

Charakter inicjacji ruchów masowych w Karpatach fliszowych na podstawie analizy strukturalnych uwarunkowań rozwoju wybranych jaskiń szczelinowych

Włodzimierz Margielewski* & Jan Urban*

W obrębie masywów skalnych Karpat fliszowych występują jaskinie dylatacyjne rozwijane linijnie wzdłuż płaszczyzn spękań. Będąc efektem cyklicznej relaksacji naprężeń ścinających w górotworze, stanowią one formy wyjściowe do powstania skalnych osuwisk. Cztery wybrane jaskinie tego typu zostały poddane szczegółowej analizie tektonogenetycznej, w aspekcie ich związku z inicjacją ruchów masowych. Dwie z analizowanych jaskiń znajdują się w obrębie częściowo rozwiniętych osuwisk, stwarzając potencjalne możliwości dalszego rozwoju tych form w głąb masywu skalnego (jaskinia Złotopieńska Dziura w Beskidzie Wyspowym), bądź po rozciągłości stoku (Jaskinia Zbójnicka na Jaworzynie Krynickiej w Beskidzie Sądeckim). Dwie dalsze z analizowanych jaskiń (Jaskinia Malinowska w Beskidzie Śląskim i jaskinia Zbójcka Jama w Gorcach) znajdują się w obrębie stoku dotychczas nie objętego ruchami masowymi, stanowiąc inicjalne stadium jego rozwoju w osuwisko. Analiza przebiegu większości wysokich, skalistych nisz osuwisk karpaccich, rozwijanych wzdłuż stromo zapadających powierzchni spękań wskazuje, że mogły one powstać z propagacji tego typu jaskiń, warunkujących początkowe stadium zniszczenia masywów skalnych. Skalista niszka takiego osuwiska byłaby więc rozwijana wcześniej, niż główne przemieszczenie mas skalnych. Etapowy charakter rozwoju tych form potwierdza pogląd, że skalne, głębokie osuwiska są efektem długotrwałych procesów grawitacyjnych związanych z etapowym narastaniem naprężeń ścinających w górotworze i ich względnym rozładowywaniem wzdłuż naturalnych powierzchni nieciągłości występujących w masywach skalnych. Zjawisko to następuje aż do przekroczenia naprężenia granicznego i grawitacyjnego przemieszczenia fragmentu masywu skalnego wyodrębnionego szczelinami.

Słowa kluczowe: jaskinie dylatacyjne, procesy osuwiskowe, grawitacyjny rozwój stoków, anizotropia strukturalna, dystrybucja naprężeń ścinających, masywy skalne, Karpaty fliszowe

Włodzimierz Margielewski & Jan Urban — **The type of initiation of mass movements in the Flysch Carpathians studied on the base of structural development of the selected crevice type caves (southern Poland).** Prz. Geol., 48: 268–274.

S u m m a r y. Numerous crevice type caves formed along the joint systems occur on the mountain slopes of the Polish Flysch Carpathians. They represent basic and often initial forms of deep rock landslides development. Tectonic features of four selected caves (situated in different parts of the Carpathians) were observed in order to study and determine relations between natural joint systems and landslide formation. Two of analyzed caves are situated within the partly developed landslides and contribute to further formation of the landslide to deep (Złotopieńska Dziura cave in the Beskid Wyspowy Mts) and perpendicular to the slope dipping (Zbójcka Cave in the Beskid Sądecki Mts). The next two caves are located in the slope without the traces of mass movements and precede the landslide formation. The studies proved that the rock niches often represent the effect of earlier propagation of cracks and crevice type caves. Thus the niches are often formed before the main gravitational mass movements. The deep rock landslides develop in the prolonged process of stadal loading and unloading the shearing stress along the natural planes of original extension joints and induced relaxation joints in the rock massifs. Finally, this process bring to the marginal, breaking stress and gravitational movement of rock body separated by the widened cracks (often crevice type caves) from the massif.

Key words: crevice type caves, mass movement, initial stage of slope development, structural anisotropy, stress distribution, rocky massifs, Polish Flysch Carpathians

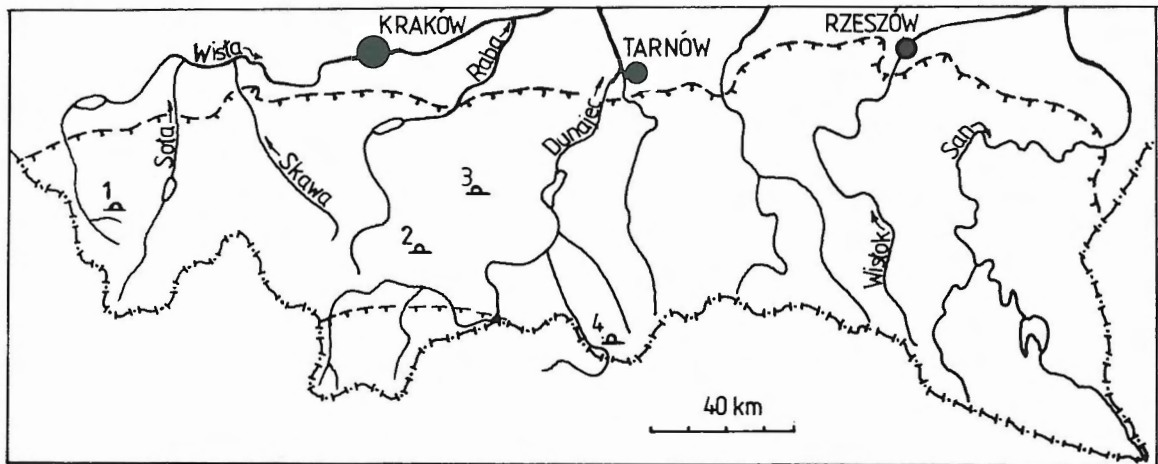
Procesy osuwiskowe w obrębie Karpat są zjawiskiem powszechnym, determinowanym zarówno charakterystyczną budową geologiczną Karpat sprzyjającą rozwojowi ruchów masowych, jak i częstością występowania czynnika inicjalnego prowadzącego do destabilizacji zbocza (stoku). Analiza sposobu powstawania osuwisk będących efektem finalnym cyklicznego narastania naprężeń (*loading stress*) i ich względnej relaksacji (*unloading stress*) w górotworze następujących wzdłuż naturalnych powierzchni nieciągłości, pozwoliła wysunąć wniosek o strukturalnych założeniach wszystkich skalnych osuwisk w Karpatach (Margielewski, 1997, 1998a). Jakkolwiek hipoteza ta wydaje się logiczna, dotychczas trudno było znaleźć jej jednoznaczne potwierdzenie. Możliwość taką stwarza analiza jaskiń — naturalnych pustek podziemnych dostępnych dla człowieka — rozwijających się linijnie w obrębie masywów skalnych Karpat, wzdłuż zespołów spękań (Kowalski, 1954; Janiga, 1974; Puchejda, 1989; Pulina, 1997a, b, 1998). Jaskinie te zwane pseudokrasowymi, powstają na różnych etapach ewolucji stoków. W inicjalnych stadiach rozwoju procesów odprężeniowo-grawitacyjnych, jaskinie typu *crevice caves* (Vitek, 1983)

określane w języku polskim jako jaskinie s.zparowe (Urban & Mochoń, 1990) lub szczelinowe (Klassek, 1994; Pulina, 1997a), tworzą się zarówno w obrębie stoku stanowiąc formy wyjściowe do powstania osuwisk, jak i ponad krawędziami nisz osuwisk. Jaskinie blokowskie typu *talus caves* (Vitek, 1983), powstają w obrębie rumowiskowych koluwiów rozwiniętych osuwisk.

Mechanizm powstawania jaskiń dylatacyjnych

Cykliczne naruszanie równowagi stoku poprzez jego podcinanie erozyjne, obciążenie wodą lub wstrząsy sejsmiczne, powoduje powstawanie w jego obrębie naprężeń ścinających, które są rozładowywane w obrębie masywów skalnych (Thiel, 1980). Pochłanianie energii tych naprężeń przez masyw skalny, skutkuje jego odprężaniem wzdłuż szczelin rozwieranych na zespołach spękań (dylatacja). Zapewnia to utrzymanie równowagi dynamicznej stoku aż do momentu krytycznego, w którym może dojść do przekroczenia naprężenia granicznego w masywie i jego zniszczenia. Nastąpi wówczas przemieszczenie grawitacyjne jego fragmentu, zmierzające do osiągnięcia nowego stanu równowagi (Terzaghi, 1950; Brunnsden, 1985). Cykliczne rozładowywanie naprężeń powoduje więc rozwieranie szczelin i powolną dezintegrację tektoniczną „odstokowej”

*Instytut Ochrony Przyrody PAN, ul. Lubicz 46, 31-512 Kraków



Ryc. 1. Rozmieszczenie analizowanych jaskiń dylatacyjnych w Karpatach: 1 — Jaskinia Malinowska w Beskidzie Śląskim, 2 — Zbójcka Jama na Jaworzynie Kamienickiej w Gorcach, 3 — Złotopieńska Dziura na Łopieniu w Beskidzie Wyspowym, 4 — Jaskinia Zbójnicka na Jaworzynie Krynickiej w Beskidzie Sudeckim

Fig. 1. Distribution of the analysed crevice type caves in the Flysch Carpathians: 1 — Malinowska Cave in the Beskid Śląski Mts, 2 — Zbójcka Cave in Mt Jaworzyna Kamienicka in the Gorce Mts, 3 — cave Złotopieńska Hole in Mt Łopień in the Beskid Wyspovy Mts, 4 — Zbójnicka Cave in Mt Jaworzyna Krynicka in the Beskid Sudecki Mts

części wyodrębnionego fragmentu masywu skalnego, oddzielonego od nienaruszonej części masywu szczeliną dylatacyjną rozwijaną wzdłuż spękań. Tego typu szczeliny dylatacyjne (*tension cracks, tension crevices*), są więc efektem odzyskiwania równowagi dynamicznej przez ośrodek skalny, którego równowaga jest zaburzana czynnikami egzogenicznymi.

Szczeliny dylatacyjne stanowią powierzchnię odkłucia wyodrębnionego fragmentu masywu, rozbudowywaną w trakcie etapu przygotowawczego do transportu grawitacyjnego. Są one zazwyczaj pierwszymi objawami powstawania osuwiska (Kleczkowski, 1955; Hoek & Bray, 1981). Często zasypane druzgotem lub przykryte płytami skalnymi są jednak dostępne z powierzchni, stanowiąc jaskinie szparowe (szczelinowe; Kowalski, 1954; Wójcik & Zwołński, 1959; Janiga, 1974; Puchejda, 1989; Klassek, 1994). Pozwalają one prześledzić ewolucję stoku „od wewnątrz” masywu skalnego, zaś analiza ich przebiegu oraz zależności od systemów spękań, umożliwia obserwację początkowego stadium powstawania osuwisk w fazie narastania naprężeń i ich relaksacji (Jakubowski, 1974; Margielewski, 1998a).

Charakterystyka wybranych jaskiń

W celu scharakteryzowania różnych typów rozpadu masywów skalnych w ich inicjalnych stadiach, szczegółowej analizie tektogenetycznej poddano cztery wybrane jaskinie karpackie, stanowiące typ *crevice caves*. Dwie z nich są formami powstałymi na stokach nie objętych dotychczas ruchami masowymi stanowiąc inicjalny etap ich rozwoju, zaś kolejne dwie są rozwinięte w obrębie istniejących osuwisk, stwarzając możliwość ich sukcesji.

Jaskinie stanowiące inicjalny etap rozwoju stoku

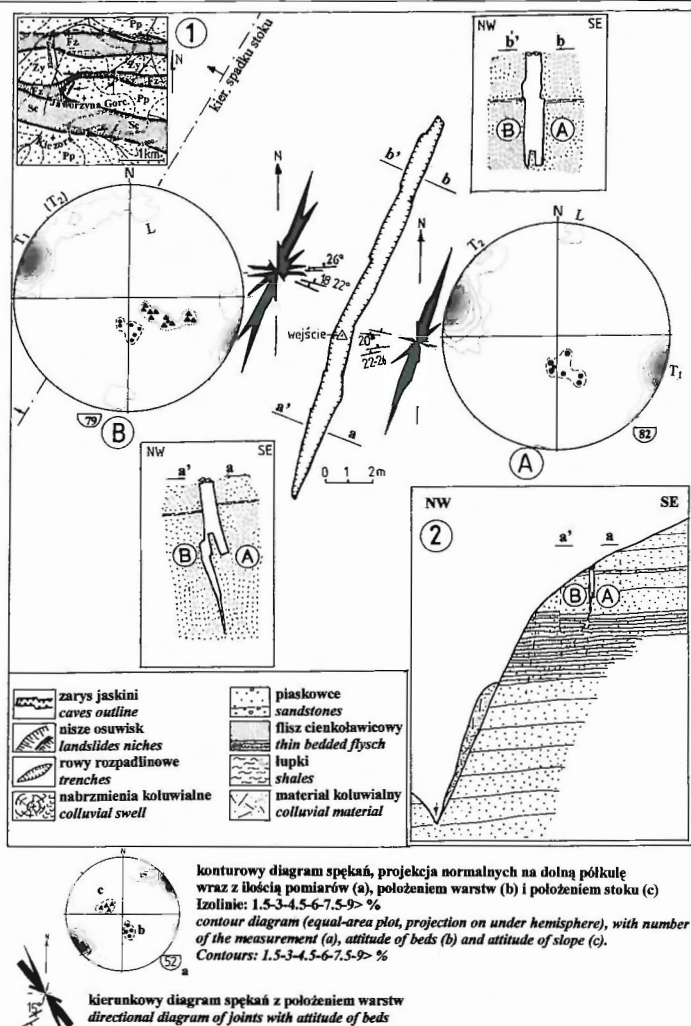
Jaskinia Zbójcka Jama w Gorcach. Jaskinia znajduje się w obrębie zachodniego stoku Jaworzyny Kamienickiej (1288 m n.p.m.), ponad współczesnym załomem doliny jednego z prawych dopływów Kamienicy (ryc. 1. 2). Utworzyła się w obrębie gruboławicowych piaskowców ogniwa piaskowca z Piwnicznej formacji magurskiej, krynickiej strefy tektoniczno-facialnej płaszczowiny magur-

skiej (Cieszkowski & Oszczytko, 1998). Jaskinia stanowi jeden korytarz o długości 15 m, wysokości 2–5 m i szerokości 0,8–1,5 m (ryc. 2. 7; Kowalski, 1954; Pulina, 1997b). W jej stropie występuje druzgot. W spągu jaskini jest widoczna pionowa szczelina (szer. 40 cm) sięgająca w dół, w głąb masywu.

Jaskinia Zbójcka Jama jest klasyczną szczeliną dylatacyjną rozwijaną subsekwentnie w stosunku do rozciągłości warstw (ryc. 2.1–2). Ściany jaskini o prostoliniowym przebiegu, są wycięte wzdłuż zespołu spękań poprzecznych T_1 o kierunku 10–20°, który jest równoległy do rozciągłości stoku (ryc. 2.1 B). Na słabo zaznaczonych spękaniach podłużnych L o kierunku 280° powstały poprzeczne pionowe załomy ścian, o szerokości 25 cm zachowane na dostkowej (A — nienaruszony masyw) i odstokowej (B — odspojony fragment masywu) ścianie jaskini (ryc. 7*). Ich wzajemne relacje wskazują na poziomą translację odstokowej części masywu o ok. 40 cm w kierunku północnym. W środkowej części obydwu ścian, jest widoczny cienki (5 cm), ciągły poziom piaskowców skorupowych. Na wysokości otworu na ścianie odstokowej poziom ten jest niższy o 5 cm, zwiększając dystans w kierunku północnym do 20 cm. W kierunku południowym z kolei, poziom ten można obserwować wyżej o ok. 20 cm na ścianie odstokowej (ryc. 2.1). Sugeruje to, że rozwój jaskini nastąpił w efekcie dylatacyjnego rozsznięcia szczeliny na zespole spękań poprzecznych, następnie zaś translacji nożycowej odstokowej części masywu i jej niewielkiej lewoskrętnej rotacji wzdłuż osi 285°, na co wskazuje również zmiana kąta upadu spękań podłużnych L (280°) ściany odstokowej (ryc. 2.1B) i dostkowej jaskini (ryc. 2.1A).

Jaskinia Malinowska. Jaskinia ta występuje na południowych stokach Malinowa (1117 m n.p.m.) w Beskidzie Śląskim (Kowalski, 1954; G. Klassek [W:] Pulina, 1997a) (ryc. 1.1). Powstała ona w gruboławicowych piaskowcach i zlepieńcach malinowskich warstw godulskich górnych płaszczowiny śląskiej, budujących tu szczytowe partie góry (Burtan, 1973; ryc. 3). Przebieg jaskini nawiązuje do dwóch zespołów spękań poprzecznych T_1 i T_2 o kierunkach 300–310° oraz 20–25° i niemal pionowych płaszczynach, a także do zespołu spękań odprężeniowych o falistych

*Ryc. 7–10 patrz III str. okładki s. 275.



Ryc. 2. Jaskinia Zbójceka Jama na Jaworzynie Kamienickiej w Gorcach: 1 — plan wg Kowalskiego (1954), zmodyfikowany, wraz z przekrojami jaskini (a-a', b-b'), 2 — przekrój przez stok (geologia wg Cieszkowskiego & Oszczytko, 1998); Pp — gruboławicowe piaskowce ogniwa piaskowca z Piwnicznej formacji magurskiej, Fz — formacja z Zarzecza (flisz cienkoławicowy), Sc — formacja szczawnicka (flisz cienkoławicowy), Zy — piaskowce gruboławicowe ogniwa życzanowskiego formacji szczawnickiej. Analiza spękań na podstawie diagramów konturowych (projekcja równopowierzchniowa normalnych na dolną półkulę) i kierunkowe dla części dostokowej (A) i odstokowej (B) jaskini

Fig. 2. Cave Zbójceka Jama in Mt Jaworzyna Kamienicka in the Gorce Mts. 1 — map after Kowalski (1954), with cross-sections of passages (a-a', b-b'), 2 — cross section of the slope (geology after Cieszkowski & Oszczytko, 1998); Pp — thick-bedded sandstones of Piwniczna Member of Magura Formation, Fz — thin-bedded flysch of the Zarzecze Formation, Sc — Szczawnica Formation (thin-bedded flysch), Zy — thick-bedded sandstones of the Życzanów Member of Szczawnica Formation. The joint's analyse on the background of the contour diagram (equal — area plot, projection on lower hemisphere) and directional diagram for upper side (A) and lower side (B) of the cave

powierzchniach. Dlatego ściany jaskini mają regularny, prostoliniowy przebieg, lokalnie zaś falisty (również w pionie; ryc. 8). Wysokość korytarzy osiąga 15 m, zaś w stropie występują płyty skalne (ryc. 3.2). Najdłuższy, zespół prostych korytarzy w centralnej części jaskini (korytarz „a-b” na ryc. 3.1) jest rozwinięty w przybliżeniu równoległe do stoku, skrajne jej fragmenty zaś — wschodni i zachodni — półkoleście skracają w kierunku spadku stoku. W części zachodniej zmiana biegu jaskini następuje poprzez regularne załamania korytarza na kierunkach spękań T_1 i T_2 . Zachodnia część korytarza równoległego do stoku (główna część potencjalnej niszy osuwiska — korytarz „b”), jest

rozwinięta na niemal pionowych płaszczyznach ciosowych zespołu spękań poprzecznych T_1 o przebiegu ok. 300° (ryc. 3.1 A₁-B₁). W obrębie wschodniej części tego systemu (korytarz „a” na wschód od wejścia) jest widoczna reorientacja kierunków spękań poprzecznych, szczególnie w części dostokowej, spowodowana znaczną dezintegracją tektoniczną tego fragmentu masywu (ryc. 3.1 A₂-B₂).

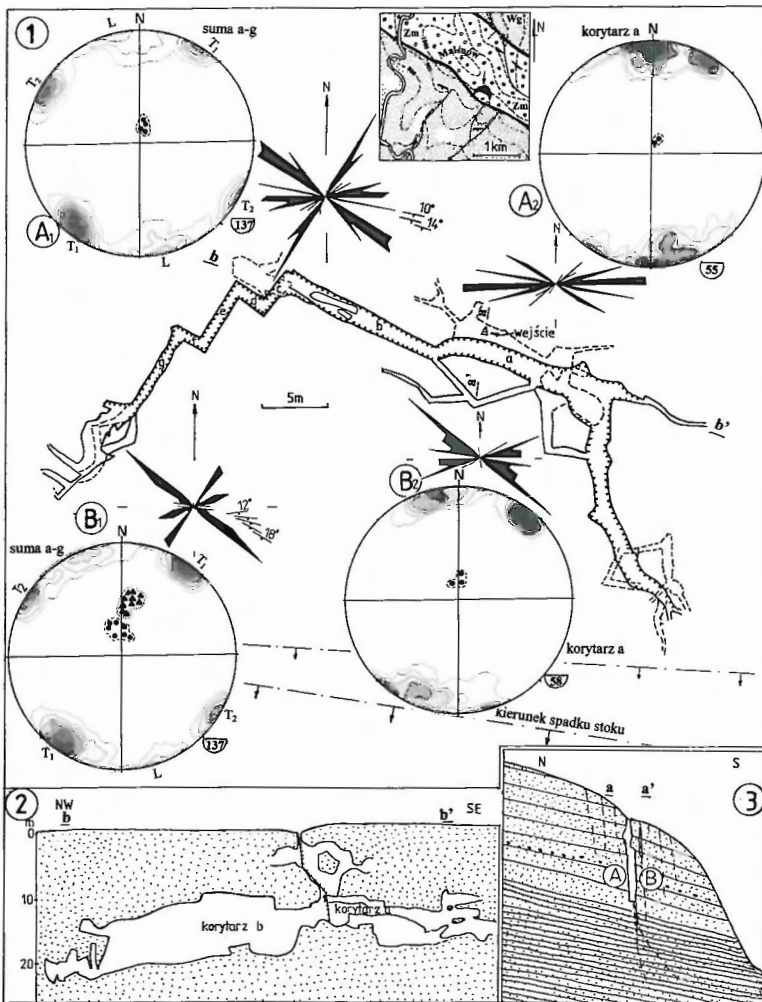
W obrębie ścian korytarzy „b-e”, zaznacza się wyraźnie poziom warstwowania frakcyjnego, pozwalający prześledzić charakter przemieszczeń poszczególnych fragmentów masywu. Ogólnie na ścianach odstokowych (B), poziom ten znajduje się 10-30 cm niżej niż na ścianie dostokowej (A) części masywu, zaś wielkość przemieszczenia wzrasta w kierunku zachodnim. Zbliżona szerokość korytarzy jaskini tworzących zygzakowaty system (ryc. 3.1, korytarze „b-g”) wskazuje, że nastąpiło dylatacyjne przesunięcie odstokowej części masywu w kierunku spadku stoku (i zapadania warstw), następnie zaś translacja pionowa części odstokowej, zwiększająca się w kierunku zachodnim. Potwierdza to zarówno nieznaczny wzrost kątów zapadania warstw w części odstokowej masywu, jak również niewielkie „wypionowanie”, płaszczyzn spękań zespołów T_1 i T_2 , pierwotnie nachylonych w kierunku przeciwnym do spadku stoku (ryc. 3.1: A₁-B₁).

Charakterystyczne dla jaskini amfiteatralne obramowanie wyodrębnionego fragmentu masywu skalnego, stwarzając w perspektywie możliwość koleistego przebiegu niszy potencjalnego osuwiska (ryc. 3.1). Taki zarys płaszczyzny odkłucia mas skalnych, jest efektem wielokierunkowego rozładowywania naprężeń ścinających wzdłuż różnych kierunków nieciągłości i jest kształtowany już na etapie rozładowywania naprężeń.

Jaskinie związane z osuwiskami i wyznaczające potencjalne kierunki ich rozwoju

Jaskinia Zbójnicka w Jaworzynie Krynickiej. Jaskinia ta powstała w obrębie gruboławicowych piaskowców ogniwa piaskowca z Piwnicznej formacji magurskiej, krynickiej strefy tektoniczno-fakcyjnej płaszczyzny magurskiej (Chrzastowski i in., 1995). Znajduje się ona na południowym stoku grzbietu odchodzącego ku wschodowi od szczytu Jaworzyny Krynickiej na wys. 1114 m n.p.m. (Kowalski, 1954; E. Borek [W:] Pulina, 1997b)

Jaskinia Zbójnicka utworzyła się częściowo w obrębie niszy osuwiska (ryc. 4.1-3), mającego liniową, częściowo skalistą niszę o wysokości ok. 3 m z rowem rozpadlinowym u jej podnóża, oddzielającym od niszy rozległe wyłaszczenie osuwiskowe (ryc. 4. 2). Otwór jaskini znajduje się w obrębie leja zapadliskowego w rowie rozpadlinowym. W stosunku do osuwiska, jaskinia reprezentuje dwie wyraźnie zróżnicowane części: wschodnią, będącą pionową kontynuacją niszy osuwiska w głąb masywu i zachodnią, wykraczającą poza obszar osuwiska. Wschodnia część jaskini związana bezpośrednio z osuwiskiem, ma charakter rumowiskowy i jest zamknięta zwaliskami, zaznaczonymi na powierzchni terenu w postaci lejów w obrębie rowu rozpadlinowego (ryc. 4.1, 2). Zachodnią część jaskini rozwiniętą już poza osuwiskiem, stanowi korytarz o wysokości 3-4 m i dnie opadającym w kierunku zachodnim (ryc. 9). Proste,



Ryc. 3. Jaskinia Malinowska w Beskidzie Śląskim: 1 — plan wg Rachwańca & Holka [W:] Pulina, 1997b, uproszczony, 2 — przekrój podłużny, 3 — przekrój poprzeczny. Przekrój poprzeczny wg Ganszera & Pukowskiego [In:] Pulina, 1997b. Geologia wg Burtan 1973: Zm — gruboławicowy zlepianiec malinowski warstw godulskich górnych, Wg — warstwy godulskie górne (piaskowce cienkoławicowe i łupki). Konturowe i kierunkowe diagramy spekań: A1–B1: suma korytarza a–g, A2–B2 korytarza. Objaśnienia sygnatur — ryc. 2
Fig. 3. Malinowska Cave in the Beskid Śląski Mts.: 1 — map after Rachwańca & Holka [In:] Pulina, 1997b, simplified, 2 — the cross section longitudinal and, 3 — the cross section transversal (after Ganszer & Pukowski [In:] Pulina, 1997b). Geology after Burtan 1973: Zm — thick-bedded Malinowski Conglomerate, Wg — thin-bedded flysch of Upper Godula Beds, Tectonic diagram: A1–B1 — the sum of measurement for passages a–g, A2–B2 — the passage a. Explanation of signatures — see Fig. 2.

często pionowe, lite ściany wycięte wzdłuż jednego z zespołów spekań poprzecznych o kierunku $290\text{--}300^\circ$, tworzą płaskie powierzchnie o długości 1,5 m, rozdzielone poprzecznymi załomami o szerokości 10–25 cm, rozwiniętymi na spekaniach o kierunku $35\text{--}45^\circ$. Strop jaskini stanowią tu lokalnie spągi ławic piaskowca. Charakterystyczna dyspersja kierunków spekań poprzecznych dostokowej (ryc. 4.1 A₁) części jaskini, przy regularnym przebiegu spekań części odstokowej (ryc. 4.1 B₁), jest spowodowana dylatacyjną dezintegracją tej części masywu.

W najniższych, najbardziej na zachód wysuniętych partiach jaskini występuje korytarz o wysokości 5 m i szerokości 0,5 m, tworzący drugi, niższy jej poziom. Falisty przebieg powierzchni spekań, odzwierciedla się na diagramach zmiennością kierunków ($280\text{--}300^\circ$) oraz kąta zapadania płaszczyzn spekań (ryc. 4.1 A₂–B₂). Większa dyspersja

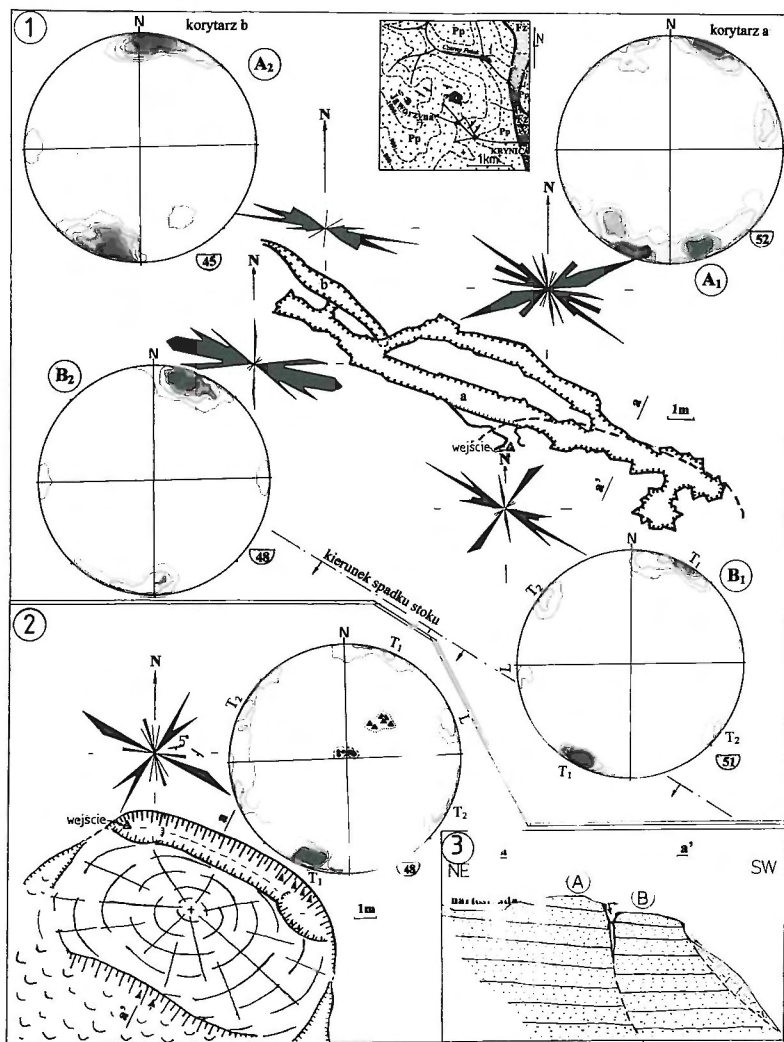
kierunków i kątów zapadania spekań odstokowej części głównego fragmentu jaskini, związana jest z niewielką rotacją tej części masywu. W stosunku do spekań głównych partii jaskini, kierunki spekań analizowanej części jaskini, stanowią odrębny system, związany z ciosem odprężeniowym.

Zgodność kierunków spekań niszy osuwiska i odstokowej części głównego fragmentu jaskini, wydaje się ewidentna, gdyż jaskinia jest tu częścią osuwiska rozwijanego subsekwentnie w głąb masywu i wzdłuż rozciągłości stoku (ryc. 4.1, 3). **Złotopińska Dziura w Beskidzie Wyspowym.** Jaskinia ta znajduje się na północno-wschodnim stoku jednego z grzbietów odchodzących ku północy od wierzchołowy szczytowej Łopienia (953 m n.p.m.) w Beskidzie Wyspowym (Mleczek [W:] Pulina, 1997b; ryc. 1. 3). Powstała ona w obrębie gruboławicowych piaskowców magurskich strefy Siar płaszczowiny magurskiej (Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1966; Konon, 1996).

Jaskinia stanowi unikatową strukturę powstałą w obrębie niszy osuwiska. System ścian dostokowych jaskini stanowi kontynuację niszy osuwiskowej w głąb masywu, schodząc schodowo w dół w formie 4 kondygnacji rozdzielonych stopniami wyciętymi na powierzchniach ławic (ryc. 5. 3). Ściany jaskini utworzone są na powierzchniach spekań o kierunkach w przybliżeniu równoległych do stoku. Spekania te mają znaczny rozrzut kierunków (od 300 do 340°), do których dowiązują poszczególne poziomy jaskini (ryc. 5.1B). Powierzchnie spekań są pionowe lub nieznacznie nachylone w różnych kierunkach, niekiedy zaś faliste. Rozwarcie jaskini zmniejsza się w głąb masywu.

Najwyższy poziom jaskini (poziom I), wykształcił korytarz o wysokości do 1,5 m, szerokości $0,7\text{--}1,5$ m, dowiązujący do kierunku spekań 300° . Ściana prosta, lokalnie ma tu przebieg muszlowy. Strop jest gładki i dowiązuje do powierzchni ławic. Z poziomem tym łączy się cofnięty w kierunku dostokowym i nieco niżej występujący poziom Ia, tworzący korytarz o wysokości 3 m i przebiegu 295° . Poziom II, niższy, ma prostoliniowy przebieg, ściany zaś są często faliste, dowiązujące do płaszczyzn ciosu odprężeniowego. Szerokość rozwarcia wynosi tu $0,7\text{--}1,5$ m, wysokość korytarza 1,8 m (ryc. 10). Gładki strop tworzą powierzchnie ławic. Poziom ten o przebiegu $313\text{--}322^\circ$, nawiązuje do wyraźnie wyodrębnionego kierunku spekań

skośnych z maksimum 315° (ryc. 5.1). Poziom III o głównym przebiegu korytarza 330° , ma rozwarcie $0,7\text{--}0,8$ m i wysokość 1,5 m. Lokalnie przebiegi ścian mają falisty charakter, zaś boczne korytarzyki o kierunku 230° , wskazują na udział spekań poprzecznych, słabo odzwierciedlonych na diagramach. Szerokość korytarza najniższego występującego poziomu IV, wynosi $0,4\text{--}1$ m, wysokość zaś do 2 m. Rozciągłość ścian nawiązuje do płaszczyzn spekań o przebiegu 335° . Ponad jaskinią występuje skalista nisza osuwiska pakietowo-rumoszowego (por. Ziętara, 1969), o wysokości $5\text{--}7$ m i łącznej długości 200 m, powstałego w efekcie dezintegracji grawitacyjnej najwyższej kondygnacji jaskini. Powierzchnie ścian skalnych niszy (stanowiącej niegdyś dostokową ścianę tej części jaskini) są zgodne z kierunkami spekań podłużnych $295\text{--}300\text{--}310^\circ$ (ryc. 5.2). Do tych kierunków spekań nawiązują również dwa przypo-



Ryc. 4. Jaskinia Zbójnicka na Jaworzynie Krynickiej. Przykład rozwoju osuwiska wzdłuż stoku: 1 — plan wg Borka [W:] Pulina 1997b, zmodyfikowany, 2–3 — przekrój i lokalizacja formy osuwiskowej w obrębie stoku. Geologia wg Chrzastowski i in., 1995: Pp — gruboławicowe piaskowce ogniwa piaskowca z Piwnicznej formacji magurskiej, Fz — cienkoławicowy flisz formacji z Zarzecza. Diagramy spękań: A₁, B₁ — główny korytarz jaskini, A₂, B₂ — korytarz boczny jaskini. Na planie jaskini linią przerywaną zaznaczono zasięg niszy osuwiska. Objasnienia sygnatur — ryc. 2

Fig. 4. Zbójnicka Cave in Mt Jaworzyna Krynicka. The example of the development of the landslide along the slope: 1 — map after Borek [W:] Pulina 1997b, modified, 2–3 — cross-section and cave situation in the slope. Geology after Chrzastowski i in., 1995: Pp — Piwniczna Member of the Magura Formation, Fz — thin-bedded flysch of Zarzecze Formation. Tectonic diagrams: A₁, B₁ — main passage of the cave, A₂, B₂ — branch passage. The extent of landslide niche on the map of the cave is marked by discrete line. Explanation of the signatures — see Fig. 2

wierzchniowe poziomy jaskini (poziom I i Ia), zaś w obrębie korytarzy głębszych poziomów (II–IV) jest widoczna prawoskrętna rotacja kierunków spękań, sięgająca dla najniższego poziomu 40° (vide ryc. 5.1B). Może to wynikać z lokalnych zmian w dystrybucji kierunków spękań, spowodowanych różnym stopniem relaksacji poszczególnych partii masywu. Pionowe przemieszczenie obserwowane w obrębie powierzchni ławic dostokowej i odstokowej części masywu, wynosi nie więcej niż 20 cm, dlatego głównym mechanizmem inicjacji osuwiska była dylatacja, nie zaś ześlizg. Liczne jaskinie szczelinowe występujące ponad niszą osuwiska, wskazują na możliwość jego cofania w kierunku wierzchowiny.

Charakter potencjalnego rozwoju jaskiń dylatacyjnych w osuwiska

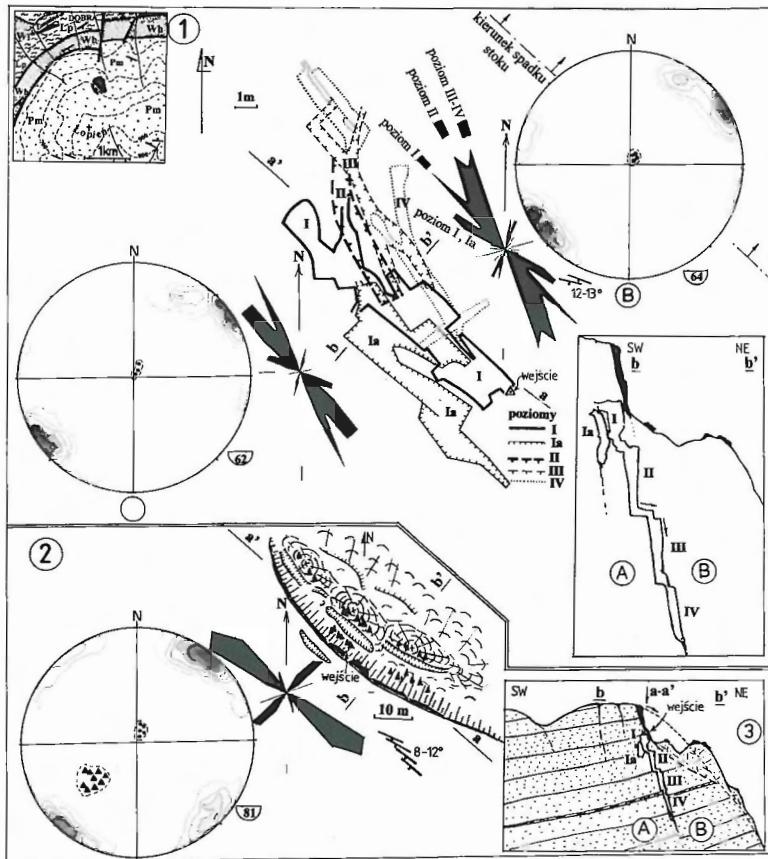
Dylatacja, będąca procesem wyjściowym do przemieszczenia wyodrębnionego fragmentu masywu w formie osuwiska, jest rozwijana wzdłuż naturalnych powierzchni nieciągłości strukturalnej. Późniejsze przemieszczenia mas skalnych poza obszar odrywania w postaci koluwium (zwarłego, pakietowego lub zdezintegrowanego, rumoszewego — por. Ziętara, 1969), jest już procesem bardziej złożonym strukturalnie.

Najprostszym modelem grawitacyjnego przemieszczenia fragmentu masywu skalnego wyodrębnionego jaskinią, jest odspojenie i transport jego fragmentu przez przechył, będący efektem stopniowego wzrostu rozwarcia szczeliny w górnych partiach. Ten typ osuwiska określane jako *toppling* (ryc. 6.1; Poisel, 1990; Dikau i in., 1996), może przejść zarówno w obryw nie wykształcający płaszczyzny poślizgu, jak też w osuwisko z płaszczyzną poślizgu płytko lub głęboko występującą. Podobny charakter przemieszczeń może nastąpić wskutek stopniowego rozwierania równoległych systemów szczelin występujących w układzie schodowym w obrębie stoku, powodującego powstanie osuwiska schodowego (Hoek & Bray, 1981; Brunsden, 1985).

W efekcie blokowego poziomego rozsuwania poszczególnych pakietów skalnych rozdzielanych szczelinami dylatacyjnymi, będzie następował wzrost rozszerzalności bocznej masywu skalnego (*lateral spreading* — Dikau i in., 199).

Powstanie osuwisk z płaszczyzną poślizgu, będzie związane ze stałym wzrostem naprężenia normalnego na podstawie odstokowej części masywu skalnego wyodrębnionego szczeliną dylatacyjną, wskutek stopniowego zmniejszenia jego łączności z masywem. Taka redystrybucja naprężeń powodująca zwiększenie się naprężeń stycznych z głębokością, prowadzi do powstania w obrębie masywu powierzchni krytycznej, wzdłuż której jest on niestabilny (Terzaghi, 1950). Jeżeli naprężenia osiągną wartość krytyczną, wzdłuż tej powierzchni nastąpi zniszczenie masywu i transport grawitacyjny mas skalnych. W tego typu osuwiskach, zaznacza się odrębność rozwoju dwu płaszczyzn wyodrębniających zsuw: płaszczyzny odkucia odwzorowanej w obrębie jaskini i płaszczyzny poślizgu mas skalnych tworzonej już w trakcie przemieszczeń grawitacyjnych (Margielewski, 1998a).

Płytki ześlizg mas skalnych odspojonych przez jaskinią dylatacyjną, następujący po strukturalnych powierzchniach nachylonych w kierunku spadku stoku, będzie miał charakter translacyjny (ryc. 6.3; Hutchinson, 1988; Dikau i in., 1996). W tym przypadku powierzchnia poślizgu zależna bezpośrednio od struktury geologicznej, będzie płaska (zsuw konsekwentno-ześlizgowy po powierzchni uwarstwienia, uławicenia), bądź klinowa (zsuw konsekwentno-szczelinowy po płaszczyznach spękań lub uskoków; Varnes, 1978; Hoek & Bray, 1981 — klasyfikacja za Boberem, 1984). Tego typu płaskie powierzchnie poślizgu zdeterminowane dla osuwisk strukturalnych w Karpatach (por. Kleczkowski, 1955; Bober, 1984), mogą występować jedynie w obrębie płytkich zsuwów,



Ryc. 5. Złotopieńska Dziura na Łopieniu w Beskidzie Wyspowym. Przykład rozwoju osuwiska w głąb masywu skalnego: 1 — plan wg Młeczka [W:] Pulina, 1997b, zmodyfikowany i uproszczony, 2–3 — plan osuwiska i przekrój przez grzbiet. Geologia wg Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1966; Konon, 1996: Pm — piaskowce formacji magurskiej, Wh — warstwy hieroglifyowe (cieńkoławicowy flisz), Wi — warstwy inoceramowe (cieńkoławicowy flisz), Lp — łupki pstre. Na diagramie kierunkowym odstokowej części jaskini (1B) zaznaczono kierunki korytarzy poszczególnych poziomów jaskini. Na planie jaskini poszczególne jej poziomy zaznaczono różnymi liniami. Pozostałe sygnatury — ryc. 2

Fig. 5. Złotopieńska Dziura (Złotopieńska Hole) in Mt Łopień in the Beskid Wyspowy Mts. The example of development of the landslide inside (in depth) rocky massif: 1 — map after Młeczka [In:] Pulina, 1997b, modified and simplified, 2–3 — sketch of the landslide with cross-section. Geology after Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1966; Konon, 1996: Pm — Magura sandstones, Wh — Hieroglyphic Beds, Wi — Inoceramian Beds, Lp — variegated shales. On the directional diagram of lower side of the cave the directions of the cave levels are marked. On the map the different levels are drawn with different lines. Explanation of the other signatures — see Fig. 2

w których przemieszczany materiał koluwalny nie powoduje zmian w przebiegu strukturalnej powierzchni poślizgu.

W przypadku transportu grawitacyjnego znacznych mas skalnych zdestabilizowanych szczeliną (tu jaskinią) dylatacyjną, powierzchnia poślizgu występuje głęboko i jest złożona z odcinków płaskich (strukturalnych) i krzywoliniowych (ścięciowych; Brunsten, 1985; Margielewski, 1998a). Charakter przemieszczeń powoduje, że powierzchnia poślizgu będzie miała charakter strefy (*shearing zone*), gdyż z transportem mas skalnych jest związane zjawisko eliminowania makroszorstkowości powierzchni strukturalnych, prowadzące do zwiększenia się objętości materiału w strefie zniszczenia oraz powstawanie ścięciowych elementów, będących efektem kruchej pęknięcia. Transport grawitacyjny zachodzący po tak głęboko występujących powierzchniach (strefach) poślizgu, charakteryzuje się zwykle ruchem obrotowym przemieszczanych mas, zaś powierzchnia (strefa) poślizgu ma kolisty, cylindryczny

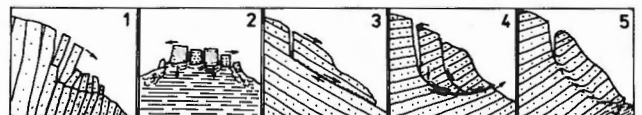
zarys, typowy dla osuwisk rotacyjnych (ryc. 6.4) (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Dikau i in., 1996). Jest przy tym istotne, że wraz ze wzrostem głębokości pionowego zasięgu szczeliny dylatacyjnej (jaskini) w masyw skalny, zmniejsza się krzywizna pierwotnie cylindrycznego zarysu powierzchni poślizgu (Hutchinson, 1995). W tym przypadku bardziej płaski przebieg tej powierzchni wymuszający przejście od rotacyjnego do bardziej translacyjnego charakteru zsuwu, będzie powodował wzrost udziału składowych strukturalnych w strefie poślizgu.

Specyficznym typem głębokich osuwisk rozwijanych z jaskiń jest spływ skalny (*rock flow: Sacking, sagging* — Hutchinson, 1995; Dikau i in., 1996). Ten typ traktowany jako inicjalny etap rozwoju osuwisk (Hutchinson, 1995) jest związany z plastycznymi odkształceniami ośrodka na granicy nienaruszonego masywu — osuwisko (ryc. 6.5). W efekcie powolnego transportu fragmentu masywu odspojonego szczelinami dylatacyjnymi, nastąpi tu fałdowanie grawitacyjne, zaś plastyczny charakter odkształceń, będzie również stwarzał (aż do przekroczenia naprężeń granicznych) możliwość pochłaniania naprężeń ścinających. W późniejszym etapie nastąpi ścięcie deformacji ciągłych na granicy poślizgu i utworzenie klasycznego osuwiska rotacyjnego z głęboko występującą strefą poślizgu.

Analizowane jaskinie tworzą formy wyjściowe do powstania głębokich osuwisk, zaś ich rozwój w osuwisko rotacyjne, lub rotacyjno-translacyjne, będzie posiadał charakter kompleksowy, od form inicjalnych typu *Sacking mogących bezpośrednio przejść w osuwisko rotacyjne* (Zbójcecka Jama, Jaskinia Zbójnicka), po etapowo rozwijany *toppling* (Złotopieńska Dziura), czy *lateral spreading* (Jaskinia Malinowska).

Powierzchnia odkucia mas skalnych odwzorowująca kierunki anizotropii tektonicznej, może posiadać różny, niekiedy skomplikowany charakter, w zależności od litologii utworów i stopnia zaangażowania poszczególnych kierunków anizotropii strukturalnej w jej kreowaniu (Margielewski, 1998a). Analizowane jaskinie powstały w obrębie gruboławicowych piaskowców, stąd powierzchnia ich ścian jest prostoliniowa ze

stopniami rozwijanymi w pionie na powierzchniach uławiczenia (Złotopieńska Dziura), z pionowymi załomami ścian rozwijanymi wzdłuż poprzecznych zespołów spękań (Zbójcecka Jama w Górcach) lub też ma kształt muszlowy rozwi-



Ryc. 6. Charakter rozwoju jaskiń szczelinowych w osuwisko: 1 — przechył, 2 — rozszerzanie boczne masywu, 3 — osuwisko translacyjne, 4 — osuwisko rotacyjne, 5 — spływ skalny (wg Hutchinson, 1988; Dikau i in., 1996)

Fig. 6. The type of the caves crevice type development as landslide: 1 — toppling, 2 — lateral spreading, 3 — translational landslide, 4 — rotational landslide, 5 — rock flow (sagging; after Hutchinson, 1988; Dikau, 1996)

jany wzdłuż ciosu odprężeniowego (Jaskinia Malinowska, dolne partie Jaskini Zbójnickiej na Jaworzynie i Złotopieńskiej Dziury). Ściany te są pionowe (Jaskinia Malinowska), nachylone w kierunku ruchu lub przeciwnie do niego (Złotopieńska Dziura i fragment Zbójcekiej Jamy). Nisze osuwisk stanowiące w początkowym etapie ich rozwoju dostokowe ściany jaskiń, były rozwijane stopniowo, na długo przed utworzeniem właściwych form osuwiskowych i w stosunku do osuwisk mają charakter rezydualny.

Wnioski

Rozwój osuwisk z jaskiń dylatacyjnych wskazuje na odrębność rozwoju dwóch płaszczyzn wyodrębniających zsuw: płaszczyzny odkucia i płaszczyzny poślizgu mas skalnych. Płaszczyzna odkucia rozwijana poprzez propagację jaskiń szczelinowych zawsze będzie odwzorowywała powierzchnie strukturalne, jej rozwój zaś będzie znacznie rozłożony w czasie. Płaszczyzna (właściwie strefa) poślizgu, tworzona w trakcie przemieszczeń grawitacyjnych, najczęściej jest powierzchnią strukturalno-ścięciową w różnym stopniu odwzorowującą struktury geologiczne. Dlatego wszystkie skalne osuwiska w Karpatach powinny mieć założenia strukturalne (por. Margielewski, 1998a), związane z dylatacyjnym charakterem ich inicjacji. W takim aspekcie, model rozwoju i geologiczne kryteria klasyfikacyjne osuwisk strukturalnych opracowane dla Karpat (Kleczkowski, 1955; Bober, 1984), dotyczą wyłącznie płytkich osuwisk przemieszczanych po płaskich powierzchniach i są zbyt schematyczne w stosunku do skomplikowanej budowy geologicznej Karpat. Jakkolwiek nowe, uniwersalne kryteria klasyfikacyjne osuwisk proponowane przez International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (por., Dikau i in., 1996 — *vide* ryc. 6) wydają się rozwiązywać problem klasyfikacji osuwisk, należy zwrócić uwagę na fakt, iż klasyfikacja ta jest oparta w głównej mierze na hipotetycznych modelach rozwoju osuwisk. Stąd jej stosowanie powinno uwzględniać szczególną specyfikę inicjacji i rozwoju osuwisk w silnie anizotropowych tektonicznie fliszowych masywach skalnych Karpat.

Rozwój osuwisk z jaskiń dylatacyjnych jest długotrwały, zaś etap przygotowawczy mas skalnych do przemieszczenia (narastanie naprężeń i ich relaksacja w górotworze) jest znacznie rozłożony w czasie. Wskutek oddziaływania czynnika inicjalnego o powszechnym zasięgu, mogła więc następować masowa finalizacja form długo przygotowywanych do przemieszczeń. Stąd w fazach zwłagoceń klimatu w holocenie, w czasie których rejestrowano gwałtowny wzrost częstości występowania zjawisk ekstremalnych (por. Starkel, 1997) mogło następować masowe uruchamianie osuwisk. Przyjęcie powszechności takiego modelu rozwoju osuwisk, może stanowić klucz do wyjaśnienia fazowości intensyfikacji osuwisk karpaccich związanej ze zmianami klimatycznymi w holocenie i uzasadnia wydzielanie faz osuwiskowych w Karpatach (Alexandrowicz, 1996; Starkel, 1997; Margielewski, 1998b).

Badania były prowadzone w ramach grantu KBN 6P 04E 005 15. Autorzy składają podziękowania Dr. hab. inż. Markowi Cieszkowskiemu z UJ, za udostępnienie niepublikowanych materiałów kartograficznych Górców.

Literatura

ALEXANDROWICZ S. W. 1996 — Holocenne fazy intensyfikacji procesów osuwiskowych w Karpatach. *Kwart. AGH, Geologia*, 22: 223–262

- BOBER L. 1984 — Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Inst. Geol.*, 340: 115–158
- BRUNSDEN D. 1985 — Ruchy masowe [W:] Embleton C. & Thornes J. (red.), *Geomorfologia dynamiczna*. PWN: 158–218.
- BURTAN J. 1973 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1: 50 000, arkusz Wisła. *Wyd. Geol.*
- BURTAN J. & SKOCZYLAŚ-CISZEWSKA K. 1966 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1: 50 000, ark. Limanowa (wyd. tymczasowe).
- CHRZĄSTOWSKI J., NESCIERUK P. & WÓJCIK A. 1995 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1: 50 000, arkusz Muszyna.
- CIESZKOWSKI M. & OSZCZYPKO N. 1998 — Mapa geologiczna odkryta Górczańskiego Parku Narodowego oraz jego bezpośredniego otoczenia 1: 25000. [W:] *Operat ochrony zasobów i walorów przyrody nieożywionej i gleb G.P.N. Archiwum Dyrekcji G.P.N.*
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTTL. & IBSEN M. L. (red.) 1996 — Landslide recognition. Identification. Movement and Causes. J. Wiley et Sons: 251.
- HOEK E. & BRAY J. 1981 — *Rock Slope Engineering*. London: 345.
- HUTCHINSON J. N. 1988 — Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. [W:] C. Bonnard (red.) *Landslides, Proc. 5th Intern. Symp. on Landslides*, 1: 3–35.
- HUTCHINSON J. N. 1995 — Deep seated movements on slopes. *Mem. Soc. Geol. It.*, 50: 147–164.
- JAKUBOWSKI K. 1974 — Współczesne tendencje przekształceń form osuwiskowych w holocennym cyklu rozwojowym osuwisk na obszarze Karpat fliszowych. *Pr. Muz. Ziemi*, 22: 169–193.
- JANIGA S. 1974 — Uwagi o genezie jaskiń z okolic Dukli. *Czasop. Geogr.*, 45: 355–360.
- KLASSEK G. 1994 — Jaskinie pseudokrasowe w Karpatach polskich [W:] *V Międzynarodowe Symp. Pseudokrasowe, Szczyrk 1994. Bielsko-Biala: 5–9.*
- KLECZKOWSKI A. 1955 — Osuwiska i zjawiska pokrewne. *Wyd. Geol.*: 116
- KONON A. 1996 — Tektonika góry Łopień. *Prz. Geol.*, 44: 1195–1198.
- KOWALSKI K. 1954 — Jaskinie Beskidów i Pogórza Karpackiego. [W:] *Jaskinie Polski*, PWN, 3: 23–67.
- MARGIELEWSKI W. 1997 — Formy osuwiskowe pasma Jaworzyny Krynickiej i ich związek z budową geologiczną regionu. *Kwart. AGH, Geologia*, 23: 45–102.
- MARGIELEWSKI W. 1998a — Rozwój form osuwiskowych w Baranowcu (Beskid Sądecki, Karpaty zewnętrzne), w świetle analizy strukturalnych warunkowań osuwisk w Karpatach fliszowych. *Prz. Geol.* 46: 436–450.
- MARGIELEWSKI W. 1998b — Landslide phases in the Polish Outer Carpathians and their relation to climatic changes in the Late Glacial and the Holocene. *Quater. Stud. Pol.*, 15: 37–54.
- POISEL R. 1990 — The dualism discrete-continuum of jointed rock. [W:] Hans Peter Rossmanith (ed.) *Mechanics of jointed and faulted rock*. A. Balkema: 41–49.
- PUCHEJDA W. 1989 — Geneza jaskini w Trzech Kopcach w Beskidzie Śląskim. *Kras i Speleologia*, 6: 66–76.
- PULINA M. (red.) 1997a — Jaskinie polskich Karpat fliszowych. Jaskinie Pogórza Śląskiego, Beskidu Śląskiego, Kotliny Żywieckiej, Beskidu Żywieckiego. *Wyd. PTPNoZ*, 1: 250.
- PULINA M. (red.) 1997b — Jaskinie polskich Karpat fliszowych. Jaskinie Beskidu Małego, Beskidu Makowskiego, Pogórza Wiśnickiego, Beskidu Wyspowego, Górców, Beskidu Sądeckiego, Pogórza Rożnowskiego, Pogórza Ciężkowickiego. *Wyd. PTPNoZ*, 2: 228.
- PULINA M. (red.) 1998 — Jaskinie polskich Karpat fliszowych. Jaskinie Beskidu Niskiego, Pogórza Dynowskiego, Gór Sanocko — Turczańskich, Bieszczadów. *Wyd. PTPNoZ*, 3: 261.
- STARKEL L. 1997 — Mass-movement during the Holocene: the Carpathian example and the European perspective. [W:] B. Frenzel (ed.) *Rapid mass-movement as a source of climatic evidence for the Holocene. Paleoclimatic Res.*, 19: 384–400.
- TERZAGHI K. 1950 — Mechanism of landslides. [W:] S. Paige (ed.) *Application Geology to Engineering Practice*. Geol. Soc. Amer. (J. Berkey Memory Vol.), Washington DC: 83–122.
- THIEL K. 1980 — *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. PWN.
- URBAN J. & MOCHOŃ A. 1990 — Pseudokras — definicja, rodzaje form, i ich występowanie. *Kwart. Geol.*, 34: 776–777.
- WÓJCIK Z. & ZWOLIŃSKI S. 1959 — Mode przesuńnięcia tektoniczne w jaskiniach tatrzańskich. *Acta Geol. Pol.*, 9: 319–336.
- VARNES D. J. 1978 — Slope movements: type and processes. [W:] R. L. Schuster & R. J. Krizek (ed.) *Landslides: Analysis and Control*. Transport. Res. Board, Nat. Acad. of Sci., Washington D.C., Spec. Rep. 176: 11–35.
- VITEK J. 1983 — Classification of pseudokarst forms in Czechoslovakia. *Intern. J. Speleology*, 13: 1–18.
- ZIĘTARA T. 1969 — W sprawie klasyfikacji osuwisk w Karpatach fliszowych. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan.*, 3: 111–131.

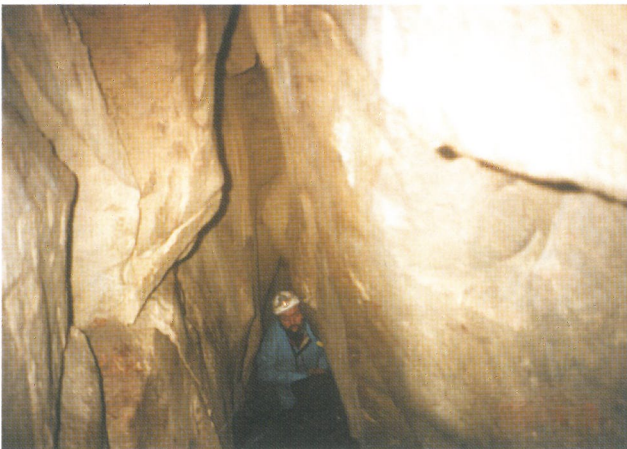
Charakter inicjacji ruchów masowych w Karpatach fliszowych na podstawie analizy strukturalnych uwarunkowań rozwoju wybranych jaskiń szczelinowych (patrz str. 268)



Ryc. 7. Jaskinia Zbójcecka Jama na Jaworzynie Kamienickiej w Gorcach (*vide* ryc. 2.1)



Ryc. 8. Jaskinia Malinowska w Beskidzie Śląskim (*vide* ryc. 3, korytarz b)



Ryc. 9. Jaskinia Zbójnicka na Jaworzynie Krynickiej. Fragment korytarza a (*vide* ryc. 4, korytarz a)



Ryc. 10. Złotopieńska Dziura na Łopieniu (Beskid Wyspowy). Fragment korytarza III (*vide* ryc. 5.1). Z prawej strony u góry (część dostokowa A), widoczne wąskie przejście do wyższego (II) poziomu