



Wybrane zagadnienia analizy stateczności nasypów kolejowych

Metody do weryfikacji

Agnieszka Stopkowicz, Marek Cała

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

1. Wstęp

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 w rejonach górskich najwcześniejszą stały się przedmiotem badań, co znajduje odzwierciedlenie w wielu opracowaniach literaturowych. Wraz z rozwojem budownictwa i transportu lądowego problem osuwisk pojawił się w odniesieniu do zbroczy sztucznie ukształtowanych przez człowieka, jak np. nasypy drogowe i kolejowe. O ile naruszenia funkcjonalności dróg przez zjawiska osuwiskowe znajduje się w centrum powszechnego zainteresowania, to problem stateczności nasypów i wykopów kolejowych zdaje się być rzadziej podkreślany.

Po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej powstała konieczność dostosowania infrastruktury kolejowej do standardów unijnych, a także przystosowania

infrastruktury dróg kolejowych do dużych prędkości, przekraczających 200–250 km/h [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 przypadł na rok 1835, kiedy nastąpiło otwarcie linii kolejowej z Warszawy do Zagłębia Dąbrowskiego i Krakowa [8]. W następnych latach powstały kolejne linie kolejowe w obrębach poszczególnych zaborów. Różna szerokość sieci kolejowych stanowiła główny problem integracji transportu kolejowego w okresie międzywojennym.

Przed II wojną światową Polska posiadała sprawnie funkcjonujący system kolejowy, obejmujący 306 km linii przystosowanych do prędkości 115 km/h oraz 2035 km z dopuszczeniem prędkości 100 km/h. Wybuch II wojny światowej przerwał jej rozbudowę, a także przyczynił się do znacznego zniszczenia zabudowy kolejowej. Po 1945 r. nastąpił okres naprawy zniszczeń i dalszej rozbudowy infrastruktury kolejowej. W 2002 r. długość linii normalnotorowych i szeroko-

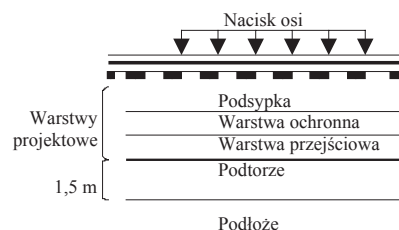
torowych wynosiła 20 000 km, a łączna długość torów szlakowych i głównych zasadniczych na stacjach osiągnęła 31 000 km [6]. W ostatnich latach zlikwidowano niektóre linie kolejowe. Aktualnie, jak podaje Ministerstwo Transportu [3], długość eksploatowanych linii kolejowych wynosi 21 000 km.

Polska sieć kolejowa jest dobrze rozwinięta pod względem ilościowym i zajmuje trzecie miejsce wśród krajów europejskich (ryc. 1). Jednakże znajduje się ona w znacznie gorszym stanie technicznym. Według danych przedstawionych przez Ministerstwo Transportu [3] 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.

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. Szczególnie groźna jest utrata stateczności nasypów, które winny stanowić stabilne i nieodkształcalne podłoże. W budowie nasypów wyróżnić można następujące, główne elementy (ryc. 2 [6]):

- podsypka, kruszywo najczęściej ze skał magmowych, gębinowych 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. wychłapki, świadczące o utracie zdolności filtracyjnych materiału.
- podtorze – główna część nasypu przenosząca obciążenia statyczne i dynamiczne, zbudowana z gruntów w kształcie nasypów bądź przekopów.



Ryc. 2. Schemat budowy nasypu kolejowego, za: [6]



Ryc. 1. Sieć polskich linii kolejowych z zaznaczoną lokalizacją projektów modernizacyjnych na lata 2004–2006 wg Ministerstwa Transportu

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



Ryc. 3. Nasyp kolejowy z uzupełnieniem materiału w obrębie powierzchniowego zsuwu ośrodka, fot. Geopartner

Doprowadzić to może do utraty stateczności nasypów. W ich obrębie często obserwować można zsuwy płytkich, wierzchnich warstw (ryc. 3) generalnie nie naruszających nośności nasypu. Jednakże ruch ośrodka powoduje odsłonięcie głębszych warstw budujących skarpe, 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, jak 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 zjawiskami osuwiskowymi było 86 km (zatem na 10 km linii przypadało 1 osuwisko [7]). Stan aktualny, jak można przypuszczać, uległ pogorszeniu.

4. Analiza stateczności nasypu kolejowego

Osuwisko powstało na międzynarodowej linii kolejowej po okresie intensywnych opadów. Prawdopodobnie wcześniej przeprowadzono w tym miejscu reprofilowanie starego, zbudowanego jeszcze



Ryc. 4. Osuwisko w obrębie nasypu kolejowego, fot. Geopartner

przez Niemców, nasypu, co spowodowało naruszenie zewnętrznych warstw ochronnych i mogło się przyczynić do zainicjowania ruchów osuwiskowych.

W miejscu osuwiska przeprowadzono uzupełnienie osuwiska 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.

Obliczenia stateczności przeprowadzono dla określenia aktualnych warunków stateczności nasypu kolejowego. Analizę przeprowadzono przy zastosowaniu programu FLAC opartego o Metodę Różnic Skończonych [2]. Nasyp miał wysokość od 8,35 do 9,35 m i kąt nachylenia skarp ok. 35°. Obliczenia wykonano w następujących etapach: I – obliczenia stateczności FLAC Slope w celu wyznaczenia „najsłabszego 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 [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 profilowań

georadarowych przeprowadzonych w tym samym przekroju.

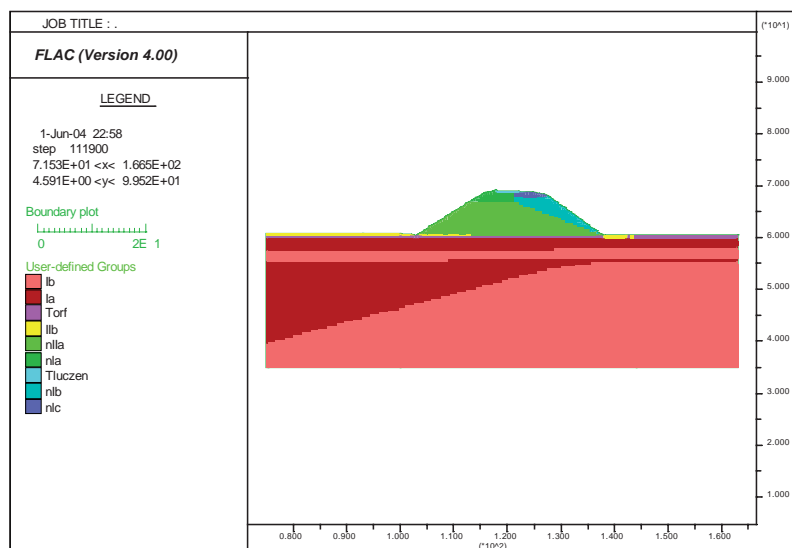


Ryc. 5. Zrekonstruowany nasyp. Białą linią zaznaczono zasięg podciągania wody gruntowej, fot. Geopartner



Ryc. 6. Zrekonstruowany nasyp. Zaznaczone widoczne powierzchniowe osuwanie się materiału, fot. Geopartner

W oparciu o wyniki badań in situ i badań laboratoryjnych stworzono model obliczeniowy (ryc. 7), któremu przypisano parametry przedstawione w tabeli 1.



Ryc. 7. Model obliczeniowy

	Ciężar obj. γ [kN/m ³] wg PN-81-B-03020	Kąt tarcia ϕ [°]	Spójność c [kPa]
lb	20.00	32.9	-
la	19.00	30.2	-
Torf	13.65	6.2	8.500
llb	18.50	18.0	30.000
nlla	20.00	22.3	17.500
nlb	17.00	32.3	-
nla	16.50	29.3	-
nic	17.50	38.4	-
Tłuczeń	21.00	17.0	24.000

Model ośrodka: – model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra
– MSSR

Poziom ZWG wg pomiarów

Obciążenie od ruchu kolejowego 90 kPa

Tab. 1. Parametry modelu obliczeniowego

4.1. Wyniki analizy stateczności przeprowadzonej przy wykorzystaniu FLAC Slope

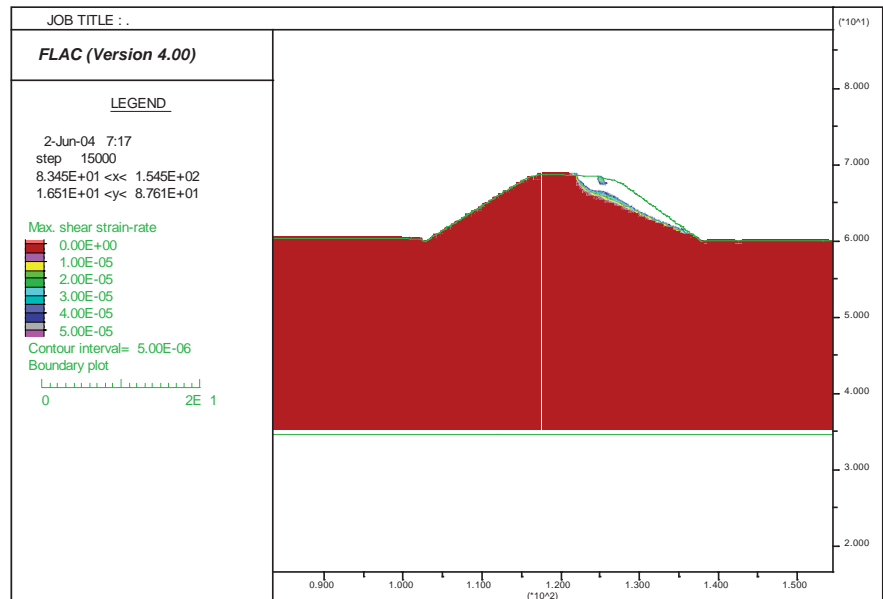
Dla modelu obliczeniowego przedstawionego na rycinie 7 otrzymano wskaźnik stateczności $FS_0=0,90$. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów zakładając, iż nasyp jest nieobciążony, z obciążeniem od ruchu kolejowego dla toru T-1, z obciążeniem toru T-2.



Ryc. 8. Wyznaczona powierzchnia poślizgu dla $FS_0 = 0,90$

W obydwu przypadkach z uwzględnionym obciążeniem otrzymano taką samą wartość wskaźnika stateczności $FS_0=0,90$, wobec czego zaprezentowano w niniejszym artykule tylko jeden z wariantów, a mianowicie wariant z obciążonym torem T-1 (ryc. 8). Powierzchnia poślizgu obejmuje tylko wierzchnią, kilkudziesięciocentymetrową 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 jego stateczności, dlatego winien on 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

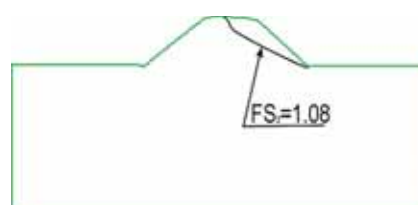


Ryc. 9. Powierzchnia poślizgu wyznaczona na podstawie rozkładu odkształceń postaciowych dla $FS_1=1,0$

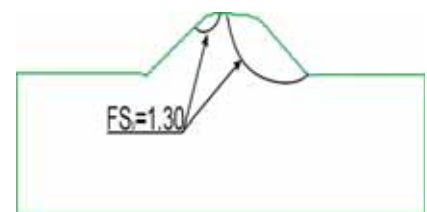
W celu lokalizacji kolejnych miejsc utraty stateczności, przeprowadzono obliczenia programem FLAC v 4.0 z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (MSSR) [1]. Metoda ta najogólniej polega na stopniowym podwyższaniu/ zmniejszaniu parametrów wytrzymałościowych (c, ϕ), co pozwala 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 $FS_1=1,0$ (ryc. 9, 10) otrzymano powierzchnię poślizgu obejmującą zasięgiem tor T-1. Kolejny etap zniszczenia sięgający głębiej przedstawiono dla $FS_2=1,08$ (ryc. 11) i tu powierzchnia poślizgu sięga aż do toru T-2. Dla wskaźnika stateczności $FS_3=1,30$ (ryc. 12) powstaje powierzchnia poślizgu i następuje ruch materiału w drugiej części nasypu.



Ryc. 10. Powierzchnia poślizgu dla $FS_1=1,00$



Ryc. 11. Powierzchnia poślizgu dla $FS_2=1,08$



Ryc. 12. 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 stateczność i bezpieczeństwo nasypu, jednak 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 rycinie 11 przedstawiono przebieg powierzchni poślizgu dla $FS_2=1,08$. Powierzchnie poślizgu dla $FS_3=1,30$ (ryc. 12) wskazują na możliwość wystąpienia ruchów ośrodka w obu częściach nasypu.

Otrzymana wartość wskaźnika stateczności FS_1 i FS_2 jest ≥ 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, podczas gdy w rzeczywistości może zaistnieć sytuacja, kiedy nasyp będzie obciążony przez ruch na obu torach lub też obciążenie rzeczywiste może być wyż-

sze niż przyjęte do obliczeń. Niewielkie zachwianie równowagi może zainicjować ruch mas gruntowych budujących nasyp wzdłuż powierzchni poślizgu, przedstawionych na powyższych rycinach. 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 wykonane 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 stojącej, kilkudziesięciocentymetrowej warstwy wody w otoczeniu nasypu zlokalizowanego w centralnej części zlewni wód. Ponadto wiele zarzutów budzi nieprzemyślany i prawdopodobnie zrealizowany nasyp pośpiesznie sposób stabilizacji nasypu.

Przeprowadzona analiza stateczności pozwoliła stwierdzić, iż aktualnie w prawej górnej części skarpy, gdzie otrzymano wskaźnik stateczności $FS_0=0,90$, występują płytkie zsuwy gruntu, nie wpływające na stateczność analizowanego nasypu. Wyznaczone w I etapie płytkie powierzchnie poślizgu znalazły potwierdzenie w obserwacjach przeprowadzonych na analizowanym nasypie, co świadczy 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. chwiejnej równowagi, gdyż niewielkie obniżenie właściwości wytrzymałościowych warstw budujących skarpy może doprowadzić do inicjacji ruchu ośrodka gruntowego wzdłuż powierzchni poślizgu, która, jak to przedstawiono na rycinach 10, 11 i 12, swoim zasięgiem obejmuje linię kolejową. Zalecono przemodelowanie nasypu oraz odpowiedni drenaż i odprowadzenie wody gruntowej.

Podsumowanie

Problematyka występowania zjawisk osuwiskowych dotyka zarówno zbczy

naturalnych, jak i sztucznych. Szczególnie interesujący wydaje się być problem stateczności nasypów kolejowych, których aktualny stan techniczny budzi wiele zastrzeżeń. Po akcesji Polski do Unii Europejskiej i konieczności przystosowywania trakcji kolejowych do dużych prędkości, problem stateczności nasypów kolejowych staje się zagadnieniem bardzo aktualnym i otwartym. Linie dużych prędkości to przyszłość kolei. Powoduje to poszukiwanie wciąż nowych rozwiązań technicznych nie tylko co do konstrukcji pojazdów szynowych, ale także poszukiwanie niekonwencjonalnych konstrukcji nawierzchni. By stanowić bezpieczne podłoże, nasypy kolejowe linii dużych prędkości powinny 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, pozwalająca na 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 staje się stosowanie metod nieinwazyjnych (np. geofizycznych), w celu wskazania miejsc najbardziej zagrożonych.

Literatura:

1. Cała M., Flisiak J.: *Analiza stateczności skarpy z zastosowaniem zmodyfikowanej metody redukcji wytrzymałości na ścinanie*. XXVI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Bukowina Tatrzańska 2003.
2. Itasca Consulting Group. FLAC v 4.0 & FLAC Slope. Users Manual 2002.
3. Ministerstwo Transportu, <http://www.mt.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.
8. *Historia kolei na terenie Polski: 1835–1843*. Oprac. J. Wasilewski [on line]. Kraków [dostęp 10 lutego 2007]. Dostępny w Internecie: <http://www.pkp.pl>.

Artykuł ukazał się w materiałach Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii

XXIII

Konferencja
Naukowo-Techniczna
Szczecin – Międzyzdroje
23 – 26 maja 2007



zapobieganie
diagnostyka
naprawy
rekonstrukcje

KOMITET ORGANIZACYJNY
Politechnika Szczecińska
Wydział Budownictwa i Architektury
70-311 Szczecin, al. Piastów 50
tel. /fax 091 449 46 60
tel.: 091 449 47 77
e-mail: awarie@ps.pl
www.awarie.ps.pl

BIURO KONFERENCJI
70-483 Szczecin
al. Wojska polskiego 99
tel.: 091 423 33 52
fax: 091 423 34 97