



## **WZMOCNIENIE NASYPU KOLEJOWEGO W STANIE AWARYJNYM W CIĄGU LINII E65 W MIEJSCOWOŚCI JURKOWICE**

OSKAR MITROSZ, *omitrosz@keller.com.pl*  
Keller Polska Sp. z o.o.

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono sposoby wzmocnienia i stabilizacji nasypu w stanie awaryjnym w ciągu linii kolejowej E65 w miejscowości Jurkowice w ramach projektu modernizacji i dostosowania międzynarodowej linii kolejowej do potrzeb kolei dużych prędkości. Omówiono przyczyny awarii, rolę poprawnego rozpoznania warunków geotechnicznych podłoża oraz rozwiązania projektowe wzmocnienia nasypu kolejowego. Opisano sposób monitorowania czynnego osuwiska i podejmowania działań naprawczych w myśl projektowania aktywnego w zależności od uzyskanych wyników analizy nasypu. Przedstawiono możliwe oraz przyjęte działania naprawcze.

**Słowa kluczowe:** wzmocnienie, nasyp, kolej wysokich prędkości, osuwisko, Pendolino, geotechnika, CFA, CSC, Compaction.

### **1. Wprowadzenie**

Budowę dzisiejszej linii E65, pierwotnie jednotorowej, rozpoczęto w połowie XIX wieku w zaborze rosyjskim i niemieckim w ramach rozbudowy połączenia międzynarodowego, otwierającego krótszą drogę do portów bałtyckich, łączącego Prusy Wschodnie z terenami Królestwa [1]. Ostatni jednotorowy odcinek Mikołajki Pomorskie – Malbork, na którym zlokalizowany jest analizowany nasyp w Jurkowicach, przekształcono na dwutorowy w 1967 r. Linia magistralna E65/C-E65 należy do VI Transeuropejskiego Korytarza Transportowego łączącego państwa nadbałtyckie z krajami położonymi nad Morzem Adriatyckim i na Bałkanach. Obecnie w ramach prac modernizacyjnych linię dostosowano do prędkości 160 km/h dla pociągów pasażerskich powszechnie nazywanych „Pendolino” (200 km/h dla składów z wychylnym pudłem) i 120 km/h dla pociągów towarowych przy nacisku 221 kN/oś. Głównym celem inwestycji było przystosowanie odcinka linii kolejowej Warszawa-Gdynia do parametrów określonych w umowach AGC/AGTC<sup>1</sup> oraz wymogów interoperacyjności<sup>2</sup> [2].

W referacie opisano przyczyny awarii i sposoby wzmocnienia nasypu kolejowego od km 266 + 195 do km 266 + 355 w ciągu linii kolejowej E65 odcinek Warszawa – Gdynia na szlaku Młeczewo – Dąbrówka Malborska w miejscowości Jurkowice (rys. 1).

---

<sup>1</sup> Umowy AGC/AGTC – na podstawie europejskiej umowy o głównych międzynarodowych liniach kolejowych (AGC) oraz europejskiej umowy o ważnych międzynarodowych liniach transportu kombinowanego i obiektach towarzyszących (AGTC).

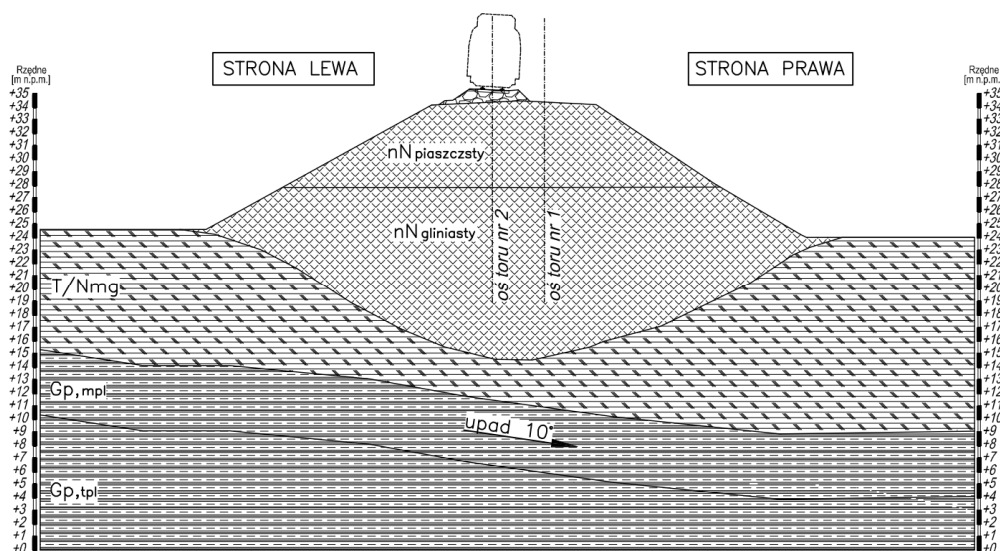
<sup>2</sup> Interoperacyjność kolei – zdolność transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości i transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnej do bezpiecznego i niezakłóconego ruchu pociągów na terenie państw członkowskich Unii Europejskiej.



Rys. 1. Linia E65 na odcinku Warszawa – Gdynia z zaznaczeniem miejscowości Jurkowiec (koło Malborka). Zdjęcie fotogrametryczne analizowanego nasypu (autorstwa Geopartner Sp. z o.o.)

## 2. Warunki geotechniczne

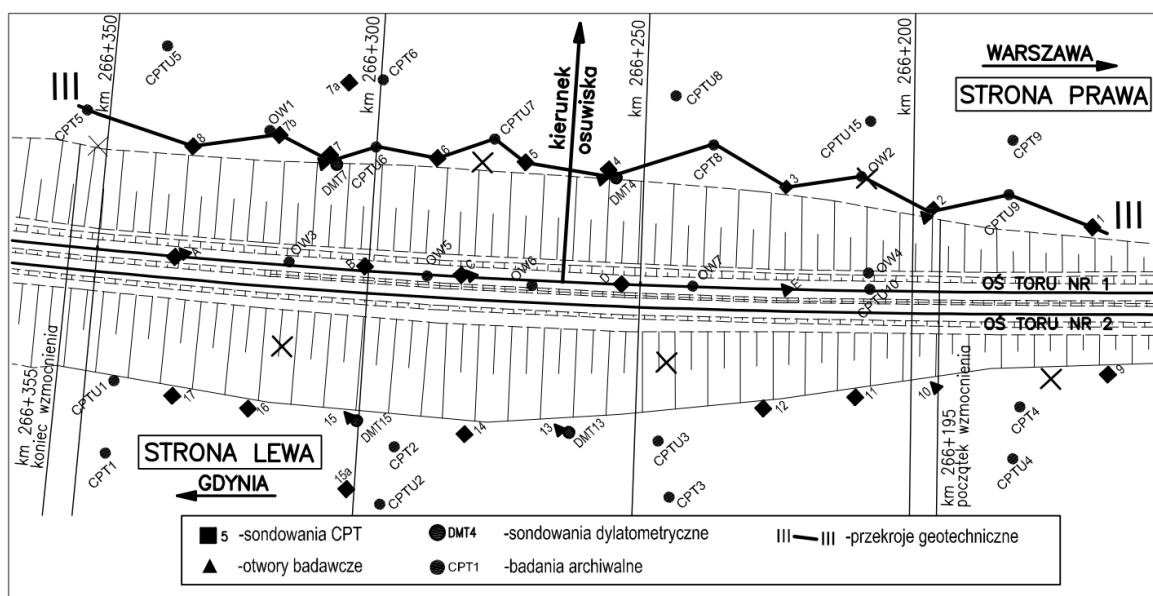
Na podstawie przeprowadzonych badań geotechnicznych sięgających do głębokości 30 m p.p.t. i badań laboratoryjnych oraz w oparciu o Rozporządzenie MTBiGM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawienia obiektów budowlanych przedmiotowy nasyp kolejowy zaliczono do drugiej kategorii geotechnicznej w złożonych warunkach gruntowych. Grunty słabonośne występują praktycznie od poziomu terenu do głębokości 10–11 oraz 15–17 m odpowiednio dla strony lewej i prawej nasypu. Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu  $S_u$  dla gruntów organicznych określona na podstawie sondowań CPT wynosi 10–35 kPa (lokalnie 5 kPa). Miąższość pakietu gruntów organicznych, zwłaszcza namulów, na odcinku gdzie trasa linii kolejowej przebiega wzdłuż lokalnych cieków, może świadczyć o jej lokalizacji w dolinie rzecznej lub starorzeczu. Poniżej gruntów organicznych znajduje się pakiet gruntów spoistych w stanie miękkoplastycznym i plastycznym o miąższości około 5 m. Niniejsze warstwy zalegają pod nasypem w upadzie około  $10^\circ$  od strony lewej do prawej, w kierunku w którym wytworzyło się osuwisko (rys. 2).



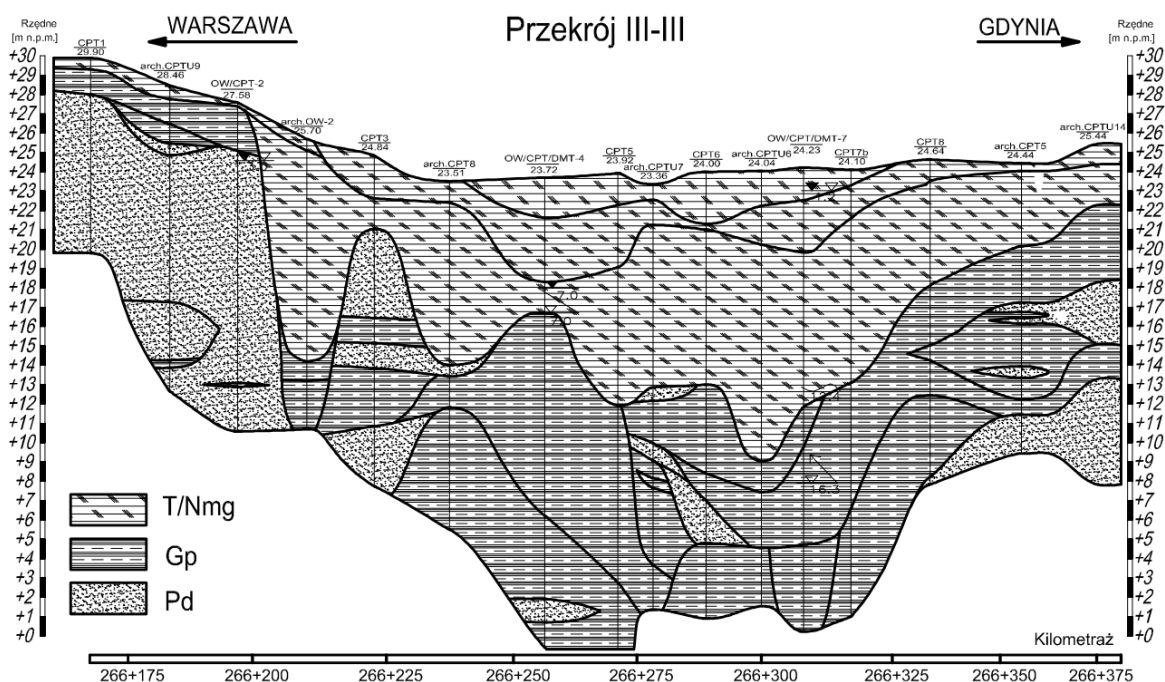
Rys. 2. Typowy przekrój poprzeczny przez nasyp w km 266 + 300 (stan pierwotny, przed osuwiskiem)

Poniżej znajdują się plejstocenyjskie osady morenowe reprezentowane głównie przez gliny piaszczyste i piaski gliniaste w stanie twardoplastycznym. Zwierciadło wód gruntowych sięga

Korpus nasypu kolejowego uformowano zarówno z gruntów niespoistych (piaski drobne i średnie w stanie luźnym i średnio zagęszczonym,  $I_D < 0,4$ ) jak i spoistych (gliny piaszczyste w stanie plastycznym i twardoplastycznym,  $I_L = 0,1-0,4$ ). Kilkudziesięcioletnie przeciążanie nasypem o wysokości 8–10 m spowodowało wykształcenie się naturalnej niecki z gruntów antropogenicznych i częściowe wyparcie gruntów organicznych spod nasypu. Odnotowane w badaniach terenowych miąższości gruntów pochodzenia organicznego bezpośrednio pod nasypem wynoszą 1–4 m i w wyniku konsolidacji charakteryzują się istotnie zwiększonymi parametrami wytrzymałościowymi względem analogicznych warstw oddalonych od konstrukcji nasypu.



Rys. 3. Mapa dokumentacyjna z zaznaczeniem przekroju III-III (dla strony prawej nasypu)



Rys. 4. Przekrój geotechniczny III-III (w podstawie nasypu od strony prawej)

### 3. Opis awarii

W trakcie prowadzonych robót ziemnych, objętych modernizacją linii kolejowej i bezpośrednio związanych z poszerzeniem nasypu o 1 m od strony toru nr 1 (rys. 5a), stwierdzono wciśniętą w nasyp warstwę tłucznia o miąższości 2–3 m, co świadczyło o wieloletnim osiadaniu nasypu w tym miejscu i regularnym podbijaniu torów. W listopadzie 2013 r., przed ułożeniem warstwy ochronnej na gotowym, poszerzonym podtorzu, nastąpiło osunięcie części korony nasypu odkrywające jednocześnie szczelinę szerokości około 5 cm (rys. 5b). Zauważalna rysa na powierzchni górnej podtorza przybrała kształt łuku od km 266 + 210 do km 266 + 340 o długości około 130 m, a zarejestrowane osiadania fundamentów słupów trakcyjnych wyniosły około 30 cm. Geometria i charakter odspojonej skarpy świadczyły o uruchomieniu się mechanizmu utraty stateczności nasypu w wyniku wytworzenia się głębokiej linii poślizgu.



Rys. 5. a) Wykonanie schodkowego skarpowania w celu poszerzenia nasypu o około 1 m od strony prawej nasypu, b) Pęknięcie korony nasypu pod torem nr 1

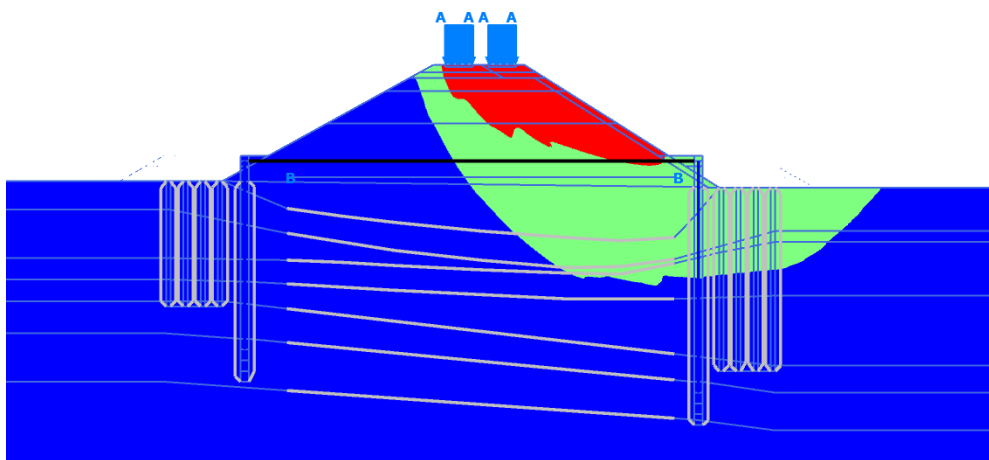
Czynny tor nr 2 objęty monitoringiem geodezyjnym nie wykazywał żadnych przemieszczeń, zatem ruch pociągów, z wyłączeniem taboru towarowego, został na nim utrzymany. Dodatkowo wprowadzono ograniczenie prędkości taboru pasażerskiego do 10 km/h. Niezwłocznie po wystąpieniu awarii wykonano podstawowe badania geotechniczne w celu głębszego względem projektu budowlanego rozpoznania warunków gruntowych. W rezultacie, po przeanalizowaniu ww. dokumentacji geologiczno-inżynierskiej przedstawiono Zamawiającemu (PKP PLK S.A.) kilka koncepcji projektowych wzmocnienia nasypu obejmujących szczegółowy kosztorys i harmonogram planowanych robót.

### 4. Projektowane rozwiązanie

Przed przystąpieniem do sporządzenia Projektu Wykonawczego naprawy nasypu-wyznaczono siatkę dodatkowych badań geotechnicznych (otwory wiertnicze, sondowania CPTU i DMT oraz badania trójosiowe) w celu weryfikacji przyjętych parametrów podłoża i zmienności warstw geologicznych na długości osuwiska. Niniejsze uszczegółowienie pozwoliło, względem koncepcji projektowej, na doprecyzowanie stref wzmocnienia nasypu, co w konsekwencji przełożyło się na korzyści czasowe dla Zamawiającego. W ramach prac przygotowawczych wykonano szczegółową inwentaryzację przebiegu pęknięcia korony oraz geometrii nasypu od km 266 + 150 do km 266 + 400. Po przeanalizowaniu danych projektowych przyjęto ostateczny zakres wzmocnienia nasypu od km 266 + 195 do km 266 + 355, tj. na odcinku około 160 m. Ze względu na występowanie gruntów słabonośnych będących przyczyną awarii, także poza zinwentaryzowanym pęknięciem nasypu, zakres wzmocnienia rozszerzono obustronnie zachowując odpowiedni margines bezpieczeństwa.



Przy projektowaniu naprawy nasypu wzięto pod rozwagę dwa warianty wzmocnienia: rozwiązanie sztywne i podatne. Podejście pierwsze spowodowałoby duże różnice sztywności pomiędzy wzmocnionym odcinkiem nasypu, a odcinkiem posadowionym na podłożu rodzimym. W tym rozwiązaniu należałoby dodatkowo wykonać strefy przejściowe, które wpłynęłyby na zwiększenie zakresów robót, co w rezultacie byłoby ekonomicznie nieuzasadnione. Po przeprowadzeniu analizy statycznej oraz w oparciu o doświadczenia z innych realizacji zaprojektowano podatne wzmocnienie nasypu pracujące podobnie jak sąsiadujące nasypy posadowione na gruntach nośnych, nie wykazujące osiadań. Stateczność ogólną nasypu kolejowego przeanalizowano za pomocą programu Plaxis 2D w oparciu o metodę elementów skończonych oraz porównawczo za pomocą programu inżynierskiego GGU-Stability w oparciu o metodę Bishopa. Uzyskano wymagany w instrukcji [3] współczynnik stateczności podtorza i jego elementów  $F_{min} > 1,50$  (dla fazy eksploatacji).



Rys. 6. Najbardziej niekorzystny przekrój obliczeniowy (km 266 + 300), obciążenie taborem kolejowym wg PN-85/S-10030, stan po wykonaniu wzmocnienia. Stateczność na poziomie  $F_{min} = 1,53$

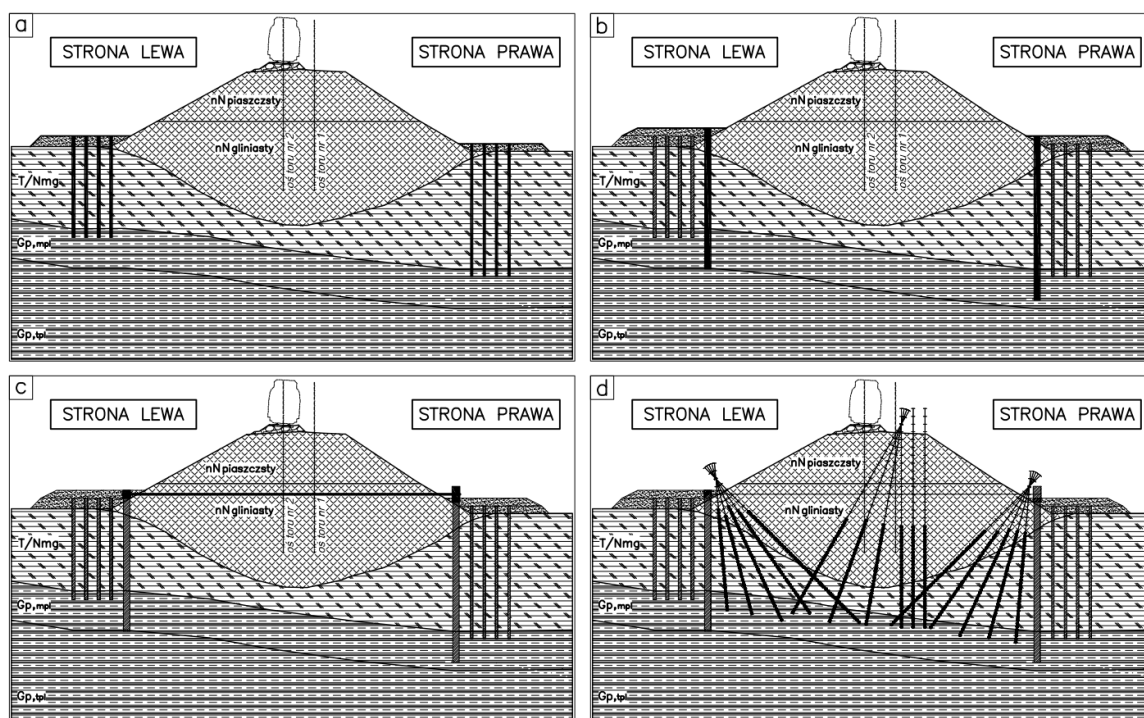
W pierwszej kolejności, w celu zapewnienia bezpieczeństwa robót oraz stateczności nasypu w trakcie zasadniczych robót naprawczych, przyjęto wykonanie po obu stronach nasypu tymczasowych przypór gruntowych o wysokości około 2 m i szerokości minimum 11 m. Przypory gruntowe wykorzystano jako platformy robocze dla specjalistycznych maszyn budowlanych. Ze względu na bardzo niskie parametry wytrzymałościowe podłoża gruntowego w podstawie nasypu zdecydowano się na wzmocnienie przypór gruntowych w paśmie pracy palownicy za pomocą kolumn betonowych (rys. 7a).

Następnie zaplanowano wykonanie ażurowych palisad z pali CFA (ang. *Continuous Flight Auger*) o średnicy 80 cm w rozstawie osiowym co 1 m (rys. 7b). Ażurowa konstrukcja palisad zakotwionych w warstwie nośnej na wymaganą określoną na podstawie obliczeń głębokość gwarantuje swobodny przepływ wód gruntowych, pozwalając tym samym uniknąć problemów związanych z ich piętrzeniem się przed przegrodą.

Warto zaznaczyć, iż w procesie wykonywania długich pali w złożonych warunkach gruntowych, co miało miejsce na opisanym odcinku nasypu, bardzo istotne jest doświadczenie, wykwalifikowany personel oraz możliwości sprzętowe wykonawcy. W takich okolicznościach szczegóły techniczne odgrywają ogromną rolę, dlatego zaleca się stosować procedury gwarantujące wysoką jakość wykonywanych robót. W celu redukcji ryzyka uszkodzenia sąsiednich, wykonanych już pali należy prowadzić ciągłą obserwację produkcji pali i odpowiednio, na bieżąco dostosowywać kolejność ich wykonywania (np. co trzeci / czwarty). Podczas wiercenia otworów pali następuje odprężenie i rozluźnienie gruntu zarówno wokół poboczniczy pala

jak i w jego podstawie, dlatego ważnym jest monitorowanie w sposób ciągły i utrzymywanie odpowiedniego ciśnienia mieszanki betonowej, równoważącej efekt „osłabienia” pala. Kolejnym aspektem znacząco wpływającym na jakość pala jest odpowiedni dobór receptury mieszanki betonowej, zapobiegającej „zamykaniu się” otworu wypełnionego betonem. Umiejętne przeciwdziałanie tworzeniu się tzw. obwałów gruntu umożliwia bezpieczne pogrążenie zbrojenia na znaczną głębokość, nawet do 18 m.

W kolejnej fazie robót zaplanowano zwieńczenie palisad belkami oczepowymi i spięcie ich ściągami wykonanymi w rurach „prowadzących” HDPE  $\varnothing$  90 mm zainstalowanych w przewiertach u podstawy nasypu (rys. 7c). Założono wykorzystanie systemowych ściągów składających się z trzech lub czterech lin stalowych (stal Y1600/1860, 150 mm<sup>2</sup>), zapewniając podwójną ochronę antykorozyjną elementów nośnych. Wykonana w ten sposób trwała konstrukcja oporowa przecina wykształconą głęboko linię poślizgu uniemożliwiając dalsze przemieszczenia poziome nasypu w trakcie jego eksploatacji. Dodatkowo zabezpiecza przed powstaniem potencjalnych linii poślizgu po drugiej stronie nasypu będącego obliczeniowo w stanie równowagi chwiejnej,  $F \approx 1,0$ .



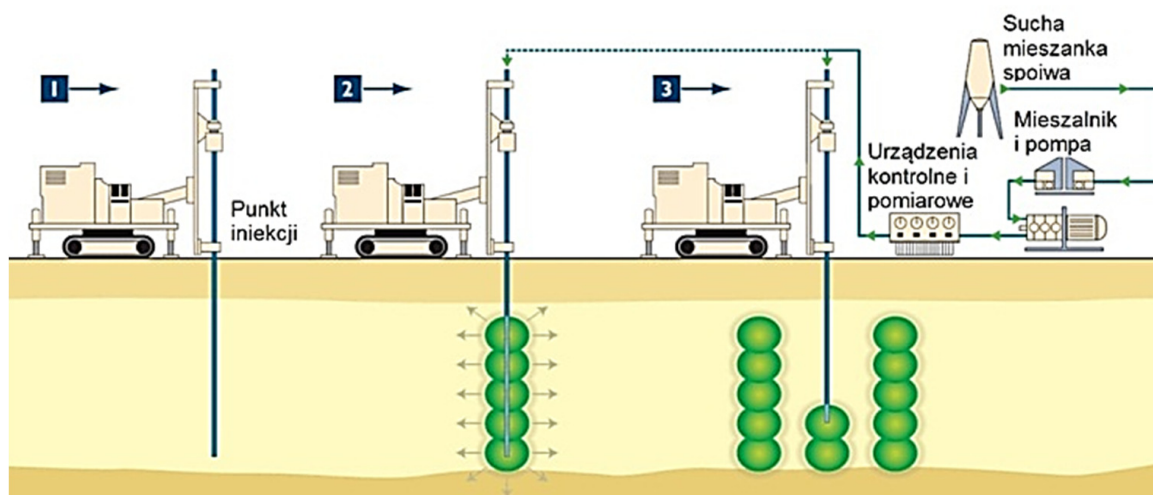
Rys. 7. Kolejność robót naprawczych: a) tymczasowe przypory gruntowe, b) palisada z pali CFA  $\varnothing$  80 cm, c) ściągi stalowe spinające palisady zwieńczone oczepami żelbetowymi, d) iniekcja CG

W ostatnim etapie prac naprawczych zaprojektowano wykonanie ciśnieniowej iniekcji zagęszczającej CG (ang. *Compaction Grouting*) w nasypie oraz w warstwie gruntów nienośnych znajdujących się pod podstawą nasypu. Rozstaw podłużny punktów iniekcji wynosił 2 m i został dostosowany do układu ściągów stalowych. Założono wykonanie punktów CG z korony nasypu w przesunięciu o 1 metr względem iniekcji realizowanych z jego lewej i prawej strony, tzn. mijankowo (rys. 7d). Zadaniem iniekcji było wgłębne dogęszczenie podłoża gruntowego rozluźnionego w wyniku powstania osuwiska, wypełnienie powstałych szczelin oraz stabilizacja nasypu poprzez zwiększenie sztywności podłoża gruntowego w warunkach eksploatacji torowiska.

Tabela 1. Przyjęte parametry robocze oraz kryteria wykonawcze iniekcji CG

| Parametr technologiczny            | Wartość / kryterium                                                                            |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Krok podciągania rury iniekccyjnej | 0,50 m                                                                                         |
| Objętość materiału iniekcyjnego    | min. 50 dm <sup>3</sup> /krok lub min. 100 dm <sup>3</sup> /mb iniekcji                        |
| Maksymalne ciśnienie iniekcji      | 0,3 MPa dla głębokości <10 m<br>1,0 MPa dla głębokości 10–15 m<br>2,0 MPa dla głębokości >15 m |

Iniekcja zagęszczająca Compaction Grouting systemu Kellera polega na pompowaniu w podłoże gruntowe stabilnego materiału wypełniającego (iniekt – pasta betonowa), w wyniku czego doprowadza się do zagęszczenia gruntów niespoistych lub wzmocnienia gruntów spoistych i organicznych. W czasie iniekcji kontroluje się na bieżąco ciśnienie iniekcji oraz ilość wpompowanego iniektu i na podstawie pomiaru tych parametrów produkcyjnych ustala się kryterium zakończenia iniekcji w poszczególnych punktach (tab. 1). Zasadnicze znaczenie dla przebiegu i skuteczności tego typu iniekcji ma umiejętność właściwego doboru wszystkich parametrów procesu, w tym szczególnie składu, ilości i sposobu wtlaczania wypełniacza. Ponadto konieczne są wnikliwe obserwacje przemieszczeń podłoża oraz aktywne projektowanie.



Rys. 8. Etapy realizacji iniekcji CG: 1. wprowadzenie rury iniekccyjnej, 2. proces iniekcji, 3. stopniowe zagęszczanie

Technologia iniekcji CG obejmuje następujące etapy robót (rys. 8):

1. Rura wiertnicza zakończona traconą koronką/ostrzem zostaje wprowadzona do projektowanej głębokości za pomocą techniki wiertniczej lub wibracyjnej. Po osiągnięciu głębokości przewidzianej w Projekcie formuje się podstawę kolumny iniekccyjnej przez wprowadzenie w podłoże założonej ilości stabilnego wypełniacza, pod ciśnieniem zależnym od zagłębienia rury i rodzaju gruntów.
2. Następnie rurę podciąga się etapami do góry i wprowadza się pod ciśnieniem przygotowaną wcześniej w mieszalniku zaprawę iniekcyjną, przy czym ilość wtlaczanego materiału i ciśnienie robocze iniekcji podlegają stałej obserwacji i kontroli. Podczas stopniowego podciągania lub zagłębienia rury iniekccyjnej tworzy się szereg pojedynczych, przylegających do siebie brył, które ostatecznie tworzą kolumnę iniekcyjną. Prędkość podciągania rury oraz czas i przerwy w iniekcji zależą od rodzaju gruntu oraz od wymaganego stopnia wzmocnienia podłoża.

3. Dla osiągnięcia równomiernego zagęszczenia gruntu iniekcja wykonywana jest początkowo w luźnej siatce (kolumny pierwotne), a następnie siatka punktów iniekcyjnych zostaje dogęszczona (kolumny wtórne).

### 5. Analiza sytuacji na czynnym osuwisku

W oparciu o projekt wykonawczy przystąpiono na budowie do realizacji robót przygotowawczych. Po wykonaniu tymczasowych przypór gruntowych, stanowiących platformy robocze do wykonania zasadniczych robót naprawczych, w dniach 25–26 września 2014 r., bezpośrednio w wyniku intensywnych opadów deszczu, nastąpiło gwałtowne aktywowanie osuwiska (rys. 9). Niezwłocznie po zaistniałym zdarzeniu zwołano komisję, której członkowie określili dalszy tok postępowania. Czynny tor nr 2 w obrębie osuwiska objęto całodobowym monitoringiem polegającym na kontroli istniejącego toru w planie i w profilu (po każdym przejeździe pociągu – wizualne oględziny torowiska, co godzinę – pomiar geodezyjny przemieszczeń szyn). W przypadku negatywnych wyników oględzin bądź pomiarów Inżynier odpowiedzialny za monitoring został zobowiązany do niezwłocznego zawiadomienia dyżurnych służb kolejowych o wstrzymaniu ruchu pociągów. Pod tym warunkiem utrzymano przejezdność toru, podtrzymując jednocześnie ograniczenie prędkości do 10 km/h.

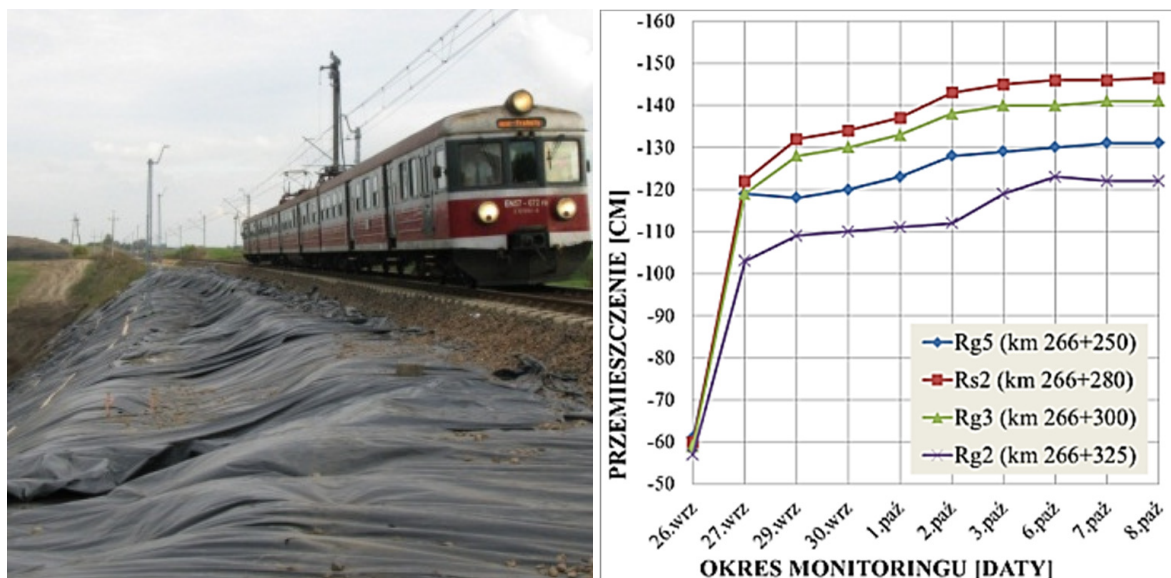


Rys. 9. Korona nasypu w dniu 26.09.2014 r. (przemieszczenie około 60 cm)

Dodatkowo koronę nasypu zakryto na długości osuwiska folią budowlaną zabezpieczając bryłę nasypu przed dalszym niszczącym wpływem czynników atmosferycznych (rys. 10a). W związku z postępującą deformacją osuwiska, podjęto decyzję o instalacji 6. inklinometrów do pomiaru deformacji poziomych podstawy osuwiska. Dodatkowo wykonano sondowania dynamiczne dla oceny stanu zagęszczenia nasypu w rejonie osuwiska: w klinie odłamu (koluwium), poza płaszczyznę poślizgu oraz referencyjnie pod istniejącym torem nr 2.

Wyniki pomiarów przemieszczeń nasypu wykazały w okresie kilkunastu dni całkowite osiadania osuwiska około 1,5 m w najniekorzystniejszym przekroju km 266 + 280 (rys. 10b). Po około 2 tygodniach od zaistniałej sytuacji, przemieszczenia zaczęły wykazywać tendencję do stabilizacji, co wskazywało, iż osuwisko stopniowo przestawało „płynąć”, a nasyp nie podlegał już dalszej degradacji. Zauważalne zmniejszenie tempa osiadania odspojonej części nasypu umożliwiło kontynuowanie zasadniczych prac naprawczych w obrębie osuwiska od strony prawej nasypu.



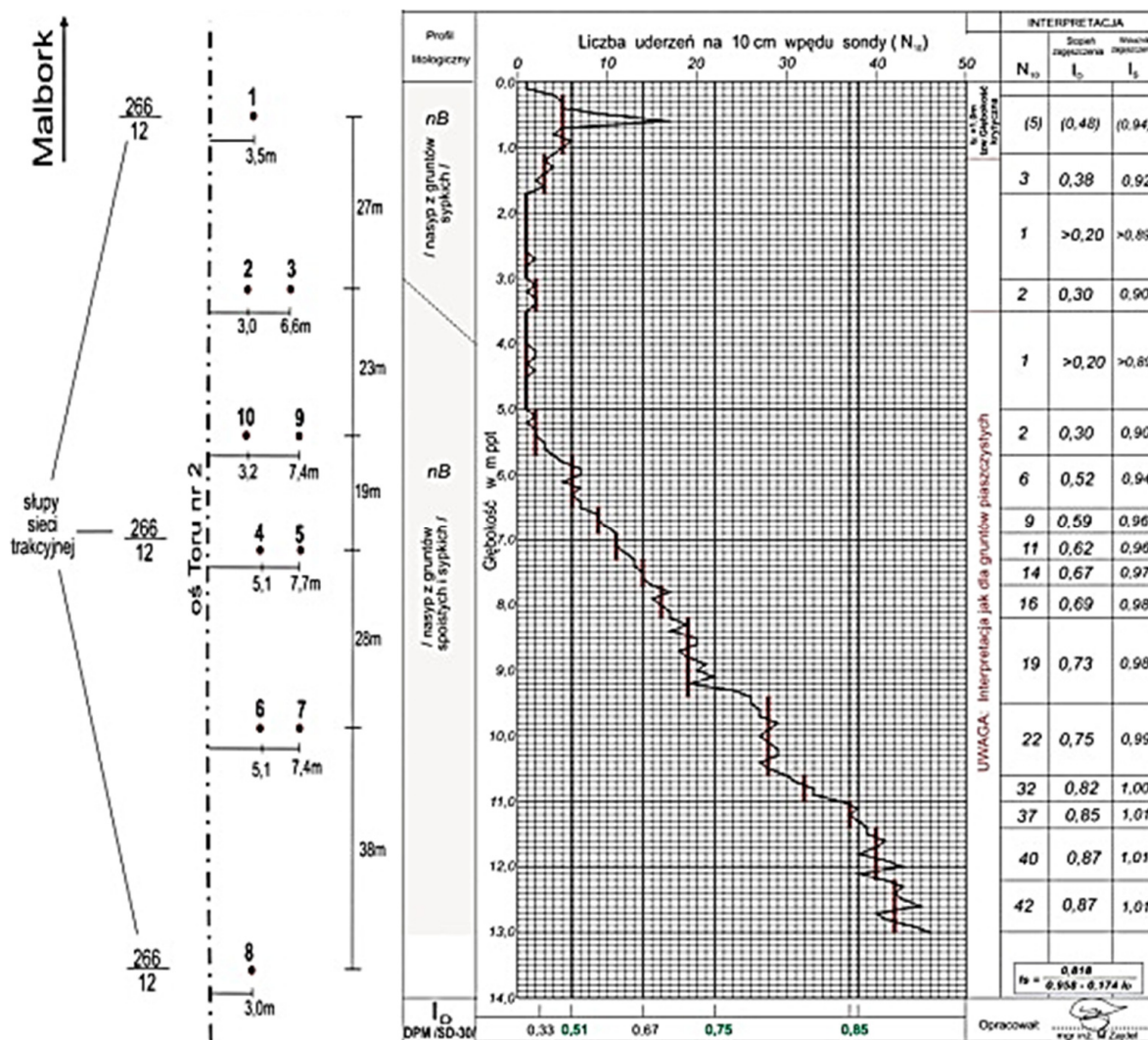


Rys. 10. a) Korona nasypu w dniu 27.09.2014 r. (przemieszczenie około 120 cm), b) Wykres osiadań odspojonego nasypu w czterech przekrojach obserwacyjnych w okresie 25.09–08.10.2014 r.

Analiza wyników wykonanych sondowań dynamicznych sondą średnią DPM pozwoliła na sformułowanie kilku ważnych wniosków. Sondowania nr 1, 2, 8, 10 wykonane poza osiadającą bryłą osuwiska oraz przy torze nr 2 wykazały zróżnicowane parametry nasypu znajdującego się głównie w stanie średnio zagęszczonym o  $I_D \geq 0,45$  ( $I_S \geq 0,93$ ). Badania nr 3, 4, 5, 6, 7, 9 wykonane z niższego poziomu, tj. z powierzchni półki osuwiskowej pokazały wyraźnie niższy stopień zagęszczenia wskazujący na rozluźnienie przemieszczonej części nasypu. Strefy gruntu rozluźnionego o  $I_D < 0,38$  ( $I_S < 0,92$ ) sięgają do głębokości około 6 m poniżej obniżonej korony osuwiska. Lokalizację badań oraz przykładowe sondowanie nr 3 zamieszczono na rys. 11. Wyniki sześciu sondowań wykonanych bezpośrednio pod istniejącym torem nr 2 wykazały znacząco wyższy stopień zagęszczenia  $I_D \geq 0,50$  ( $I_S \geq 0,94$ ). Ocenę wartości i interpretację wskaźnika zagęszczenia  $I_S$  określono jak dla gruntów piaszczystych wg zależności korelacyjnej [4]:

$$I_s = \frac{0,818}{0,958 - 0,174 \cdot I_D} \quad (1)$$

Zarówno wyniki badań sondami dynamicznymi jak i charakter czynnego osuwiska wskazywały jednoznacznie, iż odspojeniu i osunięciu uległ materiał tworzący poszerzenie nasypu wykonane w latach 60. ubiegłego wieku, dobudowany do pierwotnie jednotorowego układu linii kolejowej. Rozluźniona, osiadająca część nasypu nie spełniała wymagań dokumentacji projektowej oraz nie gwarantowała bezpieczeństwa docelowego nasypu. Podjęto zatem trudną, ale konieczną decyzję o wstrzymaniu ruchu pociągów na torze nr 2. Zamknięcie linii zaplanowano na 24 października 2014 r. o godzinie 22:10. Otrzymano tylko 32 dni na wymianę wadliwej części nasypu zgodnie ze sztuką budowlaną i przywrócenie pełnej przejezdności pociągów. W wyniku analizy zaistniałej kryzysowej sytuacji zaproponowano dostosowane do aktualnych warunków zamienne, tożsame z wcześniejszym, rozwiązanie projektowe, dające w efekcie porównywalny stopień wzmocnienia podłoża i umożliwiające realizację prac w narzuconym terminie.



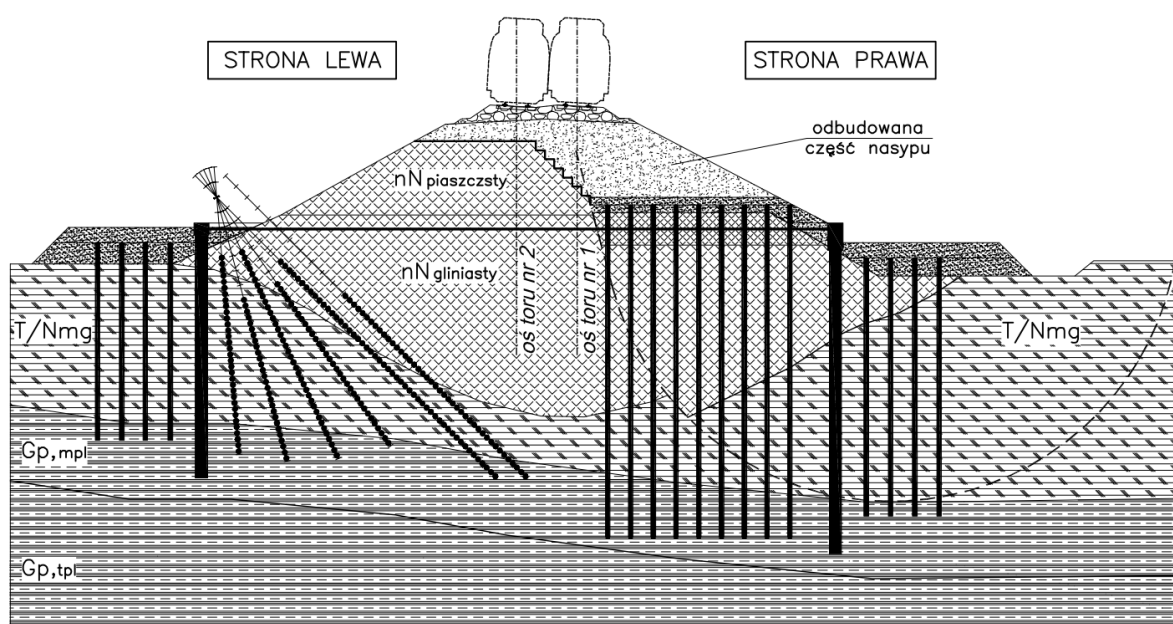
Rys. 11. Lokalizacja sondowań i przykład sondowania dynamicznego nr 3 w osiadającym klinie odłamu osuwiska

## 6. Rewizja założeń projektowych

Wprowadzone zmiany obejmowały demontaż toru nr 2 i częściowe usunięcie nasypu. Dodatkowo punkty iniekcji CG wykonywane od strony prawej i z korony nasypu zostały zastąpione systemem kolumn CSC Ø 40 cm (ang. *Controlled Stiffness Column*) wraz z warstwą transmisyjną, stanowiącą wzmocnienie podłoża pod odbudowywaną częścią nasypu (rys. 12). Technologia kolumn o kontrolowanej sztywności to metoda wzmocnienia gruntu polegająca na wykonaniu kolumn tworzących wraz z otaczającym podłożem kompozyt o sztywności większej od sztywności gruntu. Zaprojektowano kolumny jako pionowe sztywne elementy betonowe formowane w gruncie metodą głowicy przemieszczeniowej wzmacniające słabe podłoże gruntowe. Krótco po wykonaniu kolumny, jej głowicę ścinano na świeżo, na głębokość około 0,5 m poniżej powierzchni roboczej oraz wprowadzano projektowane zbrojenie. Ubytek betonu wypełniano kruszywem, z materiału jak dla powierzchni roboczej. Wymienione roboty miały na celu wykształcenie podatnego podparcia warstwy transmisyjnej tzw. platformy LTP (ang. *Load Transfer Platform*), zapobiegającego nadmiernej penetracji trzonu betonowego w warstwę nadbudowy. System ten umożliwił przejęcie części obciążeń oraz przeniesienie ich w głębsze

warstwy poprzez tarcie na pobocznicy i opór podstawy kolumny. Obliczono, iż odciążenie w ten sposób słabszych warstw spowoduje znaczną redukcję osiadania nasypu w fazie eksploatacji.

Po wykonaniu kolumn CSC na ich głowicach rozpoczęto układanie warstwy transmisyjnej, redystrybuującej obciążenia wewnątrz kompozytu. Platforma LTP składała się z mat stalowych i zagęszczonego gruntu zasypowego, stanowiących integralną część systemu wzmocnienia podłoża. Następnie wykonano badania odbiorcze za pomocą aparatu VSS i określono wartości wtórnych modułów dla warstwy transmisyjnej. Z badań uzyskano średni moduł o wartości 63 MPa, przy wymaganym w projekcie module  $E_{V2} \geq 40$  MPa. Po dokonaniu odbioru platformy LTP zamontowano repery talerzowe w celu monitorowania przemieszczeń pionowych podstawy nasypu.



Rys. 12. Zrealizowany sposób naprawy nasypu

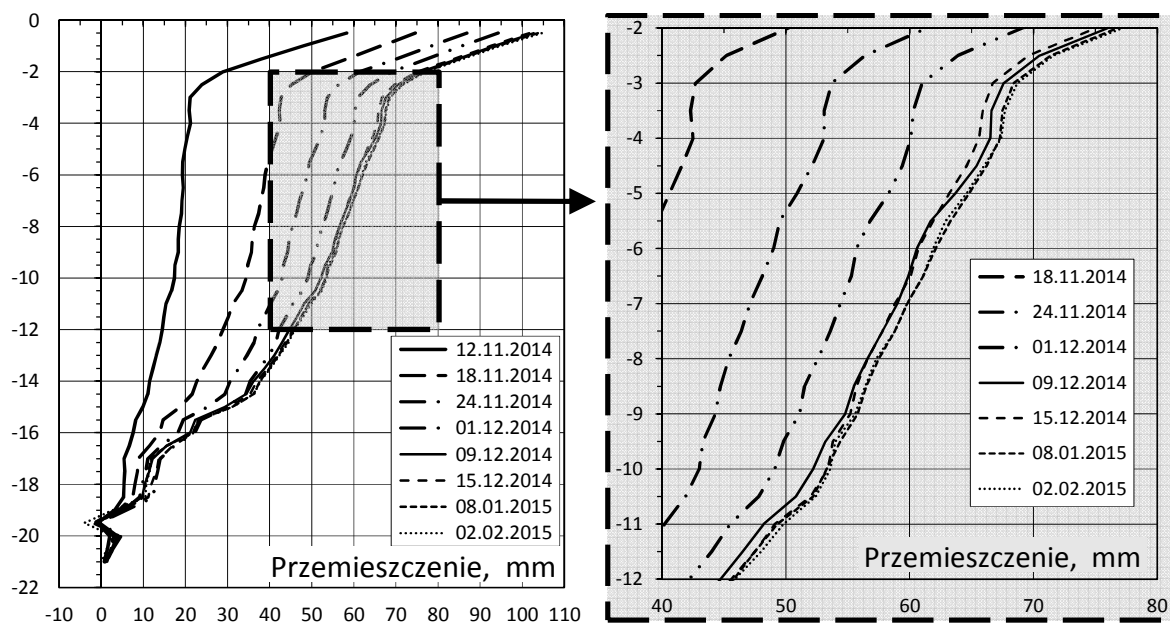
Po zrealizowaniu wzmocnienia nasypu za pomocą systemu kolumn CSC wraz z platformą LTP, przystąpiono do budowy kolejnych warstw korpusu nasypu. Połączenie istniejącego nasypu z częścią odbudowywaną przeprowadzono poprzez schodkowanie o wymiarach schodków  $60 \times 80$  cm. W celu ujednolicenia parametrów górnej części podtorza ostatni metr nasypu, licząc od góry warstwy ochronnej, wykonano jako jedną wspólną warstwę dla istniejącej oraz dobudowywanej części nasypu (rys. 12). W Projekcie przyjęto parametry odbiorcze konstrukcji podtorza określając wskaźnik zagęszczenia gruntów nasypu zgodnie z instrukcją [3], tj. do głębokości 2,0 m od góry warstwy ochronnej –  $I_s \geq 1,00$ , poniżej 2,0 m od góry warstwy ochronnej –  $I_s \geq 0,95$ .

## 7. Podsumowanie

Przedstawiony przykład dotyczył wykonania kompleksowego wzmocnienia nasypu kolejowego znajdującego się w stanie awaryjnym w złożonych warunkach gruntowo-wodnych i przy bardzo restrykcyjnych terminach umownych (newralgiczne 32 dni). Prawdziwym wyzwaniem dla Inżynierów realizujących kontrakt okazało się sprawne koordynowanie pracujących jednocześnie na ograniczonej przestrzeni ludzi i wielu maszyn. Sprawne zarządzanie budową pozwoliło szczęśliwie zakończyć ją sukcesem, bez żadnego poważnego wypadku.



Po zrealizowaniu wszystkich robót naprawczych, prowadzone regularne pomiary przemieszczeń poziomych podstawy nasypu za pomocą inklinometrów (rys. 13) jak również pomiary geodezyjne oczepów wykazały stabilizację przemieszczeń, potwierdzając tym samym skuteczność i poprawność zastosowanego rozwiązania. Z perspektywy doświadczeń zakończonoj naprawy nasypu w Jurkowicach można w sposób uzasadniony stwierdzić, że nigdy nie należy lekceważyć sił natury i zawsze trzeba pamiętać o bezpieczeństwie zarówno ludzi pracujących na budowie jak i bezpieczeństwie wznoszonej konstrukcji.



Rys. 13. Wykres przemieszczeń poziomych nasypu pomierzonych za pomocą inklinometru. Pomiar zerowy 07.11.2014 r. (zakończenie wykonywania kolumn CSC), pomiar referencyjny 15.12.2014 r. (zakończenie sprężania ściąągów stalowych)



Rys. 14. Odbudowany nasyp od strony osuwiska



Ponadto, zdaniem autora, niewystarczające na etapie projektu budowlanego rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych, chociaż zgodne z instrukcją Id-3 [3] (głębokość rozpoznania do 2–2,5 m od główki szyny), nie pozwala wychwycić potencjalnie problematycznych miejsc. Powoduje to konsekwencje finansowo-czasowe dla całego zamierzenia i powinno być tematem szerszej dyskusji w kontekście przyszłych kontraktów kolejowych. Wypracowanie przez geotechników poprawnych procedur przy rozpoznaniu podłoża gruntowego może przynieść wymierne korzyści w projektach infrastruktury kolejowej.

## 8. Podziękowania

Wyrażam szczególne podziękowania Generalnemu Wykonawcy robót (firmie Trakcja PRKiL S.A.), całemu Zespołowi Inżyniera Projektu (Egis Poland Sp. z o.o./Halcrow) oraz przedstawicielom Zamawiającego (PKP PLK S.A.) za konstruktywną i owocną współpracę oraz koordynację prac w czasie realizacji opisanego kryzysowego zadania. Działając wspólnie, przy ogromnym zaangażowaniu, udało się zrealizować projekt w oczekiwanym terminie, przy zachowaniu wysokiej jakości robót oraz uzyskując efekt przejeźdnosci „Pendolino” z projektowymi prędkościami.

## Literatura

1. Lijewski T. Geografia Transportu Polski, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1977.
2. GEOS Consulting Zakład Ochrony Środowiska: Raport o oddziaływaniu na środowisko przebudowy i rozbudowy (modernizacji) linii kolejowej E65 Warszawa-Gdynia w granicach województwa pomorskiego km 236.900–328.120; 0.00 – do km 26.00, Warszawa 2006.
3. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, Warszawa 2009.
4. Borowczyk M., Frankowski Z. Wpływ parametrów fizycznych gruntu na ocenę wskaźnika i stopnia zagęszczenia. VI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, 36–44.

## SOIL IMPROVEMENT OF EMBANKMENT IN FAILURE STATE ALONG RAILWAY LINE E65 IN JURKOWICE

**Abstract:** The article presents the methods of ground treatment and stabilization of embankment in failure state along the railway line E65 in Jurkowice as a part of national programme of high-speed rail construction. Three key components of the scheme have been presented: the causes of the failure, the role of site investigation in the context of adequate determination of geotechnical properties, and design solutions. The methods of monitoring the active landslide and reconstructing the embankment dependent on the achieved results have been discussed according to conscious designing philosophy as well as the possible and accepted repair solutions.

**Keywords:** improvement, embankment, high-speed rail, landslide, Pendolino, geotechnics, CFA, CSC, Compaction.

