

# ANALIZA STATECZNOŚCI WIADUKTU KOLEJOWEGO NA PLANOWANEJ LINII NR 622 PODŁĘŻE-SZCZYRZYC W ASPEKTCIE ZAGROŻENIA OSUWISKOWEGO<sup>1</sup>

---

**Elżbieta Pilecka**

dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: +48 12 628 2534, e-mail: epilecka18@gmail.com

---

**Damian Rypel**

mgr inż., Voessing Polska Sp. z o.o., ul. Wielicka 50, 30-552 Kraków tel.: +48 881 365 142, e-mail: damian.rypel@gmail.com

---

***Streszczenie.** W artykule dokonano analizy numerycznej osuwiska znajdującego się w ciągu planowanej linii kolejowej nr 622 Podłęże-Szczyrzyc. W rozpatrywanej lokalizacji posiadawiony będzie przyczółek wiaduktu kolejowego. Na podstawie przekrojów geologiczno-inżynierskich oraz rzeczywistego ukształtowania terenu, w programie Midas GTS NX wygenerowano trójwymiarowe modele osuwisk, które zostały obciążone (uwzględnione zostało obciążenie taborem i ciężarem konstrukcji wiaduktu). Ze względu na wczesną fazę projektu, konieczne było wstępne zaprojektowanie konstrukcji wiaduktu. Przeanalizowano stateczność w warunkach suchych i nawodnionych, dzięki czemu określono ryzyko wystąpienia ruchów osuwiskowych. Zaproponowano również odpowiednie wzmocnienie gruntu.*

**Słowa kluczowe:** wiadukt kolejowy, osuwisko, analiza stateczności

## 1. Wprowadzenie

Projekt składający się z budowy nowych linii nr 622 Podłęże – Szczyrzyc – Tymbark oraz linii nr 623 Szczyrzyc – Mszana Dolna wraz z modernizacją linii nr 105 Chabówka – Nowy Sącz jest jedną z większych planowanych inwestycji kolejowych w Polsce. Najważniejszym celem tego zadania jest skrócenie czasu przejazdu na trasach Kraków – Zakopane, Kraków – Nowy Sącz oraz Chabówka – Nowy Sącz. Obecnie, ze względu na długi czas przejazdu, większość podróżnych na wyżej wymienionych odcinkach wybiera transport samochodowy, co z kolei powoduje nadmierne obciążenie ruchem dróg krajowych nr 7 oraz 47 (tzw. „Zakopianki”) oraz nr 75. Dzięki realizacji wyżej wymienionego projektu czas przejazdu na odcinku Kraków – Zakopane skróci się do 2 godzin, natomiast na odcinku Kraków – Nowy Sącz do 1 godziny [3]. Poprawi się znacznie szybkość i komfort podróży do największego miasta regionu, a zarazem jednego z największych ośrodków akademickich w Polsce, jakim jest Kraków. Kolejnymi pozytywnymi skutkami są wzrost atrakcyjności turystycznej oraz inwestycyjnej łączonych miejscowości. Będzie to również

---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Pilecka E. 50 %, Rypel D. 50%

alternatywne połączenie dla trasy Kraków – Sucha Beskidzka – Chabówka – Zakopane. Warto wspomnieć, iż budowa nowych połączeń jest częścią planu modernizacji sieci transeuropejskich korytarzy transportowych (TEN-T). Nowobudowana linia nr 622 ma swój początek w podkrakowskiej wsi Podłęże (posterunek odgałęźny Węgrzce). Następnie biegnie w kierunku południowym w stronę miejscowości Szczyrzyc. Od linii nr 622 w miejscowości Szczyrzyc odgałęzia się linia nr 623 do Mszany Dolnej. Linie te w Mszanie Dolnej oraz Tymbarku łączą się z modernizowaną linią nr 104 Chabówka – Nowy Sącz. W przypadku nowych linii wybrano Wariant budowy 1A, który zakłada budowę 58,5 km nowych linii, na trasie których będzie zlokalizowane 11 tuneli o łącznej długości 11,7 km oraz 7 estakad o łącznej długości 6,4 km. Budowa nowych linii pozwoli na jazdę z prędkością 160 km/h przy dopuszczalnym nacisku na oś 221 kN, przy czym uwzględniona jest opcja osiągnięcia prędkości większych niż 160 km/h. Linia nr 622 na odcinku Podłęże – Szczyrzyc ma być linią dwutorową, natomiast na odcinku Szczyrzyc – Tymbark jednotorową [1].

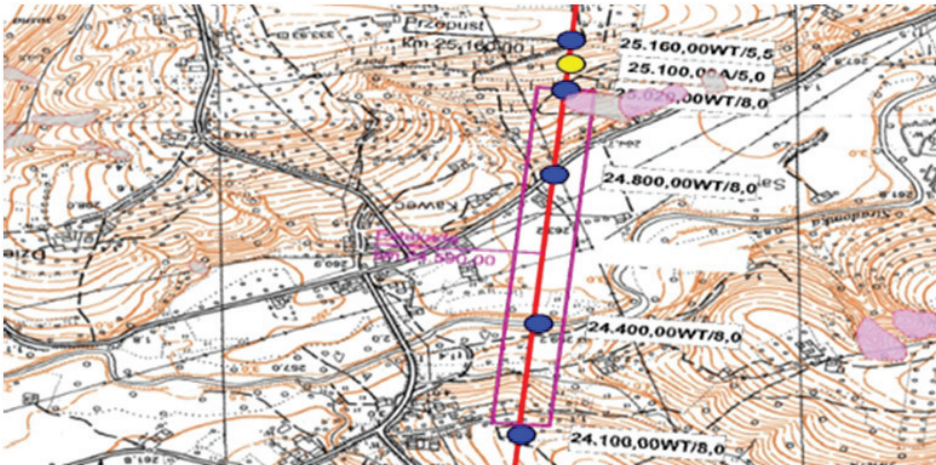
## 2. Zagrożenie osuwiskowe w Karpatach

W Polsce najbardziej narażonym na ruchy osuwiskowe terenem są Karpaty Zewnętrzne. Dzieje się tak ze względu na ich budowę geologiczną. Znajdziemy tam naprzemianległe ułożone warstwy skalne (m.in. piaskowce, mułowce, iłowce) - tzw. flisz karpacki. Taki układ warstw gruntu szczególnie sprzyja powstawaniu ruchów osuwiskowych. Innymi czynnikami są rzeźba terenu (nachylenie stoków i liczne doliny) oraz tektonika (uskoki).

Wszystkie wymienione powyżej uwarunkowania powodują, że w polskich Karpatach występuje 95% osuwisk położonych na terenie kraju [4]. W 2005 roku określono ich liczbę na poziomie 20 000, co przy powierzchni 19 700 km<sup>2</sup>, daje 1 osuwisko na kilometr kwadratowy. Szacuje się, że w polskich Karpatach w przypadku linii kolejowych występuje jedno osuwisko na 10 km linii. Liczby te pokazują jak poważne jest to zagrożenie. Powinno ono być więc uwzględniane przy każdej inwestycji budowlanej na tym terenie, a szczególnie przy inwestycjach komunikacyjnych.

## 3. Charakterystyka analizowanego obszaru

W niniejszym artykule analizie został poddany fragment linii kolejowej nr 622 w zakresie km 24.131,00 – 25.031,00 (rys. 1). W miejscu tym znajduje się jeden z projektowanych wiaduktów. Przechodzi on przez okresowo czynne osuwisko, znajdujące się na jednym z jego końców (w okolicach kilometra 25.031).

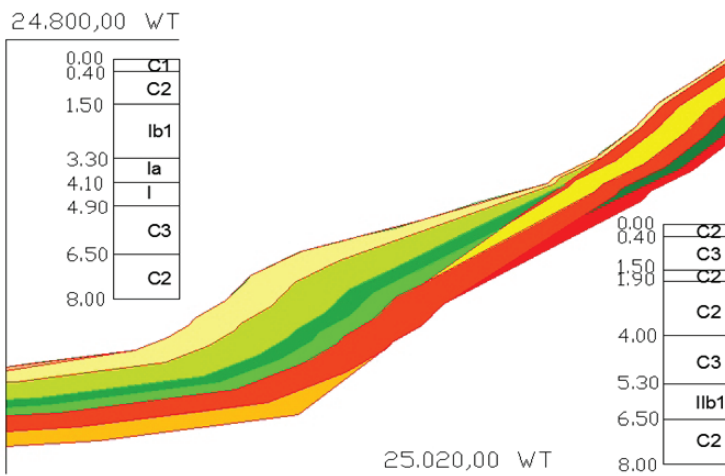


Rys.1. Lokalizacja analizowanego wiaduku oraz osuwiska na tle planu sytuacyjnego linii nr 622

W takim wypadku, z racji przynależności terenów osuwiskowych do trzeciej kategorii geotechnicznej, należy przeprowadzić obliczenia stateczności dla danego przypadku. Jest to niewielkie osuwisko, jednakże z powodu występującego dużego obciążenia (obiekt inżynierski w postaci wiaduku i samo obciążenie przejeżdżającym taborem) analiza jest niezbędna.

#### 4. Warunki gruntowe

W celu zamodelowania istniejących warunków gruntowych wykonano przekrój geotechniczny (rys. 2) wzdłuż linii nr 622 w km 24.800,00 – 25.020,00 na podstawie kart otworów badawczych wykonanych wierceń [1].



Rys.2. Przekrój geotechniczny wzdłuż linii nr 622 w km 24.800,00 – 25.020,00, skala skażona – opis warstw w tabeli 1

Parametry geotechniczne gruntów w stanie suchym i nawodnionym zostały przedstawione w tabeli 1. Wartości zostały przyjęte na podstawie dokumentacji geotechnicznej [1] oraz literatury (wytrzymałość podłoża skalnego) [2].

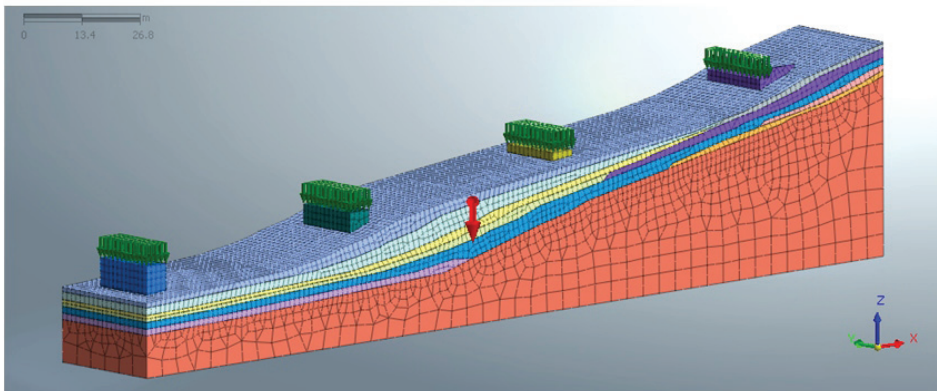
Tabela 1. Parametry geotechniczne gruntów – w przypadku dwóch wartości - lewa w stanie suchym, prawa w stanie nawodnionym, w przypadku jednej wartości – parametr identyczny w obu stanach

Nr	Symbol warstwy	Rodzaj gruntu	Moduł pierwotnego odkształcenia $E_0$ [Mpa]	Wsp. Poissona $\nu$	Ciężar obj. $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Spójność $c$ [kPa]	Kąt tarcia wewn. $\Phi$ [°]	$M_0$ [Mpa]
1	C1	Pył	33.9 / 6.6	0.32	20.5/19.5	30.0/5.0	18.0/6.0	48.4/9.4
2	C2	Pył, pył piaszczysty, glina pylasta, glina piaszczysta	20.6 / 6.6	0.32	21.0/20.0	17.0/5.0	14.8/6.0	29.4/9.4
3	Ib1	Żwir	165.9	0.20	19.00	0.0	39.5	184.8
4	Ia	Żwir	186.4	0.20	20.00	0.0	40.3	207.7
5	I	Żwir	197.1	0.20	20.00	0.0	40.6	219.7
6	C3	Glina pylasta	16.6 / 6.6	0.32	20.0/19.0	13.3/5.0	13.2/6.0	23.6/9.4
7	Ilb1	Piasek średni	102.6	0.25	18.50	0.0	33.9	122.0
8	-	Piaskowiec	31500.0	0.15	26.40			

Źródło: opracowanie własne

## 5. Model terenu

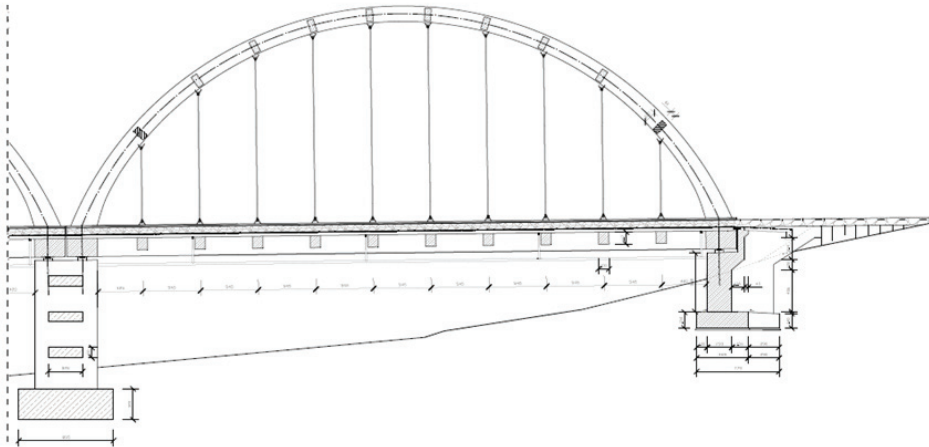
Wykonano trójwymiarowy model istniejącego terenu w programie Midas GTS NX. Został on stworzony na podstawie przekroju geotechnicznego. Warstwy gruntu do głębokości 8 m (do skały) oraz konstrukcje wsporcze zamodelowano siatką o rozmiarze oczka 1,5 m, natomiast warstwę poniżej – skałę (piaskowiec) siatką o rozmiarze oczka 5 m (rys. 3). Większy rozmiar siatki warstwy skalnej wynika z jej dużo mniejszego wpływu na stateczność ogólną.



Rys.3. Model z przyłożonymi obciążeniami w programie Midas GTS NX – widoczne warstwy gruntu oraz konstrukcje wsporcze wiaduktu

## 6. Wiadukt kolejowy

Na długości rozpatrywanego odcinka linia kolejowa biegnie na wiadukcie kolejowym. Z racji braku wytycznych do projektu wiaduktu w istniejącej dokumentacji, została zaprojektowana wstępna koncepcja tego rozwiązania (rys. 4). Zaprojektowano wiadukt kolejowy składający się z trzynastu przęseł, żelbetowy, łukowy, ze sprężonymi dźwigarami.



Rys.4. Widok pierwszego przęsła wiaduktu - widoczny przyczółek posadowiony na osuwisku

Płyta pomostu jest podwieszona za pomocą stalowych wieszaków. Rozpiętość przęsła wynosi 63,5 m, natomiast całkowita długość wiaduktu mierzona w osiach łożysk wynosi 821,46 m. Każdy z torów biegnie na niezależnie pracującym przęśle – wybrano takie rozwiązanie w celu zwiększenia niezawodności obiektu (w razie remontu któregoś z przęseł pociągi będą mogły jeździć po drugim). Przęsła opierają się na 12 filarach i 2 przyczółkach. Wymiary poszczególnych elementów dobrano na podstawie istniejącego wiaduktu kolejowego o podobnej konstrukcji, znajdującego się w Świnnej Porębie. Zastosowano klasyczną nawierzchnię podsypkową składającą się z tłucznia o minimalnej grubości 43 cm, podkładów strunobetonowych PS94M w rozstawie 60 cm oraz szyn 60E1 z przytwierdzeniem SB.

## 7. Obciążenia

W programie Midas GTS NX zamodelowano warstwy gruntu wraz z przyczółkiem i trzema filarami – dzięki temu nie trzeba było uwzględniać w zestawieniu obciążeń ciężaru konstrukcji wsporczych. Obliczono ciężar samego wiaduktu (dźwigarów, płyty, łuków, wyposażenia, itd.). Obciążenie przejeżdżającym taborem zamodelowano poprzez model obciążenia LM71, który został opisany w normie PN-EN 1991-2. Obliczone obciążenie przyłożono na górnej powierzchni filarów i przyczółka.



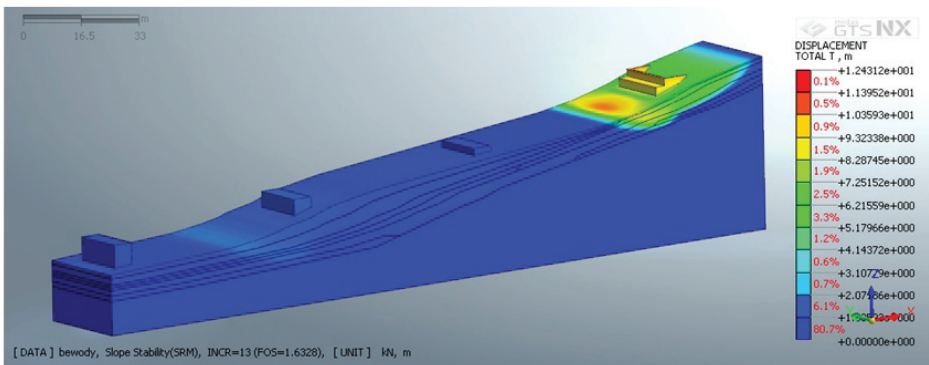
Powyższe parametry dają charakterystyczne obciążenie:

- od wiaduktu (stałe): 58 629 kN na filar, 29 314 kN na przyczółek,
- od taboru (zmiennie): 13 647 kN na filar, 6 823 kN na przyczółek.

Po uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa dla sytuacji GEO (1,5 dla obciążeń zmiennych, 1,35 dla stałych) otrzymujemy obciążenie na pojedynczy filar o wartości 99 621 kN i obciążenie na przyczółek o wartości 49 810 kN. Górna powierzchnia filara ma pole 94,01 m<sup>2</sup>, co ostatecznie daje wartość obciążenia 1060 kPa. Górna powierzchnia przyczółka ma pole 52,05 m<sup>2</sup>, co ostatecznie daje wartość obciążenia 957 kPa. Mniejsze obciążenie na przyczółek wynika z faktu, iż na przyczółek przypada połowa obciążenia, które oddziałuje na filar (podpiera tylko dwa przęsła zamiast czterech).

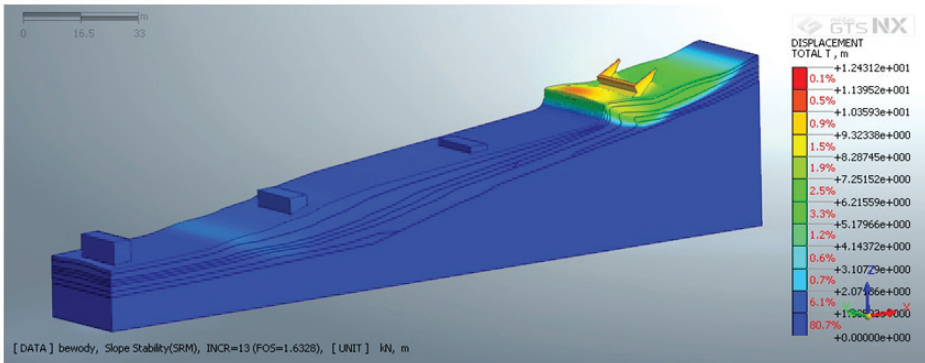
## 8. Przypadek nr 1 – grunt suchy

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano współczynnik stateczności FOS (Factor Of Safety) równy 1,6328. Jest to wartość oznaczająca stateczność analizowanej skarpy. Warto jednak zaznaczyć, że jest to przypadek gdy grunt jest suchy. Wg kolejowej instrukcji Id-3, w przypadku nowobudowanych linii wymagany jest współczynnik wynoszący co najmniej 2.0.



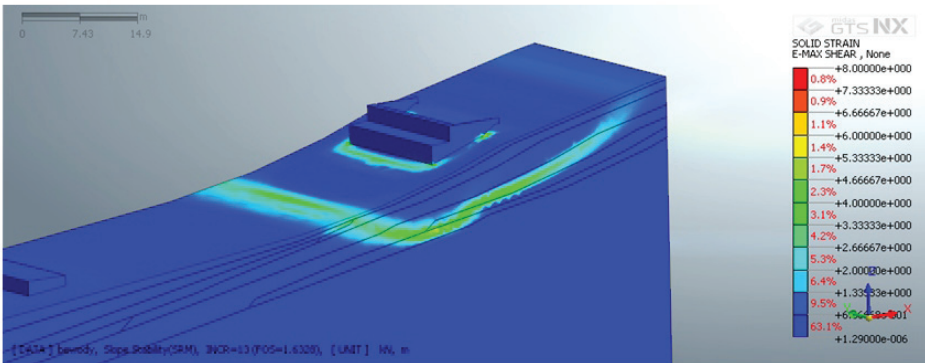
Rys. 5. Wartości przemieszczeń całkowitych

Największe przemieszczenia występują w obszarze przyczółka (maksimum poniżej przyczółka) – rys. 5. Przemieszczają się warstwy gruntów spoistych, które są wyraźnie słabsze od znajdującego się w tamtym obszarze gruntu niespoistego (piasek średni). Można również zauważyć większe przemieszczenia w pobliżu drugiego filara (licząc od najniższego punktu modelu) w porównaniu z sąsiednim obszarem. Oba przypadki zwiększonych przemieszczeń występują w obszarach, gdzie pochYLENIE stoku jest największe.



Rys. 6. Odształcony model

Na rysunku 6 widoczny jest mechanizm zniszczenia gruntu, polegający na przemieszczeniu się warstw gruntu spoistego, co połączone jest z obrotem przyczółka.

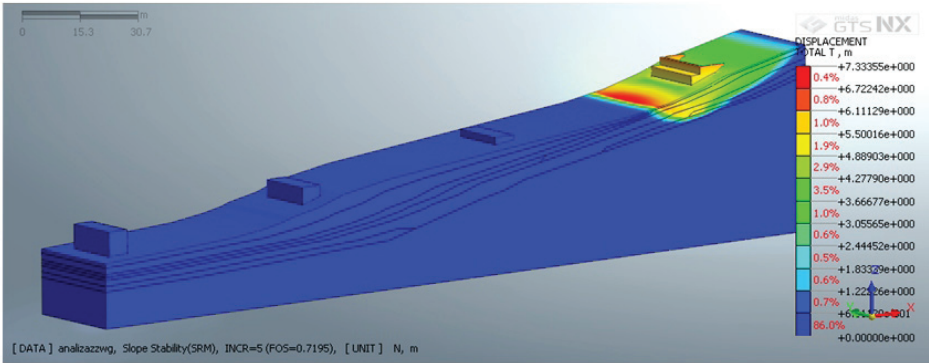


Rys. 7. Maksymalne odkształcenia ścinające

Na rysunku 7, przedstawiającym odkształcenia ścinające, można zauważyć głęboko zlokalizowaną powierzchnię poślizgu, wzdłuż której następuje obrót warstw gruntu wraz z przyczółkiem.

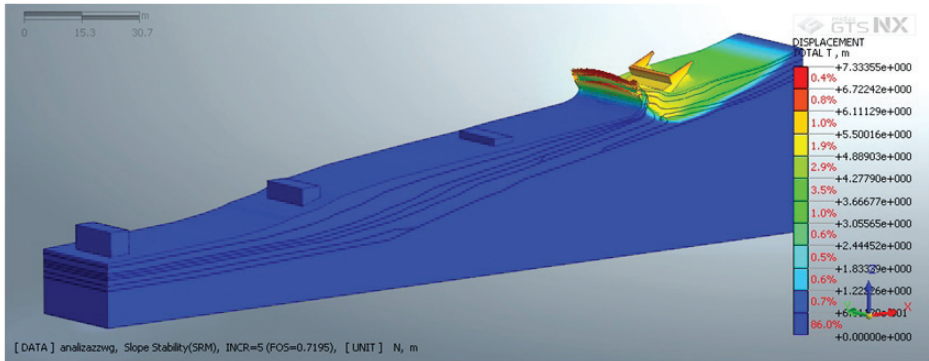
## 9. Przypadek nr 2 – grunt nawodniony

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano współczynnik stateczności FOS (Factor Of Safety) równy 0,7195. Jest to wartość oznaczająca niestateczność analizowanej skarpy (gdyż wynik jest mniejszy od 1, oznacza to, iż siły zsuwające przeważają nad siłami utrzymującymi).



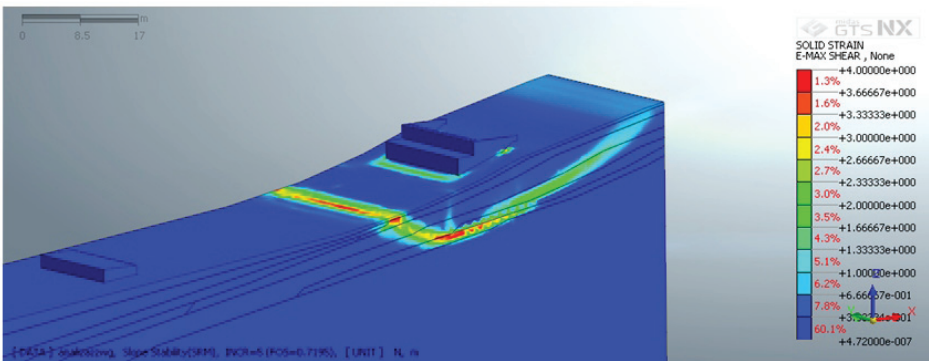
Rys. 8. Wartości przemieszczeń całkowitych

Największe przemieszczenia występują w obszarze przyczółka (maksimum poniżej przyczółka - rys. 8). Są one analogiczne do poprzedniego wypadku – wyraźnie jest to miejsce najłabsze, wymagające w pierwszej kolejności wzmocnienia.



Rys. 9. Odształcony model

Na rysunku 9 widoczny jest mechanizm zniszczenia gruntu, identyczny jak w poprzednim przypadku obliczeniowym: przemieszczenie się warstw gruntu niespoistego, co połączone jest z obrotem przyczółka. Różnica polega na tym, że deformacje są na tyle duże, że doszło do deformacji siatki, która straciła swoją ciągłość.



Rys. 10. Maksymalne odkształcenia ścinające



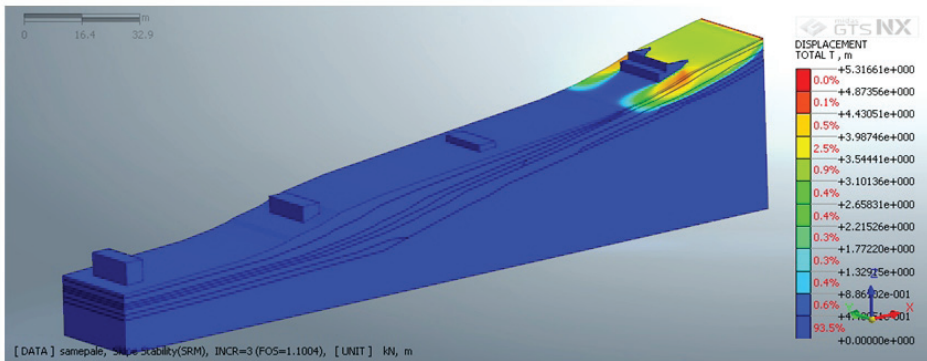
Na rysunku 10, można zauważyć głęboko zlokalizowaną powierzchnię poślizgu, wzdłuż której następuje obrót warstw gruntu wraz z przyczółkiem.

Aby uzyskać wymagany współczynnik bezpieczeństwa należy wzmocnić grunt. Zdecydowano się na posadowienie wszystkich konstrukcji wsporczych na palach, które sięgają będą warstw skalnych. Powinno to zmniejszyć obciążenie bezpośrednio oddziałujące na grunt, co w rezultacie da zwiększenie współczynnika stateczności.

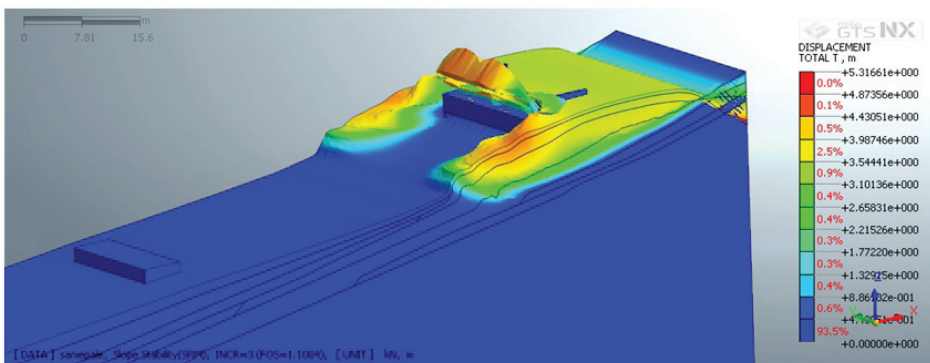
## 10. Przypadek nr 3 – grunt nawodniony, posadowienie na palach

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano współczynnik stateczności FOS (Factor Of Safety) równy 1,1004. Jest to wartość oznaczająca stateczność stoku, nie jest to jednakże wartość wystarczająca (wymagany jest współczynnik wynoszący co najmniej 2.0).

Tak jak wcześniej przemieszczają się głównie warstwy gruntów spoistych wokół przyczółka (rys. 11). Różnica polega na lokalizacji maksymalnych przemieszczeń – znajdują się one po bocznej stronie przyczółka. Jest to spowodowane „utwierdzeniem” przyczółka w skale – palowanie spowodowało, że przyczółek sam w sobie się nie przemieszcza, jednakże grunt naokoło nadal wykazuje tendencję do osuwania się.



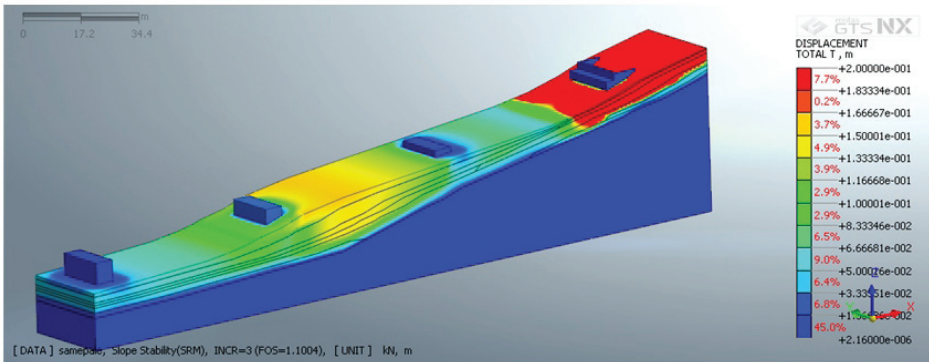
Rys. 11. Wartości przemieszczeń całkowitych



Rys. 12. Odkształcony model

Na rysunku 12 widoczny jest mechanizm niszczenia gruntu, polegający na przemieszczeniu się warstw gruntu spoistego. Przyczółek w tym wypadku pozostaje nienaruszony, grunt przemieszcza się wokół niego.

W celu zwiększenia współczynnika stateczności do wymaganego poziomu (2.0), zdecydowano się na wymianę gruntu w okolicy przyczółka na pospółkę – parametry przyjęto identycznie jak dla warstwy I (żwir). Wymieniono również grunt wokół drugiego filara, licząc od najniższego punktu stoku. Na taki zabieg zdecydowano się po przeanalizowaniu map przemieszczeń całkowitych gruntu po zmianie skali wyświetlania wyników (rys. 13). Jest to drugie potencjalne miejsce osuwania się gruntu – ze względu na pochylenie stoku.

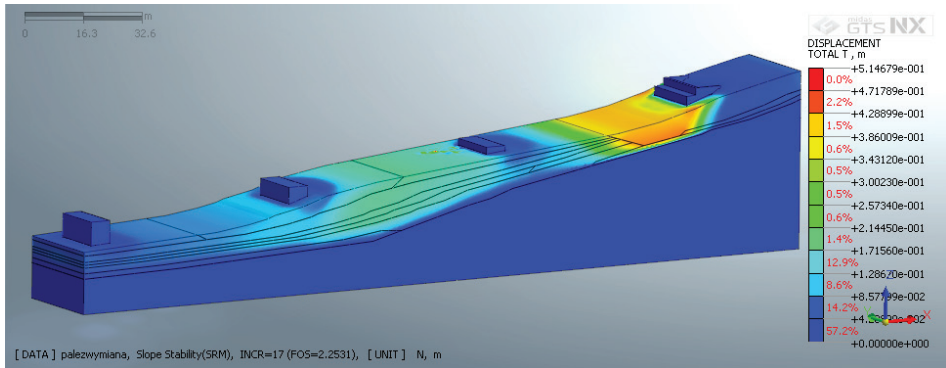


Rys. 13. Odkształcenia stoku po zmianie skali wyświetlania wyników

## 11. Przypadek nr 4 – grunt nawodniony, posadowienie na palach, wymiana gruntu

Grunt wymieniono łącznie na długości około 100 m – w miejscach o największym pochyleniu stoku, które są najbardziej podatne na ruchy osuwiskowe. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano współczynnik stateczności FOS (Factor Of Safety) równy 2,2531. Jest to wartość oznaczająca stateczność analizowanej skarpy, ale co ważniejsze został osiągnięty wymagany współczynnik stateczności wynoszący 2.0.

Największe przemieszczenie obecnie znajduje się poniżej przyczółka w obrębie wymienionego gruntu (rys. 14), co powodowane jest poprzez znajdujące się w dalszej odległości słabonośne grunty spoiste. Jednakże przemieszczenia te są tylko i wyłącznie wynikiem działań programu w celu obliczenia współczynnika stateczności (program zwiększa działające obciążenie aż do utraty stateczności). W rzeczywistości nie nastąpi przemieszczenie stoku, jako że współczynnik stateczności ma wartość większą niż 2. Wynik ten wskazuje miejsce, które należałoby wzmocnić, gdyby była konieczność uzyskania jeszcze wyższego współczynnika stateczności, lub zwiększono by obciążenie działające na stok.



Rys. 14. Wartości przemieszczeń całkowitych, widoczne miejsca wymiany gruntu

## 12. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych obliczeń dobrano wzmocnienie projektowanego wiaduktu kolejowego, tak aby współczynnik stateczności spełniał wymagania normowe dla konstrukcji nowobudowanych – tzn. aby był większy od 2.0.

Pierwotne rozwiązanie okazało się niestateczne – w nawodnionych warunkach następowało przemieszczenie warstw gruntów spoistych znajdujących się bezpośrednio w sąsiedztwie przyczółka. Powodowało to również przemieszczenie się konstrukcji przyczółka, co mogłoby spowodować katastrofę budowlaną (zawalenie się wiaduktu). W celu zwiększenia współczynnika stateczności zmieniono sposób posadowienia na pośredni. Nastąpiło zwiększenie współczynnika stateczności do wartości 1.1 – oznacza to, że zbocze było stateczne, jednakże nie były nadal spełnione wymagania normowe. Nastąpiła stabilizacja przyczółka przez jego utwierdzenie w warstwach skalnych za pomocą pali. Nadal istniało zagrożenie osuwania się mas ziemnych w miejscach o największym nachyleniu – w sąsiedztwie przyczółka i jednego z filarów. W tym przypadku w celu zwiększenia współczynnika stateczności zdecydowano się na wymianę słabonośnych gruntów spoistych na grunt nasypowy (pospółka) o dużo wyższej nośności. Działania te przyniosły oczekiwany skutek – współczynnik stateczności po wszystkich zmianach wyniósł 2.2531.

Podsumowując: aby uzyskać odpowiednią stateczność dużego obiektu inżynierskiego jakim jest wiadukt kolejowy, który przecina osuwisko, nie wystarczy stosowanie klasycznych rozwiązań w postaci posadowienia pośredniego – wymagana jest również wymiana gruntu w miejscach najbardziej podatnych na osuwanie się gruntu.

## Bibliografia

- [1] Aktualizacja studium wykonalności dla zadania: Budowa nowej linii kolejowej Podłęże – Szczyrzyc -Tymbark/Mszana Dolna oraz modernizacja istniejącej linii kolejowej nr 104 Chabówka - Nowy Sącz. Etap VIII: Badania geologiczne i geotechniczne. Warszawa, październik 2015.
- [2] Pinińska J., Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał - cz. IV Karpaty Fliszowe. Zakład Geomechaniki Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, 2004.
- [3] <http://www.podleze-piekielko.pl/#!cel-projektu/c1fgy> - dostęp czerwiec 2016[4], <https://www.pgi.gov.pl/gdansk/wody-podziemne-pomorza/131-kopalnia-wiedzy-nowe/zagroenia-geologiczne/2005-soposuwiska-pod-kontrolp.html> - dostęp czerwiec 2016.