

WARIANTOWA ANALIZA WZMOCNIENIA PODTORZA NA PRZYKŁADZIE LINII KOLEJOWEJ NR 8, ODCINEK WARKA-RADOM¹

Elżbieta Pilecka

dr hab. inż., prof. PK, Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

Grzegorz Gierula

mgr inż., Swietelsky Rail Polska, ul. Wielicka 250, 30-663 Kraków

Streszczenie. W artykule przedstawiono wariantową analizę wzmocnienia na przykładzie linii kolejowej nr 8 odcinek Warka – Radom. Analizę przeprowadzono na przykładowym przekroju stosując wzmocnienie kolumnami DSM i wymianę gruntu. Przeprowadzono analizę numeryczną w programie Z-Soil. W wyniku obliczeń okazało się, że oba warianty wzmocnień są pod względem inżynierskim dopuszczalne. Większy zapas bezpieczeństwa wykazało jednak wzmocnienie w postaci kolumn DSM.

Słowa kluczowe: wzmocnienie podtorza, Metoda Elementów Skończonych, kolumny DSM, wymiana gruntu

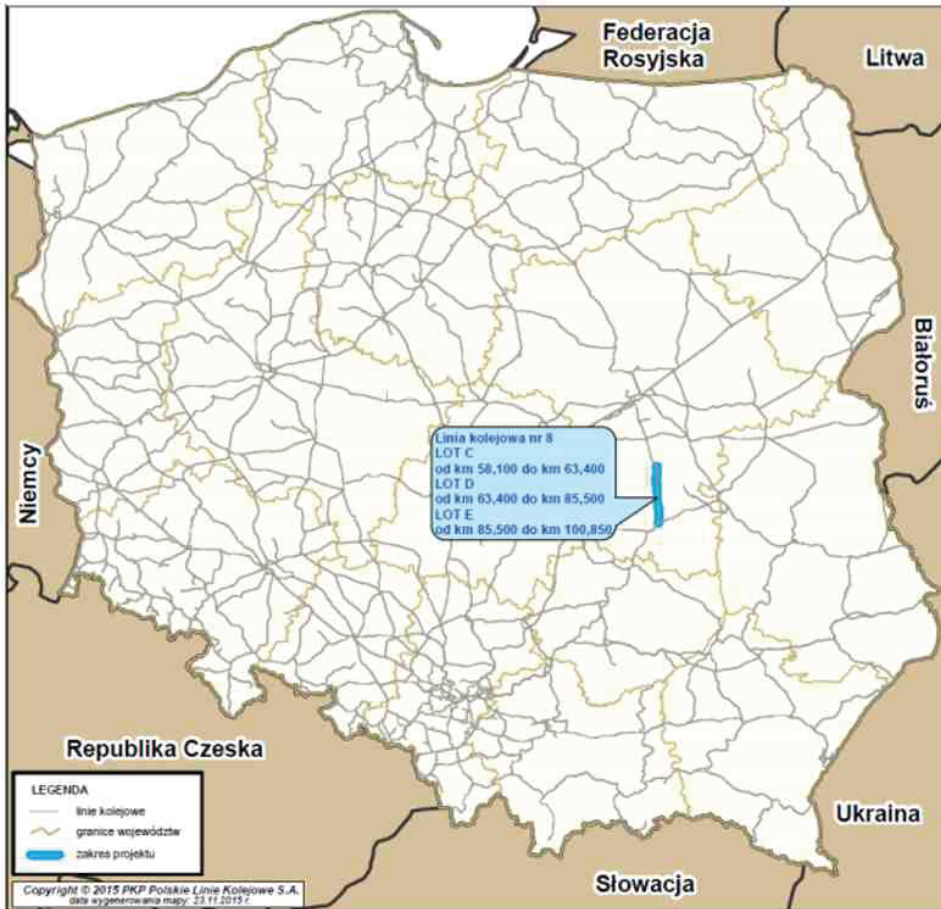
1. Wstęp

Celem wariantowej analizy wzmocnienia podtorza na przykładzie linii kolejowej nr 8 odcinek Warka – Radom jest sprawdzenie zasadności zamiany wariantu wzmocnienia podtorza poprzez wymianę gruntu słabonośnego na wariant obejmujący wzmocnienie podtorza poprzez wykonanie kolumn DSM. Zamiana wariantu została zastosowana na odcinku w km 75+000 – 76+000 linii kolejowej nr 8, odcinek Warka – Radom.

1.1. Charakterystyka warunków geologicznych

Analizowany odcinek linii kolejowej w całości zlokalizowany jest w województwie mazowieckim, pomiędzy Warką a Radomiem. Dokładny przebieg trasy został przedstawiony na rys. 1.1.

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Pilecka E.: 50%, Gierula G.: 50%



Rys. 1.1. Orientacja linii kolejowej nr 8 na mapie Polski

Zródło: PKP Polskie Linie Kolejowe S.A

1.1.1. Ukształtowanie regionalnej budowy geologicznej

Obszar inwestycji ulokowany jest w południowo – zachodniej części niecki brzeźnej oraz na północno – wschodnim skłonie wału środkowopolskiego.

Jak zostało przedstawione na rys. 1.2 niecka brzeźna położona jest w skrajnej części platformy wschodnioeuropejskiej i ma postać długiej depresji wypełnionej osadami kredy oraz paleogenu. Pod osadami występują utwory jury permu oraz triasu. Kształt niecki jest sfałdowany oraz pocięty wieloma uskokami. Na rysunku widoczny jest również obszar wału środkowopolskiego o pozytywnej strukturze oraz ogólnym kierunku północno-wschodnim i południowo-zachodnim. Wał rozciąga się przez zakres całej Polski, począwszy od Pomorza do Małopolski.



Rys. 1.2. Spis jednostek geotektonicznych Polski

Źródło: Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy

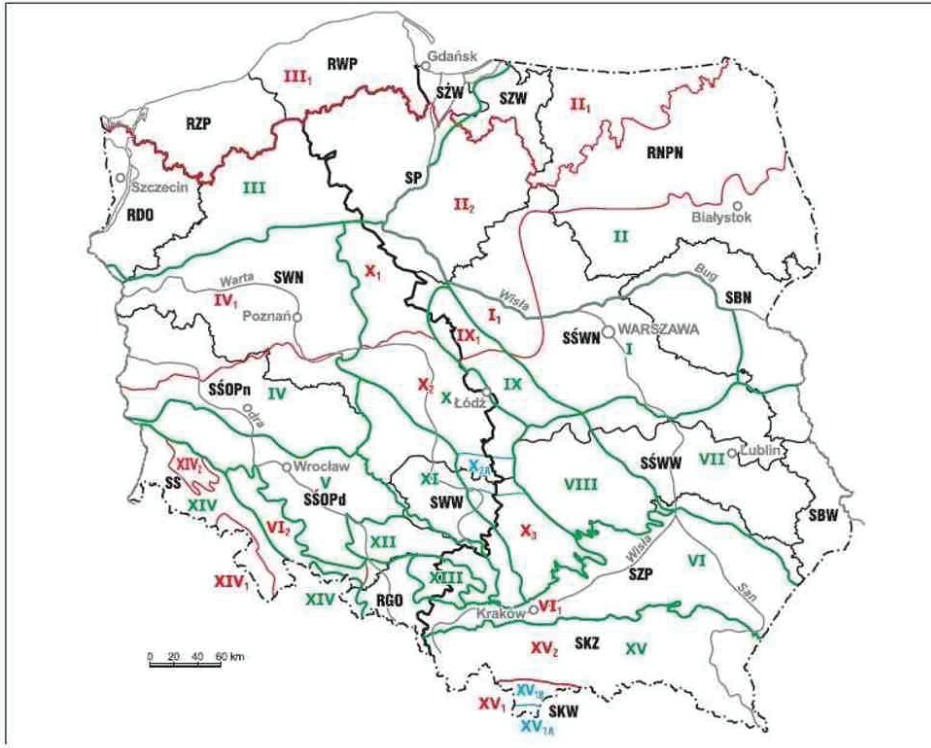
1.1.2. Warunki hydrogeologiczne

Omawiany odcinek kolejowej usytuowany jest na granicy następujących regionów hydrologicznych: region IX lubelsko – podlaski oraz I mazowiecki.

Na analizowanym odcinku jako utwory wodonośne można wyróżnić czwartorzędowe piaski oraz piaski ze żwirem, górne wapno kredowe jak i miocenijskie piaski.

Według mapy Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce, opracowanej przez AGH IHiGI, odcinek linii kolejowej usytuowany jest na obszarze czwartorzędowego zbiornika porowego, charakteryzującego się naturalnym zwierciadłem wody oraz bardzo dużą zasobnością. Kolejnym ośrodkiem porowym, przez który przechodzi linia kolejowa jest ośrodek położony w utworach paleogenu oraz neogenu. Ostatnim obszarem obejmującym część odcinka linii kolejowej nr 8 jest Niecka Radomska, która jest kredowym porowo-szczelinowym zbiornikiem.

Podział według jednostek hydrogeologicznych został przedstawiony na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Podział według jednostek hydrogeologicznych

Zródło: Hydrologia regionalna Polski, 2007

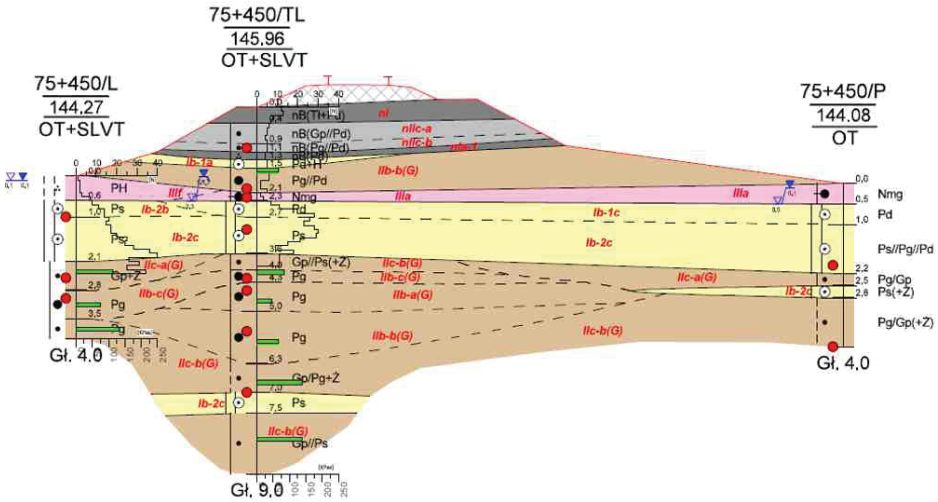
1.1.3. Charakterystyka warunków geologiczno-inżynierskich

Warunki geologiczno-inżynierskie zostały przedstawione na podstawie prac terenowych, takich jak wykonanie odwiertów badawczych, wykonanie badań makroskopowych gruntów oraz przeprowadzenie licznych badań laboratoryjnych.

W trakcie opracowywania modelu geologicznego podłoża posłużono się normą PN-EN 1997-1. Wielkości parametrów przedstawiono na podstawie wyników badań (badania laboratoryjne oraz odwierty). Bezpośrednio pod warstwą nasypów znajdują się bardzo zróżnicowane warstwy gruntu, które stanowią podłoże dla budowl ziemnych.

Na potrzeby wyraźnego zobrazowania warstw gruntów o różnych parametrach, stworzono grupy gruntów o podobnych właściwościach i na ich podstawie zdefiniowano warstwy geotechniczne.

Jak można zauważyć na rys. 1.4, przedstawiającym przekrój poprzeczny przez poszczególne warstwy, bezpośrednio pod nasypem zalegają grunty słabo nośne. Są to piaski gliniaste oraz namuły w stanie plastycznym oraz miękkoplastycznym. Poniżej nienośnych gruntów spoistych znajduje się warstwa gruntu niespoistego (piasek drobny oraz piasek średni), będącego w stanie średnio zagęszczonym. Wytrzymałość podtorza, składającego się z powyższych warstw gruntów zostanie przeanalizowana w dalszej części niniejszego opracowania.



Rys. 1.4. Przekrój geotechniczny, poddany analizie w km 75+450

Źródło: Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska, Linia kolejowa nr 8, odcinek Warszawa – Radom, od km 58+100 – 100+850

2. Analiza porównawcza

2.1. Kryterium wytrzymałościowe

Celem niniejszego rozdziału jest przeprowadzenie analizy, ocena stanu technicznego podtorza linii kolejowej nr 8 na analizowanym odcinku oraz sprawdzenie skuteczności proponowanych rozwiązań (wzmocnienie poprzez kolumny DSM oraz wzmocnienie poprzez wymianę gruntu słabonośnego).

Analizę przeprowadzono posługując się programem ZSoil, wykorzystującym do obliczeń MES (Metoda Elementów Skończonych). Obliczenia przeprowadzono na przekroju wybranym z kilometrowego odcinka podlegającego wzmocnieniu. Wyniki przedstawiono poniżej.

Obciążenie oddziałujące na odcinek poddany analizie zestawiono zgodnie z PN-EN 1991-2:2003. Współczynnik dynamiczny: do poniższego obciążenia równomiernie rozłożonego nie należy stosować współczynnika dynamicznego lub nadwyżki dynamicznej.

Wartość współczynnika klasyfikacyjnego α :

Przyjęta wartość współczynnika $\alpha = 1,21$ (min. wymaganego wg. tab. 11 TSI INF)

Obciążenia charakterystyczne rozłożone na szer. 3,0 m oraz 0,70 m poniżej płaszczyzny jazdy toru oraz umieszczone w osiach poszczególnych torów:

- obciążenie stałe:

$$\frac{6 \frac{kN}{mb}}{3,0mb} = 2 \frac{kN}{m^2}$$

- obciążenie zmienne (ruchem kolejowym):

$$\frac{4 \times 250 \text{ kN}}{6,4 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}} = 52,08 \times 1,21 = 63,02 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Przyjęto wartość **63,00** $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Obciążenia obliczeniowe rozłożone na szer. 3,0 m oraz 0,70 m poniżej płaszczyzny jazdy toru oraz umieszczone w osiach poszczególnych torów.

- obciążenie stałe:

$$\gamma G = 1,0 \times 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- obciążenie zmienne (ruchem kolejowym):

$$\gamma Q = 1,3 \times 63,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 81,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Określenie miarodajnego obciążenia użytkowego:

$$\gamma Q = 1,3 \times 25,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 32,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\gamma Q = 1,3 \times 5,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 6,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

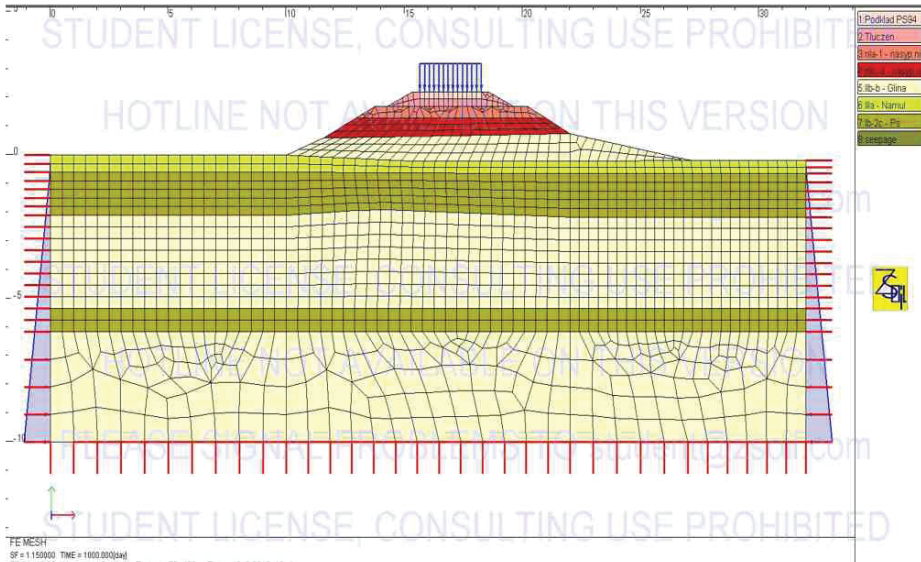
W celu wykonania analizy stateczności podtorza, zamodelowano schemat obliczeniowy, na podstawie przekroju geologicznego. Model obliczeniowy zawiera siatkę o nieregularnej wielkości oczek. Największe dogęszczenie siatki znajduje się w partii nasypowej, gdzie warstwy te mają największy wpływ na wynik analizy. W odróżnieniu do głęboko zalegających warstw gruntu, gdzie oczka siatki zostały rozszerzone, z uwagi na niewielki wpływ na wynik analizy.

Z uwagi na specyfikę materiału jakim jest grunt, do wykonania analizy posłużono się modelem Coulomba-Mohra, który znajduje zastosowanie głównie w przypadku, gdy materiał poddany analizie charakteryzuje się niewielką wytrzymałością na rozciąganie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie.

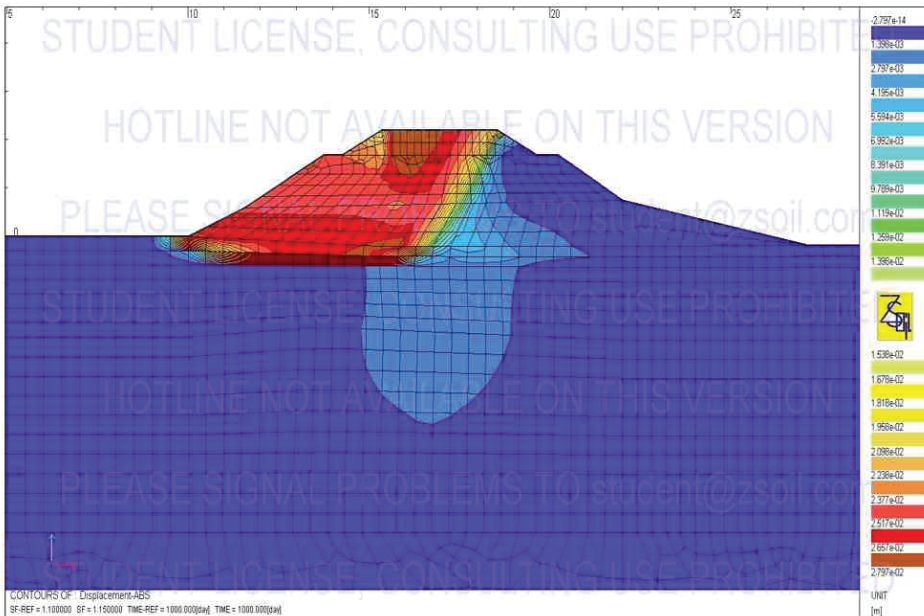
Model został przedstawiony na rysunku 2.1.

Poprzez przeprowadzenie analizy otrzymano współczynnik bezpieczeństwa $SF=1,15$. Współczynnik jest zbyt niski, aby spełnić wymagania przedstawione w instrukcji Id-3. Współczynnik bezpieczeństwa dla podtorza kolejowego po modernizacji wynosi $SF=1,3$.

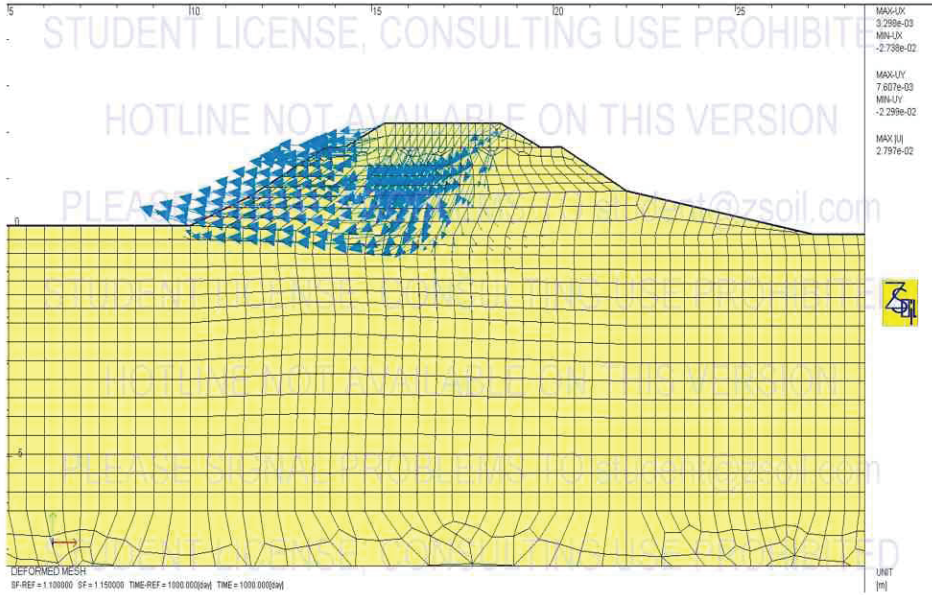
Jak zostało przedstawione na powyższych rysunkach, wpływ obciążenia działa deformująco na geometrię podtorza. Analizowany nasyp traci swoją stateczność w znacznej części przekroju poprzecznego. Taki wynik analizy jest spowodowany sporym obciążeniem, jakie jest przekazywane na podtorze, powodując tym samym widoczne przemieszczenie gruntu w kierunkach pionowych oraz poziomych, działając destrukcyjnie na konstrukcję budowli ziemnej.



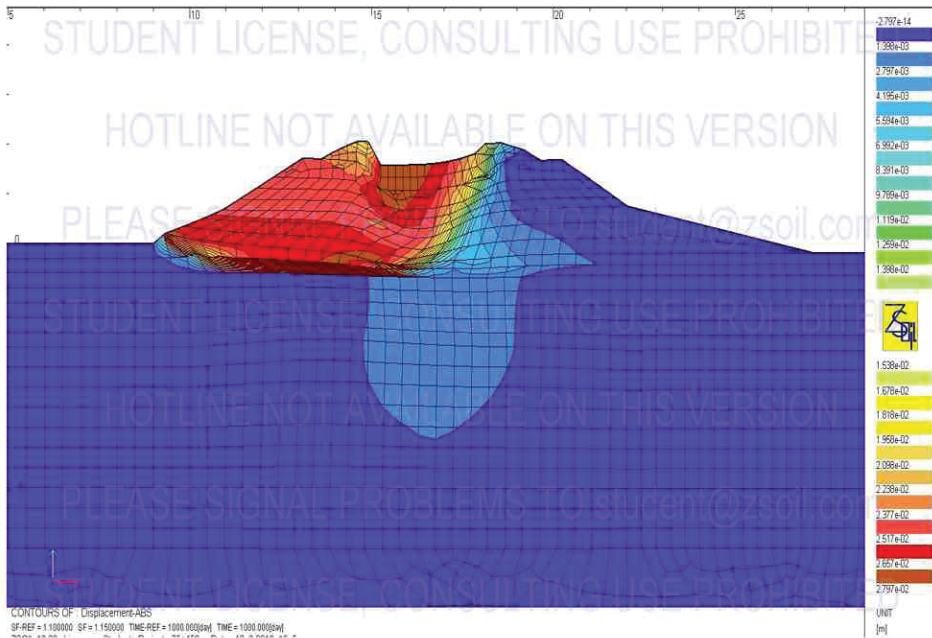
Rys. 2.1. Model obliczeniowy gruntu – przekrój w km 75+450



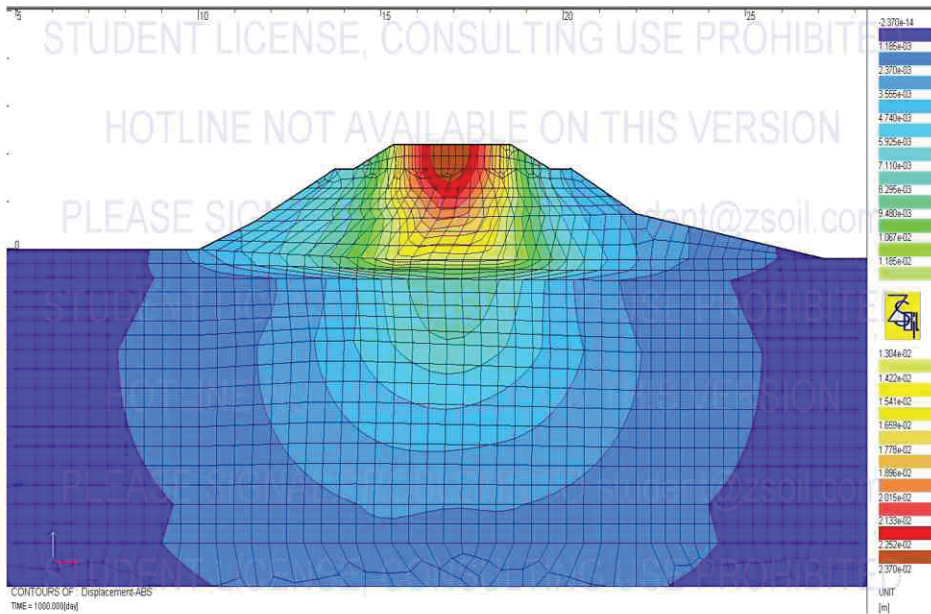
Rys. 2.2. Stan istniejący – powierzchnia poziomą – SF=1,15 w km 75+450



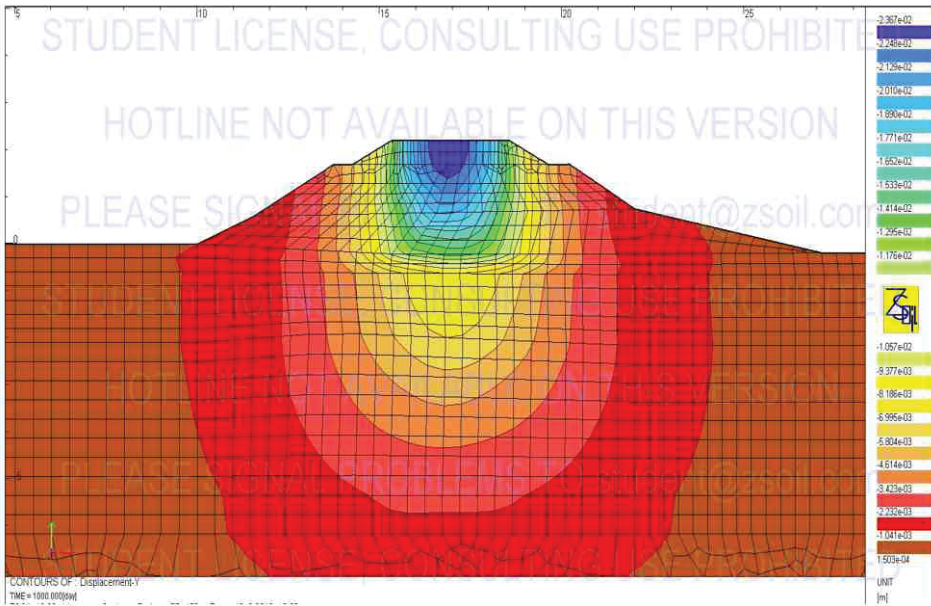
Rys. 2.3. Stan istniejący – rozkład wektorów przemieszczeń – SF=1,15 w km 75+450



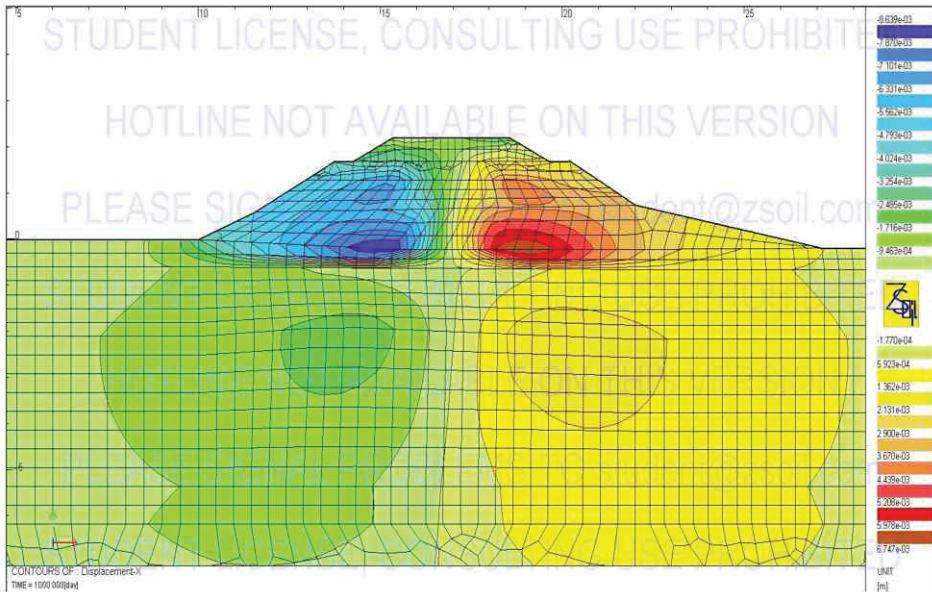
Rys. 2.4. Stan istniejący – deformacja – SF=1,15 w km 75+450



Rys. 2.5. Stan istniejący – mapa przemieszczeń całkowitych w km 75+450



Rys. 2.6. Stan istniejący – mapa przemieszczeń pionowych w km 75+450



Rys. 2.7. Stan istniejący – mapa przemieszczeń poziomych w km 75+450

Na rysunku 2.5 są doskonale widoczne przemieszczenia całkowite, gdzie największe z nich występują bezpośrednio pod torowiskiem, po czym maleją stopniowo wraz ze wzrostem głębokości oraz odsunięciem poziomym od osi w kierunku zewnętrznym, w stronę skarp.

Obciążenie przekazywane przez pojazd torowy, generuje osiadania podtorza. Osiadania, zgodnie z rysunkiem 2.6 wynoszą 2,4 cm, z kolei przemieszczenia poziome wynoszą prawie 1,0 cm (rys. 2.7).

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki, jako warianty wzmocnienia niestatecznego podtorza poddano analizie wykonanie kolumn DSM lub wymianę słabonośnego gruntu.

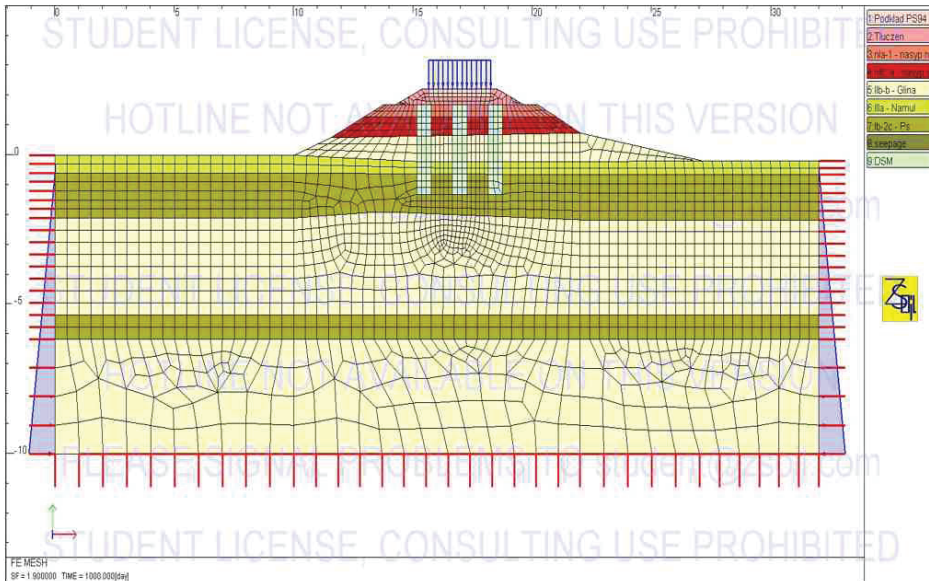
2.2. Analiza stateczności po wykonaniu kolumn DSM

Pierwszym wariantem wzmocnienia podtorza jest wykonanie kolumn DSM, mające poprawić parametry wytrzymałościowe. Zastosowano kolumny o następujących parametrach:

- średnica kolumny $\varphi = 600$ mm,
- długość kolumny $l = 3,0$ m,
- rozstaw kolumn 1,50 m.

Długość kolumny zaprojektowano w taki sposób, aby była osadzona poniżej warstwy torfów.

Model został przedstawiony na rysunku 2.8.

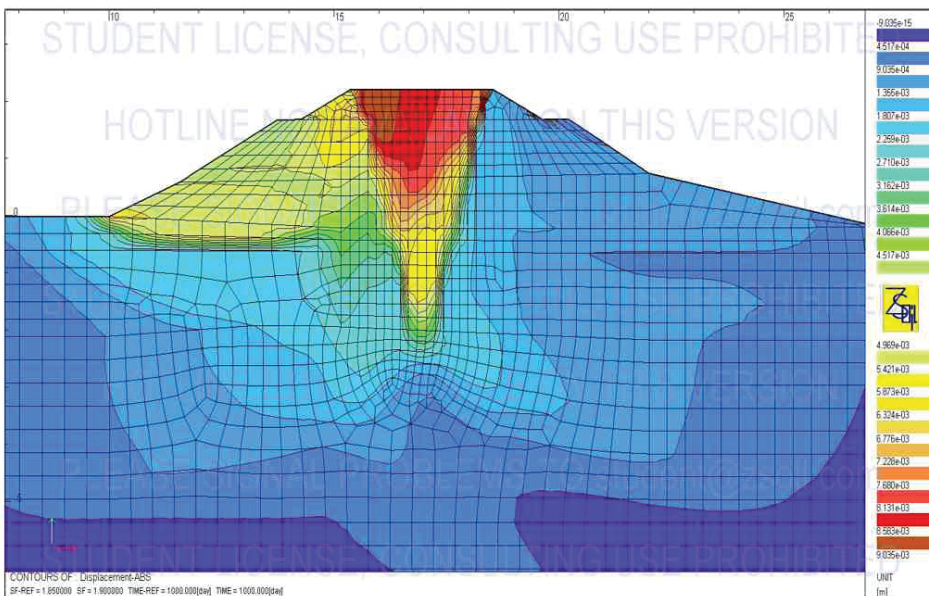


Rys. 2.8. Model obliczeniowy z wykonanymi kolumnami DSM – przekrój w km 75+450

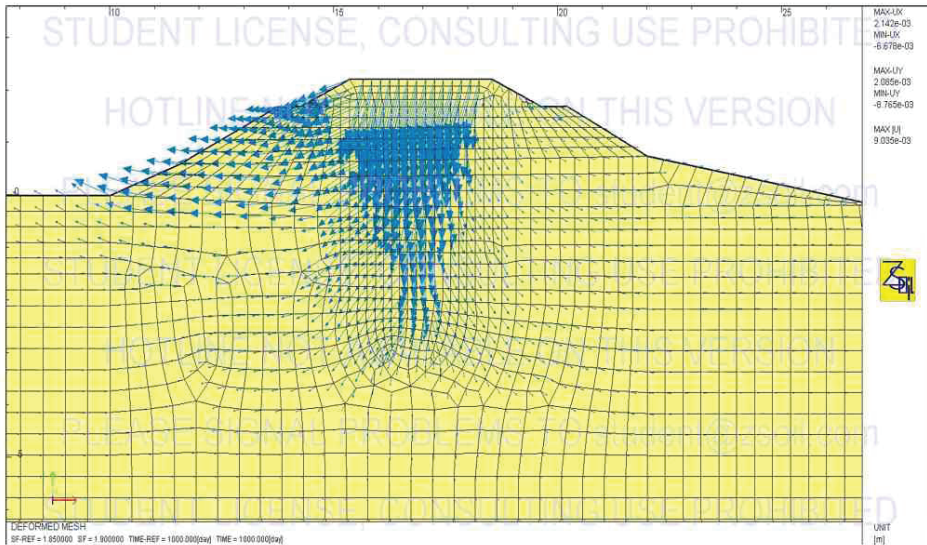
W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano wartość współczynnika bezpieczeństwa $SF=1,90$. Wynik ten stanowi znacząca poprawę w porównaniu do wariantu bez wzmocnienia. Uzyskany wynik spełnia wymagania instrukcji Id-3, gdzie dla nasypów po modernizacji, współczynnik musi wynosić min. $SF=1,3$.

$$SF=1,9 > SF=1,3$$

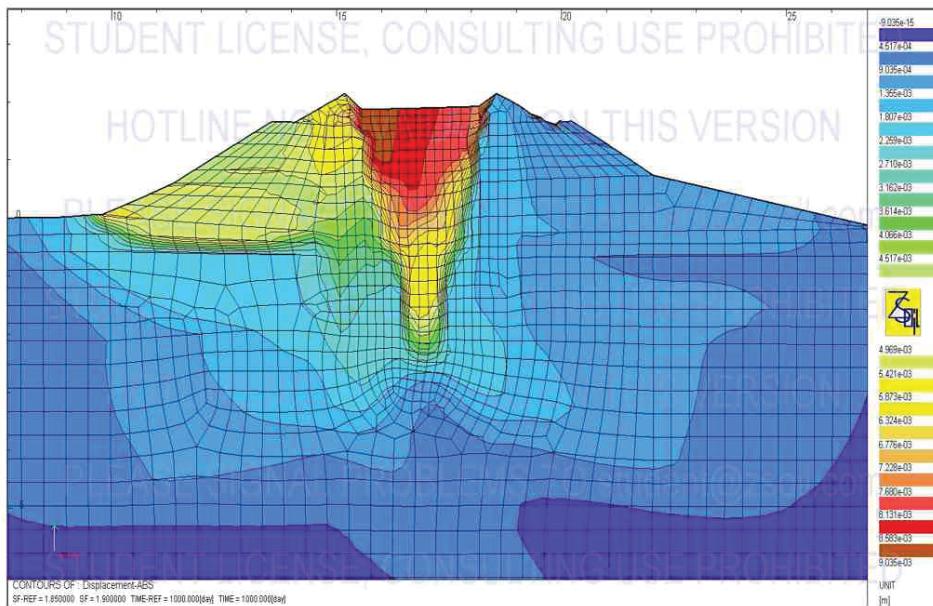
Warunek został spełniony.



Rys. 2.9. Kolumny DSM – powierzchnia poślizgu – $SF=1,90$ w km 75+450

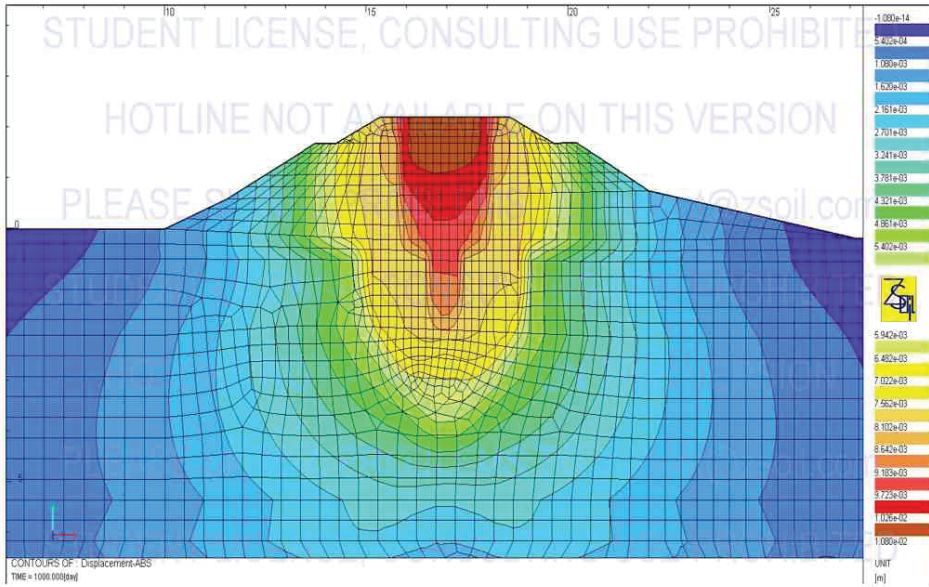


Rys. 2.10. Kolumny DSM – rozkład wektorów przemieszczeń – SF=1,90 w km 75+450

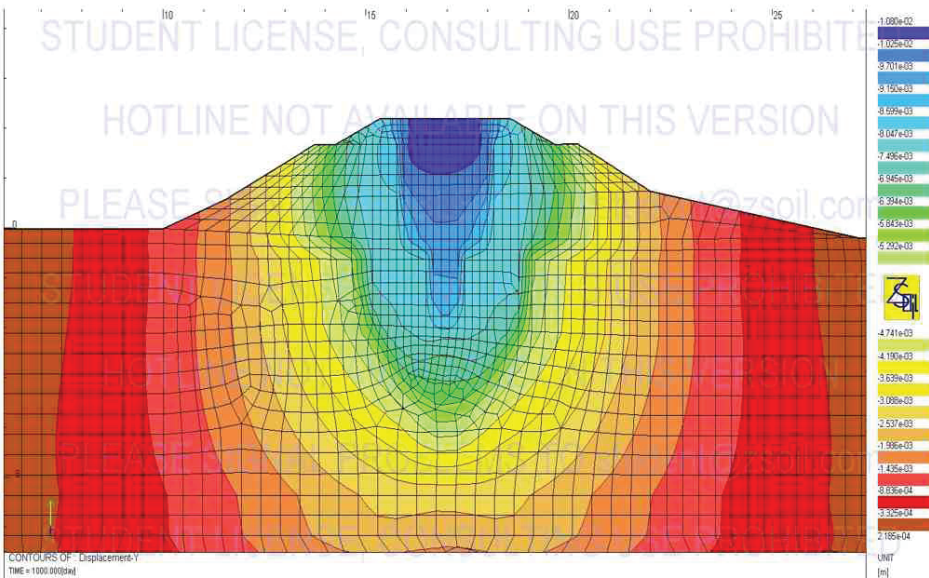


Rys. 2.11. Kolumny DSM – deformacja – SF=1,90 w km 75+450

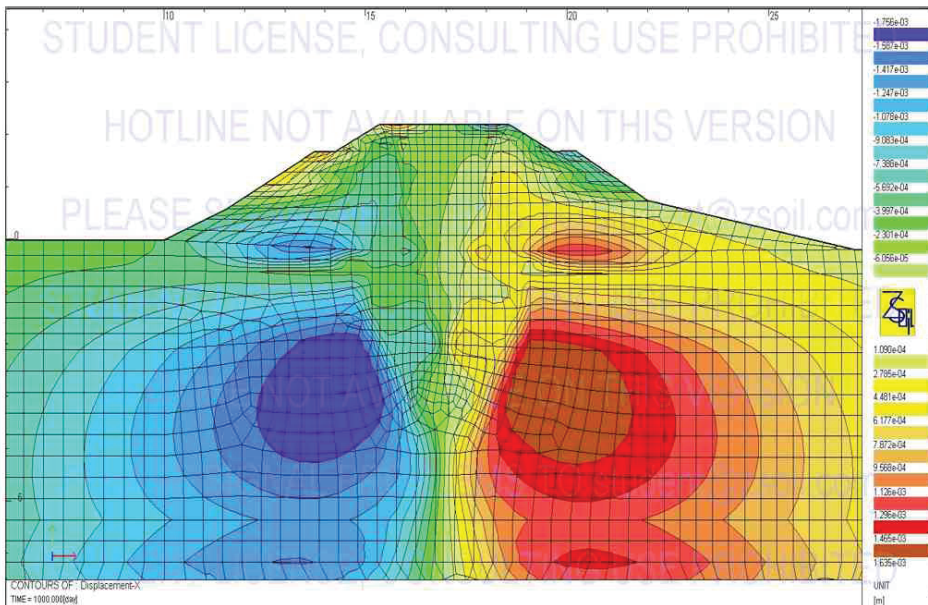
Rozpatrując powyższe rysunki można bardzo łatwo zauważyć dużą poprawę i poprzez analizę wyników stwierdzić, że zastosowanie kolumn DSM w celu wzmocnienia podtorza przyniesie oczekiwany efekt.



Rys. 2.12. Kolumny DSM – mapa przemieszczeń całkowitych w km 75+450



Rys. 2.13. Kolumny DSM – mapa przemieszczeń pionowych w km 75+450



Rys. 2.14. Kolumny DSM – mapa przemieszczeń poziomych w km 75+450

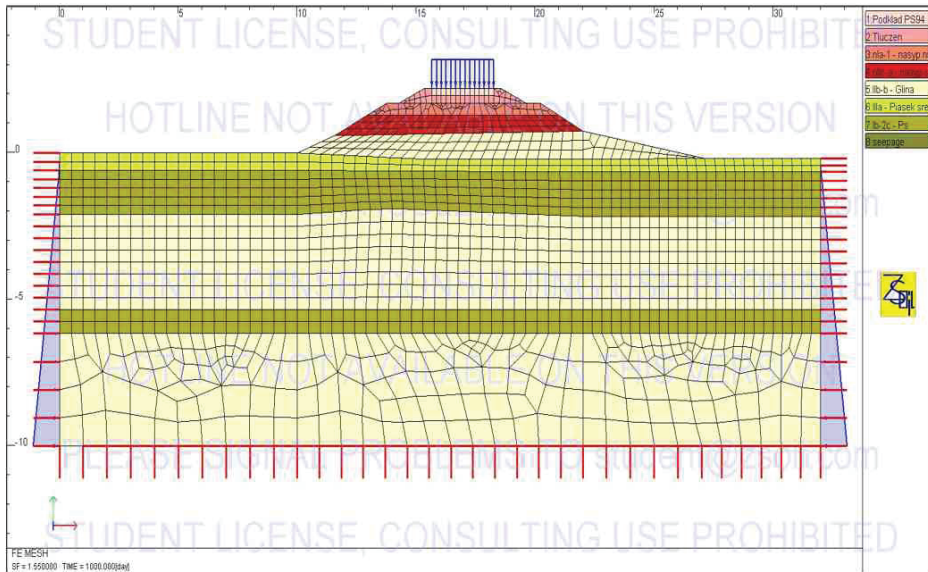
Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 2.12-2.14, można zauważyć jak bardzo stateczność podtorza została polepszona poprzez zastosowanie kolumn DSM. Maksymalne przemieszczenia pionowe oraz poziome są mniejsze niż m

Podsumowując, wzmocnienie kolumnami DSM może zapewnić stateczność podtorza.

2.3. Analiza stateczności po wykonaniu wymiany słabonośnego gruntu

Drugim wariantem wzmocnienia podtorza jest wykonanie wymiany gurtów słabonośnych na materiał nośny i nadający się do budowy nasypów. Grunty słabo nośne, w tym przypadku grunty spójne w stanie plastycznym lub miękko plastycznym (głina piaszczysta, torf), zostały zastąpione gruntem niespoistym o odpowiednio dobrych parametrach.

Model został przedstawiony na rysunku 2.15.

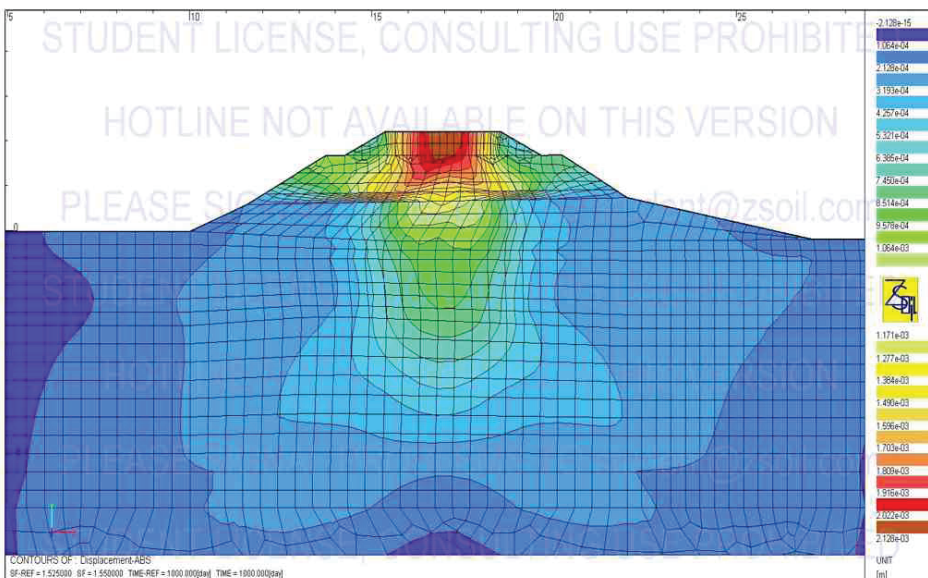


Rys. 2.15. Model obliczeniowy z wykonaną wymianą gruntu – przekrój w km 75+450

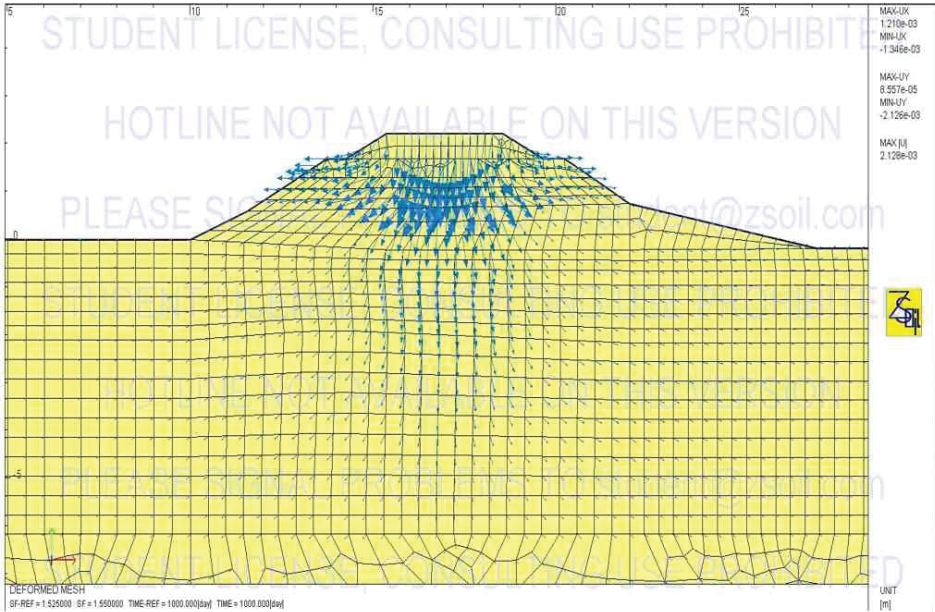
W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano wartość współczynnika bezpieczeństwa $SF=1,55$. Tak jak w przypadku zastosowania wariantu pierwszego, wynik uległ poprawie w stosunku do stanu pierwotnego (istniejącego) i spełnia wymagania instrukcji Id-3.

$$SF=1,55 > SF=1,3$$

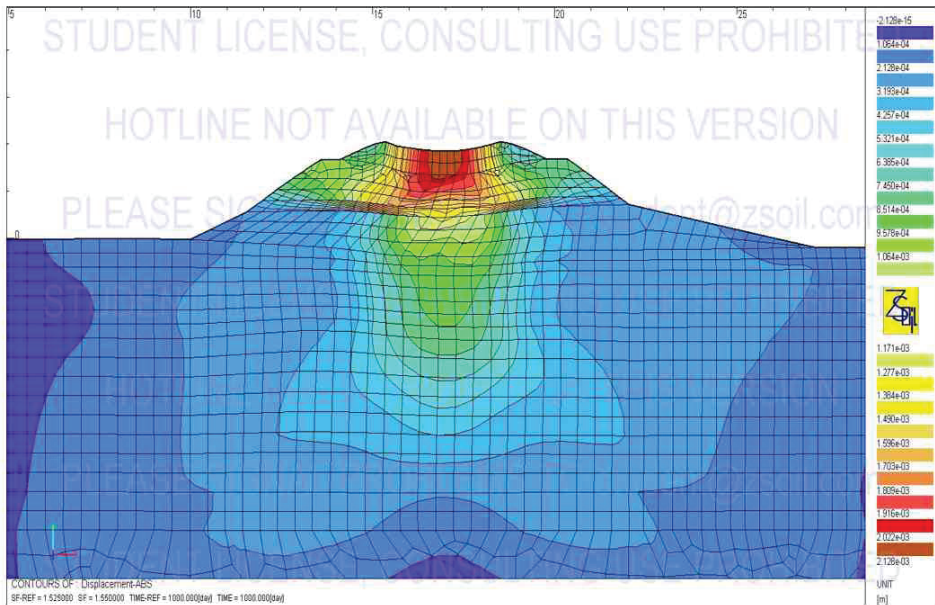
Warunek został spełniony.



Rys. 2.16. Wymiana gruntu – powierzchnia poślizgu – $SF=1,55$ w km 75+450

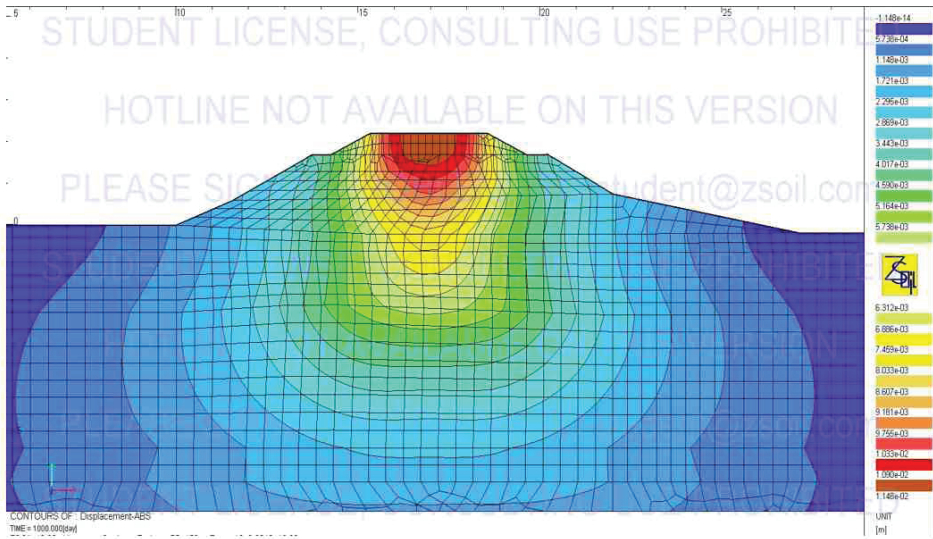


Rys. 2.17. Wymiana gruntu – rozkład wektorów przemieszczeń – SF=1,55 w km 75+450

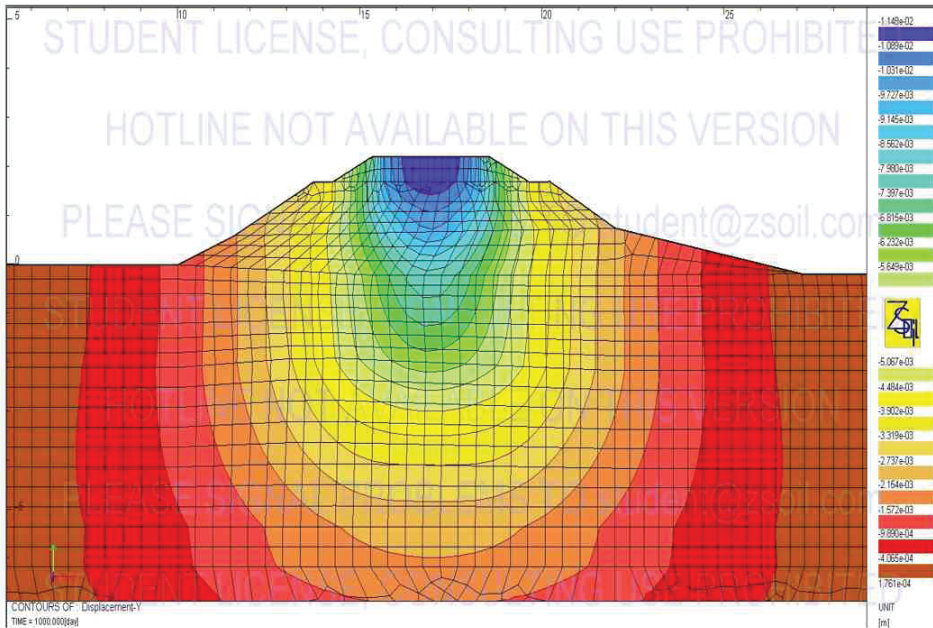


Rys. 2.18. Wymiana gruntu – deformacja – SF=1,55 w km 75+450

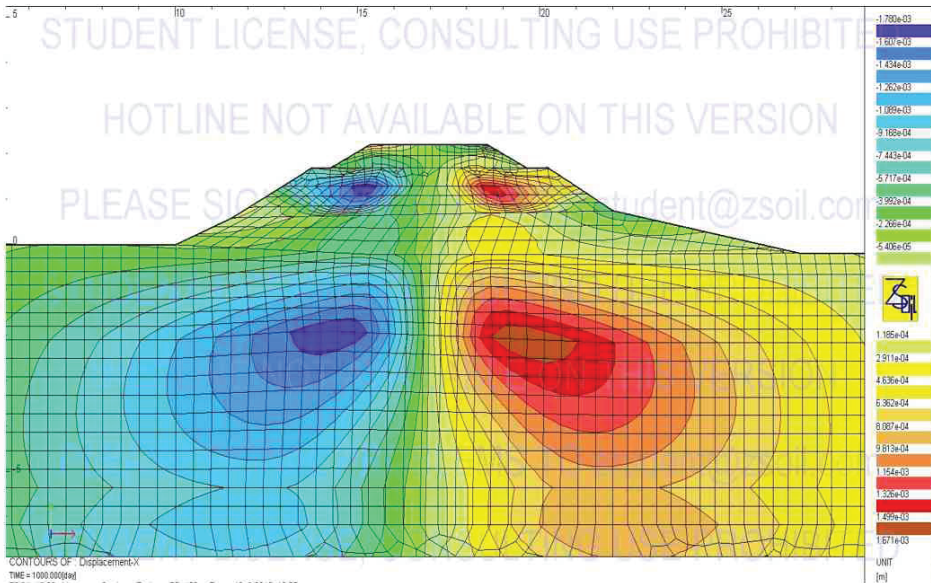
Analizując rysunki 2.16 – 2.18, można stwierdzić poprawę oraz zmniejszenie deformacji po wymianie materiału na nośny i spełniający wymagania instrukcji Id-3.



Rys. 2.19. Wymiana gruntu – mapa przemieszczeń całkowitych w km 75+450



Rys. 2.20. Wymiana gruntu – mapa przemieszczeń pionowych w km 75+450



Rys. 2.21. Wymiana gruntu – mapa przemieszczeń poziomych w km 75+450

Analizując wyniki obliczeń numerycznych przedstawione na kolejnych rysunkach (2.16-2.21), można stwierdzić, że wymiana gruntu jest kolejną skuteczną metodą, pozwalającą na osiągnięcie stateczności podtorza kolejowego. Mimo, że wyniki deformacji przemieszczeń pionowych oraz poziomych nie są tak małe jak w przypadku wariantu z kolumnami DSM, to jednak ciągle są to niewielkie wartości nie osiągające nawet 1 cm. Jak wykazała analiza, wzmocnienie poprzez wymianę gruntu słabonośnego zapewnia stateczność budowli.

3. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wzmocnienie podtorza poprzez zastosowanie kolumn DSM jak i wymiana słabonośnych gruntów może zapewnić stateczność budowli. Wymiana gruntu podobnie jak w przypadku zastosowania wariantu pierwszego (kolumny DSM), przyniesie pożądany efekt. Wymiana gruntu determinuje większy nakład organizacyjny na terenie budowy. Należy dostarczyć na miejsce grunt o odpowiednich właściwościach mechanicznych. Należy przeprowadzić symulacje komputerowe dla różnych warunków zawodnienia, gdyż grunty zmieniają swoje właściwości pod wpływem wody i innych czynników. Drugim aspektem jest koszt wymiany gruntu, który czasem jest większy niż zastosowanie kolumn DSM. W przypadku metody wymiany gruntu z przeprowadzonej analizy otrzymano wartość współczynnika bezpieczeństwa $SF = 1,55$. W przypadku zastosowania metody wzmocniania w postaci kolumn DSM w wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano wartość współczynnika bezpieczeństwa $SF = 1,9$. Jest

to wartość większa, a tym samym bezpieczniejsza dla użytkowania budowli. Aktualnie podejście EC7 pozwala Projektantowi decydować o wartości μ , która musi być mniejsza od 1. Tak więc w przypadku metody wzmocnienia w postaci kolumn DSM $\mu = 0,5$, a w przypadku metody wzmocnienia poprzez wymianę gruntu $\mu = 0,64$. Korzystniejsza wartość jest dla metody z zastosowaniem kolumn DSM, a tym samym bezpieczniejsza dla użytkowania budowli.

Bibliografia

- [1] Gieruła G., Metody wzmocniania podtorza wraz z porównaniem wariantów na przykładzie linii kolejowej nr 8, praca magisterska WIL PK 2019 r.
- [2] Kędra Z., Technologia robót torowych, Gdańsk 2017 r.
- [3] Skrzyński E., Podtorze kolejowe, Warszawa 2010 r.
- [4] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego id-3, Warszawa 2009 r.
- [5] Jerłomiwicz P., Zagęszczanie i stabilizacja gruntów w budownictwie. Technologie i ich skuteczność. Zasady projektowania i wykonawstwa, Ostrołęka 2015 r.
- [6] Bzówka J., Wybrane techniki wzmocniania słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym, 2015 r.
- [7] Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zadania „opracowanie projektów budowlanych i wykonawczych oraz realizacja robót LOT-ÓW: c, d, e w formule „Projektuj i Buduj” w ramach projektu POIIS 5.1-10 „prace na linii kolejowej nr 8, odcinek Warka – Radom (lot c, d, e)”.
- [8] Specyfikacja istotnych warunków zamówienia dla zadania „opracowanie projektów budowlanych i wykonawczych oraz realizacja robót LOT-ÓW: c, d, e w formule „Projektuj i Buduj” w ramach projektu POIIS 5.1-10 „prace na linii kolejowej nr 8, odcinek Warka-Radom (lot c, d, e)”.

