

## WYBRANE ZAGADNIENIA ANALIZY STATECZNOŚCI NASYPÓW KOLEJOWYCH

*Agnieszka Stopkowicz\*, Marek Cała\**

### 1. Wprowadzenie

Ruchy osuwiskowe są zjawiskami występującymi powszechnie niemal na całym świecie, przy czym problem ten dotyka szczególnie terenów górskich. Procesy te występują tu nie tylko najliczniej, ale i są najbardziej spektakularne. Osuwiska górskie często obejmują swoim zasięgiem duże obszary i charakteryzują się głęboko zlokalizowanymi powierzchniami poślizgu, tworząc na powierzchni terenu wyraźne formy osuwiskowe. Z tego też względu zjawiska osuwiskowe występujące na terenach górskich najwcześniej stały się przedmiotem badań, co znajduje odzwierciedlenie w szeregu powstałych opracowań literaturowych. Wraz z rozwojem budownictwa, transportu lądowego i górnictwa odkrywkowego problem osuwisk pojawił się w odniesieniu do zbroczy sztucznie ukształtowanych przez człowieka, jak np. nasypy drogowe i kolejowe. O ile naruszanie funkcjonalności dróg przez zjawiska osuwiskowe znajduje się w centrum powszechnego zainteresowania, to problem stateczności nasypów i wykopów kolejowych zdaje się być rzadziej podkreślany.

Z wejściem Polski w struktury Unii Europejskiej powstała konieczność dostosowania infrastruktury kolejowej do standardów unijnych, a także przystosowania infrastruktury dróg kolejowych do dużych prędkości przekraczających 200÷250 km/h (Towpik, 2004 [6]). Na świecie powstają już linie kolejowe przystosowane nawet do prędkości 350 km/h. Zważywszy na bezpieczeństwo ruchu problem stateczności nasypów kolejowych i skarp wykopów staje się otwarty i aktualny.

### 2. Infrastruktura kolejowa w Polsce

Początek kolei w Polsce przypada na rok 1835, kiedy nastąpiło otwarcie linii kolejowej z Warszawy do Zagłębia Dąbrowskiego i Krakowa [www.pkp.pl]. W następnych latach powstają kolejne linie kolejowe w obrębach poszczególnych zaborów. Różna szerokość sieci kolejowych stanowiła główny problem integracji transportu kolejowego w okresie międzywojennym. Przed drugą wojną światową Polska posiadała sprawnie funkcjonujący system kolejowy obejmujący 306 km linii przystosowanych do prędkości 115 km/h oraz 2 035 km z dopuszczeniem prędkości 100 km/h. Druga wojna światowa przerwała rozbudowę transportu kolejowego, a także przyczyniła się do znacznego zniszczenia zabudowy kolejowej.

---

\* *Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH*

Po drugiej wojnie nastąpił okres naprawy zniszczeń i dalszej rozbudowy infrastruktury kolejowej. W 2002 roku długość linii normalnotorowych i szerokotorowych wynosiła 20 000 km, a łączna długość torów szlakowych i głównych zasadniczych na stacjach osiągnęła 31 000 km (Towpik, 2004 [6]). W ostatnich latach zlikwidowano niektóre linie kolejowe. Aktualnie, jak podaje Ministerstwo Transportu i Budownictwa, długość eksploatowanych linii kolejowych wynosi 21 000 km. Polska sieć kolejowa jest dobrze rozwinięta pod względem ilościowym i zajmuje trzecie miejsce wśród krajów europejskich (rys. 1). Jednakże znajduje się ona w znacznie gorszym stanie technicznym. Według danych przedstawionych przez Ministerstwo Transportu i Budownictwa [www.mi.gov.pl] w stanie dobrym znajduje się tylko 22,9% torów i 19,7% rozjazdów. Powoduje to konieczność wprowadzania ograniczenia prędkości, co znacznie pogarsza jakość i konkurencyjność świadczonych usług.



LOKALIZACJA PROJEKTÓW KOLEJOWYCH REALIZOWANYCH Z FUNDUSZY SPÓJNOŚCI I ERDF NA LATA 2004 - 2006

Rys. 1. Sieć polskich linii kolejowych z zaznaczoną lokalizacją projektów modernizacyjnych na rok 2004–2006 wg Ministerstwa Transportu i Budownictwa [www.mi.gov.pl]

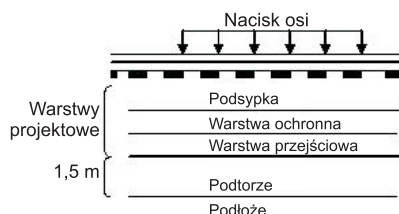
### 3. Wybrane problemy stateczności dróg kolejowych

W przypadku infrastruktury kolejowej problem stateczności zarysowuje się zarówno w odniesieniu do nasypów kolejowych, jak i stateczności skarp wykopów. Przy czym szczególnie groźna jest utrata stateczności nasypów, które winny stanowić stabilne i nieodkształcalne podłoże. W budowie nasypów wyróżnić można następujące, główne elementy (rys. 2) (Towpik, 2004 [6]):

- podsypka, kruszywo najczęściej ze skał magmowych, głębinowych bądź wylewnych o uziarnieniu 31,5 do 50 mm. Jej głównym zadaniem jest przenoszenie obciążenia,

a także odprowadzanie wody z otoczenia torów. W trakcie eksploatacji warstwa ta ulega zużyciu, w wyniku zanieczyszczenia podsypki tworzą się tzw. wychlapki, świadczące o utracie zdolności filtracyjnych materiału;

- podtorze, to główna część nasypu przenosząca obciążenia statyczne i dynamiczne, zbudowana z gruntów w kształtce nasypów bądź wykopów.



Rys. 2. Schemat budowy nasypu kolejowego (Towpik, 2004 [6])

Nasypy kolejowe polskiej sieci kolejowej powstały w różnych okresach, niektóre fragmenty liczą sobie nawet kilkadziesiąt lat, część z nich poddawana była reprofilowaniu bądź naprawom, a inne fragmenty funkcjonują aktualnie bez jakichkolwiek zmian. Duże obciążenia statyczne i dynamiczne oraz długi okres użytkowania powoduje, iż nasypy ulegają zniszczeniu i przestają w pełni spełniać swoją funkcję. Przyczyniają się do tego:

- procesy erozyjne, wietrzenie, działanie mrozu, okresy intensywnych opadów;
- zmiany warunków hydrogeologicznych;
- odprowadzenie wody z torowiska;
- brak ujęcia wód opadowych i gruntowych;
- działania zwierząt, np. kretów;
- inne.



Fot. 1. Nasyp kolejowy z uzupełnieniem materiału w obrębie powierzchniowego zsuwu ośrodka (Fot. GeoPartner)

Doprowadzić to może do utraty stateczności nasypów. W obrębie nasypów często obserwowane można zsuwy płytkich, wierzchnich warstw (fot. 1), generalnie nienaruszających nośności nasypu. Jednakże ruch ośrodka powoduje odsłonięcie głębszych warstw budujących skarpe nasypową, co może w przyszłości doprowadzić do powstania osuwiska. Zjawiska osuwiskowe, szczególnie wystąpienie nagłego osunięcia się ziemi, stanowią poważne niebezpieczeństwo dla infrastruktury kolejowej i mogą doprowadzić do poważnych w skutkach awarii zagrażających życiu ludzkiemu.

Równie niebezpieczne, co utrata stateczności samego nasypu, jest zlokalizowanie go na terenie osuwiskowym. W Polsce problem ten występuje zwłaszcza na terenie fliszu karpackiego. Na tym terenie liniom kolejowym w latach 1967–1970 zagrażało 49 osuwisk. Przy łącznej długości sieci kolejowej wynoszącej 850 km zagrożonych było zjawiskami osuwiskowymi 86 km (zatem na 10 km linii przypadało 1 osuwisko) (Zabuski i in., 1999 [7]). Stan aktualny, jak można przypuszczać, z pewnością uległ pogorszeniu.

#### 4. Analiza stateczności nasypu kolejowego

Osuwisko powstało na międzynarodowej linii kolejowej wiosną 2004 r. (fot. 2) po okresie intensywnych opadów. Prawdopodobnie wcześniej przeprowadzono w tym miejscu reprofilowanie starego, zbudowanego przez Niemców, nasypu co spowodowało naruszenie zewnętrznych warstw ochronnych i przyczynić się mogło do zainicjowania ruchów osuwiskowych.



Fot. 2. Osuwisko w obrębie nasypu kolejowego (fot. GeoPartner)

W miejscu osuwiska przeprowadzono uzupełnienie nasypu nowym materiałem. Na materiał osuwiskowy, bez usunięcia słabych warstw czy uszkodzonego słupa trakcji elektrycznej, usypano nowy ośrodek. Po niedługim czasie zaobserwowano na tym odcinku symptomy świadczące o dalszej niestateczności nasypu.

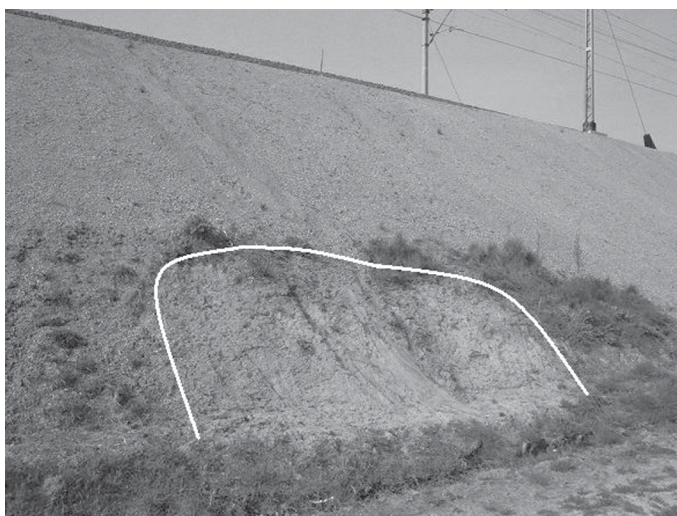
Obliczenia stateczności przeprowadzono dla określenia aktualnych warunków stateczności nasypu kolejowego. Analizę przeprowadzono przy zastosowaniu programu FLAC opartego o Metodę Różnic Skończonych (Users Manual, 2002 [2]). Nasyp miał wysokość od 8,35 do 9,35 m i kąt nachylenia skarp około 35 stopni. Obliczenia wykonano w następujących etapach: I – obliczenia stateczności FLAC Slope w celu wyznaczenia „najslabszego ogniwa”,



czyli powierzchni poślizgu, gdzie najwcześniej nastąpi utrata stateczności. W II etapie przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR), zlokalizowano kolejne miejsca utraty stateczności ze wskaźnikiem stateczności wyższym od obliczonego w I etapie (Cała i Flisiak, 2000 [1]). Zidentyfikowane w ten sposób kolejne powierzchnie poślizgu mają większy zasięg, czyli są bardziej niebezpieczne dla funkcjonalności analizowanego nasypu. Wyniki obliczeń zostały porównane z obrazem otrzymanym z profiliowań georadarowych przeprowadzonych w tym samym przekroju.

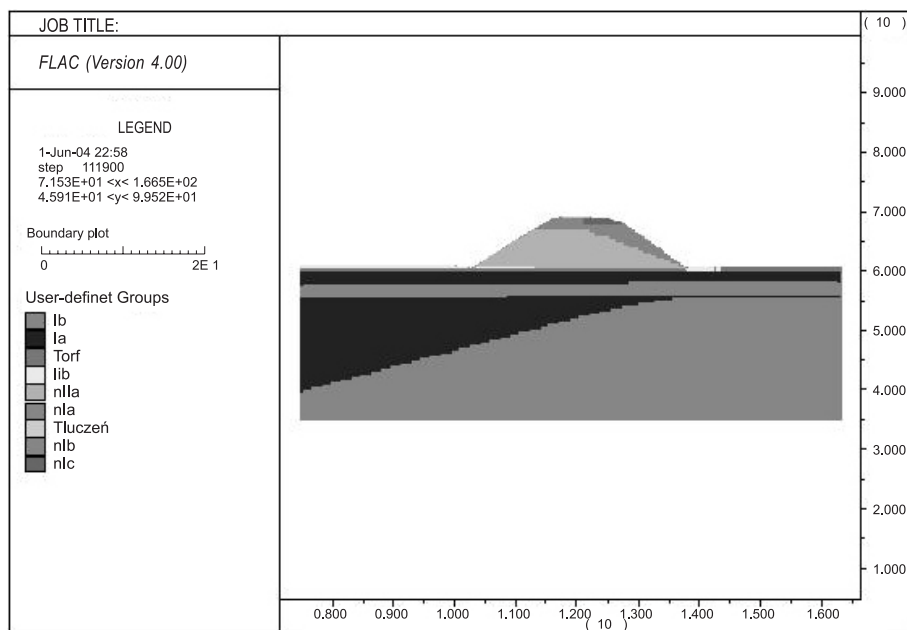


**Fot. 3.** Zrekonstruowany nasyp. Białą linią zaznaczono zasięg podciągania wody gruntowej (fot. GeoPartner)



**Fot. 4.** Zrekonstruowany nasyp. Zaznaczone widoczne powierzchniowe osuwanie się materiału (fot. GeoPartner)

W oparciu o wyniki badań *in situ* i badań laboratoryjnych stworzono model obliczeniowy (rys. 3), któremu przypisano parametry przedstawione w tabeli 1.



Rys. 3. Model obliczeniowy

Tabela 1. Parametry modelu obliczeniowego

	Ciężar obj. $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] wg PN-81-B-03020	Kąt tarcia $\varphi$ [°]	Spójność $c$ [kPa]
Ib	20,00	32,9	–
Ia	19,00	30,2	–
Torf <sup>1</sup>	13,65	6,2	8.500
Iib	18,50	18,0	30.000
nIIa <sup>2</sup>	20,00	22,3	17.500
nIb	17,00	32,3	–
nIa	16,50	29,3	–
nIc	17,50	38,4	–
Tłuczeń <sup>3</sup>	21,00	17,0	24.000
Model ośrodka: MSSR	model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra		
Poziom ZWG wg pomiarów			
Obciążenie od ruchu kolejowego 90 kPa			

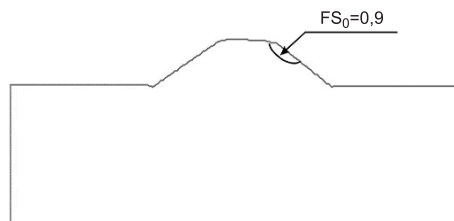
1 Wartości przyjęte wg Pisarczyk S., Gruntoznawstwo Inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001,

2 Parametry przyjęte na podstawie badań laboratoryjnych,

3 Wartości wg Thiel K., Własności fizyko-mechaniczne i modele maszywów skalnych polskich Karpat fliszowych. Biblioteka Naukowa, Hydrotechnika nr 19, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, 1995.

#### 4.1. Wyniki analizy stateczności przeprowadzonej przy wykorzystaniu FLAC Slope

Dla modelu obliczeniowego przedstawionego na rysunku 3 otrzymano wskaźnik stateczności  $FS_0 = 0,90$ . Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów zakładając, iż nasyp jest nieobciążony, z obciążeniem od ruchu kolejowego dla toru T-1 oraz z obciążeniem toru T-2.

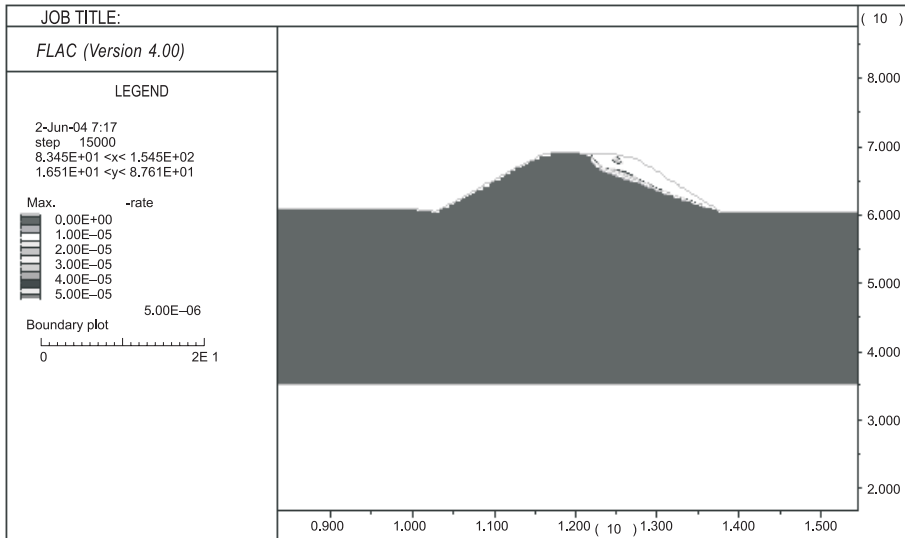


Rys. 4. Wyznaczona powierzchnia poślizgu dla  $FS_0 = 0,90$

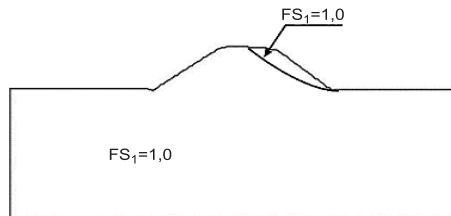
We wszystkich przypadkach otrzymano taką samą wartość wskaźnika stateczności  $FS_0 = 0,90$  wobec czego zaprezentowano w niniejszym artykule tylko jeden z wariantów, mianowicie wariant z obciążonym torem T-1 (rys. 4). Powierzchnia poślizgu obejmuje tylko wierzchnią, kilkudziesięciu centymetrową warstwę, co potwierdzają obserwacje poczynione podczas badań nasypu. Zsuw gruntu wzdłuż powierzchni wynika przede wszystkim z niewystarczających parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntu budującego skarpe. Aktualnie zsuwający się grunt nie wpływa na stateczność i funkcjonalność nasypu, jednakże w przyszłości może przyczynić się do utraty stateczności nasypu, dlatego winien zostać odpowiednio zabezpieczony. Zlokalizowana powierzchnia utraty stateczności jest najsłabszym elementem nasypu. Istnieje możliwość występowania powierzchni poślizgu z wyższym wskaźnikiem stateczności obejmujących swym zasięgiem większą część nasypu. Stąd konieczność przeprowadzenia dalszych obliczeń.

#### 4.2. Analiza stateczności przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie dla przypadku obciążenia od ruchu kolejowego jednego toru – T-1

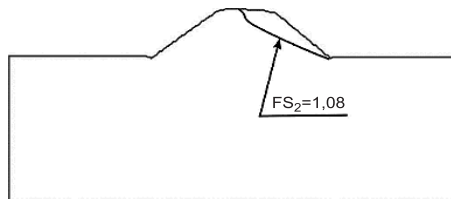
W celu lokalizacji kolejnych możliwych miejsc utraty stateczności przeprowadzono obliczenia programem FLAC v 4.0 z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR) (Cała M., Flisiak J. 2000 [1]). Metoda ta najogólniej polega na stopniowym podwyższaniu/zmniejszaniu parametrów wytrzymałościowych ( $c$ ,  $\phi$ ), co pozwala na zlokalizowanie kolejnych miejsc utraty stateczności i obserwację przebiegu procesów zniszczenia. W analizowanym przypadku parametry wytrzymałościowe były podwyższane aż do uzyskania stanu statecznego, a następnie obniżane. W efekcie wyznaczono kolejne możliwe etapy zniszczenia nasypu kolejowego. I tak dla wskaźnika stateczności  $FS_1 = 1,0$  (rys. 5, 6) otrzymano powierzchnię poślizgu obejmującą zasięgiem tor T-1. Kolejny etap zniszczenia sięgający głębiej przedstawiono dla  $FS_2 = 1,08$  (rys. 7) i tu powierzchnia poślizgu sięga aż do toru T-2. Dla wskaźnika stateczności  $FS_3 = 1,30$  (rys. 8) powstaje powierzchnia poślizgu i następuje ruch materiału w drugiej części nasypu.



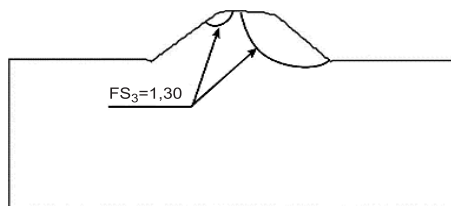
**Rys. 5.** Powierzchnia poślizgu  
wyznaczona na podstawie rozkładu odkształceń postaciowych dla  $FS_1 = 1,0$



**Rys. 6.** Powierzchnia poślizgu dla  $FS_1 = 1,00$



**Rys. 7.** Powierzchnia poślizgu dla  $FS_2 = 1,08$



**Rys. 8.** Powierzchnie poślizgu dla  $FS_3 = 1,30$



Reasumując w efekcie obliczeń I etapu, otrzymano płytko zlokalizowaną, bo sięgającą maksymalnie do kilkudziesięciu centymetrów powierzchnię poślizgu wierzchniej warstwy nasypu. Osunięcie się materiału budującego nasyp wzdłuż tej powierzchni nie wywiera obecnie wpływu na bezpieczeństwo nasypu, jednakże może przyczynić się w przyszłości do jego uszkodzenia. Dlatego należy przedsięwziąć środki zapobiegające dalszemu rozwojowi ruchów gruntu. W efekcie dalszych obliczeń uzyskano kolejne powierzchnie poślizgu sięgające głębiej i obejmujące swoim zasięgiem tory kolejowe. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg powierzchni poślizgu dla  $FS_2 = 1,08$ . Powierzchnie poślizgu dla  $FS_3 = 1,30$  (rys. 8) wskazują na możliwość wystąpienia ruchów ośrodka w obu częściach nasypu.

Otrzymana wartość wskaźnika stateczności  $FS_1$  i  $FS_2$  jest  $\geq 1$ , zatem można stwierdzić, iż skarpa obecnie jest w stanie równowagi granicznej i występujący zapas bezpieczeństwa jest niewystarczający. Nawet niewielkie obniżenie parametrów wytrzymałościowych (np. skutek opadów deszczu) może spowodować utratę stateczności o niebezpiecznych konsekwencjach. Ponadto niniejsze obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem tylko obciążenia od ruchu kolejowego toru T-1, a w rzeczywistości może zaistnieć sytuacja, gdy nasyp będzie obciążony przez ruch na obu torach lub obciążenie rzeczywiste może być wyższe niż to przyjęte do obliczeń. Niewielkie zachwianie równowagi może zainicjować ruch mas gruntowych budujących nasyp wzdłuż powierzchni poślizgu przedstawionych na powyższych rysunkach. W efekcie tego mogą nastąpić przemieszczenia się mas gruntowych. Wyznaczone powierzchnie poślizgu dla  $FS_1 = 1,00$  obejmują swoim zasięgiem trakcję kolejową (w zasięgu osuwającego się materiału nasypu znajduje się cały tor T-1, a dalej dla  $FS_2 = 1,08$  linia poślizgu zbliża się do toru T-2). Dlatego zasadne jest przeprojektowanie analizowanego nasypu ze szczególnym naciskiem na poprawę parametrów wytrzymałościowych gruntu budującego prawą część skarpy.

### 4.3. Podsumowanie przeprowadzonej analizy

Przeprowadzona wizja lokalna, a także przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, iż prawdopodobną przyczyną osunięcia się ziemi było znaczne nasiąknięcie wodą podtorza, co było efektem naruszenia wierzchniej warstwy izolacyjnej. Osunięcie się nasypu nastąpiło po długich okresach opadów deszczu, co spowodowało skumulowanie się w dłuższym okresie czasu stojącej, kilkudziesięciocentymetrowej warstwy wody w otoczeniu nasypu, który zlokalizowany był w centralnej części zlewni wód. Ponadto wiele zarzutów budzi nieprzemysłany i prawdopodobnie zrealizowany pośpiesznie sposób stabilizacji nasypu.

Przeprowadzona analiza stateczności pozwoliła stwierdzić, iż aktualnie w prawej, górnej części skarpy, gdzie trzymano wskaźnik stateczności  $FS_0 = 0,90$  występują płytkie zsuwy gruntu, które nie wpływają na stateczność analizowanego nasypu. Wyznaczone w I etapie płytkie powierzchnie poślizgu, znalazły potwierdzenie w obserwacjach przeprowadzonych na analizowanym nasypie, co świadczy to o dobrej jakości badań i poprawności modelu mechanicznego i numerycznego. Ponadto wyznaczone powierzchnie poślizgu zostały potwierdzone przeprowadzonymi profilowaniami georadarowymi. Występujące obecnie płytkie zsuwy materiału gruntowego winny być w miarę możliwości szybko ustabilizowane, gdyż mogą przyczynić się do erozji głębszych warstw nasypu. Obecnie nasyp jest stateczny, jednak jest to stan równowagi granicznej, tzw. „chwijnej równowagi”, gdyż niewielkie obniżenie właściwości wytrzymałościowych warstw budujących skarpy może doprowadzić do inicjacji ruchu

ośrodka gruntowego wzdłuż powierzchni poślizgu, która, jak to przedstawiono na rysunku 6, 7 i 8, swoim zasięgiem obejmuje linię kolejową. Zalecano przemodelowanie nasypu oraz odpowiedni drenaż i odprowadzenie wody gruntowej.

## 5. Podsumowanie

Problematyka występowania zjawisk osuwiskowych dotyczy zarówno zboczy naturalnych, jak i sztucznych. Szczególnie interesującym wydaje się być problem stateczności nasypów kolejowych, których aktualny stan techniczny budzi wiele zastrzeżeń. Wobec wejścia Polski w strukturę Unii Europejskiej oraz przystosowywania trakcji kolejowych do dużych prędkości, problem stateczności nasypów kolejowych staje się zagadnieniem bardzo aktualnym i otwartym. Linie dużych prędkości stanowią przyszłość kolei. Powoduje to poszukiwanie wciąż nowych rozwiązań technicznych nie tylko co do konstrukcji pojazdów szynowych, ale także poszukiwanie niekonwencjonalnych konstrukcji nawierzchni. Nasypy kolejowe linii dużych prędkości, aby stanowić bezpieczne podłoże, winny charakteryzować się dużą stabilnością i sztywnością, eliminując powstawanie odkształceń czy osiadań torowiska. Powoduje to konieczność weryfikacji stosowanych metod określania stateczności nasypów kolejowych.

Szczególnie przydatne do określania stanu stateczności stają się metody numeryczne, zwłaszcza zastosowana metodyka redukcji parametrów wytrzymałościowych, umożliwiająca obserwację przebiegu procesu zniszczenia. Możliwości obliczeniowe zaprezentowano na przykładzie rzeczywistego osuwiska powstałego na międzynarodowej linii kolejowej. Przy czym w przypadku analizy stateczności dużych odcinków linii kolejowej konieczne stają się stosowanie metod nieinwazyjnych (np. geofizycznych), co umożliwi prowadzenie obliczeń w miejscach najbardziej zagrożonych.

## Literatura:

- [1] Cała M., Flisiak J.: Analiza stateczności skarp z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie. XXVI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, 2003
- [2] Itasca Consulting Group. FLAC v. 4.0 & FLAC/Slope. Users Manual, 2002
- [3] Ministerstwo Budownictwa i Transportu, [www.mi.gov.pl](http://www.mi.gov.pl)
- [4] Pisarczyk S.: Gruntoznawstwo Inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
- [5] Thiel K.: Własności fizyko-mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych. Biblioteka Naukowa Hydrotechnika nr 19, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1995
- [6] Towpik K.: Infrastruktura Transportu kolejowego. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [7] Zabuski L., Thiel K., Bober L.: Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1999

### Chosen problems of railway slope stability analysis

ABSTRACT: This paper shows the problem of landslides occurring on railway embankments or trenches. One case study (landslide after heavy rainfall in spring 2004) of slope instability on international railway was discussed. All slope stability analysis were performed with Finite Difference Code FLAC with application of Modified Shear Strength Reduction Method.