnie inne kategorie ruchów masowych – rozciąganie boczne (ang. *lateral spreading*) lub powolne zsuwanie się przykrawędziowych partii płyty piaskowcowej (ang. *block gliding*). Procesy te, w odróżnieniu od opisanych wcześniej, samodzielnie odpowiadają za utworzenie się korytarzy skalnych, a więc należą do procesów pierwotnych tworzących skalne miasta. Jednym z lepszych przykładów obecności tego typu zjawisk jest system przechodnich rozpadlin w skalnym mieście High Rocks w południowej części Wielkiej Brytanii (np. Robinson i Williams, 1994). Zdaniem wspomnianych badaczy wielkie bloki piaskowca odsuwają się tam od siebie, sunąc po podatnym na odkształcenia plastyczne, podścielającym je podłożu. Z korytarzami powstałymi na skutek odsunięcia się i pochylenia zewnętrznej części piaskowcowego plateau spotkamy się także w obrębie Příhrazských skál w Czeskim Raju (fot. 6) (Rybář i inni, 2006) czy stoliwa Pfaffenstein w Szwajcarii Saksońskiej w Niemczech.



Fot. 6. Szeroka aleja w skalnym mieście Příhrazské skály (Czeski Raj), powstała przez grawitacyjne odsunięcie pakietu skalnego widocznego po lewej stronie. Na ścianach skalnych liczne przejawy selektywnego wietrzenia piaskowców (fot. P. Migoń)

A wide corridor in the 'rock city' of Příhrazské skály ('Bohemian Paradise'), opened due to gravitational movement of the rock block seen on the left. Numerous examples of selective weathering of sandstone are evident on the rock faces

Podsumowanie

Skalne miasta są wyjątkowym typem rzeźby erozyjno-denudacyjnej rozwiniętej w skałach zwięzłych, który wykazuje znaczną i bezpośrednią zależność od litologicznych i strukturalnych cech podłoża skalnego. W szczególności zaznacza się rola pionowych powierzchni i stref nieciągłości, ukierunkowujących procesy erozji, w tym podpowierzchniowej, wietrzenia i ruchów masowych, czego konsekwencją jest powstanie wzdłuż nich linijnych form wklęsłych: szczelin, korytarzy, tuneli podskalnych i ulic. Są one rozdzielone przez zwarte masywy skalne przybierające postać murów, baszt i ścian. Skalne miasta powstają w różnych typach skał podłoża, ale w sposób najpełniejszy są rozwinięte w grubych seriach piaskowcowych w strukturach platformowych. Paradoksalnie, mimo trwającego od ponad 100 lat naukowego zainteresowania tymi formami i obecności spektakularnych przykładów, także w granicach Polski (Góry Stołowe), brakowało uzgodnionej terminologii, która mogłaby być stosowana do ich opisu geomorfologicznego. Nie ulega wątpliwości, że skalne miasta są formami złożonymi, poligenetycznymi, a także, że różne zespoły procesów rzeźbotwórczych mogą być odpowiedzialne

za powstanie i rozwój skalnych miast w różnych typach skał. W ten sposób skalne miasta stają się przykładem ilustrującym zasadę konwergencji form w geomorfologii. O ile zależności rzeźby skalnych miast od budowy geologicznej, zwłaszcza układu głównych nieciągłości pionowych są już stosunkowo dobrze rozpoznane i mogą być zobrazowane przy wykorzystaniu współczesnych technologii skanowania laserowego i fotogrametrii, rozpoznanie procesów i ich tempa wciąż jest niepełne. Dotyczy to w szczególności procesów podpowierzchniowych, w tym rozkładu piaskowców do postaci piaszczystego residuum, które może być usunięte przez wodę płynącą. Formy rzeźby i osady korelatne pozwalają wnioskować o naturze niektórych procesów, jednak ujęcie ilościowe pozostaje istotnym wyzwaniem na przyszłość.

Serdecznie dziękujemy trzem recenzentom za pomocne uwagi i sugestie. Badania nad skalnymi miastami były finansowane w ramach projektu badawczego nr 2014/15/N/ST10/00828 Narodowego Centrum Nauki (F. Duszyński) i działalności statutowej jednostki (nr 1015/S/IGRR/2017; P. Migoń). W trakcie pracy nad artykułem Filip Duszyński otrzymał stypendium doktorskie w projekcie badawczym ETIUDA Narodowego Centrum Nauki (nr 2017/24/T/ST10/00101).

Piśmiennictwo

- Adamovič J., Mikuláš R., Cílek V., 2006, *Sandstone districts of the Bohemian Paradise: emergence of a romantic landscape*, Geolines, 21, s. 1–100.
- Adamovič J., Mikuláš R., Cílek V., 2010, *Atlas pískovcových skalnych měst České a Slovenské republiky: Geologie a geomorfologie*, Academia, Praha.
- Alexandrowicz Z., 1970, *Skałki piaskowcowe w okolicach Ciężkowic nad Białą*, Ochrona Przyrody, 35, 281–335.
- Balatka B., Loučková J., Sládek J., 1969, *Vývoj pískovcového reliéfu české tabule na příkladu Polomených hor*, Rozprawy ČSAV, ř. MPV, 79, 5, s. 1–39.
- Briceño H.O., Schubert C., 1990, *Geomorphology of the Gran Sabana, Guyana Shield, southeastern Venezuela*, Geomorphology, 3, s. 125–141.
- Bruthans J., Soukup J., Světlík D., Schweigstillová J., Mayo A., 2012, *Zpevněné povrchy puklin v kvádrovém pískovci a jejich role při vzniku skalních měst*, Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012 (B), s. 109–115.
- Busche D., Sponholz B., 1992, *Morphological and micromorphological aspects of the sandstone karst of eastern Niger*, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement-Band, 85, s. 1–18.
- Cílek V., Williams R., Osborne A., Migoń P., Mikuláš R., 2007, *The origin and development of sandstone landforms*, [w:] H. Härtel, V. Cílek, T. Herben, A. Jackson, R. Williams (red.), *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, s. 34–43.
- Cunningham F.F., 1971, *The Silent City of Rocks, a bornhardt landscape in the Cotterell Range, South Idaho*, Zeitschrift für Geomorphologie N.F., 15, s. 404–429.

- Czeppe Z., 1949, *Labirynt skalny na szczycie Gór Stołowych*, Wierchy, 19, s. 44–57.
- Czeppe Z., 1952, *Z morfologii Gór Stołowych*, Ochrona Przyrody, 20, s. 236–252.
- De Melo M.S., Coimbra A.M., 1999, *Ruiniform relief in sandstones: the example of Vila Velha, Carboniferous of the Parana Basin, Southern Brazil*, *Acta Geologica Hispanica*, 31, 4, s. 25–40.
- Della Fávera, J.C., 1999, *Parque Nacional Sete Cidades, Piauí*, [w:] C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, M. Berbert-Born (red.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil* (dostęp z: <http://sigep.cprm.gov.br/sitio025/sitio025.htm>; 2017-02-17).
- Demek J., 1987, *Obecná geomorfologie*, Academia, Praha.
- Dixon, J.C., 2010, *Canyonlands and arches: windows on landscapes in the American Southwest*, [w:] P. Migoń (red.), *Geomorphological Landscapes of the World*, Springer, Dordrecht, s. 39–47.
- Dumanowski B., 1961, *Zagadnienie rozwoju stoku na przykładzie Gór Stołowych*, *Czasopismo Geograficzne*, 32, s. 311–324.
- Duszyński F., Migoń P., 2017, *Zespół skalny Dziedzińca na płaskowyżu Skalniaka w Górach Stołowych*, *Przyroda Sudetów*, 20, s. 199–218.
- Duszyński F., Migoń P., Kasprzak M., 2016, *Underground erosion and sand removal from a sandstone tableland, Stołowe Mountains, SW Poland*, *Catena*, 147, s. 1–15.
- Fairbridge R.W. (red.), 1968, *Encyclopedia of Geomorphology*, Reinhold, New York.
- Filippi M., 2018, Bruthans J., Řihošek J., Slavík M., Adamovič J., Mašín D., 2018, *Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering*. *Earth-Science Reviews*, 180, s. 159–184.
- Ford D.C., Williams P.W., 2007, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley, Chichester.
- Goudie A. (red.), 2004, *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge, London.
- Goudie A., Migoń P., Allison R.J., Rosser N., 2002, *Sandstone geomorphology of the Al Quwayra area of south Jordan*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 46 (3), s. 365–390.
- Grimes K., 2012, *Surface karst features of the Judbarra/Gregory National Park, Northern Territory, Australia*, *Helictite*, 41, s. 15–36.
- Howard, A.D., Kochel, R.C., 1988, *Introduction to cuesta landforms and sapping processes on the Colorado Plateau*, [w:] A.D. Howard, R.C. Kochel, M.E. Holt (red.), *Sapping Features of the Colorado Plateau. A Comparative Planetary Geology Field Guide*, NASA Scientific and Technical Information Division, Washington DC, s. 6–56.
- Jaroszewski W., Marks L., Radomski A., 1985, *Słownik geologii dynamicznej*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Jennings J.N., 1983, *Sandstone pseudokarst or karst?*, [w:] R.W. Young, G.C. Nanson (red.), *Aspects of Australian Sandstone Landscapes*, University of Wollongong, Wollongong, s. 21–30.
- Jerzykiewicz T., 1968, *Uwagi o orientacji i genezie ciosu w skałach górnokredowych niecki śródsudeckiej*, *Geologia Sudetica*, 4, s. 465–478.
- Klimaszewski M., 1981, *Geomorfologia*, PWN, Warszawa.

- Lehmann H., 1970, *Über "Verzauberte Städte" (ciudades encantadas, villes de rocher) und ähnliche "Naturspiele" in Carbonatgesteinen Südwesteuropas*, [w:] Sitzungberichte der Wissenschaftlichen Gesellschaft an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, 8 (1969), 2 (przedruk w: *Beiträge zur Karstmorphologie, Erdkundlicher Wissen*, 86, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, s. 213–244).
- Lohman S.W., 1974, *The geologic story of the Canyonlands National Park*, U.S. Geological Survey Bulletin, 1327, s. 1–126.
- Mainguet M., 1972, *Les Modèles des grès*, Institute Géographique National, Paris.
- Martini J.E.J., 1979, *Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop*, Eastern Transvaal. *Annals of the South African Geological Survey*, 13, s. 115–128.
- Mertlík J., Adamovič J., 2016, *Bohemian Paradise: sandstone landscapes in the foreland of a major fault*, [w:] T. Pánek, J. Hradecký (red.), *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*, Springer, Switzerland, s. 195–208.
- Michniewicz A., Jancewicz K., Różycka M., Migoń P., 2016, *Rzeźba granitowa skalnego miasta Starościńskich Skał w Rudawach Janowickich (Sudety Zachodnie)*, *Landform Analysis*, 31, 17–33.
- Migoń P., 2006, *Geomorfologia*, PWN, Warszawa.
- Migoń P., Duszyński F., Goudie A., 2017, *Rock cities and ruiniform relief: Forms – processes – terminology*, *Earth-Science Reviews*, 171, s. 78–104.
- Migoń P., Kasprzak M., 2015, *Analiza rzeźby stoliwa Szczelińca Wielkiego w Górach Stołowych na podstawie numerycznego modelu terenu z danych LiDAR*, *Przegląd Geograficzny*, 87, 1, s. 27–52.
- Migoń P., Zwiernik M., 2006, *Strukturalne uwarunkowania rzeźby północno-wschodniego progu Gór Stołowych*, *Przegląd Geograficzny*, 78, s. 319–338.
- Millar S.W.S., 2007, *Late-Pleistocene slope evolution using characteristics of rock cities in Western New York, USA*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51, Supplement-Band 1, s. 57–67.
- Mlejnek R., Ouhrabka V., Růžička V., 2010, *Poseidon – the pseudokarst system in the sandstones of the Czech Republic: geomorphological structure and biogeographical importance*, [w:] *Proceedings of the 10th International Symposium on Pseudokarst*, 29 April–2 May 2008, Gorizia (Włochy), Centro Ricerche Carsiche "Carlo Seppenhof", s. 75–86.
- Mueller J.E., Twidale C.R., 1988, *Geomorphic development of City of Rocks, Grant County, New Mexico*, *New Mexico Geology*, 10, s. 73–79.
- Peng H., Ren F., Pan Z., 2015, *A review of Danxia landforms in China*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 59, Suppl. 1, s. 19–33.
- Piccini L., 1995, *Karst in siliceous rocks: karst landforms and caves in the Ayuán-tepui (Est. Bolívar, Venezuela)*, *International Journal of Speleology*, 24, s. 2–13.
- Piccini L., Mecchia M., 2009, *Solution weathering rate and origin of karst landforms and caves in the quartzite of Auyan-tepui (Gran Sabana, Venezuela)*, *Geomorphology*, 106, s. 15–25.
- Placek A., 2006, *Młotek Schmidta w badaniach geomorfologicznych – ewaluacja i przykłady zastosowania*, *Czasopismo Geograficzne*, 77, s. 182–205.

- Placek A., 2011, *Rzeźba strukturalna Sudetów w świetle wyników pomiarów wytrzymałości skał i analiz numerycznego modelu wysokości*, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego, 16.
- Pulina M., 1999, *Kras. Formy i procesy*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Pulinowa M.Z., 1989, *Rzeźba Gór Stołowych*, Prace Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, 1008.
- Remisz J., 2007, *Strukturalne uwarunkowania rzeźby południowego progu Gór Stołowych*, Przyroda Sudetów, 10, s. 253–268.
- Robinson D.A., 2007, *Geomorphology of the inland sandstone cliffs of Southeast England*, [w:] H. Härtel, V. Cílek, T. Herben, A. Jackson, R. Williams (red.), *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, s. 44–51.
- Robinson D.A., Williams R.B.G., 1994, *Sandstone weathering and landforms in Britain and Europe*, [w:] D.A. Robinson, R.B.G. Williams (red.), *Rock Weathering and Landform Evolution*, Wiley, Chichester, s. 371–391.
- Rogaliński J., Słowiok G., 1958, *Rzeźba Gór Stołowych w świetle teorii pedyplanacji*, Czasopismo Geograficzne, 29, s. 473–496.
- Rubin J., Balatka B. (red.), 1986, *Atlas skalních, zemních a půdních tvarů*, Academia, Praha.
- Rybář J., Stemberk J., Hartvich F., 2006, *Slope failures around the rock castle Drábské Světničky, Czech Republic*, Acta Geodyn. Geomater., 3 (4), s. 51–65.
- Sauro F., 2014, *Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartzsandstone: evidence of the arenisation process*, Geomorphology, 226, s. 106–123.
- Silva Mutzenberg D., Barros Correa A.C., Azevêdo Tavares B., Cisneiros D., 2015, *Serra da Capivara National Park: ruiniform landscapes on the Parnaíba Cuesta*, [w:] B.C. Vieira, A.A. Rodrigues Salgado, L.J. Cordeiro Santos (red.), *Landscapes and Landforms of Brazil*, Springer, Dordrecht, s. 253–263.
- Slavík M., Bruthans J., Filippi M., Schweigstillová J., Falteisek L., Řihošek J., 2017, *Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion*, Geomorphology, 278, s. 298–313.
- Svoboda J. (red.), 1983, *Encyklopedický slovník geologických věd*, Academia, Praha.
- Traczyk A., 2009, *Problemy klasyfikacji grubofrakcyjnych pokryw stokowych*, [w:] A. Kostrzewski, R. Paluszkiwicz (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*, t. V, UAM, Poznań, s. 569–578.
- Vařilová Z., 2016, *Elbe Sandstones*, [w:] T. Pánek, J. Hradecký (red.), *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*, Springer, Switzerland, s. 123–137.
- Viles H., Pentecost A., 1994, *Problems in assessing the weathering action of lichens with an example of epiliths on sandstone*, [w:] D.A. Robinson, R.B.G. Williams (red.), *Rock Weathering and Landform Evolution*, Wiley, Chichester, s. 99–116.
- Vítek J., 1979, *Pseudokrasové tvary v křídových pískovcích severovýchodních Čech*, Rozpravy ČSAV, ř. MPV, 89, 4, s. 1–57.
- Vítek J., 2016, *Adršpach-Teplice Rocks and Broumov Cliffs – large sandstone rock cities in the Central Europe*, [w:] T. Pánek, J. Hradecký (red.), *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*, Springer, Switzerland, s. 209–220.

- Walczak W., 1963, *Geneza form skalnych na północno-wschodniej krawędzi Gór Stołowych*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 9, Studia Geograficzne, 1, s. 191–200.
- Whittow J., 1984, *Dictionary of Physical Geography*, Penguin, London.
- Wojewoda J., 1997, *Upper Cretaceous littoral-to-shelf succession in the Intrasudetic Basin and Nysa Trough, Sudety Mts.* [w:] J. Wojewoda (red.), *Obszary źródłowe: zapis w osadach*, Wind, Wrocław, s. 81–96.
- Wray R.A.L., 1997, *Quartzite dissolution: karst or pseudokarst?*, Cave Karst Sci., 24 (2), s. 81–86.
- Wray R.A.L., 2009, *Phreatic drainage conduits within quartz sandstone: evidence from the Jurassic Precipice Sandstone, Carnarvon Range, Queensland, Australia*, Geomorphology 110, s. 203–211.
- Young R.W., 1986, *Tower Karst in sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia*, Zeitschrift für Geomorphologie N.F., 30, s. 189–202.
- Young R.W., 1987, *Sandstone landforms of the tropical East Kimberley region*, Journal of Geology, 95, 205–218.
- Young R.W., 1988, *Quartz etching and sandstone karst: examples from the east Kimberleys, northwestern Australia*, Zeitschrift für Geomorphologie, 32, s. 409–423.
- Young R.W., Wray R.A.L., Young A.R.M., 2009, *Sandstone Landforms*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Young R.W., Wray R.A.L., 2015, *Rock control in sandstone geomorphology: a tribute to Eiju Yatsu with some Australian examples*, Zeitschrift für Geomorphologie, 59, Supplement-Band 1, s. 3–17.
- Zerboni, A., Perego, A., Cremaschi, M., 2015, *Geomorphological map of the Tadrart Acacus massif and the Erg Uan Kasa (Libyan Central Sahara)*, Journal of Maps 11, s. 772–787.

Summary

‘Rock cities’ – a geomorphological term widely used in Czechia, but hardly formalised elsewhere – are spectacular rock-cut landscapes consisting of closely-spaced residual rock blocks separated by narrow intersecting corridors, imparting an overall visual resemblance to an urban landscape. The heights of the rock blocks in question – as compared with the floors of the corridors and passages – may reach many tens of metres. These landforms are known in a wide range of lithologies, including limestones, dolomites, conglomerates, tuffs and granites; but they are particularly well developed in regularly jointed sandstones which support a plateau and cuesta morphology. Typical geomorphic settings of rock cities are marginal parts of plateaus, backslopes of cuesta ridges and top parts of residual hills (mesas). Examples of sandstone rock cities from south-west Poland include the mesa of Szczeliniec Wielki and the plateau of Skalniak (the so-called Błędne Skały rock labyrinth, Dziedziniec), whereas they are even better represented in the adjacent part of Czechia (at the Aдрšpach and Teplice ‘Rock

Cities' and Ostaš). Further rock cities can be found in northern Czechia, within an extensive tableland built of Upper Cretaceous sedimentary formations, chiefly sandstones, and then in Saxony, Germany. The origin and evolution of the 'rock cities' are primarily controlled by structure, i.e. the pattern of discontinuities within the rock mass. These, preferentially eroded due to mechanical weakness, turn into 'streets', and into 'squares' at their intersections. However, the rock mass itself has to be strong enough to support steep to vertical rock faces, and in sandstones the strength is the combined result of wide joint spacing in certain sandstone variants and the presence of surface crusts of chemical and biochemical origin. The latter prevent steady grain-by-grain disintegration. A wide range of processes are thus involved in the formation of sandstone 'rock cities', including surface and subsurface weathering (including silica dissolution), mass movements of different types, underground erosion (piping), and subordinately fluvial erosion and aeolian abrasion. Despite these being spectacular landscapes, very few models of long-term evolution of 'rock city' and ruiniform relief have been presented in the literature, and it is anyway unlikely that any one scenario would apply to all situations. Rather, 'rock cities' are most probably examples of geomorphological convergence.

