

# WYKORZYSTANIE MODELOWANIA 3D DO ANALIZY WPLYWU PODWYSZANIA PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNYCH NA STATECZNOŚĆ NASYPU KOLEJOWEGO<sup>1</sup>

---

**Elżbieta Pilecka**

dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem, tel.: +48 /12/ 628 25 79, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

---

**Włodzimierz Matusik**

mgr inż., doktorant PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

---

***Streszczenie.** Konieczność dostosowania infrastruktury do standardów europejskich, a szczególnie przystosowanie infrastruktury dróg kolejowych do pociągów poruszających się z dużymi prędkościami powoduje konieczność podjęcia badań stateczności modernizowanych nasypów. W artykule przedstawiono wyniki numerycznego modelowania 3D MES. Do analizy wzięto przykładowy fragment nasypu na linii CMK. Pokazano zalety modelowania w przestrzeni 3D dla różnych wariantów zastosowanych wzmocnień i różnych prędkości eksploatacyjnych pociągu.*

***Słowa kluczowe:** podtorze, modelowanie numeryczne, koleje dużych prędkości*

## 1. Wstęp

Polska od 2004 roku jest członkiem Unii Europejskiej. Z tym związana jest konieczność dostosowania infrastruktury do standardów europejskich, a także przystosowania infrastruktury dróg kolejowych do pociągów poruszających się z dużymi prędkościami (200-300 km/h). Przy dostosowywaniu linii kolejowych do tak dużych prędkości ważnym aspektem staje się stateczność nasypów kolejowych [1].

Do podstawowych metod oceny stateczności skarp nasypów należą metody równowagi granicznej, w których kształt i położenie powierzchni poślizgu są znane. Miarą stateczności w tych metodach jest wskaźnik obliczony, jako stosunek sił utrzymujących równowagę bryły do sił zsuwających. Są to metody bardzo przybliżone, co przyczynia się do powstania licznych błędów. Dlatego coraz częściej stawia się na metody numeryczne, które są dużo bardziej dokładne, w których przyjmuje się, że zbocze nasypu stanowi część półprzestrzeni sprężystej lub sprężysto-plastycznej. Do obliczenia stanu naprężeń i odkształceń w nasypach można stosować programy wykorzystujące metodę elementów skończonych MES, takie jak MIDAS GTS NX<sup>®</sup>. Do wyznaczenia wskaźnika stateczności stosuje się metodę

---

<sup>1</sup> Wkład procentowy poszczególnych autorów: Pilecka E. 90%, Matusik W. 10%

redukcji wytrzymałości, która polega na zmniejszeniu wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu w kolejnych krokach, do momentu wystąpienia niestabilności procesu numerycznego. Metody numeryczne mimo swoich ograniczeń, są dużo bardziej dokładne niż tradycyjne. W metodach numerycznych nie wymaga się wyznaczenia powierzchni poślizgu oraz oddziaływania sił pomiędzy blokami. Pozwalają one uwzględnić szereg czynników wpływających na warunki stateczności, związane z budową geologiczną i właściwościami masywu gruntowego, istnieniem nieciągłości, wpływem wody, oddziaływaniami dynamicznymi itp. [2].

Aby zachować stateczność nasypu należy zapewnić odpowiedni współczynnik pewności  $F$ . W tym przypadku wyznacza się go jako stosunek obciążenia przyłożonego na powierzchnię torowiska, do wartości oporu gruntu przed utratą stateczności. Według warunków technicznych utrzymania podtorza kolejowego Id-3 [4], współczynnik pewności  $F$  (określone na podstawie właściwości gruntów) powinny wynosić, co najmniej:

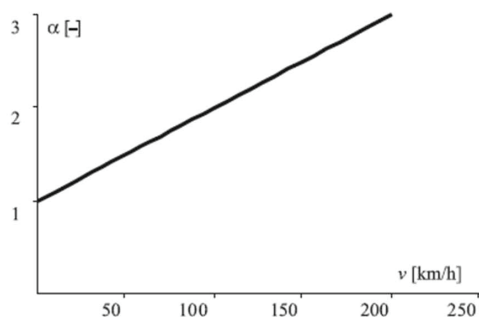
- 2,0 – dla podtorza nowobudowanego i dobudowywanego,
- 1,5 – w eksploatacji,
- 1,3 – bezpośrednio po naprawie podtorza.

W tym opracowaniu posłużono się programem MIDASGTS NX<sup>®</sup>. Jest on programem symulacyjnym opracowanym dla oceny struktury gruntu. Oparty jest na metodzie elementów skończonych.

## 2. Obciążenia i naprężenia w nasypie kolejowym

Podstawowym czynnikiem obciążającym nasyp kolejowy, decydującym o jego stateczności jest przejeżdżający tabor kolejowy. Poza obciążeniami statycznymi potrzeba wziąć pod uwagę oddziaływania dynamiczne, których wartość wzrasta wraz z prędkością. W skład obciążeń statycznych wchodzi: ciężar taboru poruszającego się po nasypie oraz ciężar poszczególnych elementów nawierzchni. Tak zestawione obciążenia mnoży się przez współczynnik dynamiczny, który zwiększa ich wartość.

Załącznik nr 1 normy BN-88/8932-02 [5] podaje sposób, w jaki należy przyjąć obciążenie dynamiczne na torowisko. Jak podają Batog i Hawrysz [6], wielkość współczynnika dynamicznego wzrasta proporcjonalnie do prędkości (rys. 1).



Rys. 1. Wielkość współczynnika dynamicznego od prędkości taboru kolejowego [6]

Zgodnie z normą BN-88/8932-02 [5], pionowe naprężenia oddziałujące na torowisko oblicza się według wzoru:

$$\sigma_{zd \max} = \alpha \sigma_0 \beta \frac{s^2}{s^2 + mz_1^2} + \sigma_{zn} \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha$  - współczynnik dynamiczny, przyjmujemy wartości:

- dla prędkości  $v < 100 \frac{km}{h}$ ,  $\alpha = 1,2 + 2,0$ ,
- dla prędkości  $v > 100 \frac{km}{h}$ ,  $\alpha = 2,0 + 3,0$ ,

ponieważ dla prędkości  $v=0$  współczynnik  $\alpha_{min} = 1,0$  a dla prędkości

$v = 100 \frac{km}{h}$  wynosi  $\alpha = 2,0$ , to przy zależności liniowej  $\alpha = f(v)$  i prędkości

160 km/h należy przyjąć  $\alpha = 2,6$ .

$\sigma_0$  - naprężenie w podsypce na poziomie spodu podkładów obliczone ze wzoru

$\sigma_0 = \frac{P}{F}$  kPa, w którym P oznacza obciążenie pionowe przekazywane na pod-

kład o powierzchni podstawy F,

$\beta$  - współczynnik określający stosunek siły przekazywanej przez podkład na podsypkę do siły przekazywanej przez koło pojazdu na szynę. Oblicza się go ze wzoru:

$$\beta = \frac{a}{2^4 \sqrt{\frac{4EJ}{U}}} \quad (2)$$

w którym:

a - odległość między osiami sąsiednich podkładów [m],

E - moduł sprężystości liniowej stali szynowej [MPa],

J - moment bezwładności przekroju poprzecznego szyny względem poziomej osi przechodzącej przez środek ciężkości przekroju [m<sup>4</sup>],

U - współczynnik podłoża szyny [kPa],

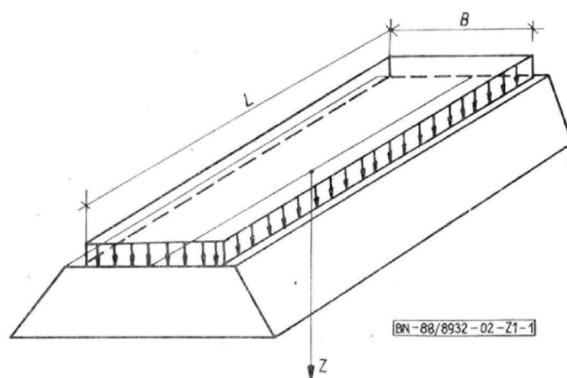
s - szerokość podstawy podkładu [m],

$z_1$  - odległość od spodu podkładu do torowiska [m],

m - współczynnik charakteryzujący rozkład naprężeń w podsypce, przyjęto  $m = 0,5$ ,

$\sigma_{zn}$  - naprężenie na powierzchni podtorza wywoływane ciężarem nawierzchni [kPa].

W celu obliczenia naprężeń w podtorzu i podłożu stosuje się obciążenie ciągłe o szerokości styku podsypki z podłożem B [m] i nieograniczonej długości L (rys. 2).



Rys. 2. Schemat obliczeniowy obciążenia podtorza (5)

### 3. Modelowanie nasypu kolejowego

Analizowany nasyp kolejowy znajduje się w ciągu linii E65 Grodzisk Mazowiecki – Biała Rawska. Prędkość eksploatacyjna pociągów pasażerskich, poruszających się po tej linii ogranicza się do 160 km/h. Linia kolejowa CMK jest dostosowywana do kolei dużych prędkości (250 km/h). W tej analizie maksymalną prędkość pociągów przyjęto na poziomie 300 km/h.

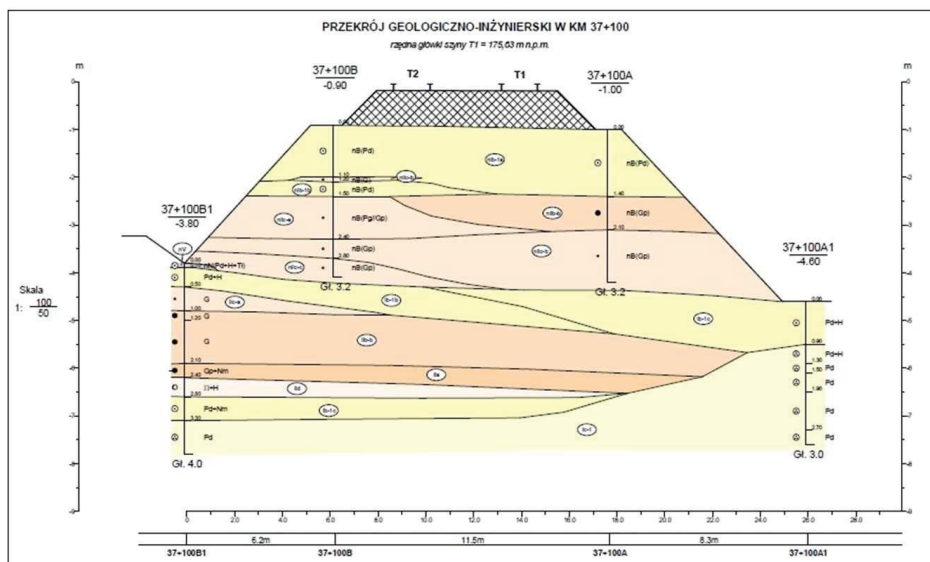
Podwyższenie prędkości eksploatacyjnych ze 160 km/h do 300 km/h, wiąże się ze zwiększeniem oddziaływań dynamicznych na torowisko, a tym samym zwiększeniem obciążeń. Celem analizy jest sprawdzenie wpływu zwiększenia tych oddziaływań na stateczność nasypu. Wzrost obciążenia powoduje spadek wskaźnika stateczności nasypu. Analiza wskaże zależność wzrostu obciążenia od zmiany wartości wskaźnika stateczności i odpowie na pytanie czy jest ona liniowa czy nie.

Analizę stateczności nasypu przeprowadzono w przestrzennym stanie odkształcenia dla trójwymiarowego modelu. Nacisk na oś wynosi 170 kN. Obciążenie pochodzi od dwóch pociągów poruszających się po torze 1 i 2 w przeciwnych kierunkach. Obciążenie przyjęto jako równomiernie rozłożone.

#### 3.1. Modelowanie nasypu (prędkość 160 km/h)

Przekrój geologiczno-inżynierski został wzięty z 37+100 km analizowanej linii (rys. 3).

Przyjmujemy, że każda warstwa jest materiałem izotropowym. Typ modelu dla warstw podtorza zakładamy wg. hipotezy wytrzymałościowej Culomba – Mohra. Poniżej przedstawiono tabelę z danymi do poszczególnych warstw. W modelowaniu tym nie uwzględnia się podsypki.



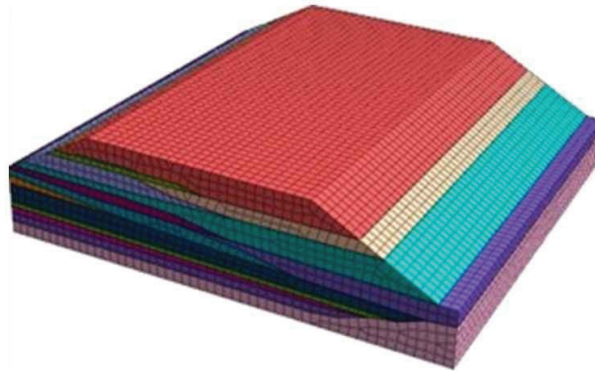
Rys. 3. Przekrój geologiczno - inżynierski w km 37+100 {7}

Tabela 1. Właściwości poszczególnych warstw nasypu

Nr	Warstwa	$E_d$ [MPa]	$\nu$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kPa]	$\Phi$ [MPa]
1	nlb-1a	38,3	0,3	17	0	29,5
2	nllc-b	24,2	0,29	21,7	20,3	15,9
3	nlb-1b	47,2	0,3	17	0	30,5
4	nllc-a	19,7	0,32	21,8	16,1	14,5
5	nllb-b	14,3	0,32	20,8	11,4	12,1
6	nllc-b	24,2	0,32	21,8	20,3	15,9
7	nllc-c	29,6	0,37	21,8	25,6	17,2
8	lb-1b	47,1	0,3	17,8	0	30,5
9	lb-1c	57,4	0,3	17,8	0	31
10	llc-a	21,0	0,32	21,3	17,4	15
11	llb-b	14,0	0,29	20,8	11,1	12
12	lla	9,0	0,37	19,8	6,9	8,5
13	lld	33,8	0,32	21,5	30	18
14	lb-1c	57,4	0,3	17,8	0	31
15	lc-1	71,5	0,3	18,5	0	31,5

Siatkowanie modelu wykonuje się w programie automatycznie. Wymiary pojedynczego „oczka” siatki elementów skończonych wynoszą 50 cm (rys. 4). Kształt

poszczególnych elementów nie może być regularny ze względu na układ i kształt warstw, dlatego składa się zarówno z sześciścianów jak i czworoscianów.



Rys. 4. Model 3D z siatką (widok z programu MIDAS GTS NX®)

Pionowe naprężenia oddziaływujące na torowisko oblicza się według wzoru (1). Dane do obliczeń przyjęto następujące:

$$\alpha = 2,6 \text{ dla prędkości } 160 \text{ km/h,}$$

$$E = 210 \text{ GPa} \quad F = 0,65 \text{ m}^2 \quad s = 0,3 \text{ m} \quad I = 3055 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$m = 0,5 \quad U = 80 \text{ MPa} \quad a = 0,6 \text{ m} \quad P = 170 \text{ kN}$$

$$B = 10,7 \text{ m} - \text{długość dolnej krawędzi podsypki,}$$

$$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3 - \text{ciężar tłucznia,}$$

$$f = 6,475 \text{ m}^2 - \text{pole powierzchni podsypki w przekroju,}$$

$$q_s = 0,60 \text{ kN/m} - \text{obciążenie od szyny,}$$

$$q_p = 5,10 \text{ kN/m} - \text{obciążenie od podkładu}$$

$$q_t = f \cdot \gamma = 145,687 \text{ kN/m} - \text{obciążenie od tłucznia,}$$

$$\sigma_{zn} = \frac{q_s + q_p + q_t}{B} = \frac{0,6 + 5,1 + 145,687}{10,7} = 14,15 \text{ kPa} - \text{naprężenia od ciężaru nawierzchni,}$$

$$\sigma_0 = \frac{P}{F} = \frac{170}{0,65} = 271,44 \text{ kPa} \quad \beta = \frac{a}{2 \sqrt{\frac{4EI}{U}}} = \frac{0,6}{2 \sqrt{\frac{4 \cdot 210 \cdot 3055 \cdot 10^{-8}}{80}}} = 0,4$$

$$\sigma_{zdmax} = \alpha \sigma_0 \frac{s^2}{s^2 + mz_1^2} + \sigma_{zn} = 2,6 \cdot 271,44 \frac{0,3^2}{0,3^2 + 0,5 \cdot 0,75^2} + 14,15 = 80 \text{ kPa}$$

Tak obliczone obciążenie przykładamy do powierzchni podtorza. Oprócz obciążenia zewnętrznego definiujemy obciążenie od ciężaru własnego. W modelowaniu określa się również warunki brzegowe tak, aby przeciwdziałać wewnętrznej deformacji warstw lub obrotowi modelu.

Do obliczeń stosuje się analizę stateczności skarpy nasypu metodą ShearStrengthReduction (SSR), czyli redukcji wytrzymałości na ścinanie. Jest to metoda najczęściej stosowana przy określaniu wskaźnika stateczności w metodach numerycznych. Do wyznaczenia powierzchni granicznej stosowana jest zwykle hipoteza Cu-

lomba-Mohra. Metoda SSR polega na równoczesnej redukcji wartości kąta tarcia i spójności, aż do utraty stateczności zbocza.

$$\tau = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{FS}} \sigma_n + \frac{c}{\text{FS}} \quad (3)$$

gdzie:

FS - wskaźnik stateczności,

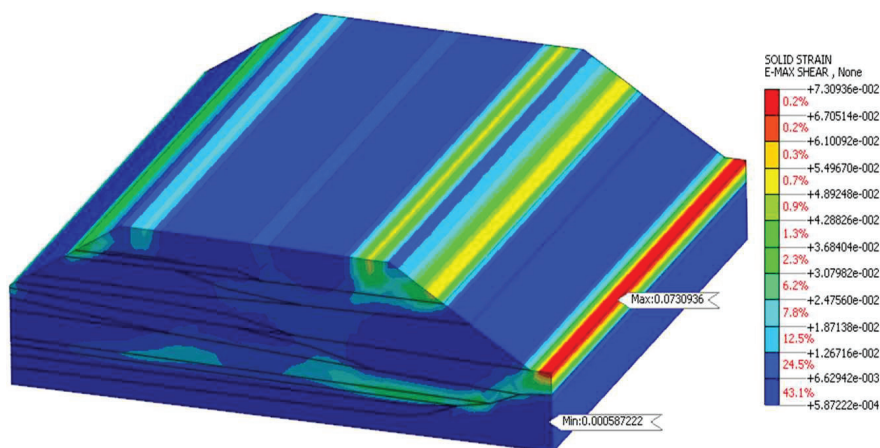
$\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

c - spójność materiału budującego zbocze,

$\tau$  - naprężenie ścinające,

$\tau_f$  - wytrzymałość na ścinanie.

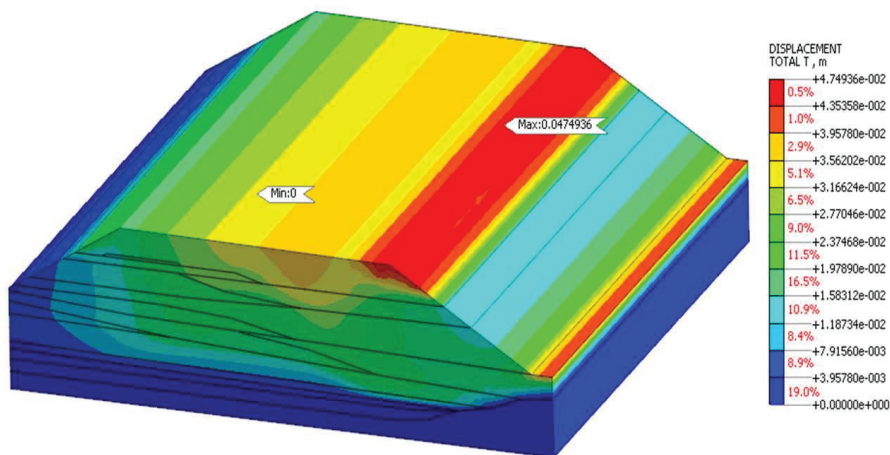
Utrata stateczności występuje w momencie pojawienia się nadmiernie dużych przemieszczeń w porównaniu z poprzednimi krokami, czy też z nadmiernymi wartościami maksymalnej niezrównoważonej siły lub prędkości przemieszczeń poszczególnych węzłów [2]. Analiza stateczności w zadanych warunkach obciążenia wykazała, że wskaźnik stateczności wynosi  $F = 1,148$  (rys. 5).



Rys. 5. Maksymalne odkształcenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,148$  (widok z programu MIDAS GTS NX®)

Wskaźnik stateczności dla danego obciążenia 80 kPa, zgodnie z wynikami analizy numerycznej wynosi  $F = 1,148$ , więc nie spełnia wymagań określonych w instrukcji Id-3 [5]. Utrata stateczności występuje na prawej skarpie nasypu. Rozkład odkształceń postaciowych pokazuje, że powierzchnia poślizgu występuje na granicy warstw Ild, Ila, IIb-b (rys. 5). Na rysunku 5 widać powierzchnię poślizgu na prawej stronie korony nasypu, która obejmuje swym zasięgiem ławę torowiska i dlatego jest niebezpieczna dla ruchu kolejowego. Druga większa powierzchnia poślizgu obejmuje także prawą stronę nasypu zaczynając się na środku nasypu i kończąc u podnóża nasypu, gdzie występują największe odkształcenia postaciowe powodujące niestateczność nasypu.

Na rysunku 6 przedstawione są całkowite przemieszczenia. Największe występują w pierwszej warstwie nasypu (nlb-1a). W kierunku poziomym z prawej strony nasypu maksymalnie wynoszą 4,7 cm i 2,1 cm z lewej. Przemieszczenia rzędu 3,7 cm w kierunku pionowym w dół są największe na środku nasypu, bezpośrednio pod obciążeniem, natomiast w kierunku do góry u podstawy nasypu, z prawej strony mają wartość 4 cm.



Rys. 6. Przemieszczenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,148$  (widok z programu MIDAS GTS NX®)

### 3.2. Modelowanie nasypu (prędkość 300 km/h)

W tym przypadku obciążenie jest zwiększone z uwagi na wyższą prędkość pociągu. Współczynnik dynamiczny do obliczeń obciążenia ciągłego przy prędkości 300 km/h wynosi  $\alpha = 4$ .

$$\sigma_{zd \max} = \alpha \sigma_0 \frac{s^2}{s^2 + mz_1^2} + \sigma_{zn} = 4 \cdot 271,44 \frac{0,3^2}{0,3^2 + 0,5 \cdot 0,75^2} + 14,15 = 115 \text{ kPa}$$

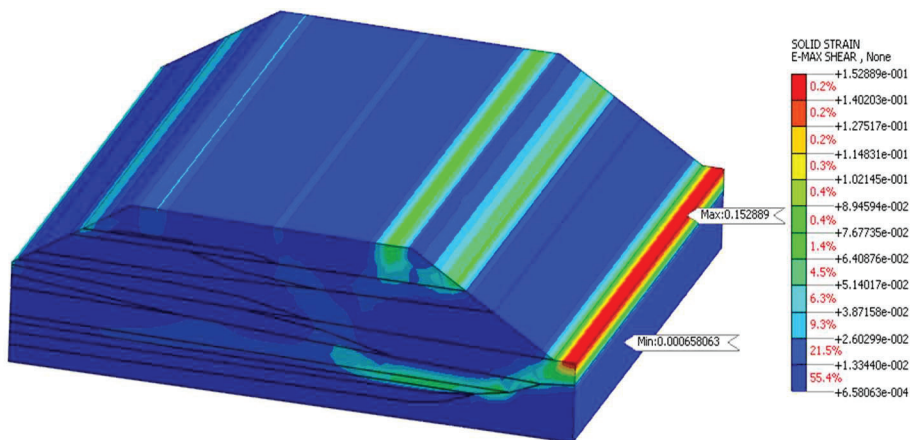
Analiza stateczności w zadanych warunkach obciążenia wykazała, że wskaźnik stateczności wynosi  $F = 1,029$ .

Wskaźnik stateczności dla zadanego obciążenia 115 kPa, zgodnie z wynikami analizy numerycznej wynosi  $F = 1,029$ , co również nie spełnia wymagań określonych w instrukcji Id-3 [4]. Utrata stateczności występuje na prawej skarpie nasypu (rys. 7).

Rozkład odkształceń postaciowych pokazuje, że powierzchnia poślizgu występuje na granicy warstw lld, lla, llb-b (rys. 7). Zagrożenie dla stateczności nawierzchni kolejowej występuje również w pierwszej warstwie (nlb-1a) z obu stron nasypu, niemniej jednak prawa strona nasypu jest bardziej zagrożona niestatecznością. Na rysunku powierzchnie poślizgu wykształcają się podobnie jak w przypadku dla prędkości pociągu 160 km/h, widać powierzchnię poślizgu na prawej stronie korony nasypu, która obejmuje swym zasięgiem ławę torowiska i dlatego jest niebezpieczna dla ruchu kolejowego. Druga większa powierzchnia poślizgu

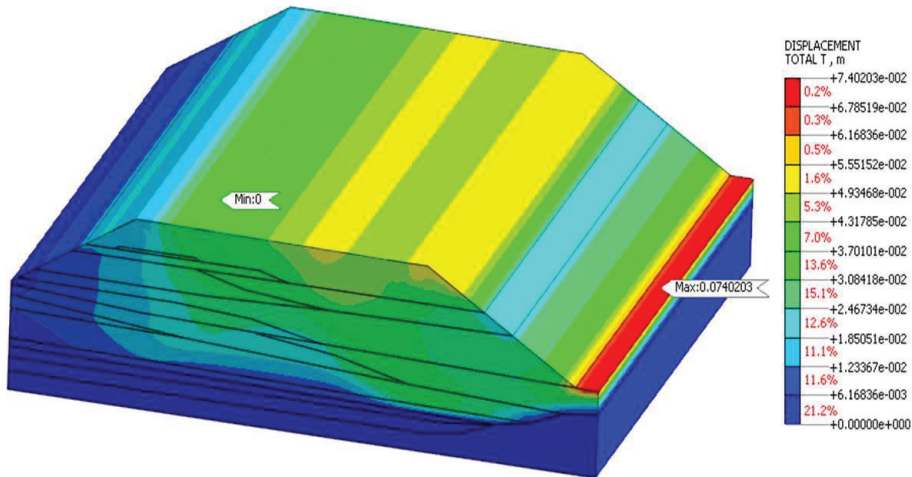


obejmuje także prawą stronę nasypu zaczynając się na jego środku kończąc u podnóża, gdzie występują największe odkształcenia postaciowe powodujące niestaczejność nasypu. Odkształcenia postaciowe pokazują ich kształt.



Rys. 7. Maksymalne odkształcenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,029$  (widok z programu MIDAS GTS NX®)

Na rysunku 8 przedstawione są całkowite przemieszczenia. Największe występują w pierwszej warstwie nasypu (nlb-1a).



Rys. 8. Przemieszczenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,029$  (widok z programu MIDAS GTS NX®)

W kierunku poziomym z prawej strony nasypu maksymalnie wynoszą 5,4 cm i 1,7 cm z lewej. Przemieszczenia rzędu 4,9 cm w kierunku pionowym, w dół największe są na środku nasypu, bezpośrednio pod obciążeniem, natomiast w kierunku do góry u podstawy nasypu z prawej strony osiągają wartość 7,3 cm.

Tabela 2. Procentowa zmiana wartości poszczególnych parametrów przy przejściu z prędkości 160 km/h do 300 km/h w stanie równowagi granicznej

	Prędkość pociągu		%
	160 km/h	300 km/h	
Współczynnik dynamiczny $\alpha$	2,60	4,00	53
Obciążenie [kPa]	80,00	115,00	44
Wskaźnik stateczności $F$	1,148	1,029	11
E-MAX SHEAR Max	0,073	0,152	65
E-MAX SHEAR Min	0,00059	0,00066	11

Porównując analizy stateczności nasypu kolejowego obciążonego odpowiednio 80 kPa i 115 kPa można zauważyć, że kształt powierzchni poślizgu jest bardzo zbliżony, zarówno w dla całej prawej skarpy nasypu jak i dla warstwy nlb-1a. Wielkość współczynnika dynamicznego, powodującego wzrost obciążenia jest wprost proporcjonalny do prędkości. Przy zmianie prędkości ze 160 km/h do 300 km/h współczynnik dynamiczny wzrósł o 54%. Podobny wzrost uzyskało obciążenie statyczne (44%). Natomiast wskaźnik stateczności  $F$  zmniejszył się zaledwie o 10 %. Dlatego można dojść do wniosku, że stateczność nasypu nie zmienia się wprost proporcjonalnie do prędkości pociągów poruszających się po nasypie.

Aby dostosować istniejący nasyp do poruszania się na nim pociągów z prędkością 300 km/h i aby spełniał on wymagania określone w instrukcji Id-3 [4], należy przeprowadzić modernizację.

### 3.3. Projektowanie wzmocnienia nasypu

Z przeprowadzonej wcześniej analizy wynika, że obliczony wskaźnik stateczności (1,029) jest za mały. Dlatego konieczna jest modernizacja podtorza.

Naprężenia pochodzące od obciążeń zewnętrznych podczas eksploatacji nie powinny powodować przekroczenia dopuszczalnych naprężeń dla nowobudowanych gruntów. Tablica nr 5 instrukcji Id-3 [4] określa również minimalne wartości modułów odkształcenia podtorza. Dla naszej analizy przyjmujemy wartość 120 MPa. Taką wartość modułu osiągnąć można wzmocniając wierzchnie warstwy podtorza spoiwem cementowym. Spoiwo powoduje, że struktura gruntu ulega zmianie. Zwiększa się spójność gruntu i wytrzymałość na ściskanie. W analizie zastosowano materiały wymienione w tablicy 7-1 stabilizowane cementem, których moduł odkształcenia kształtuje się na poziomie 200 – 450 MPa[4]. Warstwę ochronną wymiarujemy zgodnie z załącznikiem 7 instrukcji Id-3[4]. Do obliczeń niezbędne są wartości:

- moduł odkształcenia miejscowego gruntu (nlb-1a)  $E_g = 38,3$  MPa,
- moduł odkształcenia warstwy ochronnej (odsiewki uzdatnione cementem)  $E_0 = 300$  MPa,
- wymagany ekwiwalentny moduł odkształcenia  $E_e = E_{e2} = 120$  MPa.

Metoda I polega na wyznaczeniu grubości warstwy ochronnej  $h_0$  o module  $E_0$ , takiej by po ułożeniu jej na obecnym gruncie o module  $E_g$ , ekwiwalentny moduł

podtorza  $E_c$  był równy co najmniej projektowanemu modułowi dla podtorza  $E_{c2}$ . Grubość warstwy odczytujemy z nomogramu DORNII [4].

$$\frac{E_g}{E_0} = 38 \cdot \frac{3}{300} = 0,127 \approx 0,13$$

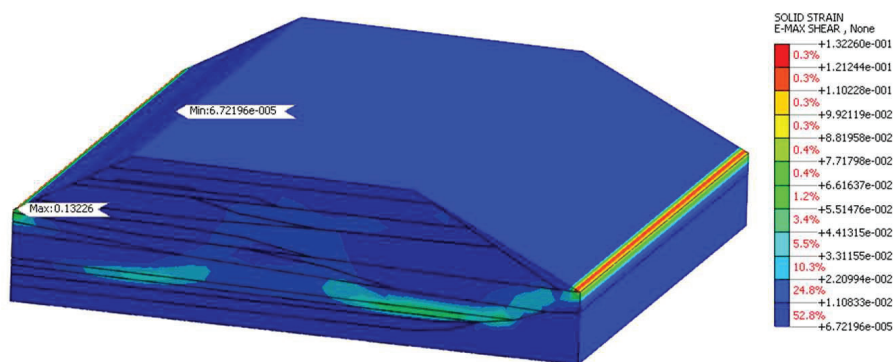
Stosunek, czyli  $h_0 = 30$  cm. Do modernizacji przyjęto grubość warstwy ochronnej 50 cm. Zwiększono również nachylenie prawej skarpy.

Tabela 3. Parametry warstwy wzmacniającej nasyp

Warstwa	$E_o$ [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kPa]	$\Phi$ [MPa]
Warstwa wzmocniona	300	17	73	33

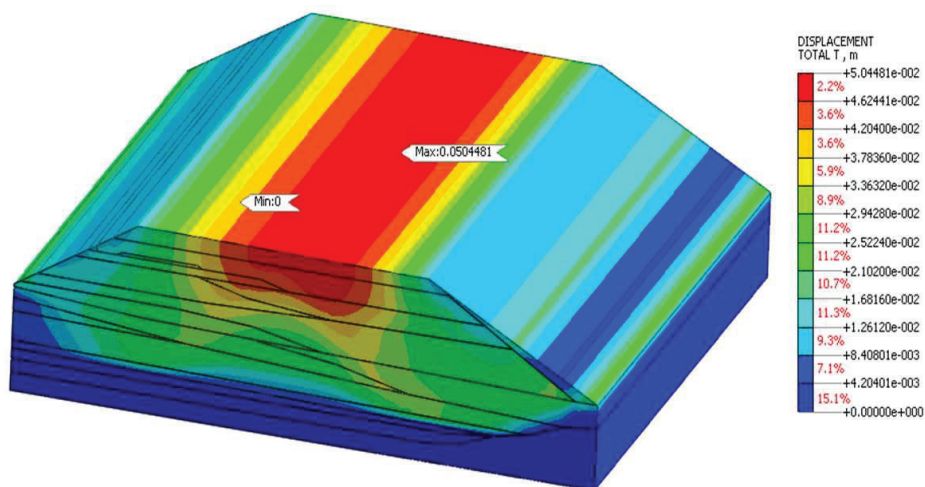
Po przeprowadzonej modernizacji analiza stateczności wykazała, że wskaźnik stateczności wynosi  $F=1,311$ .

Wskaźnik stateczności dla zadanego obciążenia 115 kPa po modernizacji zgodnie z wynikami analizy numerycznej wynosi  $F=1,311$ . Spełnia wymagania określone w instrukcji Id-3 [4]. Powierzchnia poślizgu tworzy się przy wskaźniku powyżej 1,3 i tworzy się u podnóża prawej skarpy. Rozkład odkształceń postaciowych pokazuje, że występuje ona na granicy warstw Ild, Ila, IIb-b (rys. 9). Nie zagraża ona stateczności wzmocnionego nasypu. Można przyjąć, że nasyp po modernizacji jest stateczny, nie stwarza zagrożenia dla ruchu kolejowego.



Rys. 9. Maksymalne odkształcenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,311$  (widok z programu MIDAS GTS NX®)

Na rysunku 10 przedstawione są całkowite przemieszczenia. Największe występują na środku, w pierwszej warstwie nasypu (nlb-1a), bezpośrednio pod obciążeniem. Maksymalne przemieszczenie w dół wynosi 5 cm. Natomiast do góry grunt się unosi u podstawy skarp z lewej i prawej strony o ok. 3 cm. W kierunku poziomym przemieszczenie jest równomierne od środka nasypu w obie strony o ok. 3 cm.



Rys. 10. Przemieszczenia całkowite w stanie równowagi granicznej  $F=1,311$   
(widok z programu MIDAS GTS NX®)

Tabela 4. Procentowa zmiana wartości poszczególnych parametrów po modernizacji w stanie równowagi granicznej

	Prędkość pociągu		%
	300 km/h		
Współczynnik dynamiczny $a$	4,00	4,0	-
Obciążenie [kPa]	115,00	115,0	-
Wskaźnik stateczności $F$	1,029	1,31	27
$E$ -MAX SHEAR Max	0,152	0,13	20
$E$ -MAX SHEAR Min	0,00066	0,0005	30

Dla zmodernizowanego nasypu wskaźnik stateczności zmienił się o 27 %. Podobnego rzędu zmianę zanotowały przemieszczenia oraz odkształcenia postaciowe. Po wzmocnieniu wierzchniej warstwy podtorza oraz zwiększeniu nachylenia skarpy prawej współczynnik pewności wzrósł do  $F = 1,311$ , co spełnia wymogi zapisane w instrukcji Id-3 [4].

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Celem analizy było określenie wpływu zwiększenia prędkości eksploatacyjnej na stateczność nasypu kolejowego. Stwierdzono, że skarpy nasypu posiadają różne wskaźniki stateczności. Skarpa prawa nie spełnia wymagań zawartych w Id-3 [4]. Wskaźnik stateczności jest mniejszy od wymaganego  $F_{\min} = 1,3$ . Powierzchnia poślizgu przebiega na granicy warstw Ild, Ila illb-b, która obejmuje swym zasięgiem całą prawą skarpe nasypu. Z prawej strony utrata stateczności następuje również w warstwie nlb-1a. Skarpa lewa nasypu jest stateczna, jednak w pierwszej warstwie (nlb-1a) rysuje się powierzchnia poślizgu o wskaźniku stateczności  $F = 1,206$  dla

obciążenia 80 kPa, oraz  $F = 1,161$  dla 115 kPa, który też nie spełnia wymagań Id-3 [4].

Porównując analizy stateczności nasypu kolejowego obciążonego odpowiednio 80 kPa i 115 kPa, można zauważyć, że kształt powierzchni poślizgu jest zbliżony, zarówno w dla całej prawej skarpy nasypu, jak i dla warstwy nlb-1a. Wielkość współczynnika dynamicznego, powodującego wzrost obciążenia jest wprost proporcjonalna do prędkości. Przy zmianie prędkości ze 160 km/h do 300 km/h współczynnik dynamiczny wzrósł o 54%. Podobny wzrost uzyskało obciążenie statyczne (44%). Natomiast wskaźnik stateczności  $F$  zmienił się zaledwie o 10 %. Dlatego można dojść do wniosku, że stateczność nasypu nie zmienia się wprost proporcjonalnie do prędkości pociągów poruszających się po nasypie.

Nośność podłoża w pierwszej warstwie nlb-1a nie spełnia wymagań stawianych liniom kategorii 0 (magistralne). Wzmocniono wierzchnią warstwę gruntu poprzez iniekcję cementową, aby uzyskać moduł odkształcenia 120 MPa. Zwiększono również nachylenie prawej skarpy. Po wzmocnieniu wskaźnik stateczności wzrósł do  $F = 1,311$  zmieniając się o 27%. Podobnego rzędu zmianę odnotowano dla przemieszczeń oraz odkształceń postaciowych.

W podsumowaniu, należy stwierdzić, że konieczna jest modernizacja nasypu, aby spełniał on wymagania stateczności zawarte w Id-3 [4]. Zwiększenie prędkości eksploatacyjnej pociągu ze 160 km/h do 300 km/h, nieznacznie obniża stateczność nasypu.

## Bibliografia

- [1] Stopkowicz A., Cała M., Wybrane zagadnienia analizy stateczności nasypów kolejowych. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH.
- [2] Cała M., Flisiak J., Tajduś A., Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy, Warsztaty Górnicze 2004.
- [3] Pilecka E., Zdanowicz-Dejnak M., Analiza wpływu warunków geotechnicznych podtorza na stateczność nasypów kolejowych w aspekcie kolei dużych prędkości na podstawie modelowania numerycznego. Materiały konferencyjne Drogi Kolejowe 2013, Nr 2(101)/2013.
- [4] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A z dnia 4 maja 2009.
- [5] Norma branżowa Podtorze i podłoża kolejowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania BN-88/8932-02 z roku 1988.
- [6] Batog A., Hawrysz M., Problemy analizy stateczności skarp nasypów kolejowych. Górnictwo i Geoinżynieria, rok 32, zeszyt 2, 2008.
- [7] Materiały projektowe firmy Geopartner, 2008: Dokumentacja geotechniczna do celów projektowych, dla przygotowania modernizacji linii kolejowej E65 (tor 1 i 2) na odcinku linii Nr 4 (CMK) ze stacjami, Kraków.

