

AGNIESZKA STOPKOWICZ

MAREK CAŁA

*Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie*

## **Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych**

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizy stateczności zboczy, zlokalizowanych we fliszu karpackim, przeprowadzone w oparciu o metody równowagi granicznej oraz metody numeryczne. Ponadto dokonano konfrontacji wyników obliczeń z obserwacjami rzeczywistych procesów osuwiskowych. Do obliczeń metodami równowagi granicznej (LEM) zastosowano program SLOPE/W. Obliczenia numeryczne wykonano z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR). Pozwala ona, w odróżnieniu od klasycznej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR), na kompletną analizę stateczności zbocza o dowolnej budowie geologicznej. Obliczenia te zostały przeprowadzone przy pomocy programu FLAC v 4.0 opartego o Metodę Różnic Skończonych.

### **1. Wprowadzenie**

Zjawiska osuwiskowe zachodzą i zachodzą z różną intensywnością wywierając duży wpływ na współczesną rzeźbę powierzchni Ziemi. Ogólnie biorąc, osuwiska jako procesy denudacyjne zmierzają do wytworzenia prawie poziomej, zrównanej powierzchni, którą Davis nazywa peneploną [4]. W warunkach naturalnych, bez ingerencji człowieka, zjawiska te mają charakter długotrwałych procesów uaktywniających się w zależności od zmian naturalnych czynników zewnętrznych, takich jak nasycenie ośrodka wodą, wylesienie terenu, silna degradacja czy erozja stoków. Działalność człowieka może być przyczyną utraty stateczności zboczy, co wiąże się z ruchem olbrzymich mas gruntu i skał oraz może doprowadzić do poważnych i nieobliczalnych w skutkach katastrof. Szacuje się, że zjawiska osuwiskowe są przyczyną 25-50% naturalnych katastrof na świecie [17].

W Polsce regionem szczególnie predysponowanym do powstawania osuwisk są Karpaty zewnętrzne (fliszowe), które znamionuje młoda rzeźba typu górskiego. Wiąże się z nią duża aktywność procesów geodynamicznych [11]. Na terenie Karpat fliszowych, stanowiącym 6 % powierzchni kraju, występuje aż 95 % osuwisk w Polsce (średnio 1 osuwisko na km<sup>2</sup>). Ich liczba sięga blisko 20 tysięcy, a po stronie słowackiej i czeskiej jest ich znacznie więcej. Po katastrofalnych opadach atmosferycznych w latach 1997-2002 na niespotykaną skalę uaktywniły się stare, bądź powstały nowe osuwiska, powodując ogromne szkody gospodarcze. Szacuje się, że straty spowodowane osuwiskami na przełomie 2000/2001 tylko w województwie małopolskim wyniosły blisko 183 mln zł, w tym 86 mln zł w infrastrukturze drogowej i mostowej (informacje ze strony rządu RP). Poszkodowanych zostało 1671 rodzin, a ich straty określono na 46 mln zł. Choć szkody ekonomiczne są możliwe do oszacowania, to strat społecznych odniesionych w wyniku tych zjawisk nikt nie jest w stanie wycenić.

Występujące wciąż nowe osuwiska oraz coraz poważniejsze problemy ze statecznością zboczy w górnictwie odkrywkowym wymuszają konieczność lepszego poznania mechanizmu i charakteru procesów i zjawisk zachodzących w zboczach. Ważną rolę dla zrozumienia mechanizmu osuwisk oraz ich prognozowania odgrywa analiza stateczności, pozwalająca na przedstawienie ilościowego opisu stanu stateczności zbocza. Do analizy stosuje się wiele znanych i powszechnie przyjętych metod obliczeniowych. Wyniki analiz mogą być jednak różne w zależności od przyjętej metody, co wynika przede wszystkim z niezgodności warunków rzeczywistych z przyjętymi, z konieczności wyidealizowanymi, założeniami metod obliczeniowych. Bezkrytyczne stosowanie przypadkowo wybranej metody, bez znajomości stosowanych założeń, uproszczeń i ograniczeń, może prowadzić do poważnych błędów w ocenie stateczności. Dlatego też celową wydaje się być analiza porównawcza wyników otrzymywanych z poszczególnych metod obliczeniowych oraz ich weryfikacja z rzeczywistością tak, by dążyć do jak najdokładniejszego odtworzenia mechanizmu i przebiegu procesów osuwiskowych.

## **2. Krótka charakterystyka fliszu karpackiego**

Flisz karpacki, w dużym uogólnieniu, zbudowany jest z serii naprzemianległe ułożonych warstw piaskowców i łupków a także – w znacznie mniejszych ilościach - mułowców, zlepieńców, ilowców, margli i wapieni. Uwarstwienie frakcjonalne fliszu charakteryzuje się nagromadzeniem grubego materiału skalnego w obrębie spągu warstwy i stopniowym przechodzeniem w materiał coraz drobniejszy, aż do osadów ilastych w obrębie jej stropu. Masyw Karpat charakteryzuje się również bardzo skomplikowaną tektoniką. Licznie występujące uskoki, o różnych wielkościach przesunięć, dzielą masyw na bloki. Strefy silnych zaburzeń tektonicznych związane są ze znacznym naruszeniem skał w rejonach uskokowych (strzaskania, spękania) jak i z wyraźnymi sfałdowaniami.

Powstawaniu osuwisk sprzyja również duża dynamika rzeźby wynikająca ze sporych wysokości względnych zboczy oraz dużych nachyleń stoków dolin rzecznych. Przeprowadzona analiza palinologiczna i datowania radiowęglem  $C^{16}$  wskazują, że na terenie Karpat zjawiska osuwiskowe zachodziły już w epoce plejstoceniowej [5, 10]. Zjawiska te często podlegały odmłodzeniom również w czasach współczesnych [5].

Podatność na występowanie osuwisk w Karpatach często łączona jest ze specyfiką warunków meteorologiczno-hydrologicznych [5, 10, 18], takich jak gwałtowne opady deszczu czy roztopy wiosenne. Szczególnie niebezpieczne są długie, wilgotne i chłodne okresy, trwające przez kilka miesięcy. W okresach tych woda jest magazynowana w pokrywach zwietrzelinowych i w podłożu skalnym, co przyczynia się do powstawania głębokich osuwisk strukturalnych [15].

## **3. Metodyka obliczeń**

Dla analizy stateczności wybranych osuwisk Karpat fliszowych zastosowano zmodyfikowaną metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR) [1,2,3].

Obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem programu Metody Różnic Skończonych FLAC [6]. Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) opiera się o założenie, że ruch zbocza wywołują procesy powodujące zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie i/lub wzrost naprężenia w analizowanym ośrodku [18]. Po raz pierwszy zależność

tą zastosowali w roku 1975 Zienkiewicz, Humpheson i Lewis (1975), a w dalszej kolejności Naylor (1982), Donald i Giam (1988) i inni. Klasyczna metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) wskazuje przebieg powierzchni poślizgu w miejscu, w którym najwcześniej osiągnięty zostaje stan równowagi naprężeń stycznych i wytrzymałości na ścinanie. Zmodyfikowana metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR) umożliwia wyznaczenie kolejnych etapów zniszczenia zbocza oraz wyznaczenie dla nich powierzchni poślizgu, a także pośrednio na określenie wskaźnika stateczności. Jest to tym bardziej ważne, iż wiele badań i obserwacji wskazuje właśnie na taki, postępujący przebieg procesów osuwiskowych [8]. W obliczeniach zakłada się, że górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym spełniającym zmodyfikowany warunek plastyczności Coulomba-Mohra.

Stopniowe zmniejszanie/zwiększanie parametrów pozwala na wyznaczenie kolejnych miejsc utraty stateczności oraz na śledzenie przebiegu procesów zniszczenia. Powierzchnia poślizgu jest zatem generowana samoistnie przez program obliczeniowy w miejscu, gdzie zostaje osiągnięty stan równowagi granicznej i nie ma konieczności (jak w przypadku metod LEM) przyjmowania założeń co do lokalizacji i kształtu powierzchni poślizgu. O utracie stateczności informują wartości indykatorów utraty stateczności, za które uważa się wektory prędkości oraz przemieszczeń poszczególnych węzłów, rozkład odkształceń stycznych i wskaźników uplastycznienia.

Dla porównania, wykonano obliczenia metodami równowagi granicznej (LEM), przy zastosowaniu programu SLOPE/W. Metody równowagi granicznej najogólniej polegają na poszukiwaniu, dla wyznaczanych metodą prób i błędów powierzchni poślizgu, najniższych wartości wskaźników stateczności. W przeprowadzonych obliczeniach wykorzystano znaną i wielokrotnie zweryfikowaną metodę Bishopa.

#### **4. Osuwisko Żurawnica**

Osuwisko Żurawnica zlokalizowane jest w gminie Stryszawa, czyli w regionie, w którym licznie występują zjawiska osuwiskowe. Powierzchnie poślizgu są zlokalizowane płytko, zazwyczaj w pokrywach zwietrzelinowych, rzadziej obejmują swym zasięgiem skały fliszowe. Występowanie w tym regionie osuwisk najczęściej jest ściśle powiązane z litologią, a te największe powstają na podłożu łupków pstrych lub wzdłuż przewarstwień łupkowych, jakie często występują w kompleksach piaskowcowych. Formy osuwiskowe, w tym także rozważane osuwisko, podlegały i wciąż podlegają wielokrotnym odmłodzeniom [7]. Najczęściej odpowiedzialne za inicjację ruchów osuwiskowych są warunki klimatyczne, zwłaszcza okresy deszczowe.

Model obliczeniowy zbocza (rys. 1) sporządzono na podstawie przekroju geologicznego. Wobec faktu, iż w rejonie osuwiska nie przeprowadzono głębokich wierceń i badań geotechnicznych, parametry zostały przyjęte z literatury [16]. Właściwości mechaniczne poszczególnych warstw oraz założenia przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu obliczeniowego

WYMIARY ANALIZOWANEGO MODELU ZBOCZA				
Długość 2450 [m]			Wysokość 540 [m]	
PARAMETRY GEOTECHNICZNE				
L.p.	Warstwa	Kąt tarcia wewn., $\varphi$ [°]	Spójność $c$ , [kPa]	Ciężar objętościowy, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1.	Piaskowce ciężkowickie	30	1000	25.0
2.	Łupki pstre	18	10	25.9
3.	Koluwia	20	16	20.0
4.	Piaski	37	0	20.0
5.	Piaskowce	30	1000	26.1
PRZYJĘTY MODEL OŚRODKA				
Metoda MSSR:			- model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	
Metoda LEM:			- model sztywno-plastyczny	
Poziom ZWG			średnio 40 cm poniżej powierzchni terenu	

#### 4.1. Wyniki analiz stateczności

W pierwszym etapie obliczeń dla MSSR stwierdzono utratę stateczności z wskaźnikiem stateczności  $FS_1=0.99$ , związaną z powierzchnią poślizgu zlokalizowaną (jak można było przypuszczać) w górnej, stromej części zbocza. Z szeregu obliczeń przeprowadzonych metodą Bishopa otrzymano najniższy wskaźnik stateczności wynoszący  $FS=1.139$ . Powierzchnia poślizgu dla tego wskaźnika jest podobnie zlokalizowana oraz ma kształt zbliżony do powierzchni poślizgu w metodzie MSSR, jednak jego wartość jest wyższa i wskazuje na stateczność zbocza w tym rejonie, co nie jest zgodne z obserwacjami. Dalsze obliczenia MSSR pozwoliły zlokalizować powierzchnię zniszczenia ze wskaźnikiem stateczności  $FS_2=1.28$ , która objęła swoim zasięgiem brzeg potoku przecinającego zbocze.

W górnej, stromej części zbocza metoda MSSR pozwoliła zaobserwować postępujący ruch osuwiskowy obejmujący swym zasięgiem coraz to większy obszar zbocza ( $FS_3=1.77$ ). Przy czym powierzchnia poślizgu zlokalizowana jest w obrębie słabych warstw koluwiów. Podobne wyniki uzyskano z metody Bishopa, dla której otrzymano powierzchnię poślizgu o podobnym przebiegu ze wskaźnikiem  $FS=1.70$ . W dalszych obliczeniach MSSR przy wskaźniku  $FS_4=1.78$ , a więc wyższym jedynie o 0.01 od uzyskanego w wcześniejszym etapie, pojawia się nowa powierzchnia poślizgu zlokalizowana w środkowej części zbocza. W wyniku połączenia się powierzchni poślizgu przy wartości  $FS_6=2.33$  powstaje w znacznej części zbocza zsuw koluwiów i wierzchniej części warstw skalnych. Dalszy proces powoduje, iż ruchem objęte zostają głębsze warstwy podłoża skalnego z  $FS_7=2.53$  i przy tej samej wartości wskaźnika ( $FS_8=2.53$ ) następuje zniszczenie i zsuw koluwiów w dolnej części zbocza. W miejscu tym obserwowano szczeliny osuwiskowe, które przedstawiono na rysunku 2. Podobną lokalizację powierzchni poślizgu wskazuje metoda Bishopa z  $FS=2.597$ . Przy wskaźniku  $FS_9=2.55$  dla MSSR i  $FS=3.487$  dla LEM otrzymano krytyczną powierzchnię poślizgu obejmującą całe zbocze. Wyniki obliczeń metodą Bishopa i MSSR zestawiono na rysunku 3.

#### 4.2. Dyskusja wyników

W przypadku zboczy o podłożu skalnym, ruchom osuwiskowym najczęściej podlegają warstwy zwietrzliny oraz gruntów. Ewentualny poślizg może nastąpić wzdłuż nieciągłości (spękań, szczelin) czy też wzdłuż przewarstwień słabszych skał. Mechanizm ten potwierdzają również wyniki przeprowadzonej analizy stateczności [12].

Pierwsze wyznaczone powierzchnie poślizgu bardzo dobrze korespondują ze sobą, zarówno co do kształtu jak i lokalizacji. Pojawiają się natomiast różnice wartości wskaźnika stateczności. Dla metody MSSR otrzymano  $FS_1=0.99$ , zatem analizowane zbocze jest niestateczne. Metoda Bishopa daje wskaźnik o wartości  $FS=1.139$  pozwalający zaklasyfikować zbocze jako stateczne, co jest niezgodne ze stanem rzeczywistym. Różnice w wynikach przynoszą także dalsze obliczenia. Powierzchnie poślizgu wyznaczone metodą Bishopa są znacznie głębsze, sięgają w głąb masywu skalnego przy równoczesnych wysokich wartościach wskaźnika stateczności, co wynika przed wszystkim z założeń samej metody obliczeniowej.

Obliczenia metodą MSSR pozwoliły na określenie kilku, kolejno po sobie występujących powierzchni poślizgu zgodnie z postulatem postępującego charakteru przebiegu zjawisk osuwiskowych. Na taki przebieg procesów osuwiskowych wskazują obserwacje terenu. W miejscu, w którym otrzymano z zastosowaniem MSSR, wskaźnik  $FS_8=2.53$  zlokalizowano występowanie szczelin osuwiskowych (rys. 2). Źródła historyczne podają informacje o procesach osuwiskowych występujących w dolnej części zbocza. Zbocze zostało przemodelowane w czasie powodzi latem 1972 roku [7]. Trafność lokalizacji miejsca zniszczenia podnosi wiarygodność i celowość stosowanej metodyki obliczeniowej, mimo iż ilościowo wyniki obliczeń mogą być obciążone błędem z powodu przyjęcia literaturowych własności poszczególnych warstw.

W kolejnych etapach redukcji wytrzymałości na ścinanie uzyskano krytyczne powierzchnie poślizgu, dla których otrzymany wskaźnik wynosi  $FS_9=2.55$ . Poślizg przebiega zgodnie z przewarstwieniami łupków pstrych, występujących w masywie piaskowcowym, co jest często spotykanym zjawiskiem dla takiego typu osuwisk.

## 5. Osuwisko Lipie

Osuwisko Lipie - zlokalizowane nad jeziorem Rożnowskim - stanowi fragment jego brzegu. Ruch osuwiskowy (rys. 4) spowodował między innymi zniszczenie drogi asfaltowej przebiegającej po zboczu. Podłoże zbudowane jest z mocnych skał, na których zalegają warstwy zwietrzliny skalnej oraz gliny deluwialne zaś powyżej koluwia osuwiskowe.

Model obliczeniowy sporządzono w oparciu o przekroje geologiczne. Poziom wody przyjęto według pomiarów wykonanych w otworach badawczych. Przyjęte właściwości ośrodka przedstawiono w tabeli 2, zaś schemat modelu obliczeniowego na rysunku 5. Podobnie jak w poprzednim przypadku, parametry geotechniczne poszczególnych warstw zostały przyjęte na podstawie pracy [16].

Tabela 2. Parametry modelu obliczeniowego

WYMIARY ANALIZOWANEGO MODELU ZBOCZA				
Długość 175 [m]			Wysokość 60 [m]	
PARAMETRY GEOTECHNICZNE				
L.p.	Warstwa	Kąt tarcia wewn., $\varphi$ [ $^{\circ}$ ]	Spójność $c$ , [kPa]	Ciężar objętościowy, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1.	Koluwia osuwiskowe	8	10	20.0
2.	Gliny deluwialne	16	20	19.5
3.	Zwietrzałe podłoże	18	24	21.0
4.	Podłoże skalne	47	50	22.0
PRZYJĘTY MODEL OŚRODKA				
Metoda MSSR:			- model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	
Metoda LEM:			- model sztywno-plastyczny	
Poziom ZWG			przyjęto wg pomiarów w otworach badawczych	

### 5.1. Wyniki analiz stateczności

Obliczenia pozwoliły wyznaczyć szereg powierzchni poślizgu. Wśród nich jako pierwszą z obliczeń MSSR otrzymano powierzchnię ze wskaźnikiem  $FS_1=0.57$ , a dalszej kolejności  $FS_2=0.84$ . Metoda Bishopa wygenerowała powierzchnie poślizgu ze wskaźnikami  $FS=0.626$  i  $FS=0.849$ . Wyznaczone powierzchnie poślizgu zlokalizowane są w stosunkowo stromo nachylonej, dolnej części zbocza. Obejmują one swym zasięgiem drogę, co jest zgodne z obserwacjami.

Kolejne obliczenia metodą Bishopa wskazały powierzchnie poślizgu dla  $FS=2.765$  oraz dla  $FS=2.990$ . Powierzchnie te przyjmują kształty kołowe, lecz dla warunków, jakie panują w maszywie zbocza - podłoże stanowią skały o wysokich parametrach wytrzymałościowych - taki przebieg jest mało prawdopodobny.

Na uwagę zasługuje powierzchnia poślizgu dla wskaźnika stateczności  $FS_2=0.84$  i  $FS=0.849$ . Ich kształt i lokalizacja najlepiej odpowiada rzeczywistemu zjawisku osuwiskowemu, które przedstawiono na zdjęciu fotograficznym (rys. 4). W następnych etapach obliczeń, zmniejszając parametry wytrzymałościowe ośrodka, wyznaczono kolejne fazy zniszczenia zbocza. Krytyczna powierzchnia poślizgu, dla której  $FS_7=1.78$ , przebiega po podłożu skalnym. Wyniki obliczeń metodą Bishopa i MSSR dla osuwiska Lipie zestawiono na rysunku 6.

### 5.2. Dyskusja wyników

Otrzymane wyniki, podobnie jak we wcześniejszym przypadku, wykazały zgodność lokalizacji powierzchni poślizgu o najniższym wskaźniku stateczności. Jednakże rzeczywistemu procesowi osuwiskowemu najdokładniej odpowiada wskaźnik stateczności  $FS_2=0.84$ .

Obliczenia metodą Bishopa zdają się być mało wiarygodne, zwłaszcza powierzchnie poślizgu o kształcie kołowym sięgające w głąb mocnych skał. Stąd płynie

wniosek, iż metoda ta jest mało przydatna dla analizy stateczności skalnych zboczy uwarstwionych, szczególnie, gdy budujące je warstwy mają zróżnicowane własności. Określenie warunków stateczności jest zdecydowanie dokładniejsze w przypadku stosowania metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. Powierzchnie poślizgu lokalizowane są w warstwach zalegających na podłożu skalnym. Krytyczna powierzchnia poślizgu, zgodnie z oczekiwaniami, przebiega na granicy podłoża skalnego i warstw skał słabszych, położonych powyżej nich.

## 6. Podsumowanie

W niniejszym artykule przeanalizowano stateczność dwóch zboczy osuwiskowych, przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR) oraz metody Bishopa. Metoda Bishopa jest szeroko stosowana i rozpowszechniona, zaś MSSR jest stosunkowo od niedawna stosowana do analiz stateczności skarp i zboczy. Dlatego konieczne jest przeprowadzenie weryfikacji przydatności tej metody do analiz stateczności i ocena wiarygodności symulacji zjawisk osuwiskowych z ich rzeczywistym przebiegiem.

Zbocze osuwiskowe Żurawnica powstało w obrębie fliszu karpackiego. W jego podłożu zalegają mocne piaskowce z przewarstwieniami łupkowymi. Na nich zalega warstwa zwietrzliny i zgodnie z oczekiwaniami, w pierwszym etapie obliczeń powierzchnie poślizgu powstały w słabych warstwach nadkładu. W toku dalszych obliczeń, w przypadku zastosowania metody Bishopa określono kilka innych powierzchni. Jednakże ich kołowy kształt, choć zgodny z założeniami metody obliczeniowej jest nieprawdopodobny dla analizowanego osuwiska. Znacznie przydatniejsze i bardziej wiarygodne okazały się wyniki uzyskane przy zastosowaniu procedury obniżania parametrów wytrzymałościowych. Pozwoliły one zlokalizować kilka miejsc utraty stateczności. Otrzymane wyniki znalazły potwierdzenie w publikacjach dotyczących analizowanego osuwiska [7].

Zbocze osuwiskowe Lipie, stanowiące fragment brzegu Jeziora Rożnowskiego, podobnie jak zbocze Żurawnica, reprezentuje typową dla fliszu budowę geologiczną. W podłożu zalegają mocne skały o wysokich parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych. Na nich zalegają warstwy słabsze (zwietrzelina skalna, gliny deluwialne i kołwia osuwiskowe). Obliczenia stateczności metodą Bishopa i MSSR w pierwszym etapie wykryły powierzchnie poślizgu o zbliżonej lokalizacji. Jednakże w toku dalszych obliczeń, w przypadku zastosowania metody Bishopa, uzyskano wyniki niezgodne z obserwowanymi ruchami rzeczywistymi. Porównanie wyników obliczeń MSSR z przejawami utraty stateczności, zaobserwowanymi na terenie osuwiska wypadło natomiast zadawalająco.

Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, iż metodyka obniżania własności parametrów wytrzymałościowych dała poprawne wyniki. Szczególnie dla zboczy o złożonej geometrii oraz niejednorodnej budowie, jak w przypadku osuwiska Żurawnica czy Lipie, gdzie metoda Bishopa, generująca kołową powierzchnię poślizgu, okazała się zawodna. Zmodyfikowana metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie pozwala na obserwację postępującego procesu zniszczenia. Należy to szczególnie podkreślić, bo właśnie na taki mechanizm rozwoju zjawisk osuwiskowych wskazują obserwacje i badania [13]. Potwierdzają to również wyniki przeprowadzonych obliczeń.

Reasumując, metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie pozwala na dobre odwzorowanie procesów osuwiskowych, co znalazło potwierdzenie w obydwu

analizowanych przypadkach. Zasadniczą zaletą metod numerycznych jest możliwość stosunkowo dokładnego symulowania rzeczywistych procesów osuwiskowych. Szereg zalet posiada również zastosowana do analizy stateczności metoda Bishopa. Należy do nich prostota i szybkość obliczeń. Jednakże dla zbczy o skomplikowanej budowie, gdzie poszczególne warstwy mają odmienne własności metoda ta bywa zawodna. W dużej mierze wynika to z samych jej założeń, a w szczególności, z konieczności przyjmowania a priori kształtu powierzchni poślizgu.

Dla porównania wyników obliczeń metodą MSSR świadomie wybrano metodę Bishopa. Jest ona jedną z najprostszych i najczęściej stosowanych metod analizy stateczności. Zastosowanie programu SLOPE/W umożliwiło określenie lokalizacji krytycznych powierzchni poślizgu na drodze poszukiwania minimalnej wartości wskaźnika stateczności spośród uzyskanych dla kilkudziesięciu tysięcy okręgów. Zdajemy sobie sprawę, że do zagadnień stateczności zbczy fliszowych należałoby raczej wykorzystać metody umożliwiające analizę innych niż kołowe powierzchni poślizgu (np. Morgenstern-Price'a czy też Sarney-Hoeka). Z reguły wymagają one jednakże chociaż fragmentarycznego sprecyzowania lokalizacji powierzchni poślizgu. Powyższy referat stanowi podsumowanie wstępnego etapu prac nad możliwościami zastosowania MSSR dla analizy stateczności zbczy fliszowych. W dalszej kolejności planuje się przeprowadzenie kolejnych serii obliczeń z zastosowaniem MSSR oraz innych metod LEM.

Artykuł powstał częściowo w ramach badań własnych finansowanych przez KBN – umowa nr 10.10.100.731 realizowana w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki.

## 7. Literatura

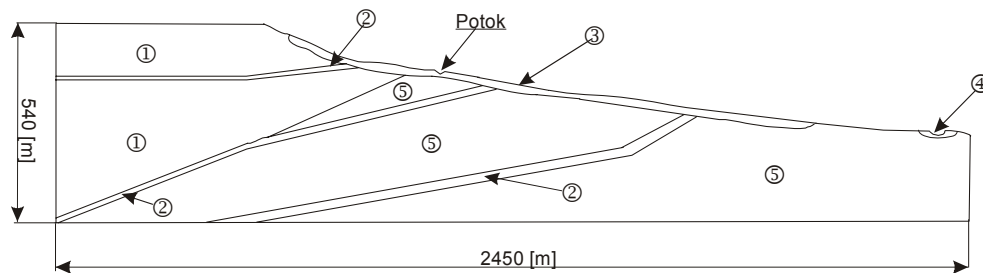
1. Cała M., Flisiak J. Analiza stateczności skarp i zbczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. Bukowina Tatrzańska. 2000. Str. 27-37.
2. Cała M., Flisiak J. Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. 2002. Str. 83-92.
3. Cała M., Flisiak J. Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (edited by Brummer, Andrieux, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers. 2003. Str. 99-102.
4. Davis W.M. The geographical cycle. Geogr. Journ. XIV. 1899.
5. Gil E., Gilot E., Kotarba A., Starkel., Szczepanek E. An Early Holocene landslide in the Niski Beskid and its significance for paleogeographical reconstructions. *Studia Geomorph. Carpatho-Balkanica* VIII. 1974.
6. Itasca Consulting Group. FLAC v. 4.0 & FLAC/Slope. Users Manual. 2002
7. Jakubská O.. Osuwiska w dolinie Tarnawki (NW część Beskidu Makowskiego). *Studia et Dissert. UŚ* 2. 1978. Str. 46-53.
8. Kleczkowski A. Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa. 1955
9. Książkiewicz M. Geologia dynamiczna Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa. 1979.
10. Margielewski. W. Late Glacial and Holocene climatic changes registered in landslide forms and their deposit in the Polish Flysch Carpathians. *Landslides*. (Edited by Rybar J., Stemberk J., Wagner P.). A.A. Balkema Publishers. Brookfield. 2003. Str. 399-404.
11. Sroczyńska A. Osuwiska karpacie – zagrożenie również dla dróg. *Drogownictwo* nr 2/97. 1997. Str. 62-66.



12. Stopkowicz A.. Analiza stateczności wybranych skarp w oparciu o badania polowe i laboratoryjne oraz obliczenia analityczne. Praca Dyplomowa. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki. WGiG AGH. Kraków. 2003.
13. Thiel K. Zarys metodyki badań i prognozowania osuwisk na zboczach zbiorników wodnych we fliszu karpackim. Materiały badawcze. Seria specjalna nr 4. 1975. Str. 202-219.
14. Thiel K., Zabuski L. The effect of atmospheric fall on the development of slide movements on flysch slopes. Superficial mass movements in mountains regions. 1<sup>st</sup> Polish-Italian Seminar, Szymbark. IMGW. Warszawa. 1979.
15. Thiel K (Praca Zbiorowa). Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. Wydawnictwo IBW PAN. Gdańsk. 1989.
16. Thiel K. Własności fizyko–mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych. Biblioteka Naukowa Hydrotechnika nr 19, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk. 1995.
17. Transportation Research Board (TRB) Special Report 247 – Landslides: Investigation and Mitigation. Washington D.C.: National Academy Press. 1996.
18. Zabuski I. Thiel K. Bober L. Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Wydawnictwo IBW PAN. Gdańsk. 1999.

## Analysis of Carpathian flysch slopes stability with numerical methods

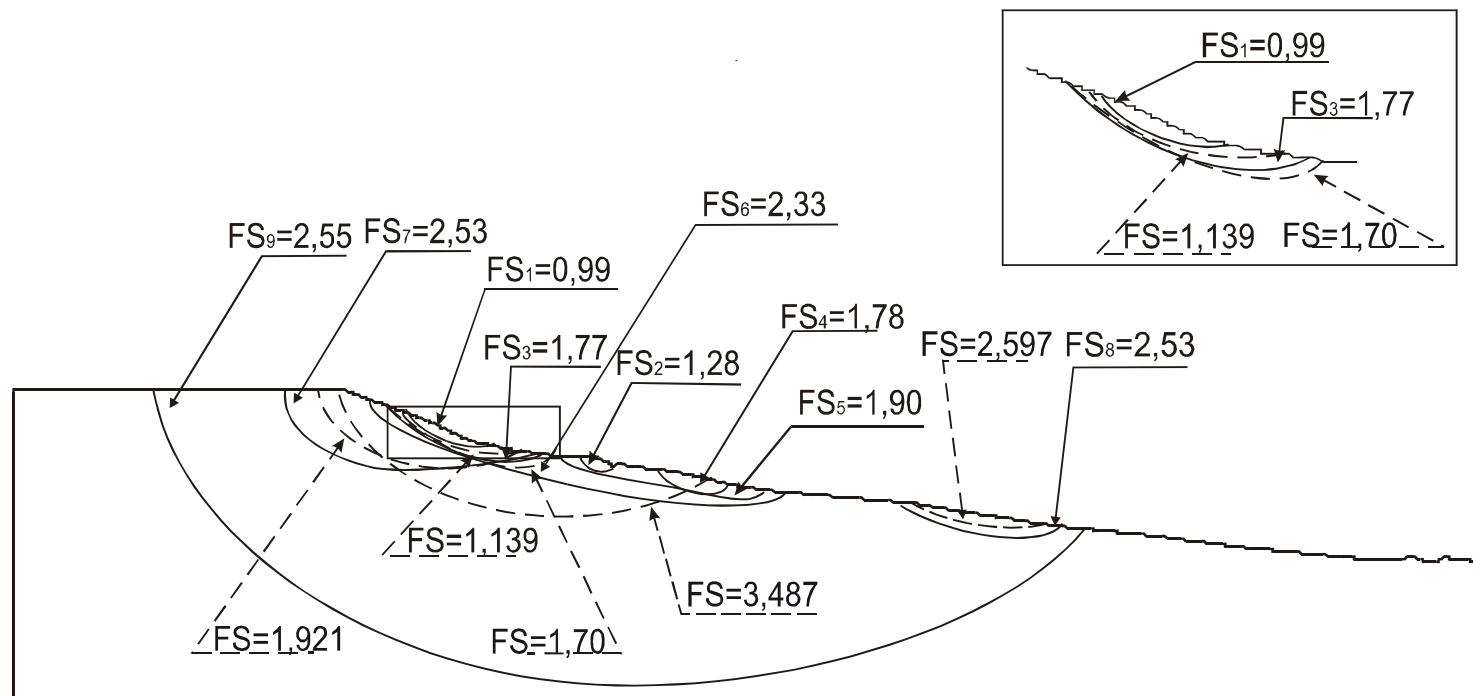
ABSTRACT: This paper deals with Carpathian flysch slope stability analysis. Calculations were performed utilising limit equilibrium methods (LEM) and modified shear strength reduction method (MSSR). The MSSR is based on reducing shear properties of soil (or rock) after identification of first slip surface. It allows performing complete estimation of stability for any type of slope. All numerical calculations were carried out with Finite Difference Method code FLAC. Calculation results were compared with field observations.



Rys. 1. Model obliczeniowy osuwiska Żurawnica



Rys. 2. Szczelina wypełniona wodą. Osuwisko Żurawnica 2003

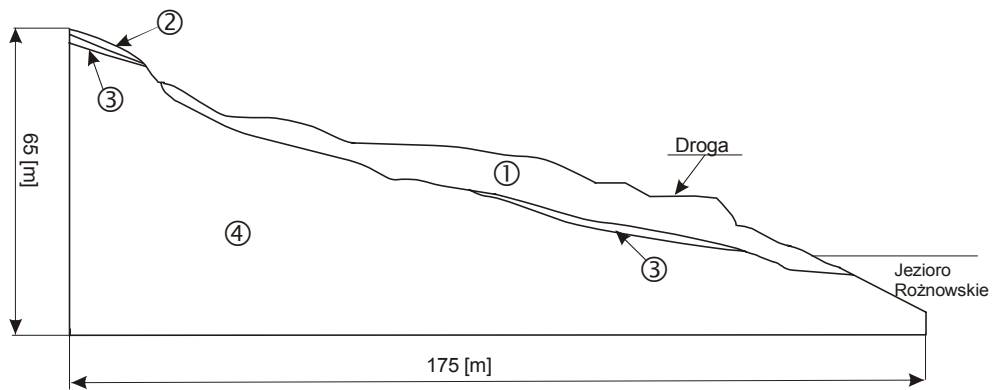


- Wskaźniki stateczności i powierzchnie poślizgu wyznaczone przy pomocy programu SLOPE/W
- Wskaźniki stateczności i powierzchnie poślizgu wyznaczone przy pomocy programu FLAC

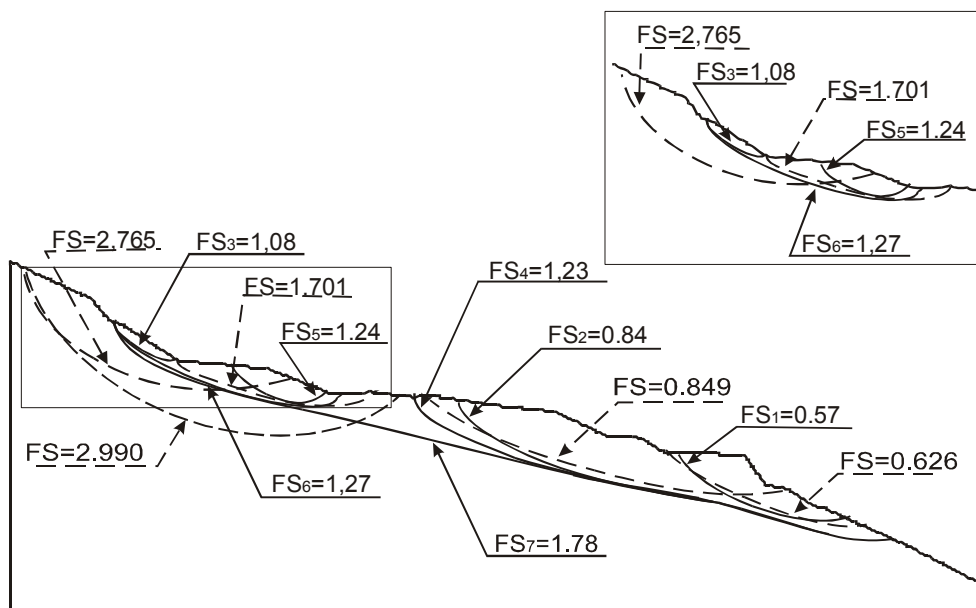
Rys. 3. Zestawienie wyników analiz stateczności za pomocą metod MSSR i Bishopa dla osuwiska Żurawnica.



Rys. 4. Osuwisko Lipie - widok ogólny niszy osuwiskowej [fot. L. Zabuski].



Rys. 5. Model obliczeniowy osuwiska Lipie



Rys. 6. Zestawienie wyników analiz stateczności za pomocą metod MSSR i Bishopa dla osuwiska Lipie.