

Badania geofizyczne i klasyfikacje geotechniczne w ocenie stateczności karpackich zboczy fliszowych

Zbigniew Bestyński¹, Grzegorz Pacanowski², Edmund Sieński¹



Z. Bestyński G. Pacanowski E. Sieński

Geophysical investigation and geotechnical classifications for stability assessment of carpathian flysch slopes. *Prz. Geol.*, 65: 717–724.

Abstract. The paper presents the possibility of using complex geophysical investigations and geotechnical classification to identify geological structure and assess the stability of Carpathian landslides. The possibility of using seismic surveys to determine the landslide slope geometry necessary to analyze the computational stability has been indicated. In the paper authors present the possibility of geotechnical classification of the flysch KFG basis on the geophysical parameters in connection with the SMR classification proposed by M. Romana, for a rapid quantitative assessment of flysch slope stability. Examples of geophysical investigation of landslides and

their stability are described on the basis of the KFG and SMR classification. The proper slope stability assessment has been pointed out as a major factor contributing to safe foundation and operation of engineering structures, especially hydrotechnical structure.

Keywords: Carpathian flysch, landslide slope, slip surface, slope stability, KFG classification, SMR classification

Ruchy masowe, w szczególności osuwiska, są zjawiskiem powszechnym na obszarach górskich. Procesy te, z różną intensywnością, występują na całym obszarze Karpat fliszowych. Liczba osuwisk karpackich nie jest dokładnie znana. W 1999 r. oceniano, że jest większa od 10 000 (Zabuski i in., 1999). W wyniku badań geologicznych, wykonanych po ekstremalnie intensywnych opadach w latach 1997, 2001 i 2010, udokumentowano 58 000 osuwisk, ale ocenia się, że ich liczba przekracza 100 000 (Wójcik, Wojciechowski, 2016). Osuwiska w utworach fliszowych, obejmujące na ogół duże powierzchnie i masy materiału skalnego, są na obszarze Karpat poważnym zagrożeniem, utrudniającym realizację wielu projektów inżynierskich, szczególnie dróg i sztucznych zbiorników wodnych. Celem analiz było opracowanie metodyki szybkiej oceny stanu zagrożenia osuwiskowego, adekwatnej do warunków fliszowych.

SPECYFIKA BUDOWY GEOLOGICZNEJ KARPAT ZEWNĘTRZNYCH

Karpaty Zewnętrzne, zbudowane z utworów fliszowych, rozciągają się na terenie Polski od Cieszyna na zachodzie do Przemyśla na wschodzie. Charakterystyczną cechą fliszu są naprzemianległe występujące sekwencje warstw twardych, składających się z gruboziarnistych piaskowców i zlepieńców oraz warstw miękkich, utworzonych z drobnoziarnistych mułowców i iłowców, o miąższości od kilku centymetrów do wielu metrów. Pakiety tych skał są spękane, zuskokowane, sfałdowane i ponasuwane na siebie, przez co tworzą wybitnie niejednorodną strukturę geologiczną, nieciągłą i anizotropową. Skały o takiej strukturze są szczególnie podatne na ruchy masowe. Nawet stare osuwiska wykształcone w tych utworach, wydawałyby się już stabilne, są bardzo podatne na ponowną utratę stateczności (Thiel, 1989).

HISTORIA BADAŃ OSUWISK KARPACKICH

Badania osuwisk karpackich rozpoczęto na początku XX w., ale rozwinęto dopiero w latach 70., w związku z budową dróg i zbiorników wodnych. Obejmowały one nie tylko pojedyncze osuwiska, lecz dotyczyły również analizy zależności stateczności zboczy od ich geometrii i właściwości mechanicznych materiału skalnego, jak również wpływu czynników aktywnych na modelowanie i stateczność zboczy. W tym okresie wzbogacono również metodykę badań osuwisk o geofizyczne badania sejsmiczne i elektrooporowe. W latach 70. XX w. zrealizowano Program Rządowy PR-7, którego jednym z celów było „opracowanie metodyki szybkiej oceny stanu technicznego budowli hydrotechnicznych i stateczności strefy brzegowej sztucznych zbiorników wodnych”. W ramach realizacji projektu wykonano kompleksowe badania sejsmiczne i elektrooporowe osuwisk położonych w strefach brzegowych zbiorników wodnych: Tresna, Porąbka, Solina, Myczkowce oraz projektowanego zbiornika Dobczyce. Ich rezultatem było wypracowanie metodyki badań geofizycznych, umożliwiającej określenie geometrii ustabilizowanych osuwisk (Bestyński, Trojan, 1975). W późniejszych latach wykonano badania geofizyczne osuwisk w strefie brzegowej zbiornika Czorsztyn–Niedzica (Bestyński, 1992), projektowanego zbiornika Krempna (Bestyński, 2000) oraz budowanego zbiornika Świnna Poręba (Bestyński, Pacanowski, 2007).

Jeszcze w latach 80. XX w. Bober (1985, 1990) zaproponował wprowadzenie „wskaźnika osuwiskowości powierzchniowej”, określającego stosunek łącznej powierzchni osuwisk do całkowitej powierzchni danego obszaru i opracował „Mapę osuwiskowości powierzchniowej Karpat fliszowych” (Bober, 1985).

Kolejnym osiągnięciem w badaniach stateczności karpackich zboczy było opracowanie przez Bobera i Zabu-

¹Institut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór w Katowicach, ul. Kossutha 6, 40-844 Katowice; bestynski.z@gmail.com.

²Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; gpac@pgi.gov.pl.

skiego (1993, 1999) klasyfikacji zbczyc fliszowych (KZF). W klasyfikacji tej zbczyc podzielono na 4 klasy – od klasy I, zbczyc o bardzo małym prawdopodobieństwie utraty stateczności do klasy IV, zbczyc o bardzo dużym prawdopodobieństwie zsuwu. Podziału dokonano na podstawie parametrów opisujących geometrię zbczyc, ich budowę geologiczną, warunki hydrogeologiczne oraz obciążenia statyczne i dynamiczne.

W latach 2009–2016 Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, w ramach realizacji programu System Osłony Przeciw Osuwiskowej (SOPO), prowadził szczegółowe badania 60 aktywnych osuwisk zlokalizowanych na obszarze Karpat fliszowych (ryc. 1; Nescieruk i in., 2015). Badania obejmowały pomiary sejsmiczne i elektrooporowe oraz kartowanie otworów wiertniczych wraz z poborem próbek do badań laboratoryjnych. Wykonano także otwory piezometryczne i inklinometryczne, w których monitorowano warunki hydrogeologiczne i ruch koluwiów. Mierzono również przemieszczenia powierzchni zbczyc metodami geodezyjnymi. Monitoring tych osuwisk jest kontynuowany.

OCENA STATECZNOŚCI ZBCZY

Najbardziej wiarygodną metodą oceny stateczności zbczyc jest analiza geomechaniczna. Do jej przeprowadzenia konieczna jest znajomość geometrii zbczyc oraz właściwości geomechanicznych występujących w nim skał. Uzyskanie tych danych jest kosztowne i czasochłonne.

Poszukiwane są więc szybsze i tańsze metody ilościowej oceny stateczności zbczyc. Jedną z takich metod jest wspomniana klasyfikacja KZF. Ustalenie klasy KZF zbczyc wymaga określenia wybranych parametrów klasyfikacyjnych, którym są przyporządkowane współczynniki wagowe, zależne od wpływu każdego z nich na stateczność. Brak jednak informacji dotyczących stosowania tej klasyfikacji i jej praktycznej weryfikacji.

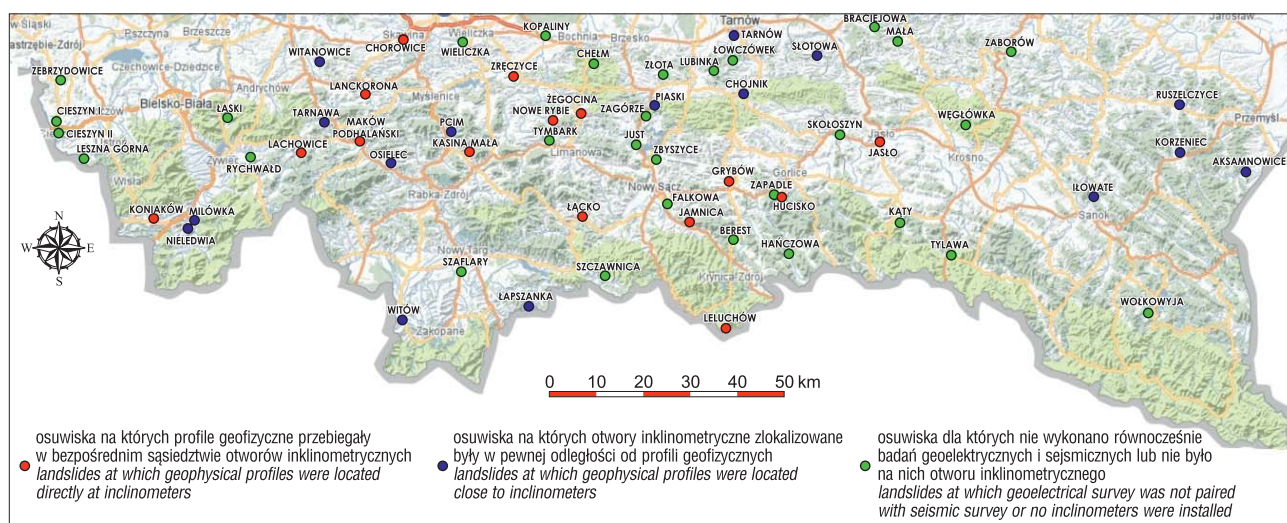
Szybką metodą oceny stateczności zbczyc, powszechnie stosowaną na świecie, szczególnie wzdłuż tras komunikacyjnych, jest klasyfikacja SMR (*Slope Mass Rating*), zaproponowana przez Romanę (1985, 2003), bazująca na klasyfikacji RMR (*Rock Mass Rating*) Bieniawskiego (1989). Liczba klasyfikacyjna RMR jest syntetycznym wskaźnikiem określającym właściwości mechaniczne ośrodka. Klasyfikacja SMR uzależnia warunki stateczności zbczyc od wytrzymałości materiału skalnego, opisanej klasą RMR, oraz od relacji między kierunkiem działania sił zsuwających i kierunkiem zsuwu, co uwzględnia się poprzez wprowadzenie tzw. współczynników korygujących Romany:

F_1 – współczynnik zależny od relacji rozciągłości zbczyc i powierzchni poślizgu;

F_2 – współczynnik zależny od kąta upadu powierzchni poślizgu;

F_3 – współczynnik zależny od relacji upadów zbczyc i powierzchni poślizgu;

F_4 – współczynnik zależny od sposobu przemodelowania i erozji zbczyc.



Ryc. 1. Mapa Karpat fliszowych z lokalizacją osuwisk objętych monitoringiem w ramach programu SOPO

Fig. 1. The map of Flysch Carpathians with the location of landslides registered by SOPO project

Tab. 1. Klasy stateczności zbczyc osuwiskowych
Table 1. Slope stability classes

Klasa stateczności zbczyc <i>Slope stability Class</i>	V	IV	III	II	I
Wartość SMR <i>SMR value</i>	0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Opis masywu <i>Rock mass description</i>	bardzo zły <i>very bad</i>	zły <i>bad</i>	normalny <i>normal</i>	dobry <i>good</i>	bardzo dobry <i>very good</i>
Stabilność zbczyc <i>Slope stability</i>	bardzo niestabilne <i>completely unstable</i>	niestabilne <i>unstable</i>	częściowo stabilne <i>partly stable</i>	stabilne <i>stable</i>	bardzo stabilne <i>completely stable</i>
Powierzchnie poślizgu <i>Slip surface</i>	duże i płaskie <i>big planar surfaces</i>	płaskie lub klinowe <i>planar or wedge</i>	pojed. płaskie i klinowe <i>single planar or wedge</i>	oddzielne pow. bloków <i>separate blocks</i>	brak pow. poślizgu <i>no slide surface</i>
Prawdopodobieństwo zsuwu <i>Slide probability</i>	0,9	0,6	0,4	0,2	0

Wartości liczbowe współczynników korygujących zostały określone empirycznie przez Romanę (1985, 2003) i uściślone przez Thomasa i in. (2007), na podstawie obserwacji dużej liczby osuwisk o zróżnicowanej geometrii i geologii.

W klasyfikacji SMR wydzielono 5 klas stateczności zboczy (tab. 1). Podział ten może być stosowany do szybkiej, ilościowej oceny stateczności zboczy fliszowych, przy czym do określenia wytrzymałości materiału skalnego zalecane jest stosowanie Geofizycznej Klasyfikacji Fliszu (KFG; Bestyński, 1997, 1999). Klasyfikację KFG opracowano na podstawie kompleksowych badań geofizycznych i geotechnicznych wykonanych na obszarze Karpat fliszowych na potrzeby budownictwa hydrotechnicznego. W klasyfikacji tej przyporządkowanie klasy geotechnicznej masywu uzależniono od wartości dwóch parametrów geofizycznych, tj. prędkości rozchodzenia się podłużnych fal sejsmicznych V_p [m/s] i oporności elektrycznej ρ [Ω m] ośrodka skalnego. Podział został skorelowany z klasyfikacją RMR tak, że liczba klasyfikacyjna KFG jest równa liczbie RMR.

Zakładając, że wprowadzone przez Romanę wartości współczynników korygujących są właściwe także dla fliszu, klasyfikację SMR z wykorzystaniem klasy KFG można by było wykorzystać do oceny stateczności zboczy fliszowych. Wyniki badań 60 karpaccich zboczy osuwiskowych, wykonane w ramach projektu SOPO, dostarczyły bogatego materiału pomiarowego i obserwacyjnego, umożliwiające sprawdzenie tego założenia. W większości są to osuwiska aktywne, o znanej geometrii, rozpoznanych warunkach geologicznych i powierzchni poślizgu. W wyniku kartowania geologicznego w otworach wiertniczych stwierdzano zwykle kilka powierzchni poślizgu. Wyniki pomiarów inklinometrycznych przemieszczeń wgłębnych wskazują, że zsuw występuje zwykle wzdłuż jednej z nich. Powierzchnia ta odpowiada najczęściej granicy refrakcyjnej związanej ze stropem litego podłoża skalnego. Aktywność osuwiskowa badanych zboczy jest czynnikiem korzystnym, ze względu na możliwość oceny, czy wartości liczbowe współczynników korygujących podane przez Romanę można zastosować do zboczy fliszowych. Jeżeli tak jest, liczba klasyfikacyjna KFG aktywnego zbocza fliszowego, po jej skorygowaniu współczynnikami F_1 , F_2 , F_3 i F_4 , powinna dać wartość SMR mniejszą od 20, charakteryzującą bardzo niestabilne zbocza klasy V, o prawdopodobieństwie wystąpienia zsuwu równym 90%. Wartość SMR większa od 20 będzie oznaczała, że w odniesieniu do zboczy fliszowych istnieje konieczność wprowadzenia dodatkowych współczynników korygujących, uwzględniających specyfikę fliszu (np. litologia, orientacja warstw, stopień zaangażowania tektonicznego), aby po ich wprowadzeniu uzyskać wartość SMR < 20.

Na podstawie badań 15 czynnych osuwisk można było porównać rzeczywistą aktywność zbocza z prognozą aktywności określoną na podstawie klasyfikacji SMR z wykorzystaniem klasy geotechnicznej KFG (tab. 2), ponieważ otwory inklinometryczne były na nich usytuowane w bezpośrednim sąsiedztwie profilów geofizycznych (ryc. 1).

Badane osuwiska, podobnie jak zdecydowana większość karpaccich osuwisk strukturalno-zwierzelinowych, są osuwiskami rozległymi, o długości i szerokości liczonej w setkach metrów i powierzchni poślizgu położonej najczęściej na głębokości od kilku do kilkunastu metrów. W skali całego zbocza osuwiskowego uśrednione powierzchnie poślizgu są płaskie i w przybliżeniu równo-

ległe do powierzchni terenu. W przybliżeniu równoległe są też linie rozciągłości zbocza i powierzchni poślizgu. Stwierdzenie to jest słuszne dla całego, uśrednionego zbocza osuwiskowego. Lokalnie zarówno powierzchnia terenu, jak i powierzchnia poślizgu są w mniejszym lub większym stopniu pofałdowane. Wartości współczynników korygujących obliczono dla uśrednionych dla całego zbocza kątów upadu i rozciągłości powierzchni terenu oraz powierzchni poślizgu. Określona na ich podstawie wartość klasy stateczności SMR jest więc wartością średnią dla całego zbocza. W przypadku zmienności wspomnianych kątów oraz wartości klasy KFG zmienna będzie również klasa stateczności SMR w obrębie zbocza.

Wartości współczynników korygujących F_1 , F_2 i F_3 określono na podstawie wzorów podanych przez Thomasa i in. (2007):

$$F_1 = 0,64 - 0,006 \arctg [0,1(|\alpha_j - \alpha_s| - 17)]$$

$$F_2 = 0,56 + 0,0051 \arctg (0,17\beta_j - 5)$$

$$F_3 = -30 + 0,33 \arctg (\beta_j - \beta_s)$$

gdzie:

α_j – rozciągłość powierzchni poślizgu,

α_s – rozciągłość zbocza,

β_j – upad powierzchni poślizgu,

β_s – upad zbocza.

Dla powierzchni poślizgu równoległej do powierzchni zbocza: $\alpha_j = \alpha_s$ i $\beta_j = \beta_s$. Po uwzględnieniu wpływu na stateczność analizowanych zboczy ich przemodelowania i erozji przyjęto, że wartość współczynnika F_4 wynosi „0”. Wartość klasy KFG dla zboczy została określona na podstawie wzoru:

$$KFG = 11,8 - 0,0028\rho + 0,0038V_p + 0,000033V_p \times \rho$$

gdzie:

V_p [m/s] – prędkość podłużnych fal sejsmicznych,

ρ [Ω m] – oporność elektryczna,

a wartość liczby klasyfikacyjnej SMR określono na podstawie wzoru:

$$SMR = KFG + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

W tabeli 2 zestawiono 15 osuwisk, na których w bezpośrednim sąsiedztwie otworów inklinometrycznych wykonano profile geofizyczne, dzięki czemu możliwe było określenie klasy SMR i porównanie rzeczywistej aktywności zsuwu z prognozowaną na podstawie klasy SMR. Pomiary inklinometryczne prowadzono na osuwiskach w latach 2010–2016. Procentowy udział piaskowców w kompleksach fliszowych określono na podstawie wyników pomiarów elektrooporowych.

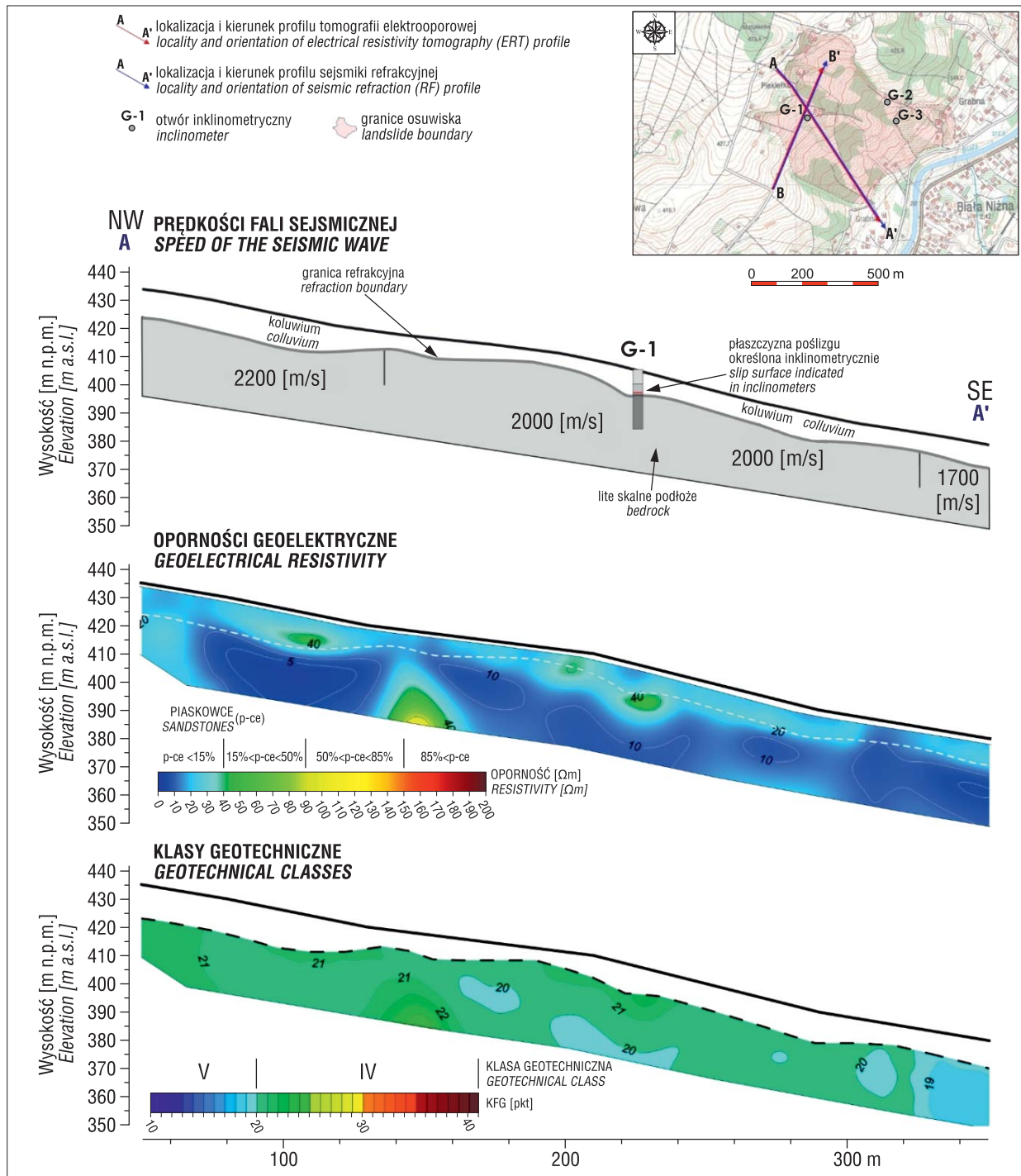
Wyniki obliczeń wskazują (tab. 2), że zaproponowane przez Romanę (1985, 2003) i zmodyfikowane przez Thomasa (2007) współczynniki korygujące umożliwiają poprawną ocenę stateczności zboczy zbudowanych z fliszu łupkowego. Dla wszystkich punktów pomiarowych zlokalizowanych na tych 15 aktywnych osuwiskach karpaccich, otrzymano wartości liczb klasyfikacyjnych SMR mniejsze od 20, co wskazuje na V klasę stateczności – o prawdopodobieństwie zsuwu większym niż 90%.

Tab. 2. Osuwiska z określoną klasą SMR stateczności zboczy
Table 2. Landslides with a specific SMR stability class

Osuwisko <i>Landslide</i>	Litologia/ <i>Lithology</i> Tektonika/ <i>Tectonics</i>	Typ zsuwu <i>Slide type and</i> Przyczyna <i>Cause</i>	Zbocze osuwiskowe <i>Landslide slope</i>		Klasa KFG <i>KFG</i> class	Granica refrakcji <i>Refraction</i> boundary [m]	Współcz. korygujące <i>Correction</i> coefficients			Klasa SMR <i>SMR class</i>
			upad / <i>dip</i> [°]				F1	F2	F3	
			głęb. pow. pośl. / <i>slide surface</i> [m]				F1			
			zsuw / <i>slide size</i> [mm]				F1			
Jamnica	łupki, piaskowce (25%) <i>shale, sandstone (25%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	konsekwentny <i>consequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	20		25,3	10,0	1,16			15,9
			10,0				0,27			
			80				-30			
Lachowice	łupki, piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (10%)</i> strefa przyskokowa <i>fault zone</i>	konsekwentny <i>consequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	14		25,2	12,5	1,16			17,9
			13,5				0,21			
			100				-30			
Kasinka Mała	łupki, piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (10%)</i> niezaburzona tektonika <i>undisturbed tectonics</i>	konsekwentny <i>consequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	17		20,6	12,0	1,16			12,6
			11,5				0,23			
			zerwanie rury / <i>tube break</i>				-30			
Łącko	łupki, piaskowce (15%) <i>shale, sandstone (15%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	insekwentny <i>insequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	13		23,1	12,0	1,16			16,1
			11,5				0,20			
			125				-30			
Żegocina	łupki, piaskowce (35%) <i>shale, sandstone (35%)</i> strefa przyskokowa <i>fault zone</i>	insekwentny <i>insequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	20		28,5	13,0	1,16			19,1
			11,0				0,27			
			22				-30			
Maków Podhalański	łupki, piaskowce (30%) <i>shale, sandstone (30%)</i> niezaburzona tektonika <i>undisturbed tectonics</i>	insekwentny <i>insequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	12		23,6	14,0	1,16			16,6
			16,5				0,20			
			19				-30			
Koniaków	łupki, piaskowce (30%) <i>shale, sandstone (10%)</i> nasunięcie, str. przyskok. <i>folding zone, overlapping</i>	subsekwentny <i>subsequent</i> infiltracja <i>infiltration</i>	6		24,4	10,5	1,16			18,5
			11,0				0,17			
			72				-30			
Szymbark- Huciska	łupki, piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (10%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	subsekwentny <i>subsequent</i> erozja <i>erosion</i>	7		19,8	11,0	1,16			13,5
			14,0				0,18			
			55				-30			
Chorowice	łupki piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (10%)</i> nasunięcie, fałdowe <i>folding zone, overlapping</i>	subsekwentny <i>subsequent</i> erozja <i>erosion</i>	6		20,5	9,5	1,16			14,6
			13,5				0,17			
			76				-30			
Grybów	łupki piaskowce (15%) <i>shale, sandstone (15%)</i> nasunięcie, zab. fałdowe <i>overlapping, folding zone</i>	złożony <i>complicated</i> infiltracja <i>infiltration</i>	10		21,3	8,0	1,16			14,7
			7,5				0,19			
			78				-30			
Jasło	łupki, piaskowce (20%) <i>shale, sandstone (30%)</i> niezaburzona tektonika <i>undisturbed tectonics</i>	złożony <i>complicated</i> infiltracja <i>infiltration</i>	9		23,0	10,0	1,16			16,7
			11,5				0,18			
			17				-30			
Lanckorona	łupki piaskowce (15%) <i>shale, sandstone (15%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	złożony <i>complicated</i> infiltracja <i>infiltration</i>	8		22,7	15,0	1,16			16,4
			12,0				0,18			
			12				-30			
Nowe Rybie Folwark	łupki, piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (10%)</i> nasunięcie, strefa przyskok. <i>overlapping, fault zone</i>	złożony <i>complicated</i> infiltracja <i>infiltration</i>	10		21,2	5,0	1,16			14,6
			4,5				0,19			
			136				-30			
Leluchów	łupki piaskowce (35%) <i>shale, sandstone (35%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	złożony <i>complicated</i> obciążenie <i>loading</i>	18		25,1	10,0	1,16			16,7
			9,5				0,24			
			zerwanie rury / <i>tube break</i>				-30			
Zręczyce	łupki piaskowce (10%) <i>shale, sandstone (15%)</i> zaburzenia fałdowe <i>folding zone</i>	złożony <i>complicated</i> infiltracja <i>infiltration</i>	7		19,6	3,5	1,16			13,3
			4,0				0,18			
			7				-30			

Tab. 3. Osuwiska z określoną klasą geotechniczną KFG zboczy
Table 3. Landslides with a specific KFG geotechnical class

Osuwisko <i>Landslide</i>	Litologia i tektonika <i>Lithology and tectonics</i>	Typ zsuwu i przyczyna <i>Slide type and cause</i>	Zbocze osuwiskowe pomiary geologiczne i inklinometryczne <i>Landslide slope, geological and inclinometers measurements</i>				Pomiary geofizyczne – zakres zmian <i>Geophys. measurements – changes range</i>		
			upad <i>dip</i> [°]	głęb. pow. poślizgu <i>slide surface</i> [m]	przemiesz- czenie [mm]	rodzaj ruchu <i>movement type</i>	Vp [km/s] ρ [Ω m]	granica refrakcji <i>refraction boundary</i> [m]	klasa KFG <i>KFG class</i>
Chojnik	łupki, piaskowce (5–75%) strefa przyuskokowa <i>shale, sandstone (5–75%) fault zone</i>	konsekwentny infiltracja erozja <i>consequent infiltration, erosion</i>	9	2,0; 12,5; 21,5	9–14	zsuw spływ <i>slide flow</i>	1,7–2,4 10–150	9–14	18,7–32,4
Łapszanka	łupki, piaskowce (25–95%) strefa przyuskokowa <i>shale, sandstone (25–95%) fault zone</i>	konsekwentny infiltracja, drgania <i>consequent infiltration, vibration</i>	9	7,0; 12,5; 21,5	11	spływ <i>flow</i>	2,5–4,0 50–200	6–24	23,3–52,8
Nieledwia	łupki, piaskowce (20–95%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (20–95%) folding zone</i>	konsekwentny infiltracja <i>consequent infiltration</i>	15	1,5; 2,5 7,0; 10,0	3–5	spływ <i>flow</i>	2,3–2,7 40–100	3–20	23,4–30,0
Korzeniec	łupki, piaskowce (5–15%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (5–15%) folding zone</i>	insekwentny infiltracja <i>insequent infiltration</i>	8	4,0; 21,0; 27,0	8	spływ <i>flow</i>	1,5–2,3 10–30	6–18	18,9–21,2
Pcim	łupki, piaskowce (5–50%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (5–50%) folding zone</i>	insekwentny infiltracja erozja <i>insequent infiltration, erosion</i>	14	4,0; 9,0; 15,5; 25,0	4–10	spływ <i>flow</i>	2,0–2,7 10–100	6–22	20,0–30,7
Piaski Drożków	łupki, piaskowce (25–65%) obszar nasunięcia <i>shale, sandstone (25–65%) overlapping zone</i>	insekwentny infiltracja erozja <i>insequent infiltration, erosion</i>	16	4,0; 6,0; 11,0; 22,0 28,0; 39,0	15–54	zsuw spływ <i>slide flow</i>	2,3–3,3 50–130	10–30	24,9–38,2
Tarnów	łupki, piaskowce (5–20%) brak tektoniki <i>shale, sandstone (5–20%) without tectonics</i>	obsekwentny infiltracja erozja <i>obsequent infiltration, erosion</i>	10	4,5; 7,0 19,0; 24,0	11–25	zsuw spływ <i>slide flow</i>	1,8–2,3 10–40	6–20	19,0–23,4
Miłówka	łupki, piaskowce (35–95%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (35–95%) folding zone</i>	obsekwentny infiltracja <i>obsequent infiltration</i>	9	12,5; 27,5	18	zsuw spływ <i>slide flow</i>	2,6–3,2 70–200	12–28	27–44,7
Witów	łupki, piaskowce (25–75%) brak tektoniki <i>shale, sandstone (25–75%) without tectonics</i>	subsekwentny infiltracja <i>subsequent infiltration</i>	8	6,0; 11,0; 16,5	7	spływ <i>flow</i>	2,4–3,2 50–150	7–14	24,0–39,5
Aksamanice	łupki, piaskowce (5–15%) obszar nasunięcia <i>shale, sandstone (5–15%) overlapping zone</i>	złożony infiltracja, drgania <i>complicated infiltration, vibration</i>	9	9,0; 15,0; 25,0	8–9	zsuw spływ <i>slide flow</i>	1,7–2,5 10–30	15–20	18,8–23,7
Tarnawa Dolna	łupki, piaskowce (15–75%) obszar nasunięcia <i>shale, sandstone (15–75%) folding zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	11	4,0; 9,0; 12,5; 19,0; 27,0	6–135	zsuw spływ <i>slide flow</i>	2,0–3,3 30–150	16–18	21,0–40,4
Witaniwice	łupki, piaskowce (5–10%) obszar nasunięcia <i>shale, sandstone (5–10%) folding zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	5	10,5; 26,0	40–110	zsuw <i>slide</i>	1,8–2,2 10–20	10–12	19,1–21,5
Międzybrodzie Hłowaty	łupki, piaskowce (5%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (5%) folding zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	8	6,0; 14,5	6	spływ <i>flow</i>	1,8–1,9 10	6–18	19,2–19,7
Jordanów –Osielec	łupki, piaskowce (25–95%) strefa przyuskokowa <i>shale, sandstone (25–95%) fault zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	13	9,0; 16,0; 19,0	40	zsuw spływ <i>slide flow</i>	2,3–3,6 50–200	6–19	24,2–48,9
Ruszelcyce	łupki, piaskowce (10%) zaburzenia fałdowe <i>shale, sandstone (10%) folding zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	5	9,0; 14,0; 20,0; 27,0	30–140	zsuw spływ <i>slide flow</i>	1,7–2,1 20	20	19,0–21,1
Słotawa	łupki, piaskowce (10%) obszar nasunięcia <i>shale, sandstone (10%) overlapping zone</i>	złożony infiltracja <i>complicated infiltration</i>	6	5,0; 17,0; 20,0; 26,0	40–60	zsuw <i>slide</i>	1,8–2,3 20	4–10	19,0–22,0

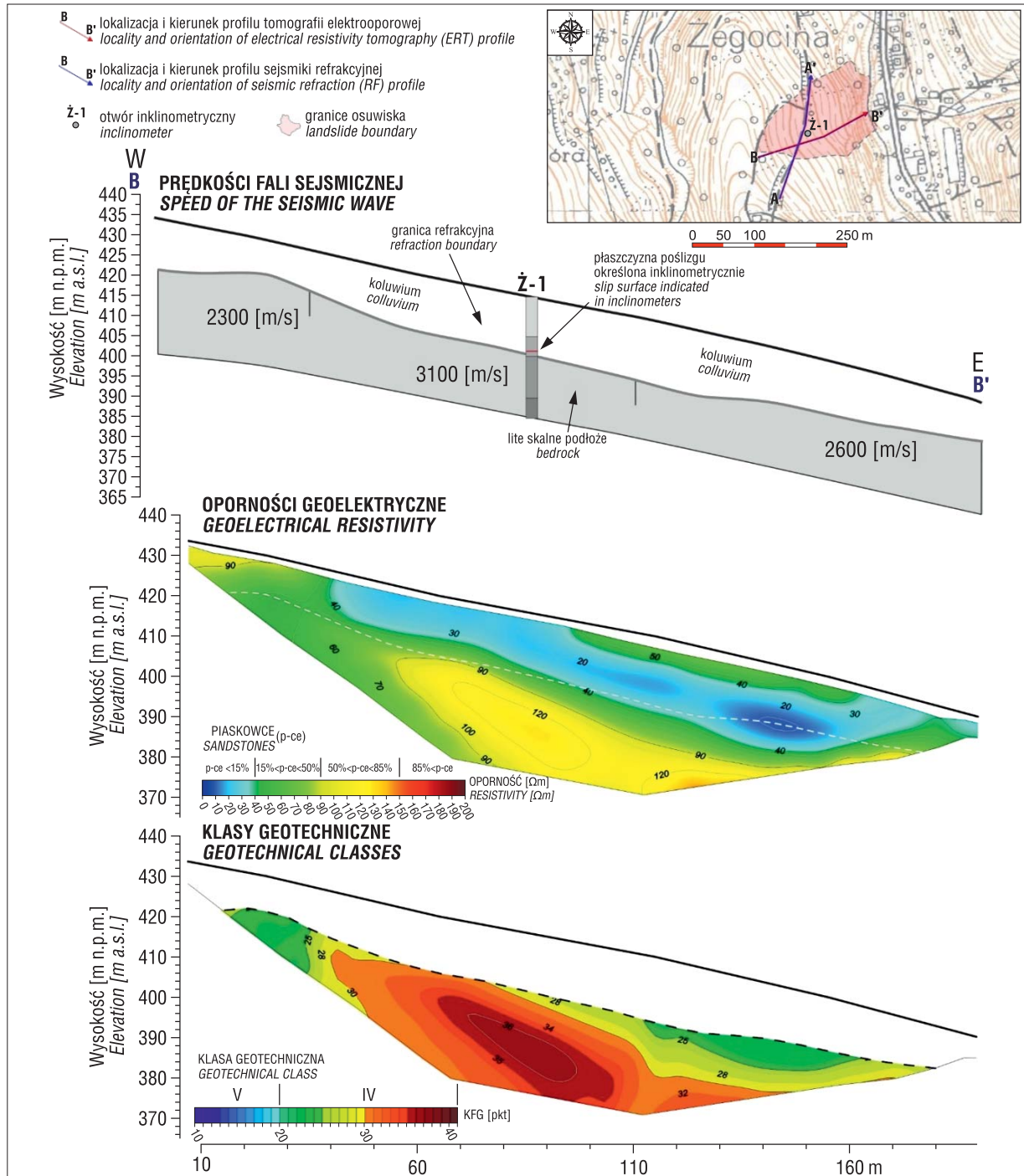


Ryc. 2. Zbocze o małym zróżnicowaniu podatności na zsuw. Osuwisko Grybów – rezultaty badań geofizycznych w profilu A–A'
 Fig. 2. The slope with a low variability of slide susceptibility. Grybów Landslide – geophysical tests results along A–A' profile

Wszystkie osuwiska zestawione w tabeli 2 uaktywniły się w osadach fliszowych, w których przeważały łupki, a zawartość piaskowców mieściła się w przedziale 10–35%. Ten fakt oraz rezultaty wcześniejszych badań i obserwacji wskazują, że zbocza fliszowe wykształcone w nieodpornym na wietrzenie fliszu łupkowym są szczególnie podatne na utratę stateczności. Wartość klasy geotechnicznej KFG i określonej na jej podstawie klasy stateczności SMR zmienia się w obrębie poszczególnych zboczy, co wskazuje na ich zmienną aktywność osuwiskową. Jest to zgodne z wynikami pomiarów i obserwacji terenowych. Nie stwierdzono natomiast związku aktywności zsuwu z typem osuwiska, co prawdopodobnie jest związane z wysokim

stopniem zaangażowania tektonicznego i zmiennością typu zsuwu w obrębie danego zbocza. Spośród 15 badanych osuwisk (tab. 2) dużą zmiennością aktywności charakteryzuje się np. osuwisko Lanckorona, gdzie KFG zmienia się w zakresie 20,0–38,6, a małą osuwisko Zręczycę, gdzie klasa KFG, zawierająca się w przedziale 19,6–20,5, jest właściwie niezmienna.

Prawdopodobieństwo zsuwu zbocza charakteryzującego się zmienną aktywnością jest funkcją prawdopodobieństwa zsuwu poszczególnych jego fragmentów. Informacja o zróżnicowaniu aktywności w obrębie zbocza, określona na podstawie klasyfikacji KFG, będzie również pomocna w określeniu danych wyjściowych do dokładnej



Ryc. 3. Zbocze o dużym zróżnicowaniu podatności na zsuw. Osuwisko Żegocina – rezultaty badań geofizycznych w profilu B–B'
Fig. 3. The slope with a large variability of slide susceptibility. Żegocina Landslide – geophysical tests results along B–B' profile

analizy obliczeniowej stateczności. Zróżnicowanie klasy KFG w obrębie zbocza umożliwia także zoptymalizowanie lokalizacji otworów badawczych odwiercanych w celu określenia właściwości skał w strefie poślizgu, a przebieg granicy refrakcyjnej umożliwia określenie położenia potencjalnej powierzchni poślizgu.

Rezultaty pomiarów wykonanych na pozostałych osuwiskach, na których nie można było porównać aktywności zboczy stwierdzonej inklinometrycznie z oszacowaną na podstawie klasy SMR, zestawiono w tabeli 3. Również te osuwiska wykazują bardzo duże zróżnicowanie aktywności. Największą zmienność klasy geotechnicznej KFG stwierdzono na osuwisku Łąpszanka, gdzie zmienia się ona w zakresie 25,3–52,8.

Przykładem zbocza o małym zróżnicowaniu KFG (19,3–22,2) jest osuwisko w Grybowie (ryc. 2), a zbocza o dużym zróżnicowaniu KFG (24,8–36,5) – osuwisko w Żegocinie (ryc. 3). Najmniejszą zmienność liczby KFG zanotowano na osuwisku Międzybrodzie Iłowaty, gdzie jest ona prawie niezmienna (19,2–19,7).

Wszystkie badane zbocza osuwiskowe charakteryzują się niewielkim nachyleniem, nie przekraczającym 20°, dość dużą zmiennością litologii, a także stopnia zaangażowania tektonicznego i w efekcie dużą zmiennością właściwości mechanicznych oraz podatności na ruchy masowe. Potwierdzeniem takich obserwacji jest zróżnicowanie klasy geotechnicznej KFG w obrębie poszczególnych osuwisk i związanej z nią klasy stateczności SMR.

Rezultaty pomiarów inklinometrycznych i skaningu laserowego, wykonanych w ramach programu SOPO, również wskazują na zmienną aktywność ruchu badanych zboczy, zarówno pozioma, jak i pionowa (Nescieruk i in., 2015). Główną powierzchnią poślizgu starych, ustabilizowanych zsuwów jest sejsmiczna granica refrakcyjna, potwierdzona skokowym wzrostem prędkości fal sejsmicznych, i odwzorowująca przebieg granicy oddzielającej nienaruszone skalne podłoże od koluwiów osuwiskowych. Kompleksową ocenę stateczności całego zbocza osuwiskowego i poszczególnych jego partii umożliwiłaby dostatecznie gęsta siatka pomiarów geofizycznych, sejsmicznych i elektrooporowych, umożliwiającą ustalenie przestrzennego zróżnicowania klasy geotechnicznej KFG, a na jej podstawie klasy stateczności SMR całego zbocza. Badania geofizyczne, umożliwiające dokładne określenie głębokości i przebiegu powierzchni poślizgu oraz wybór optymalnej lokalizacji badawczych otworów wiertniczych, są również pomocne w analizie obliczeniowej stateczności zboczy. Wyniki tych badań odgrywają ważną rolę w ocenie stateczności zboczy w rejonach posadowienia budowli hydrotechnicznych (Sieński, Śliwiński, 2015).

W ostatnich latach, po katastrofalnych opadach deszczu, liczne osuwiska uaktywniły się w bliskim sąsiedztwie budowli hydrotechnicznych, np. osuwisko w rejonie prawego przyczółka zapory w Czchowie oraz osuwisko na wschodnim zboczu góry Żar, w pobliżu zapory w Porąbce. Duże i bardzo stare osuwisko znajduje się w rejonie prawego przyczółka zapory Wisła Czarne. W czasie opróżniania zbiornika Tresna zostało uruchomione niewielkie osuwisko przy lewym przyczółku zapory. W czasie budowy zapory Świnna Poręba zostało uruchomione osuwisko nad wieżami wlotów sztolni hydrotechnicznych, które ustabilizowano poprzez kotwienie. Obecnie są wykonywane badania stateczności zbocza przylegającego do prawego skrzydła zapory w Solinie. Również w sąsiedztwie korpusu zapory Czorsztyn–Niedzica są dwa osuwiska.

Osuwiska zagrażające budowlom hydrotechnicznym mogą spowodować trudną do oceny i naprawienia katastrofę. Metoda SMR, umożliwiająca szybkie rozpoznanie aktywności osuwiskowej zboczy fliszowych, może być wykorzystana do oceny podatności na ruchy masowe zboczy w rejonach posadowienia budowli hydrotechnicznych na obszarze Karpat fliszowych.

PODSUMOWANIE

Badania sejsmiczne i elektrooporowe zboczy osuwiskowych dostarczają danych na temat przebiegu potencjalnej powierzchni poślizgu i zróżnicowania właściwości geotechnicznych materiału skalnego na zboczu, są to informacje pomocne do optymalnej lokalizacji otworów badawczych i wykonania analiz obliczeniowych stateczności zbocza. Wyniki badań geologicznych i geofizycznych wykonanych w ramach programu SOPO posłużyły do przeprowadzenia analizy możliwości wykorzystania klasyfikacji SMR do szybkiej ilościowej oceny stateczności karpaccich zboczy osuwiskowych. Wykazano, że klasyfikacja stateczności zboczy SMR w połączeniu z klasyfikacją geotechniczną fliszu KFG mogą być bez korekt wykorzystywane do szybkiej ilościowej oceny stateczności zboczy osuwiskowych wykształconych we fliszu łupkowym. Można przypuszczać, że klasyfikacje te mogą być

wykorzystywane również do oceny stateczności fliszowych zboczy piaskowcowo-lupkowych i piaskowcowych. Jednak trzeba to potwierdzić, wykonując na tego typu zboczach także same badania geofizyczne i geologiczne, jakie wykonano w ramach programu SOPO.

Fliszowe zbocza osuwiskowe, cechujące się dużą zmiennością wykształcenia litologicznego i dużym stopniem zaangażowania tektonicznego, charakteryzują się również zmienną podatnością na ruchy masowe. Badania sejsmiczne i elektrooporowe, uzupełnione pomiarami geometrii zbocza, umożliwiają określenie na podstawie klasyfikacji KFG i SMR zróżnicowania podatności zboczy na ruchy masowe.

Autorzy dziękują za recenzję artykułu Pani Profesor Joannie Pinińskiej i Panu Profesorowi Lesławowi Zabuskemu.

LITERATURA

- BESTYŃSKI Z., TROJAN J. 1975 – Metody geofizyczne w badaniach stateczności zboczy skalnych „Badanie i Prognozowanie Osuwisk na Zboczach Zbiorników Wodnych we Fliszu Karpackim”. Mat. Badaw. IMGW, Ser. Spec., 4: 155–170.
- BESTYŃSKI Z. 1992 – Dokumentacja badań sejsmicznych osuwisk w strefie brzegowej zbiornika Czorsztyn–Niedzica, Geo-Refleks, Warszawa.
- BESTYŃSKI Z. 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpacciego na podstawie badań geofizycznych. Pr. dokt., Arch. AGH, Kraków.
- BESTYŃSKI Z., THIEL K. 1999 – Flysh geotechnical properties by the Geophysical Classification Index KFG. 9th International Congress on Rock Mechanics ISRM Paris, 2: 1339–1346.
- BESTYŃSKI Z. 2000 – Dokumentacja badań sejsmicznych osuwisk w rejonie czaszy zbiornika Krempana. Geo-Refleks, Warszawa.
- BESTYŃSKI Z., PACANOWSKI G. 2007 – Dokumentacja badań geofizycznych dla określenia stabilności osuwisk w rejonie zbiornika wodnego Świnna Poręba. PBG, Warszawa.
- BIENIAWSKI Z.T. 1989 – Engineering rock mass classification. John Wiley & Sons, New Yorks.
- BOBER L. 1985 – Mapa osuwiskowości polskich Karpat fliszowych, skala 1 : 200 000. Państw. Inst. Geol.
- BOBER L. 1990 – Monografia osuwisk karpaccich. Państw. Inst. Geol.
- BOBER L., ZABUSKI L. 1993 – Flysch slope classification from viewpoint of the landslide prediction. Proc. Int. Symp. on Geotechnical Eng. of Hard Soil-Soft Rock, Athens, Balkema, Rotterdam-Brookfield.
- CIŻYŃSKI J. 1983 – Opracowanie prognozy transformacji zboczy zbiorników Solina i Myczkowce. PR 7–04.08.08. Spr. przejściowe za 1983 r. IMGW, Warszawa.
- KLECZKOWSKI A. 1955 – Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geol., Warszawa.
- NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WARMUZ B., WOJCIECHOWSKI T., MICHALSKI A., DACKA J. 2015 – Dokumentacje geologiczne z prac monitoringowych wykonanych na 60 osuwiskach karpaccich w ramach programu SOPO. Państw. Inst. Geol.-PIB.
- ROMANA M. 1985 – New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Intern. Symposium Rock Mech. Excavation Min. Civil. Works ISRM. Mexico City: 59–68.
- ROMANA M., SERON J., MONTALAR E. 2003 – SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. Polytechnic University of Valencia, Spain: 1–4.
- SIEŃSKI E., ŚLIWIŃSKI P. (red.) 2015 – Wytyczne wykonywania badań i pomiarów ocen stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa budowli piętujących wodę. IMGW-PIB, Warszawa.
- SINGH B., GOEL R.K. 1999 – Rock Mass Classification – A Practical Approach in Civil Engineering, Elsevier, Oxford.
- THIEL K. (red.) 1989 – Właściwości fizykomechaniczne i modele maszyw skalnych Polskich Karpat fliszowych. IBW PAN, Bibl. Nauk. Hydrotechnika, Gdańsk, 19: 226.
- TOMAS R., DELGADO J., SERON J. 2007 – Visual sensibility analysis of Slope Mass Rating (SMR) correction parameters using continuous functions. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics: 729–732.
- TROJAN J. 1978 – Opracowanie i metodyka stosowania aparatur geofizycznych do pomiarów kontrolnych budowli wodnych. PR 7.03.02.04. Spr. przejściowe za 1978 r. IMGW, Warszawa.
- WÓJCIK A., WOJCIECHOWSKI T. 2016 – Osuwiska jako jeden z ważnych elementów zagrożeń geologicznych w Polsce. Prz. Geol., 64: 701–709.
- ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L. 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat Polskich. Geol. Model. Obl. Statecz. IBW PAN, Gdańsk: 171.