

OSUWISKO NA LINII KOLEJOWEJ NR 8 WARSZAWA – KRAKÓW W SADOWIU – NOWE MOŻLIWOŚCI MONITOROWANIA¹

Elżbieta Pilecka

dr hab. inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 2179, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

Mirosława Bazarnik

dr hab. inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 2179, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

Aleksandra Pawlak-Burakowska

mgr inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 2358, e-mail: apawlak@pk.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem osuwiska w miejscowości Sadowie na ważnej linii kolejowej nr 8 Kraków - Warszawa. Osuwisko to wykazywało aktywność już od 1934 roku, a w 2010 roku po ulewnych deszczach i powodzi w Polsce uaktywniło się i zagroziło linii kolejowej. Omówiono mechanizm powstawania osuwiska i budowę geologiczną obszaru, na którym znajdują się osuwiska. Zaproponowano uzupełnienie monitoringu osuwiska metodą skanowania laserowego nowoczesnym przyrządem RIEGL-VZ 400 i pokazano wykonany pomiar bazowy.

Słowa kluczowe: osuwiska, skaner laserowy

Wprowadzenie

Po fali ulewnych deszczy, jakie miały miejsce w 2010 roku oraz intensywnych roztopach wiosną 2011 roku, odnotowano uaktywnienie wielu osuwisk na terenie całego kraju. Spora część z nich spowodowała zniszczenie lokalnej infrastruktury, np.: zniszczenie dróg, budynków mieszkalnych, linii wysokiego napięcia oraz lokalnej infrastruktury kolejowej. Największą liczbę osuwisk obserwuje się na południu Polski, w Karpatach - stanowią one ok.95% wszystkich osuwisk (rys. 1). Na pozostałym obszarze osuwiska występują mniej licznie, niemniej jednak stanowią istotne zagrożenie dla lokalnej infrastruktury komunikacyjnej.

Z danych literaturowych wiadomo, że w latach 1967-1970, tylko na terenie fliszu karpackiego, liniom kolejowym 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) [12]. Aktualnie Państwowy Instytut Geologiczny (PIG-PIB) realizuje program SOPO, który ma na celu

¹ Wkład autorów w publikację: Pilecka E. 35%, Bazarnik M. 35%, Pawlak-Burakowska A. 30%

szczegółową inwentaryzację osuwisk występujących w Polsce. W przypadku linii kolejowych obserwuje się zwiększone ryzyko pojawienia się ruchów osuwiskowych w wyniku podcięcia stoku, obciążenia nasypem, czy też wykonania głębokiego wykopu. Wystąpienie osuwiska może być przyczyną groźnych wypadków kolejowych, jak również powodować bardzo duże straty. Rok 2012 był w porównaniu z latami 2010 i 2011 zdecydowanie bezpieczniejszy pod względem zagrożenia osuwiskowego z uwagi na małe opady deszczu. Intensywne opady atmosferyczne wpływają na zmianę właściwości gruntu (kohezja), często inicjując powstanie osuwiska.



Rys. 1. Rozmieszczenie osuwisk w Polsce a główne szlaki transportowe (zestawiono na podstawie mapy linii kolejowych PLK {15} oraz mapy osuwisk opracowanej przez PIG - PIB {16})

Jednym z najbardziej uciążliwych osuwisk, którego skutki odczuwało większość podróżujących liniami PKP, jest osuwisko zlokalizowane w miejscowości Sadowie, na trasie linii kolejowej nr 8, Kraków Główny – Warszawa Zachodnia. W wyniku intensywnych opadów deszczu w 2010 roku, osuwisko uaktywniło się, a zasięg niszy osuwiskowej uległ kolejnemu powiększeniu. Zsuwające się masy

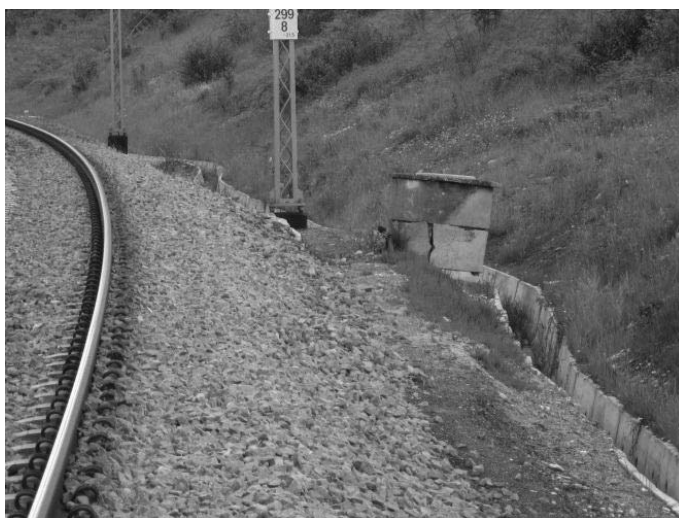
gruntu spowodowały uszkodzenie torów kolejowych, wypychając ku górze odciążone dno wykopu wraz z torem kolejowym, na długości około 400 m. Krawędź osuwiska przesunęła się powyżej korony skarpy niszcząc drogę i dochodząc do granic zabudowy wsi Sadowie. Powstało zagrożenie uszkodzenia znajdujących się powyżej drogi budynków mieszkalnych. Na skutek kolejnych zsuwów całkowicie zniszczone zostały istniejące na zboczu elementy odwodnienia (rys. 3a i 3b). Na zdjęciach z maja i czerwca 2010 roku widoczne są pozostałości przechylonych studni z żelbetowych kręgów i poprzesuwanych korytek betonowych odwodnienia wzdłuż torów, jak również deformacje samego toru (rys. 2a i 2b).



Rys. 2a. Maj 2010 roku – widoczna wyraźna deformacja toru spowodowana wypychaniem mas gruntu (mat. arch. PLK)



Rys. 2b. Maj 2010 roku - przejazd pociągu po zdeformowanym torze (mat. arch. PLK)



Rys. 3a. Maj 2012 roku - widoczne deformacje rowu odwadniającego oraz spękanie studzienki (mat. arch. PLK)



Rys. 3b. Czerwiec 2012 roku - widoczny całkowicie zgnieciony rów odwadniający (mat. arch. PLK)

Lokalizacja osuwiska w Sadowiu

Osuwisko zlokalizowane jest na północny wschód od Krakowa, wzdłuż linii kolejowej nr 8 Tunel – Kraków (trasa Warszawa – Kraków) w miejscowości Sadowie, na terenie gminy Kocmyrzów – Luborzycza (rys. 4).

Omawiane osuwisko położone jest na zboczu skarpy przekopu linii kolejowej. Obejmuje swym zasięgiem około 400 m. Koroną skarpy przebiega droga gminna. Obszar pomiędzy torowiskiem a drogą jest niezabudowany, porośnięty trawą oraz

samosiejkami krzewów i drzew. W wyniku zsuwającego się nierównomiernie materiału ziemnego zbocze nasypu przekopu zostało pofałdowane.



Rys. 4. Mapa poglądowa obrazująca położenie wsi Sadowie (17)



Rys. 5. Mapa przedstawiająca rzeźbę terenu w rejonie linii kolejowej nr 8 w miejscowości Sadowie (17)

Omawiany obszar tworzą dwa wzgórza: zachodnie, izolowane - o wys. 317 m n.p.m i wschodnie - o krętym biegu linii grzbietowej 302 m n.p.m. (rys. 5). Wzniesienia rozdzielone były szeroką przełęczą, przez którą wzdłuż wschodniego zbocza wzgórza został poprowadzony przekop kolejowy. Głębokość przekopu w tym rejonie wynosiła 13,5 m.

Rys historyczny osuwiska w Sadowiu

W 1934 roku zakończono budowę odcinka linii kolejowej Tunel - Kraków na trasie Kraków - Warszawa [10]. Bezpośrednio po otwarciu linii zaobserwowano na odcinku około 1 km osuwanie się mas iłu i gliny, budujących zbocza głębokiego na kilkanaście metrów przekopu we wsi Sadowie. Osuwający się materiał częściowo zasypywał tor, a także powodował wypychanie mas iłu z dna wykopu wraz z torem ku górze, do wysokości około 1 m. Osuwanie mas ziemnych na tym odcinku powtarzało się wielokrotnie niekiedy przybierając na sile, jak np. w roku 1942, 1953, 1962 czy 2010.

W ciągu kilkudziesięciu lat użytkowania linii kolejowej nr 8 z Krakowa do Warszawy przeprowadzono bardzo wiele procedur w celu ustabilizowania zboczy przekopu (między innymi odwodnienie powierzchni przez kopanie głębokich studni, wzmocnienie zbocza oraz usunięcie koluwium), niemniej jednak tylko częściowo udało się ograniczyć destrukcyjny wpływ osuwiska na linię kolejową.

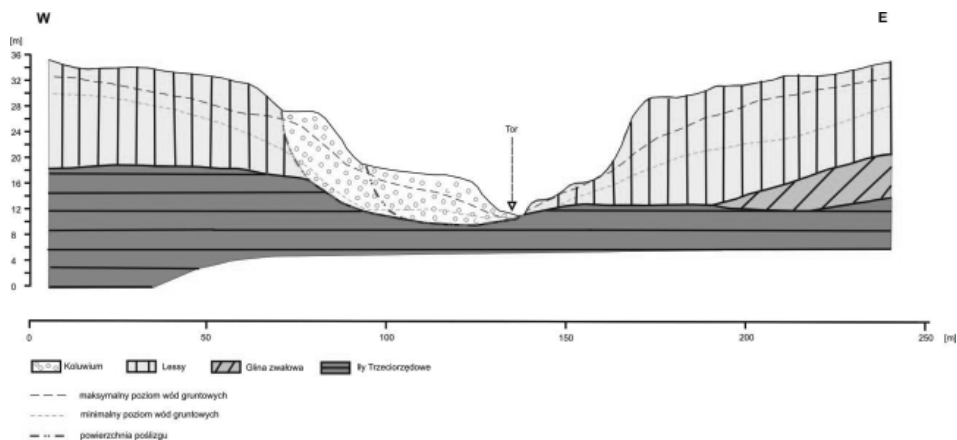
Prowadzone były okresowe obserwacje osuwiska, które wskazywały na brak całkowitej stabilizacji. Na przełomie lat obserwowano przemieszczenia punktów kontrolnych rzędu od 6 do 20 cm. W latach 70. został wykonany głęboki drenaż [1]. System został zainstalowany na głębokości do 6 m, nachylenie skarp zostało zmniejszone do 1:3, a gleba na zachodniej skarpcie częściowo wymieniona. Wschodnią skarpcę wzmocniono.

W 2010 roku po długotrwałych ulewnych deszczach nastąpiło uaktywnienie osuwiska, co spowodowało znaczące utrudnienia w ruchu kolejowym na tym odcinku. Zsuwające się masy gruntu spowodowały uszkodzenie torów kolejowych, wypychając ku górze odciążone dno wykopu wraz z torem kolejowym, na długości około 400 m. Osuwisko spowodowało również uszkodzenia drogi gminnej. W chwili obecnej są prowadzone prace mające na celu ustabilizowanie osuwiska i wyeliminowanie zagrożenia dla ruchu kolejowego. Niemniej jednak podczas prowadzenia prac napotkano na liczne trudności. Zaobserwowano obsuwanie się mas ziemnych na kolejnych odcinkach, co związane jest bezpośrednio z budową geologiczną tego obszaru.

Budowa geologiczna obszaru na którym zlokalizowane jest osuwisko

Obszar, na którym zlokalizowane jest osuwisko, zbudowany jest z nietypowych utworów lessowych, glin zwałowych, trzeciorzędowych iłów i margli kredowych (rys. 6). Lessy często stanowią koluwium, są rozwinięte jako nieregularne warstwy żółtych i szarych mułów i iłów pylastych [1]. W warstwach lessu z fragmentami wapieni obserwowano elementy wskazujące na częściowo deluwialny charakter tych osadów. Grubość lessów wynosi od kilku do kilkunastu metrów. Zasadniczą część lessów obejmuje teren bogaty w wody podziemne, co powoduje wyraźne obniżenie parametrów geotechnicznych. Lessy są podścielone przez trzeciorzędo-

we ily mioceneskie za wyjątkiem bruzd w górnej warstwie iłó, które są lokalnie wypełnione glinami zwałowymi. Litologicznie, ily są dość jednorodne i posiadają system drobnych szczelin częściowo wypełnionych mułami i piaskami drobnymi. Ich grubość sięga od kilku do nawet 30 m. Górna warstwa iłó została zakłócona przez erozję i niekiedy procesy glacitektoniczne [1]. Osady trzeciorzędowe, w postaci iłó wypełniają zagłębienia w górnej części margli kredowych.



Rys. 6. Przekrój geologiczny przez przekop (vide Bazyński, Frankowski {1})

Warunki hydrogeologiczne

Omawiany teren znajduje się na obszarze zlewni potoku Baranówka, który uchodzi do rzeki Dłubni (lewego dopływu Wisły). Woda gruntowa jest jednym z najważniejszych czynników mających wpływ na stabilność skarpy przekopu kolejowego. Woda obejmuje swym zasięgiem zarówno margle kredowe, lessy, jak również ily trzeciorzędowe [1]. Wszystkie te typy skał stanowią raczej nietypowe środowisko występowania wody gruntowej. W licznie występujących spękaniach w górnej warstwie iłó, w szczególności wypełnionych mułem i drobnym piaskiem, woda może krążyć, a jej obecność może niekorzystnie wpływać na (na ogół) dobre właściwości geotechniczne iłó, co w konsekwencji może prowadzić do tworzenia się stref posłizgu.

Główny poziom wodonośny występuje w lessach [1]. Zwierciadło wody zalega stosunkowo płytko. Poziom lustra wody gruntowej znajduje się na głębokości około 1,5 m poniżej poziomu terenu w rejonie torów (na poziomie dna rowu biegnącego wzdłuż nasypu kolejowego), oraz 2,4 – 3,3 m poniżej poziomu drogi na koronie skarpy.

Wody gruntowe zasilane, są przez wody opadowe, które infiltrują poprzez przepuszczalne utwory czwartorzędowe. Intensywność zjawiska jest zatem, w dużej mierze, uzależniona od ilości i intensywności opadów atmosferycznych. Wody

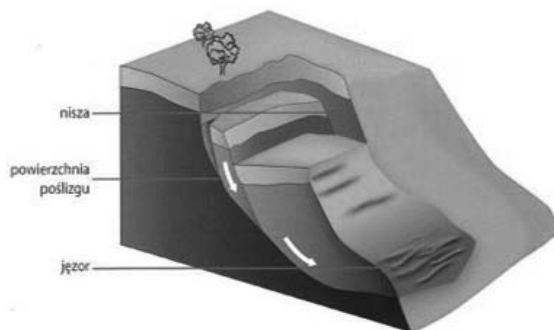
opadowe przesiąkają przez utwory lessowe do nieprzepuszczalnych ilów i tworzą w podłożu zbiorniki wodne, powodując zagrożenie.

Największe prawdopodobieństwo uaktywnienia się osuwiska występuje po okresach intensywnych opadów, niemniej jednak możliwe są opóźnienia w uruchomieniu stref poślizgu, co wynika z dużej bezwładności hydrogeologicznej skał podłoża w okresach suchych. Skomplikowany układ warstw i stosunkowo niski współczynnik filtracji, powodują zróżnicowanie nasycenia wodą, dając często rezultat w postaci opóźnienia reakcji w stosunku do zewnętrznych czynników (najczęściej atmosferycznych). Dodatkowo słaba przepuszczalność podłoża skalnego i stosunkowo strome nachylenie powierzchni są odpowiedzialne za kształt powierzchni przepływu wody pod ciśnieniem atmosferycznym, dodatkowo bardzo zmienna przepuszczalność lessów wpływa na niestałość i unieruchomienia wód gruntowych. Tak więc, po okresowych intensywnych opadach, ciśnienie hydrodynamiczne wody wzrasta i daje w wyniku podwyższenie wilgotności w lessach, a w szczególności w warstwach mułowców, które charakteryzują się wyższą przepuszczalnością, co z kolei, wpływa na stabilność stoku, a więc pogorszenie parametrów wytrzymałościowych.

Korelacja czasowa pomiędzy oscylacjami wód gruntowych i opadów może być trudna do uchwycenia.

Ogólne mechanizmy powstawania osuwisk

Utrata stateczności skarpy i zboczy, będąca przyczyną osuwania się mas ziemnych, następuje w wyniku przekroczenia wytrzymałości gruntu na ścinanie wzdłuż dowolnej (ale ciągłej) powierzchni zwanej powierzchnią poślizgu (rys. 7). W przypadkach gruntów sypkich, wytrzymałość determinowana jest oporami sił tarcia wewnętrznego. W ośrodkach spoistych, o ich wytrzymałości decydują zarówno siły tarcia wewnętrznego jak i siły spójności. W problematyce unikania skutków osuwisk najważniejsze jest: wyznaczenie zasięgu osuwiska, skarpy głównej i przebiegu powierzchni poślizgu. Bez tych informacji nie da się prawidłowo zabezpieczyć osuwiska.



Rys. 7. Schemat powstawania powierzchni poślizgu {2}

Przyczyną powstania osuwiska może być np.: podcięcie zbocza przez erozję, głębokie zwietrzenie i rozluźnienie warstw tworzących zbocze, przeciążenie zbocza wodą, która pochodzi z opadów atmosferycznych, działalność człowieka, lub niewłaściwe prowadzenie robót budowlanych. Czynniki wpływające na uruchomienie mas ziemnych możemy podzielić na aktywne i pasywne. Do czynników aktywnych będziemy zaliczać, takie, które ulegają zmianie w czasie np.:

- wody opadowe, podziemne i powierzchniowe,
- wahania temperatur, ich zakres, zmiana w czasie
- stopień nasłonecznienia,
- zmiany wysokości i nachylenia zbocza lub skarpy,
- statyczne i dynamiczne obciążenia,
- sposób użytkowania terenu.

Pasywnymi czynnikami, które w zasadzie nie ulegają zmianom są:

- budowa geologiczna,
- nachylenie warstw,
- uskoki,
- spękania.

Obydwe grupy czynników mogą współwystępować zwiększając tym samym ryzyko wystąpienia osuwisk, tak jak ma to miejsce w Sadowiu. Na dosyć specyficzną budowę geologiczną tego obszaru nałożyło się wykonanie głębokiego przekopu w wyniku, którego usunięty został blok ziemny, podtrzymujący masy sąsiednie, a tym samym usunięty został nacisk, jaki ten blok wywierał na swoje podłoże. Ponadto przekop przebił główny poziom wód gruntowych, występujących w strefie granicznej czwartorzędu i ilów mioceńskich, które zostały odsłonięte na znacznej przestrzeni w dnie przekopu. Dodatkowo intensywne opady deszczu wpłynęły negatywnie na stopień zawodnienia skarpy, a tym samym na jej stateczność, bowiem wytrzymałość na ścinanie gruntów spoistych jest funkcją wilgotności. Lessy nie są w pełni nasycone wodą, nawet poniżej obserwowanego lustra wody. Nieprzepuszczalna warstwa ilów mioceńskich występująca poniżej lessów stanowi naturalną strefę poślizgu. Podczas gdy woda zbierająca się na kontakcie z nieprzepuszczalnymi ilami niekorzystnie wpływa na parametry wytrzymałościowe.

Zatem podsumowując za główne przyczyny powstania osuwiska w rejonie miejscowości Sadowie możemy uznać:

- duże nachylenie stoku (około 40°);
- częste drgania i wstrząsy wywołane ruchem pociągów;
- infiltracja wód opadowych i roztopowych w głąb skarpy;
- przebicie głównego zbiornika wód gruntowych powyżej ilów mioceńskich.

Przebieg procesów osuwiskowych

Procesy osuwiskowe mogą przebiegać w trzech kolejnych fazach:

- 1) fazie przygotowawczej,

- 2) fazie ruchu,
- 3) fazie stabilizacji

Faza przygotowawcza charakteryzuje się narastaniem naprężeń i prowadzi do wystąpienia naprężeń granicznych w gruncie. Może to prowadzić do wystąpienia powierzchni nieciągłości w gruncie, tj. doprowadza do powstania spękań lub szczelin. Występujące w miejscach przekroczenia wytrzymałości szczeliny ułatwiają wnikanie wód opadowych. Powoduje to dalsze obniżenie parametrów wytrzymałościowych gruntów na skutek podwyższenia wilgotności, ciśnienia hydrostatycznego wody oraz pociąga za sobą szybki wzrost liczby szczelin i ich dynamiki. Następuje łączenie szczelin i kształtuje się powierzchnia poślizgu znamionująca *fazę właściwego ruchu osuwiskowego*. Obszar objęty naprężeniami granicznymi rozpoczyna szybki ruch. W niższych, bardziej płaskich, odcinkach zachodzi zatrzymanie mas gruntowych i następuje faza równowagi krótkotrwałej, która może być naruszona przy dalszym działaniu niekorzystnych czynników. *Faza stabilizacji* polega głównie na osiadaniu i konsolidacji mas gruntowych naruszonych przez osuwisko.

Osuwiska mogą mieć przebieg powtarzalny (np. co wiosnę), lub występować jednorazowo. Czas trwania każdej z wymienionych faz może być różny i zależy od charakteru i intensywności działających czynników.

Według teorii Coulomba –Mohra kryterium wytrzymałości mas skalnych na zboczu można zapisać wzorem:

$$\tau = \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (1)$$

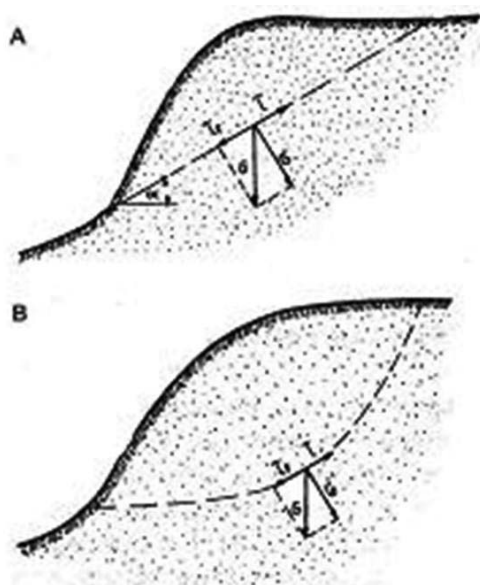
gdzie:

- τ - naprężenie określające wytrzymałość skał budujących zbocze na ścinanie,
- σ - wartość naprężenia normalnego do powierzchni ścięcia,;
- φ - kąt tarcia wewnętrznego,
- c - kohezja (spójność).

Jeżeli $\tau < \tau_c$ (naprężenie ścinające) to następuje ruch osuwiskowy. Kluczowe znaczenie dla rozpoznania zagrożenia osuwiskowego ma wyznaczenie powierzchni poślizgu (rys. 8). Najczęściej wykonywane jest ono metodami wiertniczymi i geofizycznymi [9].

Opracowany model budowy geologicznej na podstawie danych archiwalnych (map i przekrojów geologicznych, dokumentacji geotechnicznych, itp.) oraz danych z wierceń i badań laboratoryjnych może posłużyć do ustalenia modelu numerycznego, oraz symulacji ruchów osuwiskowych.

Ruchy mas gruntu mogą charakteryzować się ciągłą aktywnością (osuwiska aktywne) lub okresową (okresowo-aktywne). Osuwiska aktywne wyróżniają się wyraźną rzeźbą i szeregiem charakterystycznych form, takich jak: szczeliny, spękania, zmieniające się „wybrzuszenia” powierzchni terenu, występowanie zagłębień bezodpływowych i małych zbiorników wodnych. Osuwiska aktywne powinny być ciągle monitorowane, nawet po wykonaniu stabilizacji, ze względu zagrożenie, jakie stanowią dla pobliskiej infrastruktury.



Rys. 8. Schemat rozkładu naprężeń na powierzchni poślizgu [11]

Osuwiska okresowo-aktywne to tereny objęte procesem osuwania w przeszłości. W takich obszarach bardzo prawdopodobne jest uaktywnienie się osuwiska. Tereny tych osuwisk powinny być monitorowane po silnych długotrwałych opadach lub po działaniu innych czynników powodujących możliwą aktywację osuwiska. Są one równie niebezpieczne dla infrastruktury jak osuwiska aktywne.

Niekiedy mówi się o tzw. osuwiskach nieaktywnych, czyli takich, dla których nie odnotowano przemieszczeń mas ziemnych przez około 20 ostatnich lat. Nie oznacza to, że tereny te już nie podlegają ruchom osuwiskowym. W przypadku długotrwałego działania jakiegoś czynnika inicjującego osuwisko należy je okresowo monitorować.

Niemniej jednak wszystkie osuwiska, które stanowią realne zagrożenie dla lokalnej infrastruktury powinny podlegać niezależnemu, okresowemu monitoringowi w celu wyeliminowania zagrożenia oraz możliwości wczesnej interwencji i zniwelowania negatywnych skutków.

Nowoczesne metody monitorowania osuwisk

W Polsce do monitoringu osuwisk stosuje się odpowiednie metody zgodne z obowiązującym prawem i instrukcjami [8]. Metody monitoringu głównie oparte są na Zarządzeniu nr 25 Generalnego Dyrektora Dróg Publicznych z dnia 19.03.1999 roku w sprawie wprowadzenia „Instrukcji obserwacji i badań osuwisk drogowych” [3]. Drugim aktualnie dokumentem, według którego należy projektować i wykonywać monitoring osuwisk, jest „Instrukcja opracowania mapy

osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi” wydana w 2008 roku przez Państwowy Instytut Geologiczny [4]. W obydwu instrukcjach metody monitorowania dzielą się na powierzchniowe i wglębne. Metody powierzchniowe realizuje się przyrządami geodezyjnymi, a wglębne przy użyciu piezometrów, inklinometrów, rur i studni deformacyjnych. Różnice wynikają z zalecanej częstotliwości pomiarów oraz z zaleceń zastosowania metody GPS oraz obliczeń numerycznych w Instrukcji z 2008 roku wydanej przez PIG PIB. Dobór metod trzeba uzależnić od możliwości ekonomicznych i wymagań, co do: szczegółowości rozpoznania, wielkości i rodzaju osuwiska, wartości przemieszczeń, ich prędkości i położenia powierzchni poślizgu oraz warunków klimatycznych.

Wstępnej oceny stopnia aktywności, dokonuje się w czasie wizji terenowej w oparciu o analizę form geomorfologicznych, szaty roślinnej, stanu technicznego istniejących budowli naziemnych, studni oraz wywiad środowiskowy. Zgodnie z instrukcją przy analizowaniu problemów geologiczno-inżynierskich związanych z osuwiskami każdorazowo należy indywidualnie rozpatrywać sposób ich rozwiązania. Zalecane jest wykonanie obliczeń numerycznych stateczności stoków. Opracowanie wyników monitoringu powinno być w formie umożliwiającej ich wczytanie do bazy realizowanego obecnie w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym Systemu Osłony Przeciwosuwiskowej.

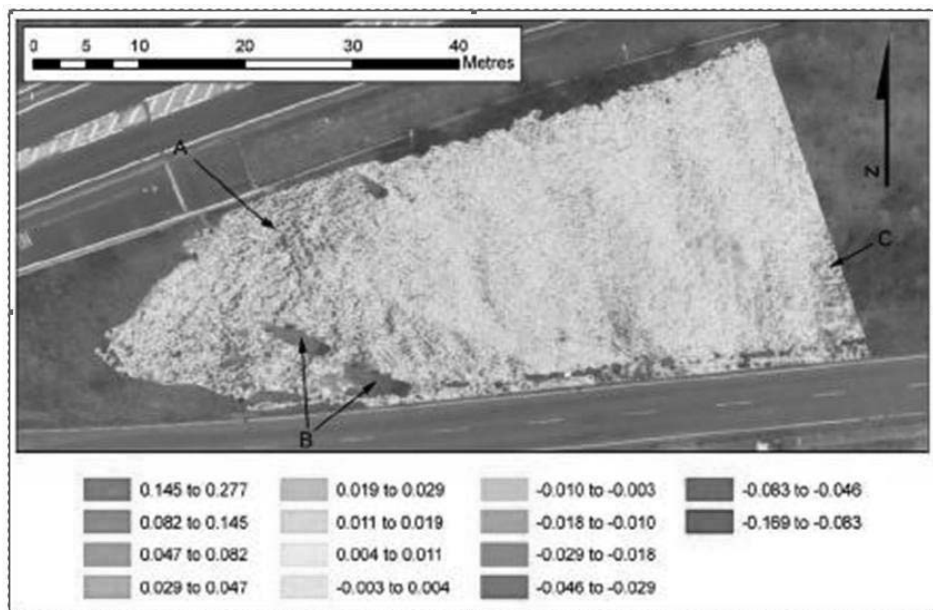
Wraz z postępem technologicznym poszukiwane są nowe metody monitorowania ruchów osuwiskowych. Takimi metodami najnowocześniejszej technologii są metody teledetekcyjne. Metody te omówiono w publikacji [8]. Monitorowanie osuwisk metodą teledetekcyjną można wykonywać z satelitów, samolotów lub z powierzchni ziemi. Teledetekcja satelitarna oparta jest na metodzie interferometrii radarowej InSAR lub jej odmiany PSInSAR [7], natomiast z wykorzystaniem samolotów stosuje się metodę opartą na zastosowaniu skanera laserowego zwaną LIDAR [5]. Aktualnie najbardziej przekonującą zaletą teledetekcji jest dokładność pomiarów. Rozdzielczość ruchów pionowych w obrazach satelitarnych jest ok. 2,5 cm. System LIDAR mierzy z dokładnością ok. 15 cm współrzędną wysokościową. W przypadku naziemnego skanera laserowego jest to precyzja rzędu 5 mm. Analizując możliwości zastosowania teledetekcji do monitorowania osuwisk wzdłuż tras kolejowych wydaje się, że najlepszym i najdokładniejszym oraz najtańszym rozwiązaniem jest naziemny skaner laserowy. W Polsce badania skanerem laserowym naziemnym i lotniczym przeprowadzane były dla aktywnych osuwisk przez np. PIG-PIB [8]. W literaturze światowej można znaleźć przykłady zastosowań skaningu laserowego dla kolei. Linie kolejowe są zagrożone osuwiskami z uwagi na deformacje związane z niestabilnością gruntu skarp i nasypów. Problem ten w kontekście zmian klimatycznych staje się coraz bardziej istotny dla oceny ryzyka zagrożenia osuwiskiem.

Zespół naukowców z Newcastle University zastosował metodę skanowania laserowego do monitorowania osuwisk na nasypach komunikacyjnych [6, 13, 14]. Przykłady zastosowania pokazano na rysunkach 9 i 10. Na rysunku 9 widoczny jest skan osuwiska na nasypie autostrady A69 w pobliżu miejscowości Haltwhistle (jest to pojedynczy skan nasypu). Autostrada będąca obwodnicą Haltwhistle razem

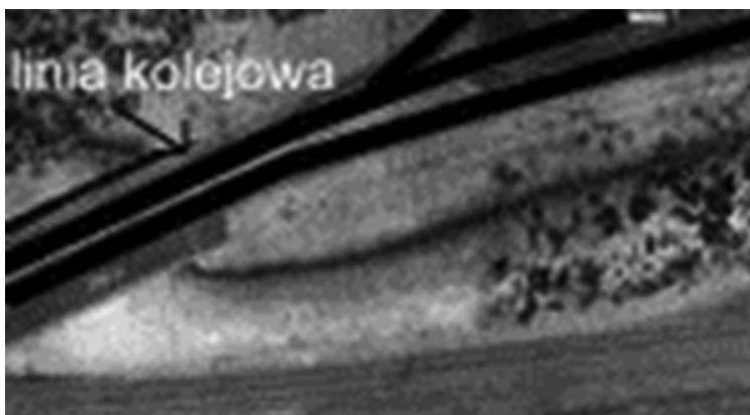
z linią kolejową tworzy ważny węzeł komunikacyjny. Wiadukt widoczny na skanie (rys. 9) przechodzi nad torami kolejowymi. Na utworzonym z dwóch pomiarów (wykonanych w odstępie miesięcznym) modelu różnicowym (rys. 10) widoczne są zmiany, które zaszły między październikiem a grudniem 2007 r. W punkcie A widoczny jest ubytek gruntu prawdopodobnie spowodowany przez erozję stoku. W punkcie B widoczne są luki w pomiarach, prawdopodobnie przez efekt cienia w pomiarach, spowodowany przez dwa gęste krzewy. W punkcie C też są widoczne ubytki masy. Na rysunku 11 pokazano wynik modelu różnicowego z badań lotniczych skanerem laserowym w tym samym węzle komunikacyjnym. Z obrazu na rys. 11 wynika, że nasyp kolejowy podlega ruchom osuwiskowym.



Rys. 9. Nasyp drogowy - obraz wykonany naziemnym skanerem laserowym w Wielkiej Brytanii w celu monitorowania deformacji [13]



Rys. 10. Model różnicowy nasypu drogowego [6]



Rys. 11. Nasyp kolejowy w Northumberland – obraz różnicowy wykonany metodą laserowego skanowania lotniczego [14]

Metodyka pomiarów deformacji osuwisk skanerem laserowym polega na nałożeniu na siebie dwóch skanów wykonanych w dowolnym odstępie czasowym ustalonym ze względu na badanie zaistniałych zamian i obliczeniu modelu różnicowego (w oprogramowaniu skanera laserowego RIEGL-VZ400 dostępne są takie aplikacje).

Obecnie na terenie osuwiska w Sadowiu trwają prace końcowe mające na celu stabilizację osuwiska, prowadzone przez firmę zewnętrzną. Zostały wykonane m.in.: konstrukcje oporowe, odwodnienia powierzchniowe, drenaże i przypory żwirowe, studnie odwadniające wraz z instalacją lewarową, kanalizacja odprowadzająca wodę z drenaży i odwodnień powierzchniowych oraz studni. Ponadto, przy okazji prowadzenia remontu drogi biegnącej w koronie skarpy przekopu, przeprowadzono zabieg jej obniżenia w celu zmniejszenia obciążenia zbocza i zwiększenia stabilności skarpy. Niemniej jednak, mając na uwadze dane archiwalne dotyczące aktywności osuwiska oraz wagę zagrożenia, jakie może stanowić dla linii kolejowej nr 8, należy prowadzić okresowy monitoring pozwalający na szybkie wychwycenie wszelkich zmian. Do tego celu idealna wydaje się być metoda naziemnego skaningu laserowego, która w sposób nieinwazyjny, niewymagający wstrzymania ruchu, pozwoli na wychwycenie z dużą dokładnością zmian zachodzących w zboczach przekopu.

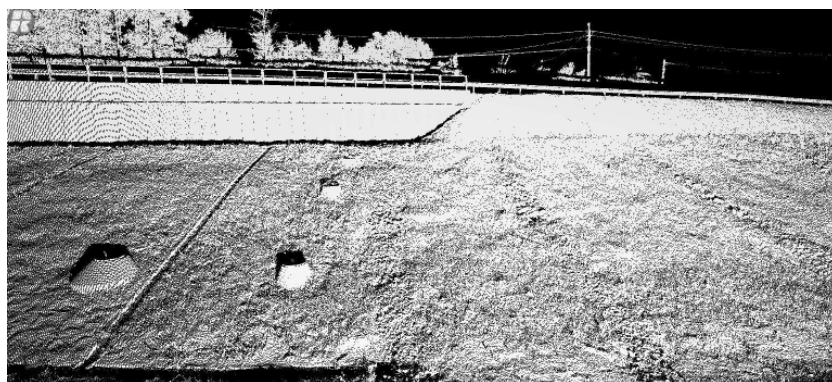
W Katedrze Infrastruktury Kolejowej i Lotniczej Politechniki Krakowskiej wykonano pierwsze powykonawcze, bazowe skanowanie laserowe osuwiska w Sadowiu na linii kolejowej Kraków - Warszawa. Poniżej przedstawiono wyniki pierwszego skanowania i modele utworzone z „chmury punktów” w trzech miejscach osuwiska (rys. 12, 13 i 14).



Rys. 12. Ogólny skan osuwiska w Sadowiu wraz z linią kolejową



Rys. 13. Skan części osuwiska w Sadowiu po zabezpieczeniu larsenami



Rys. 14. Skan części osuwiska w Sadowiu po wykonaniu robót zabezpieczających

Następne skanowanie przewiduje się wczesną wiosną 2013 roku. Na podstawie wyników zostanie utworzony model różnicowy, który pozwoli stwierdzić ewentualne ruchy osuwiskowe oraz ocenić skuteczność umocnień i zabiegów przeprowadzonych ostatnio w celu zestabilizowania osuwiska.

Podsumowanie

W artykule omówiono problem osuwiska w Sadowiu na linii nr 8 Kraków – Warszawa oraz przedstawiono propozycję udoskonalenia monitorowania osuwiska metodą skanowania laserowego na tle najnowszych trendów w technologii w celu rozpoznawania zjawisk osuwiskowych. Zaletą pomiarów skanerem laserowym jest możliwość stosowania prac bezinwazyjnych w gruntach, gdyż pomiary wykonuje się w sposób zdalny. Nie ma ograniczeń pomiarów w czasie, za wyjątkiem niekorzystnych warunków pogodowych (np. silne opady śniegu). Zastosowanie skaningu laserowego ma także zalety takie, jak: szybkość pomiaru (kilkadziesiąt, a nawet kilkaset tysięcy pomiarów punktowych na sekundę) oraz dokładność pomiaru – 5 mm. Ważną zaletą jest możliwość otrzymania modelu 3D. Aktualnie zmiany klimatyczne wymuszają poszukiwanie nowych metod monitorowania infrastruktury kolejowej w przypadkach zagrożeń naturalnych, do jakich należą osuwiska. W przypadkach osuwisk na liniach kolejowych na skarpach, w wykopach oraz nasypach kolejowych, monitorowanie stanu naziemnym skanerem laserowym jest zatem uzasadnione, efektywne i staje się coraz powszechniejsze.

Literatura

- [1] Bazyński J., Frankowski Z., Site investigations and calculations of the stability of slopes in the landslide area at Sadowie near cracow. Biull. I.A.E.g., Volume 16, Issue 1, pp 156-161, 1977.
- [2] Grabowski D., Bagińska A., Folder PIG-IB Uwaga zagrożenie osuwiskiem. Warszawa 2010.
- [3] Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. GDDP. Opr. GEO-DROM, Kraków 1999.
- [4] Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2008.
- [5] Graniczny, Kamiński, Piątkowska, Surąła, Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łąśnicy (gm.Lancokrona). Przegląd Geologiczny v.60, nr 2 , 2012.
- [6] Miller PE, Mills JP, Barr SL, Lim M, Barber D, Parkin G, Clarke B, Glendinning S, Hall JW. Terrestrial laser scanning for assessing the risk of slope instability along transport corridors. International Archives of Pho-

- togrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2008, 37(B5), 495-500.
- [7] Perski Z., Borkowski A., Wojciechowski T., Wójcik A.: Application of persistent scatterers interferometry for landslide monitoring in the vicinity of Roznow Lake in Poland *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 8 No. 3 (163). Prague, Czech Republic 2011, pp. 319-323
- [8] Pilecka E., Manterys T., Możliwości monitorowania osuwisk wzdłuż tras kolejowych z wykorzystaniem skaningu laserowego. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP oddz. W Krakowie*. Nr 96 (zeszyt 158), str. 449-465, Kraków 2011.
- [9] Pilecka E., Bazarnik M., Znaczenie rozpoznania geologiczno-geofizycznego w celu utrzymania stateczności tras kolejowych. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie*. Nr 96 (zeszyt 158), Kraków 425-449.
- [10] Sokołowski S., Osuwisko w Sadowiu w przekopie linii kolejowej Tunel-Kraków. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 32: p. 5-25, 1947.
- [11] Wacławski M. (red.), Budkiewicz M., Chrzanowska E., Gwóźdź R., Mroczek J., Pasierb B., Skowrońska M., Sroka K., *Zarys geologii i hydrogeologii*, Wyd. PK, Kraków 2005.
- [12] Zabuski L., Thiel K., Bober L., *Osuwiska we fliszu Karpat Polskich*. Wyd. IBW PAN, Gdańsk 1999.
- [13] (<http://research.ncl.ac.uk/pls/linearsurvey.html>)
- [14] (<http://www.ncl.ac.uk/ceg/research/geomatics/geospatialengineering/remotesset/index.htm>)
- [15] <http://www.plk-sa.pl>
- [16] <http://www.pgi.gov.pl/pl/oddzial-karpacki/geozagrozenia-karpaty/karpackie-osuwiska.html>
- [17] <http://maps.geoportal.gov.pl>

