

## **WPŁYW OPADU DESZCZU I EROZJI BOCZNEJ NA STATECZNOŚĆ NA PRZYKŁADZIE OSUWISKA W BIEŚNIKU (BESKID NISKI)**

Tymoteusz Zydroń, Andrzej Gruchot

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Celem pracy było określenie wpływu opadu deszczu i erozji bocznej na warunki stateczności zbocza położonego w pobliżu potoku Szalówka. Obszar badań to jedno z osuwisk Karpat fliszowych w miejscowości Bieśnik k. Gorlic (Beskid Niski), które powstało w 2010 roku. Badania obejmowały terenowe i laboratoryjne określenie właściwości geotechnicznych gruntów, a także obliczenia stateczności z uwzględnieniem infiltracji opadu oraz podjęcia jego podstawy. Wykazały one, że analizowane osuwisko powstało w terenie o niekorzystnych warunkach geotechnicznych z przewagą słabo przepuszczalnych utworów ilastych oraz łupków ilastych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Z kolei obliczenia stateczności wykazały istotny wpływ opadu deszczu i procesów fluwialnych (erozji bocznej) na warunki równowagi zbocza.

**Słowa kluczowe:** stateczność zbocza, infiltracja, erozja boczna, Karpaty

### **WSTĘP**

Stateczność zboczy stanowi jedno z podstawowych zagadnień geotechniki i geologii inżynierskiej. Zagadnienie to jest szczególnie istotne na terenie południowej Polski, gdzie procesy osuwiskowe na obszarze Karpat Zewnętrznych, tzw. fliszowych, stwarzają duże problemy natury technicznej. Głównymi czynnikami sprawiającymi, że obszar ten jest predysponowany osuwiskowo, jest skomplikowana budowa geologiczna i duże nachylenie zboczy. Do bardzo ważnych czynników sprzyjających nasileniu aktywności osuwiskowej w obszarze karpackim należy zaliczyć również opady oraz erozję boczną brzegów potoków górskich [Thiel (red.) 1989, Gil 1996]. W pracy określono wpływ tych dwóch czynników na stateczność zbocza osuwiskowego położonego w miejscowości Bieśnik k. Gorlic.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Andrzej Gruchot, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: rmgrucho@cyf-kr.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Pod względem geologicznym analizowane osuwisko występuje na obszarze jednostki magurskiej strefy Siar, gdzie zasadnicze utwory stanowią warstwy inoceramowe należące do najstarszych utworów tej jednostki [Jankowski 1997, 2013, Kopciowski i in. 1997]. Dolną ich granicą jest strefa odkłucia płaszczowiny magurskiej, a górną stanowią piaskowce z Mutnego bądź łupki pstre [Kopciowski 2007]. Warstwy inoceramowe reprezentowane są przez piaskowce cienkoławicowe, średnioławicowe i gruboławicowe oraz łupki (mułowcowe, niekiedy ilaste) kredy górnej i paleocenu, przy czym udział piaskowców i łupków jest zmienny. Piaskowce barwy popielato-szarej o spoiwie ilasto-wapnistym są warstwowane równoległe i przekątnie, z licznymi konwulsjami. Utwory te zawierają ziarna kwarcu, muskowitu i rozproszony detrytus. Z kolei łupki posiadają barwę szarą, zielonkawą i charakteryzują się zmienną wapnistością [Jankowski 2013].

Pod względem geograficznym analizowane osuwisko powstało w północnej części Beskidu Niskiego, graniczącego z Pogórzem Ciężkowickim (rys. 1) [Kondracki 2009]. Osuwisko znajduje się w północnej części podnóża Zielonej Góry (689,7 m n.p.m.), na łuku wklęsłym lewego brzegu potoku Szalówka (rys. 2). Przez osuwisko przebiega granica lasu jodłowo-bukowego i pastwiska, a lewa ściana osuwiska ograniczona jest systemem korzeniowym drzew. Z informacji uzyskanych od właścicieli terenu wynika, że osuwisko powstało na przełomie 3 i 4 czerwca 2010 roku w następstwie intensywnego opadu deszczu, który według danych zarejestrowanych przez Stację Naukową Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Szymbarku k. Gorlic wyniósł 107 mm. Opad ten rozpoczął się 3 czerwca o godzinie 19:00, a zakończył około 8:00 dnia następnego. Nachylenie terenu w pobliżu osuwiska wynosi przeciętnie 20°, ale lokalnie przekracza 30°. Charakter ruchu mas ziemnych odpowiada osuwisku rotacyjnemu, o czym może świadczyć położenie drzew w strefie odkłucia, które były przewrócone systemem korzeniowym w dół zbocza. Z kolei analizując orientację odsłoneń warstw skalnych w potoku względem kierunku ruchu mas ziemnych, osuwisko można określić, zgodnie z klasyfikacją zastosowaną przez Bobera i in. [1997], jako subsekwentne.



Rys. 1. Lokalizacja obiektu badań

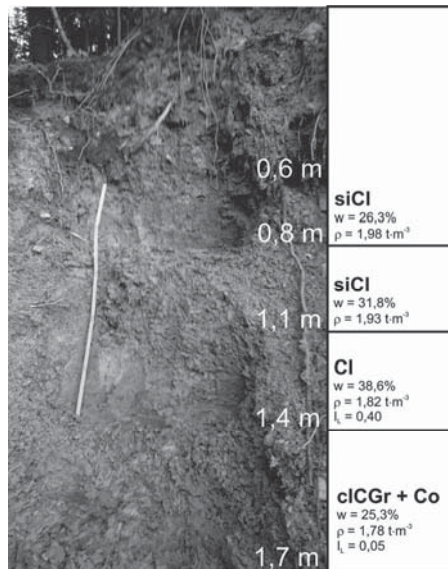
Fig. 1. Location of study area



Rys. 2. Widok ogólny osuwiska (fot. T. Zydrzeń)  
 Fig. 2. General view of the landslide (photo T. Zydrzeń)

## METODYKA

Badania terenowe obejmowały obmiar geodezyjny osuwiska, oznaczenia współczynnika filtracji metodą infiltrometru dwupięścieniowego oraz gęstości objętościowej metodą pierścienia o objętości  $100 \text{ cm}^3$  na trzech poziomach profilu bocznej ściany skarpy osuwiskowej (rys. 3). Pomiary geodezyjne wykonano w charakterystycznych punktach morfologicznych terenu obejmujących obszar niszy osuwiskowej oraz punkty położone poza obszarem osuwiska i strefę koryta ciekłu.



Rys. 3. Widok odsłonięcia skarpy osuwiska wzdłuż przekroju 1  
 Fig. 3. View of left flank along the profile No. 1

Zakres badań laboratoryjnych obejmował oznaczenie wilgotności, składu uziarnienia, granic konsystencji, parametrów wytrzymałości na ścinanie oraz współczynnika filtracji. Wilgotność oznaczono metodą suszarkową w temperaturze 105°C. Skład uziarnienia oznaczono metodą łączoną z wykorzystaniem analizy sitowej na mokro dla ziarn powyżej 0,063 mm i areometrycznej dla cząstek mniejszych od 0,063 mm. Granicę plastyczności oznaczono metodą walczkowania, a płynności metodą Casagrandego.

Parametry wytrzymałości na ścinanie gruntów występujących do głębokości 1,4 m oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach o klasie poboru A w skrzynce o wymiarach 6 × 6 cm i wysokości próbki 1,95 cm. Natomiast dla łupków pobranych z głębokości 1,5–1,7 m badanie wykonano w skrzynce o wymiarach 10 × 10 cm i wysokości próbki 7,6 cm z 5 ramkami pośrednimi, tworzącymi strefę ścinania o grubości 1,0 cm. Konsolidację i ścinanie próbek przeprowadzono przy naprężeniach normalnych, wynoszących 50, 100, 150, 200 kPa, a prędkość ścicia wynosiła 0,1 mm·min<sup>-1</sup>. Jako kryterium ścicia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających. Badania przeprowadzono w warunkach bez nawodnienia i po 24-godzinym nawodnieniu próbek. Współczynnik filtracji gruntu z poziomu 1,2–1,4 m oznaczono w edometrze na próbkach o średnicy 6,5 cm i wysokości 2 cm przy obciążeniu 12,5 kPa.

Obliczenia stateczności zbocza wykonano metodą Morgensterna-Price'a w programie GeoStudio [GEO-SLOPE... 2010b]. Ze względu na asymetryczną budowę zbocza, charakteryzującą się spadkiem zarówno w kierunku poprzecznym, jak i podłużnym, obliczenia stateczności przeprowadzono w trzech przekrojach: dwóch zlokalizowanych przy skarpach bocznych osuwiska oraz jednym znajdującym się w jego osi (rys. 4). Modele skarp opracowano na podstawie obmiaru geodezyjnego zbocza, uwzględniając morfologię nienaruszonej części terenu w sąsiedztwie osuwiska. Przekrój 1 położony na skraju lasu charakteryzował się wysokością skarpy bocznej miejscami znacznie powyżej 2,0 m. Z kolei w przekroju 3 wysokość skarpy bocznej wynosiła maksymalnie 1,0 m, a pokrycie terenu stanowiło pastwisko.



Rys. 4. Lokalizacja przekrojów obliczeniowych

Fig. 4. Localization of computational profiles

Obliczenia stateczności zostały wykonane w module SLOPE/W i zostały poprzedzone obliczeniami filtracji ustalonej (etap 1) oraz nieustalonej (etap 2) w module SEEP/W [GEO-SLOPE... 2010a]. W pierwszym etapie jako warunki brzegowe przyjęto stały poziom zwierciadła wody w cieku oraz opad o średniorocznej intensywności. Celem tych

obliczeń było określenie wyjściowego rozkładu ciśnienia wody w porach w profilu gruntowym. Natomiast w drugim etapie obliczenia uwzględniały godzinowe wartości natężenia opadu w okresie 1–4.06.2010 rok oraz wahania poziomu wody w cieku w zakresie od 0,2 do 0,6 m. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły określić zmiany rozkładu ciśnienia porowego w zboczu w analizowanym okresie i określić zmiany wartości współczynnika bezpieczeństwa. W obliczeniach stateczności założono początek i koniec powierzchni poślizgu, natomiast jej głębokość była optymalizowana przez program.

W obliczeniach uwzględniono również możliwość erozji bocznej, a więc wcięcia wód potoku w zbocze w dolnej jego części (strefa przykorytowa) w trakcie wezbrania. Na potrzeby oceny wielkości podcięcia koryta (E) wykorzystano równanie podane przez Simon and Pollen [2006]:

$$E = k_d \cdot t \cdot (\tau_0 - \tau_c) \quad (1)$$

gdzie:  $k_d$  – współczynnik erozyjności [ $\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $\tau_0$  – efektywne naprężenie styczne [Pa],  
 $\tau_c$  – krytyczne naprężenie styczne [Pa],  
 $t$  – czas trwania wezbrania [s].

Średnie naprężenie styczne oszacowano ze wzoru:

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot R_h \cdot S \quad (2)$$

gdzie:  $\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $R_h$  – promień hydrauliczny [m],  
 $S$  – spadek zwierciadła wody w cieku [–].

Krytyczne naprężenie styczne wyliczono z formuły [Simon i Pollen 2006]:

$$\tau_c = 0,06 \cdot (\rho - \rho_w) \cdot g \cdot D \quad (3)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość objętościowa gruntu,  
 $\rho_w$  – gęstość objętościowa wody,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  
 $D$  – charakterystyczna średnica gruntu [m].

Badania Hanson i Simon [2001] przeprowadzone na kilkunastu odcinkach rzek w USA wykazały, że wartości współczynnika erozyjności dla gruntów pylastych, pylasto-ilastych oraz iłów wynoszą średnio  $0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Stwierdzili oni, że współczynnik erozyjności można określać jako funkcję naprężeń stycznych:

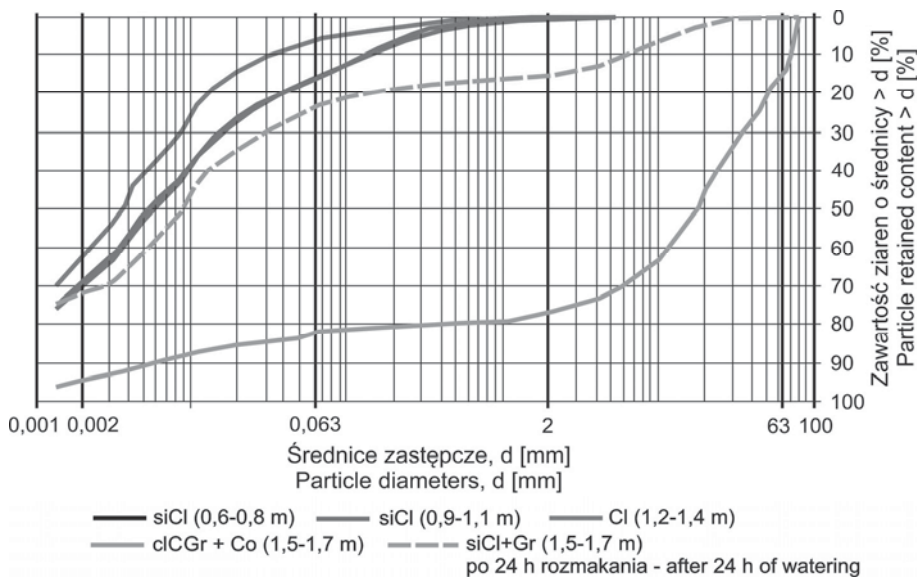
$$k_d = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \tau_c^{-0,5} \quad (4)$$

Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń przyjęto, że poziom zwierciadła wody w potoku w trakcie wezbrania nie przekroczył 0,6 m, a jego czas odpowiadał okresowi trwania opadu. Podstawowym problemem w obliczeniach było określenie wielkości charakterystycznej średnicy ziarna zalegającego u podstawy zbocza. Dlatego przyjęto różne

jej wartości, a wielkość erozji bocznej przedstawiono jako parametr zależny od średnicy ziarna charakterystycznego i promienia hydraulicznego zgodnie z równaniem (1).

## WYNIKI BADAŃ

Z przeprowadzonych badań wynikało, że skarpe osuwiskową do głębokości około 1,40 m budują ropy lub ropy pyłaste o wilgotności naturalnej od 25 do 39% (tab. 1, rys. 3 i 5). Natomiast poniżej, do głębokości 1,70 m, zalegają łupki ilaste, których uziarnienie odpowiadało żwirom grubym ilastym z domieszką kamieni. W wyniku 24-godzinnej rozmakania łupków ich uziarnienie uległo zmianie i odpowiadało ropy pyłastym z domieszką żwiru. Grunty z terenu osuwiska charakteryzowały się zawartością węgla wapnia nieprzekraczającą 1%. Ze względu na znaczne domieszki kamieni i występujące trudności z przewierceniem się przez niżej zalegające warstwy gruntów zrezygnowano z głębszego rozpoznania geotechnicznego. Przyjęto, że odsłonięcia skarpy bocznej wzdłuż linii lasu przebiegają w pobliżu powierzchni poślizgu osuwiska.



Rys. 5. Krzywe uziarnienia gruntów skarpy zbocza osuwiskowego  
Fig. 5. Grain size distribution soils from landslide's area

Wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie (tab. 1) uzyskane w warunkach bez nawodnienia były większe od 2 do 25% względnych w przypadku kąta tarcia wewnętrznego i od 10% względnych do 2-krotnie w przypadku spójności w stosunku do wartości z badań z nawodnieniem próbek. Do obliczeń stateczności przyjęto parametry wytrzymałości na ścinanie gruntów z badań z nawodnieniem próbek, przyjmując zgodnie z PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009, że odpowiadają one parametrom efektywnym. Współczynnik filtracji ropy z badań terenowych, określony na głębokości około 1,2 m, wynosił

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna gruntów skarpy zbocza osuwiskowego  
 Table 1. Geotechnical characteristics of soils from landslide's area

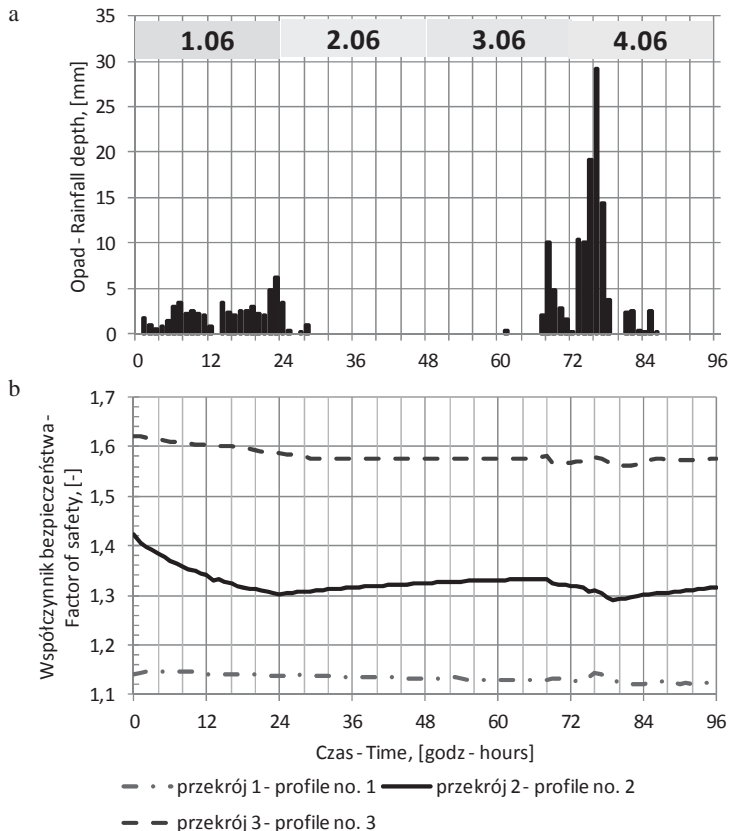
Parametr Parameter	Wartość dla gruntu pobranego z głębokości: Value for soils from depth:			
	0,6–0,8 m	0,9–1,1 m	1,2–1,4 m	1,5–1,7 m
Zawartość frakcji – Fraction content [%]:				
– kamienista – cobbles Co (> 63 mm)				13,0
– żwirowa – gravel Gr (2–63 mm)	0,2	0,5	0,1	63,0
– piaskowa – sand Sa (0,063–2 mm)	15,8	15,7	6,4	5,5
– pyłowa – silt Si (0,002–0,063 mm)	53,8	51,8	55,5	12,5
– ilowa – clay Cl (< 0,002 mm)	30,2	32,0	38,0	6,0
Nazwa gruntu wg – Name of soil acc. to [PN-EN ISO 14688-2:2006]	siCl	siCl	Cl	clCGr+Co
Wilgotność naturalna Natural moisture content [%]	26,3	31,8	38,6	25,3
Gęstość objętościowa Dry density, $\rho$ , [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,98	1,93	1,82	1,78
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density of solid particles, $\rho$ , [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,57	1,46	1,32	1,42
Granice konsystencji Atterberg limits [%]	plastyczności plastic, $w_p$		23,7	23,9
	płynności liquid, $w_L$		61,0	50,6
Stopień plastyczności Liquidity index, $I_L$ [-]			0,40	0,05
Współczynnik filtracji, $k_{10}$ [m·s <sup>-1</sup> ] z badań Coefficient of permeability, $k_{10}$ [m·s <sup>-1</sup> ] from	w edometrze eodometer		7,5·10 <sup>-10</sup>	
	infiltrometrem dwupierscieniowym <sup>a</sup> double ring infiltrometer		6,1·10 <sup>-8</sup>	
Kąt tarcia wewnętrznego, $\varphi$ [°] w warunkach Angle of internal friction $\varphi$ [°] under condition of	bez nawodnienia not waterlogged	29,1	22,2	29,4
	z nawodnieniem waterlogged	23,3	21,2	28,9
Spójność, $c$ [kPa] w warunkach Cohesion [kPa] under condition of	bez nawodnienia not waterlogged	20,3	22,9	15,2
	z nawodnieniem waterlogged	15,4	20,9	7,6

<sup>a</sup>Za Rumin [2013] – Acc. to Rumin [2013].

6,1·10<sup>-8</sup> m·s<sup>-1</sup>. Natomiast dla tego samego iłu w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych dla 4 próbek współczynnik filtracji wynosił średnio 7,5·10<sup>-10</sup> m·s<sup>-1</sup>, co oznacza, że grunty budujące przekrój skarpy osuwiskowej są mało przepuszczalne. Należy zaznaczyć, że po odsłonięciu ściany osuwiska stwierdzono liczne sączenia wody występujące w całym profilu gruntowym. Stan utworów ilastych, budujących koluwium osuwiskowe, był plastyczny, świadczący o ich zawodnieniu. Biorąc pod uwagę, że wartości współczynnika filtracji z badań laboratoryjnych są zwykle zaniżone w stosunku do wyników

z badań terenowych [Marciniak i in. 1999], na potrzeby obliczeń filtracyjnych przyjęto jednakową wartość tego parametru w całym profilu z badań polowych.

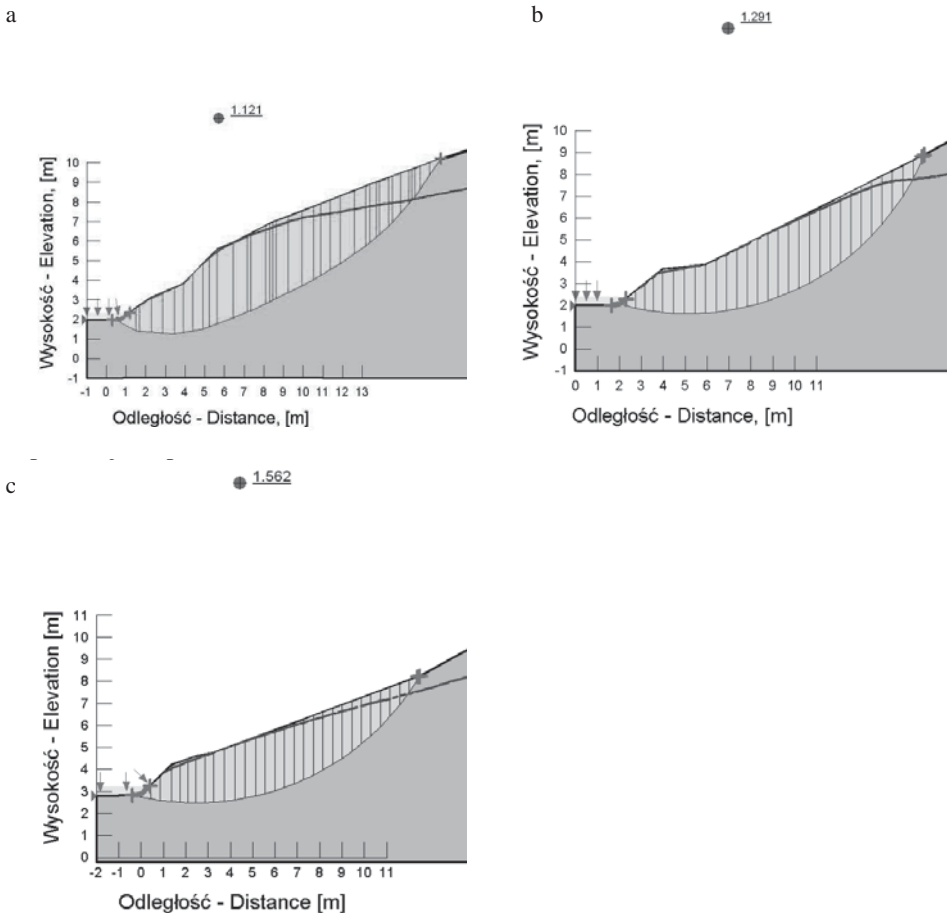
Wyniki obliczeń stateczności zbocza przedstawiono na rysunku 6. Na hietogramie opadowym (rys. 6a) wyodrębniono w analizowanym okresie dwa zasadnicze opady wysokości 56 mm (1.06) oraz 115 mm (3–4.06). Wyniki obliczeń infiltracji (rys. 7) wskazują położenie zwierciadła wody gruntowej w pobliżu powierzchni terenu. Jedynie w górnej części zbocza strefa gruntów zawodnionych była na głębokości około jednego metra poniżej powierzchni terenu. Stwierdzono systematyczne zmniejszanie się współczynnika bezpieczeństwa, przy czym minimalne jego wartości były różne w poszczególnych przekrojach (rys. 7), a zakres tych zmian był nieznaczny, co wynikało z małej wodoprzepuszczalności gruntów zalegających w zboczu. Najmniejsze zmiany współczynnika bezpieczeństwa, od 1,12 do 1,15, uzyskano dla przekroju 1 zlokalizowanego w najbardziej stromej części terenu, a największe, od 1,56 do 1,62, w przekroju 3. W każdym z przekrojów obliczeniowych najmniejsze wartości współczynnika bezpieczeństwa uzyskano w 4. dobie analizowanego okresu (rys. 6b), a więc w końcowej fazie trwania opadu.



Rys. 6. Zmiany współczynnika bezpieczeństwa w okresie 1–4.06.2010 roku: a – jako parametru zależnego od wielkości opadu, b – w poszczególnych przekrojach obliczeniowych

Fig. 6. Changes of safety factor values for various profiles of slope (b) during rainfall period of 1–4.06.2010 vs. rainfall hietograph (a)





Rys. 7. Przebieg najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu: a – przekrój 1, b – przekrój 2, c – przekrój 3

Fig. 7. General view of critical sliding plane: a – profile No. 1, b – profile No. 2, c – profile No. 3

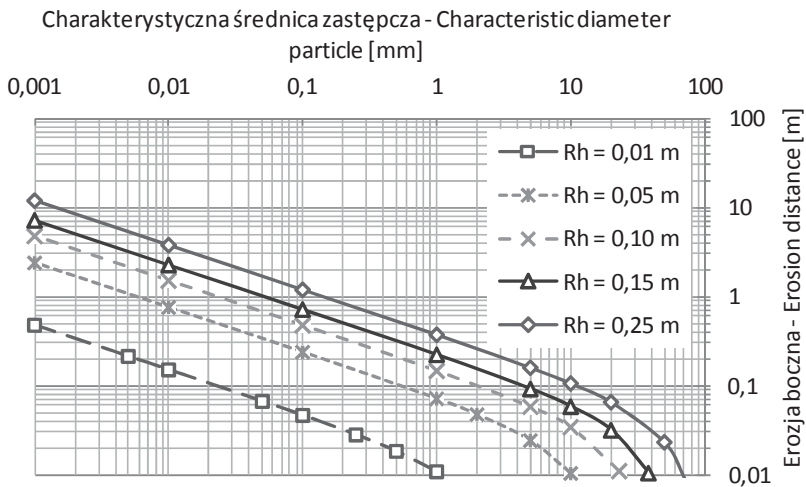
Przedmiotowe osuwisko powstało w okresie, w którym odnotowano szereg przypadków podcięć brzegów przez wezbrane wody potoków. Szczególnie było to widoczne w dolinie sąsiedniego potoku Bystrzanka (rys. 8), który w znacznej części przepływa w pobliżu zabudowań oraz infrastruktury technicznej. Dlatego w dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia intensywności erozji bocznej, których celem było określenie orientacyjnego zasięgu możliwych wcięć brzegów potoku Szalówka i ich wpływ na stateczność zbocza.

Wyniki obliczeń zasięgu podcięcia erozyjnego, jako funkcji średnicy charakterystycznej ziarna gruntowego oraz promienia hydraulicznego, przedstawiono na rysunku 9. W obliczeniach założono, że czas trwania wezbrania powodującego erozję wynosił 6 godzin. Uzyskane wyniki wskazują, że intensywność erozji bocznej wzrasta wraz ze wzrostem promienia hydraulicznego i jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy ziaren.



Rys. 8. Przykład podcięcia brzegu potoku koryta w okresie 3–4.06.2010 roku w zlewni potoku Bystrzanka w miejscowości Bieśnik (fot. T. Zydróż)

Fig. 8. Example of lateral erosion of riverbank during 3–4.06.2010 at catchment of Bystrzanka stream

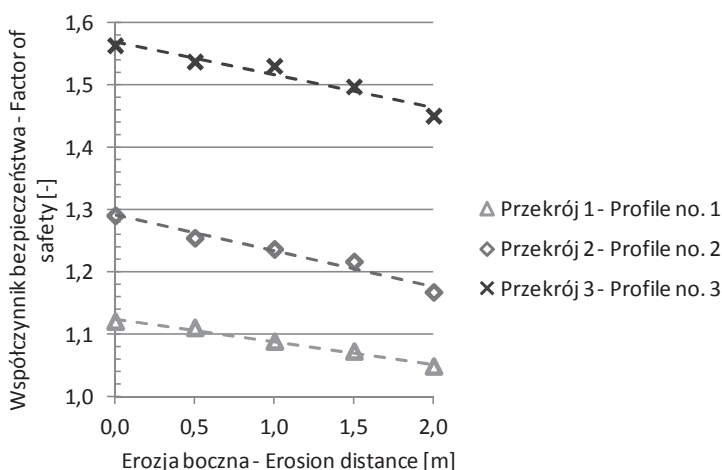


Rys. 9. Wielkość erozji bocznej jako zmiennej zależnej od charakterystycznej średnicy zastępczej ziarna i wartości promienia hydraulicznego ( $R_h$ )

Fig. 9. Results of erodibility calculation as a value dependent on grain size of soil and hydraulic radius ( $R_h$ )

Obliczenia promienia hydraulicznego wykazały, że jego wartości wynosiły około 0,25 przy szerokości koryta 2,5 m i wysokości wody 0,3 m. Biorąc pod uwagę, że średnica charakterystyczna gruntu budującego brzeg potoku wynosi 0,006 mm, należałoby się spodziewać wcięcia koryta potoku w zbocze na głębokość około 4–5 m, co wydaje się wielkością mało realną. Uwzględniając zaobserwowaną erozję boczną potoku Bystrzanka, wykonano obliczenia stateczności zbocza, uwzględniając wielkość wcięcia koryta w jego podstawie w zakresie od 0,5 do 2,0 m.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki obliczeń stateczności zbocza w zależności od wielkości podcięcia erozyjnego brzegu potoku stanowiącego podnóże osuwiska. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, że erozja boczna ma wyraźny wpływ na warunki równowagi zbocza. W przypadku podcięcia zbocza wynoszącego 1,0 m jego współczynnik bezpieczeństwa zmniejszył się o 3% w stosunku do stanu przed wezbraniem. Z kolei erozja rzędu 1,5 i 2,0 m spowodowała zmniejszenie współczynnika bezpieczeństwa odpowiednio o 5 i ponad 8%. Dla porównania obliczenia współczynnika bezpieczeństwa z uwzględnieniem opadów deszczu wykazały zmniejszenie jego wartości w przekroju środkowym o blisko 4%, a w przekroju 1, charakteryzującym się największą wysokością skarpy bocznej, tylko o 2%. Można więc przypuszczać, że przy długotrwałym wezbraniu erozja boczna będzie stanowić istotny czynnik decydujący o stateczności zbocza.



Rys. 10. Wpływ podcięcia erozyjnego podstawy zbocza na wartości współczynnika bezpieczeństwa  
Fig. 10. Values of safety factor vs. erosion distance at the toe of slope

Otrzymane wartości współczynnika bezpieczeństwa w każdym z analizowanych przekrojów były powyżej wartości granicznej ( $FS = 1,0$ ). Świadczyć to może o zawyżonych wartościach parametrów wytrzymałości na ścinanie. Dlatego w celu określenia granicznych wartości tych parametrów przeprowadzono analizę wsteczną. W każdym przekroju uwzględniono jedną najbardziej niekorzystną powierzchnię poślizgu, poziom wody przyjęto z obliczeń filtracji nieustalanej (rys. 7), a wielkość podcięcia zbocza równą 1,0 m. Obliczenia wykonano, poszukując takiej wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności, przy których współczynnik bezpieczeństwa wynosił  $FS = 1,0$ . Uzyskane wyniki obliczeń wykazały, że w każdym przekroju stan równowagi granicznej zachodził przy różnych wartościach parametrów wytrzymałości na ścinanie, które różniły się w znaczący sposób od uzyskanych z badań w aparacie bezpośredniego ścinania. W dalszej części obliczeń parametry te zmniejszono o stałą wartość współczynnika redukcyjnego do uzyskania stanu równowagi granicznej w każdym z analizowanych przekrojów. Stwierdzono, że w przypadku przekroju 1 redukcja parametrów wyniosła 11% względnych ( $\varphi = 26,5^\circ$ , i  $c = 6,9$  kPa), a w przypadku przekroju 3 – 49% względnych ( $\varphi = 17,2^\circ$  i  $c = 4,3$  kPa). Potwierdza to istotny wpływ właściwie dobranej wartości współczynnika redukcyjnego, uwzględnia-

jącego prawidłowe oszacowanie parametrów wytrzymałości na ścinanie, oraz uwzględnienie charakterystycznego dla danego zbocza przekroju obliczeniowego na obliczenia stateczności.

## PODSUMOWANIE

Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych wskazują, że przedmiotowe osuwisko powstało w terenie o niekorzystnych warunkach geologiczno-inżynierskich, gdzie profil gruntowy stanowią słabo przepuszczalne utwory ilaste oraz łupki ilaste w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Wyniki obliczeń stateczności wykazały istotny wpływ opadów deszczu i procesów fluwialnych (erozji) na warunki równowagi analizowanego fragmentu zbocza. Współczynnik bezpieczeństwa zbocza w każdym przekroju obliczeniowym spełniał warunki równowagi stanu granicznego, wskazując tym samym, że otrzymane z badań parametry wytrzymałości na ścinanie były zawyżone, na co wskazuje przeprowadzona analiza wsteczna.

Uwzględniając wpływ procesu infiltracji oraz erozji bocznej, wykazano wpływ obydwu tych procesów na pogorszenie stateczności zbocza, przy czym proces erozji bocznej ma większy wpływ na odcinkach zboczy zlokalizowanych na łukach wklęsłych potoków. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na istotną potrzebę badań procesów fluwialnych w aspekcie stateczności zboczy przykorytowych. Należy zauważyć, że brak jest programów geotechnicznych umożliwiających modelowanie procesów infiltracji i erozji bocznej równocześnie.

## ADNOTACJA

Praca wykonana w ramach badań statutowych: DS-3322/KIWiG/2016.

Autorzy składają podziękowania pracownikom Zakładu Geomorfologii Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie za udostępnienie programu komputerowego do obliczeń stateczności oraz pracownikom Stacji Badawczej IGiPZ PAN w Szymbarku za udostępnienie danych opadowych.

## PIŚMIENNICTWO

- Bober, L., Thiel, K., Zabuski, L. (1997). Zjawiska osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych. Geologiczno-inżynierskie właściwości wybranych osuwisk. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2010a). GEO-SLOPE, Seepage Modeling with SEEP/W 2007 An Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltd. Alberta.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2010b). Stability Modeling with SLOPE/W: Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltd. Alberta.
- Gil, E. (1996). Monitoring ruchów osuwiskowych. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Monitoring Geoekosystemów Górskich. Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Hanson, G.J., Simon, A. (2001). Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15, 23–28.

- Jankowski, L. (1997). Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000. Arkusz Rzepiennik (1020). PIG, Warszawa.
- Jankowski, L. (2013). Objąsnienia do szczególowej mapy geologicznej Polski 1 : 50 000. Arkusz Rzepiennik (1020). Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Kondracki, J. (2009). Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kopciowski, R. (2007). Rozwój facjalny i paleogeografia jednostki Siar płaszczowiny magurskiej na południe od Gorlic. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 426, 91–114.
- Kopciowski, R., Zimnal, Z., Chrzastowski, J., Jankowski, L., Szymakowska, F. (1997). Objąsnienia do szczególowej mapy geologicznej Polski 1 : 50 000. Arkusz Gorlice (1037). Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Marciniak, M., Przybyłek, J., Herzig, J., Szczepańska, J. (1999). Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych w cylindrach. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 15, 3, 107–123.
- PKN-CENISO/TS 17892-10:2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10: Badania w aparacie bezpośredniego ścinania.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- Rumin, J. (2013). Analiza mechanizmu osuwiska na przykładzie wybranego zbocza z okolic Gorlic. Praca magisterska. Maszynopis. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Kraków.
- Simon, A., Pollen, N. (2006). A model of streambank stability incorporating hydraulic erosion and the effects of riparian vegetation. Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8th FISC), April 2–6, Reno, NV, USA.
- Thiel, K., red. (1989). Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań na stoku Bystrzyca w Szymbarku. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.

## IMPACT OF RAINFALL AND LATERAL EROSION ON SLOPE STABILITY – CASE STUDY OF SHALLOW LANDSLIDE IN BIEŚNIK (BESKID NISKI MOUNTAINS)

**Abstract.** The analysis of influence of rainfall infiltration and lateral erosion of riverbank on slope stability is presented in the paper. Studied landslide is situated at the Flysch Carpathians (Bieśnik near Gorlice, Beskid Niski Mts.) and it was activated in 2010. Field and laboratory tests included land surveying measurements and determination of geotechnical parameters of soils. In the further part of work were done slope stability calculations, which included influence of infiltration process and erosion range at the toe of slope on stress state change within the slope. Tests revealed, that analyzed landslide originated in the area of the unfavorable geological conditions, where subsoil is composed of poorly permeable clays and schists of medium and high plasticity. In turn, the slope stability calculations have shown a significant and of a similar scope of the impact of rainfall and fluvial processes (lateral erosion) on stability of the analyzed slope.

**Key words:** slope stability, infiltration, lateral erosion, Carpathians

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Zydrón, T., Gruchot, A. (2016). Wpływ opadu deszczu i erozji bocznej na stateczność na przykładzie osuwiska w Bieśniku (Beskid Niski). *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 149–161.