

ANDRZEJ BATOG

Politechnika Wrocławska



ELŻBIETA

STILGER-SZYDŁO

Politechnika Wrocławska

## Stateczność skarp nasypów modernizowanej drogi ekspresowej S-8 w ujęciu Eurokodu 7 i aktualnych przepisów krajowych

W artykule „Stateczność skarp nasypów drogowych w ujęciu Eurokodu 7” [1], opublikowanym w Drogownictwie nr 1/2010, autorzy przedstawili dyskusję zaleceń i wytycznych obliczeniowych, zawartych w niedawno opublikowanym w języku polskim Eurokodzie 7 [5], a dotyczących analizy stateczności skarp nasypów drogowych. Podkreślono głównie brak kryteriów doboru podejść obliczeniowych oraz wytycznych interpretacji wyników, prowadzonych w poszczególnych podejściach obliczeniowych. Problem ten staje się szczególnie istotny dla projektantów, wobec niewielkiej ilości krajowych

publikacji i doświadczeń praktycznych w stosowaniu Eurokodu 7 do analizy stateczności skarp. W niniejszym artykule autorzy zawarli dyskusję sposobów przeprowadzania oceny stateczności skarp nasypów drogowych oraz interpretacji uzyskanych wyników uwzględniających procedury wprowadzone przez Eurokod 7. Zostały one oparte na wynikach obliczeń w kilkudziesięciu przekrojach nasypu modernizowanej drogi ekspresowej S-8 (na odcinku Wrocław-Syców), charakteryzującego się dużą zmiennością warunków posadowienia. Uzyskane oceny odniesiono do wymagań dotyczących stateczności skarp stawianych przez przepisy krajowe.

### Analiza stateczności nasypu drogowego

#### Droga ekspresowa S-8

W ostatnich latach na obszarze Polski modernizowana i rozbudowywana jest infrastruktura transportu lądowego (drogowego, kolejowego). W ramach tych działań modernizowana jest droga ekspresowa S-8 na odcinku Wrocław-Syców (rys. 1). Prace zaplanowane na lata 2009–2011 obejmują m.in. budowę nowych nasypów drogowych na odcinku 22,5 km. Wysokość nasypów (o nachyleniu skarp 1:1,5) jest zmienna i maksymalnie osiąga 8,6 m (rys. 2).

Warunki posadowienia nasypów są zróżnicowane, stopień złożoności warunków geotechnicznych zmienia się od prostego do skomplikowanego. Wydzielono cztery typy podłoża gruntowego:

- typ 1 – spoiste podłoże nośne (pyły, gliny piaszczyste i pylaste w stanie twaroplastycznym);
- typ 1a – spoiste podłoże nośne/słabonośne (piaski gliniaste, gliny piaszczyste i pylaste w stanie plastycznym);
- typ 2 – niespoiste podłoże nośne (piaski drobne i średnie w stanie średnio zagęszczonym);

- typ 3 – organiczne podłoże nienośne (torfy i namuły gliniaste o miąższości do 2,0 m, w stanie plastycznym i miękkoplastycznym).

W fazie prac koncepcyjnych nad projektem trasy drogowej rozważano wykonanie nasypów z gruntu niespoistego w postaci piasku średniego lekko zaglinionego, o niewielkiej spójności.

Łącznie analizą stateczności objęto 32 przekroje obliczeniowe, które pod względem warunków posadowienia dzielą się następująco: typ 1 podłoża – 11 przekrojów; typ 1a podłoża – 10 przekrojów; typ 2 podłoża – 4 przekroje; typ 3 podłoża – 7 przekrojów.

### Analiza stateczności w ujęciu Eurokodu 7

Wytyczne Eurokodu 7 zalecają sprawdzenie dwóch stanów granicznych *GEO* oraz *STR*, których osiągnięcie może wiązać się z utratą stateczności ogólnej masywu gruntowego oraz obiektów towarzyszących, nadmiernymi przemieszczeniami, przekroczeniem stanu granicznego użytkowania [1]. Stan graniczny typu *GEO* dotyczy zniszczeń powstających w masywie gruntowym, z kolei stan graniczny typu *STR* jest osiągany w przypadku wystąpienia zniszczenia lub dużych przemieszczeń w masywie gruntowym, w którym znajdują się elementy konstrukcyjne. Do analizy stateczności można zastosować jedno z czterech podejść obliczeniowych, które różnią się sposobem przyjęcia wartości poszczególnych współczynników częściowych. Jak wspomniano w [1], Eurokod 7 ujmuje je w trzech grupach:

*A* – współczynniki stosowane do oddziaływań lub ich efektów, obejmujące:

$\gamma_G$  – współczynnik częściowy do oddziaływań stałych niekorzystnych (powodowanych głównie ciężarem własnym gruntu – nie jest on tożsamy ze współczynnikiem cząstkowym dla ciężaru własnego gruntu  $\gamma_s$ );

$\gamma_{Gfav}$  – współczynnik częściowy do oddziaływań stałych korzystnych;

$\gamma_Q$  – współczynnik częściowy do oddziaływań zmiennych (obciążeń);

*M* – współczynniki do parametrów gruntu, obejmują:

$\gamma_\phi$  – współczynnik częściowy do tangensa kąta tarcia wewnętrznego;

$\gamma_c$  – współczynnik częściowy do spójności;

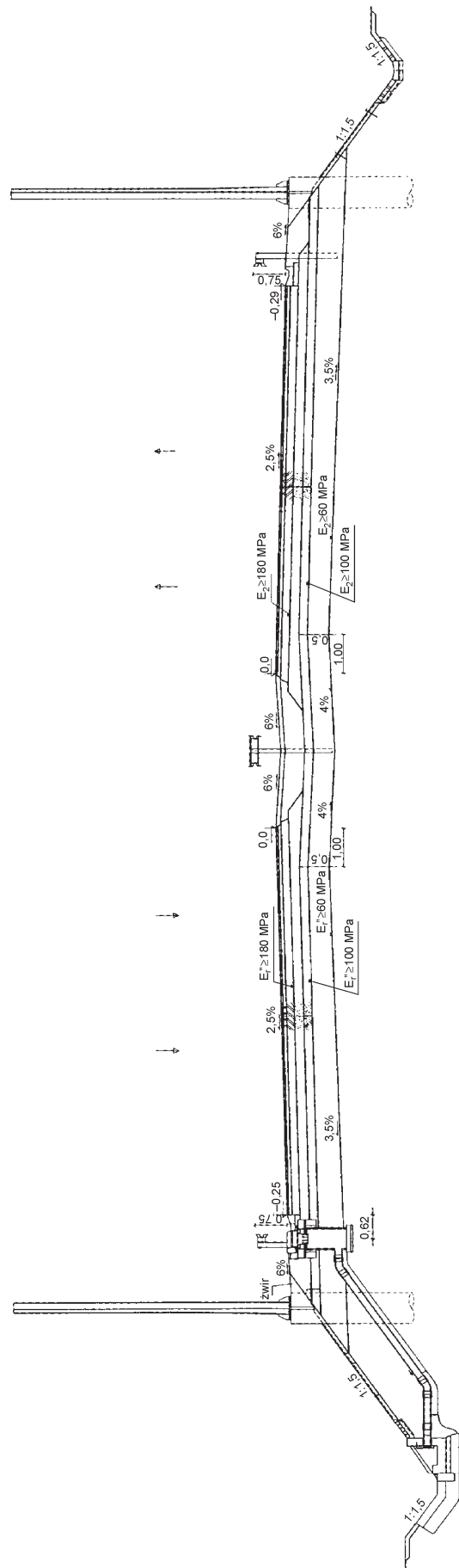
$\gamma_\gamma$  – współczynnik częściowy do ciężaru objętościowego gruntu;

*R* – współczynnik  $\gamma_{R;e}$  stosowany do oporów występujących na powierzchni poślizgu.

W tabeli 1 zestawiono wartości współczynników częściowych stosowanych w analizie stateczności skarp w poszczególnych podejściach obliczeniowych.



Rys. 1. Lokalizacja nowych nasypów drogi ekspresowej S-8 na odcinku Wrocław-Syców



Rys. 2. Typowy przekrój nasypu drogowego

Tabela 1. Wartości współczynników częściowych zalecanych do stosowania w analizie stateczności skarp

Współczynniki częściowe		Podejścia obliczeniowe			
		1		2 (DA2)	3 (DA3)
		kombinacja 1 (DA1-1)	kombinacja 2 (DA1-2)		
A	$\gamma_G$	1,35	1,0	1,35	1,0*
	$\gamma_{Gfav}$	1,0	1,0	1,0	1,0
	$\gamma_Q$	1,5	1,3	1,5	1,3*
M	$\gamma_\phi$	1,0	1,25	1,0	1,25
	$\gamma_c$	1,0	1,25	1,0	1,25
	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0	1,0	1,0
R	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,0	1,1	1,0

\* – oddziaływania te traktuje się jako oddziaływania geotechniczne

Sposób prowadzenia analiz stateczności w poszczególnych podejściach obliczeniowych, przy użyciu powszechnie stosowanej w praktyce inżynierskiej metody „pasków”, szeroko omówiono w artykule [1]. Istotnym problemem jest fakt, że stosowane programy komputerowe z reguły nie pozwalają na odpowiednie zastosowanie współczynników częściowych. W szczególności podejście 1 kombinacja 1 oraz podejście 2 nastęrcza znaczne problemy z ich aplikacją do obliczeń numerycznych, związanych z koniecznością zastosowania odmiennych wartości współczynników częściowych do oddziaływań destabilizujących oraz utrzymujących (tab. 1). W szeregu wytycznych do projektowania według Eurokodu 7 (na przykład [2], [3], [4]) podane są różne sposoby ominięcia tych niedogodności, jednakże wymagają one wprowadzenia różnorodnych odstępstw od wytycznych Eurokodu 7 w poszczególnych podejściach obliczeniowych. Stosowane sposoby ominięcia problemów obliczeń numerycznych wypaczają jednak zasady podane przez Eurokod 7 i nie pozostają bez wpływu na wyniki obliczeń. W niniejszym artykule zastosowano do obliczeń własny, autorski program *SMB*, w którym zastosowano algorytmy w pełni zgodne z wytycznymi Eurokodu 7.

## Dyskusja wyników analiz stateczności

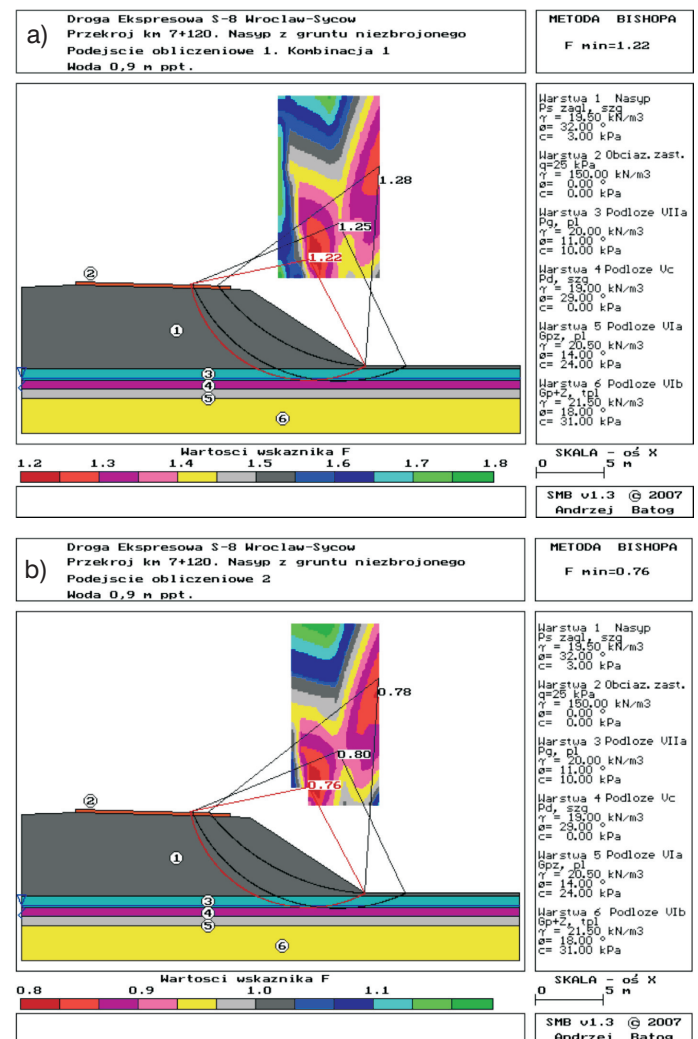
Obliczenia przeprowadzono według wszystkich czterech podejść obliczeniowych przy zastosowaniu programu *SMB*, za pomocą uproszczonej metody Bishopa, której algorytmy obliczeniowe zmodyfikowano tak, aby były w pełni zgodne z zaleceniami Eurokodu 7 w każdym podejściu obliczeniowym. Jako wartość wymaganą (dopuszczalną) wskaźnika stateczności przyjęto  $F_{dop} = 1,00$ . Wartość taka jest konsekwencją zastosowania współczynników częściowych do parametrów geotechnicznych, obciążeń i oddziaływań. Obliczenia stateczności prowadzone są zatem na obliczeniowych wartościach parametrów, co według Eurokodu 7 powinno zapewnić odpowiedni zapas stateczności. W dalszej części artykułu zostanie wykazane jednak, że występują znaczne różnice w wielkości zapasu stateczności skarp w poszczególnych podejściach obliczeniowych.

W celach porównawczych przeprowadzono również analizy odnoszące się do podejścia tradycyjnego (CA), uwzględ-

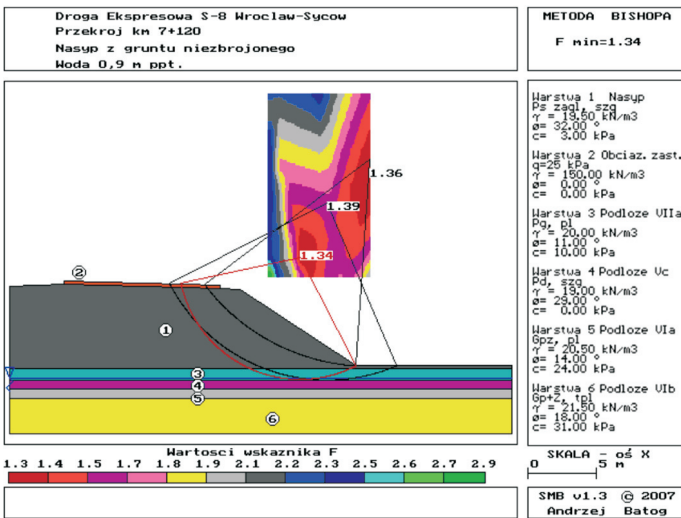
niającego charakterystyczne wartości parametrów geotechnicznych. Wartość wymaganą wskaźnika stateczności przyjęto w tym przypadku zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem MTiGM [6], według którego nasyp oraz jego bezpośrednie podłoże powinny mieć minimalny zapas stateczności określony przez dopuszczalny wskaźnik stateczności  $F_{dop} = 1,50$ .

Wyniki obliczeń stateczności, przeprowadzone za pomocą autorskiego programu *SMB* przedstawione są na przekrojach obliczeniowych w postaci wykresu warstwicowego izolinii statych wartości wskaźnika stateczności. Określone są one wewnątrz zadanego, prostokątnego obszaru położenia środków obrotu kotłowo-cylindrycznej powierzchni poślizgu, wraz z położeniem istotnych powierzchni poślizgu, w tym najmniejbezpiecznej powierzchni o minimalnej wartości wskaźnika stateczności  $F_{min}$ .

Na rysunkach 3 i 4 pokazano przykładowe wyniki obliczeń stateczności w km 7+120. W celach porównawczych na rysunku 4 zestawiono skrajne wartości oceny wskaźnika stateczności. Najwyższą wartość  $F_{min} = 1,22$  uzyskano w podejściu obliczeniowym 1 kombinacji 1 (DA1-1) oraz najniższą  $F_{min}$



Rys. 3. Droga ekspresowa S-8 Wrocław-Syców, przekrój w km 7+120 – wyniki obliczeń stateczności wykonanych według Eurokodu 7: a) podejście obliczeniowe 1 kombinacja 1 (DA1-1); b) podejście obliczeniowe 2 (DA2)



Rys. 4. Droga ekspresowa S-8 Wrocław-Syców, przekrój w km 7+120 – wyniki obliczeń stateczności w podejściu tradycyjnym

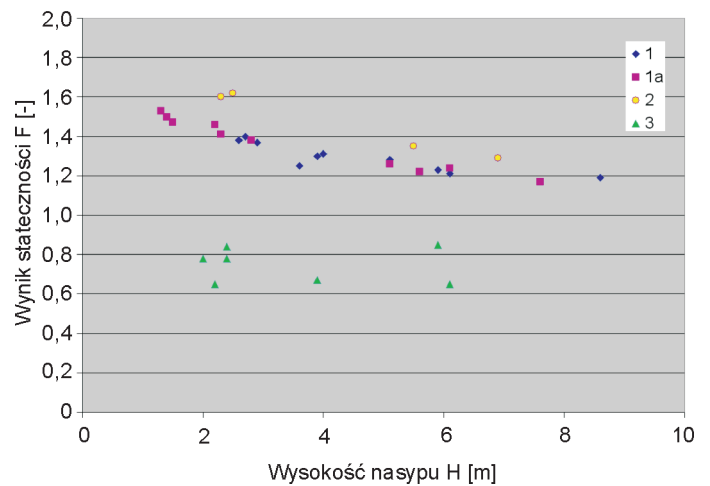
= 0,76 – w podejściu obliczeniowym 2 (DA2). W podejściu tradycyjnym minimalny wskaźnik stateczności wynosi  $F_{min} = 1,34$  (rys. 4). Opis gruntów oraz przyjęte do obliczeń wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych są uwidocznione na każdym z rysunków.

Syntetycznie wyniki obliczeń wszystkich czterech podejść obliczeniowych Eurokodu 7 zestawiono na rysunkach 5–8. Wykresy przedstawiają zależność minimalnej wartości wskaźnika stateczności  $F_{min}$  w danym przekroju obliczeniowym od wysokości nasypu. Na rysunku 9 porównano wyniki otrzymane w podejściu tradycyjnym, uwzględniając charakterystyczne wartości parametrów geotechnicznych i obciążeń. Poszczególne serie danych uwzględniają wydzielone wcześniej typy podłoża gruntowego.

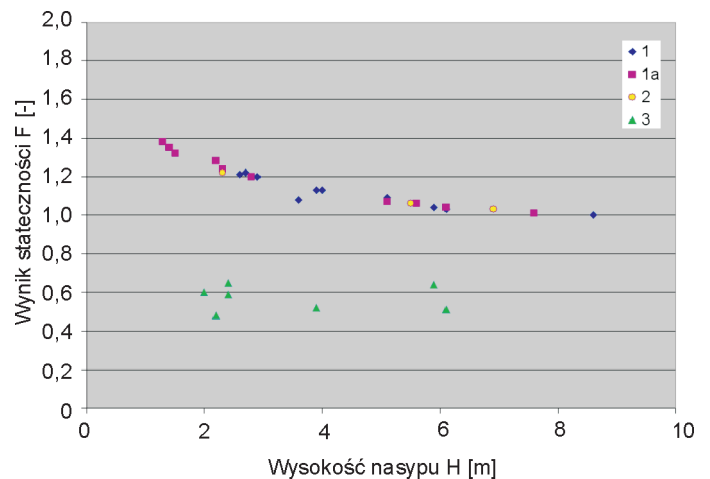
Wyniki uzyskane we wszystkich podejściach w przekrojach, w których występuje dostatecznie nośne podłoże (typ podłoża 1, 1a i 2) wykazują wyraźną zależność stateczności nasypu od jego wysokości. Punkty obrazujące obliczone wartości  $F_{min}$  układają się w krzywą wykładniczą, co wiązać należy głównie ze spójnością gruntów nasypu i podłoża. Skarpy nasypu o wysokości powyżej 7,0 m nie wykazują już wyraźnego zmniejszania się wartości wskaźnika stateczności z dalszym wzrostem wysokości nasypu. Porównywalne pod względem warunków gruntowych nasypy wysokie charakteryzują się o około 20% mniejszym zapasem stateczności niż w przypadku nasypów niskich.

Sposób przyjęcia współczynników częściowych w podejściu obliczeniowym 1 kombinacja 1 (rys. 5) „preferuje” skarpy nasypów posadowionych na podłożu niespoistym (typ podłoża 2). Minimalne wartości wskaźników stateczności układają się tu nad linią trendu (nie podano jej na rysunku, aby zachować czytelność wykresu), wykazując wyższy zapas stateczności niż w przekrojach posadowionych na podłożach z gruntów spoiwych (typ podłoża 1 i 1a).

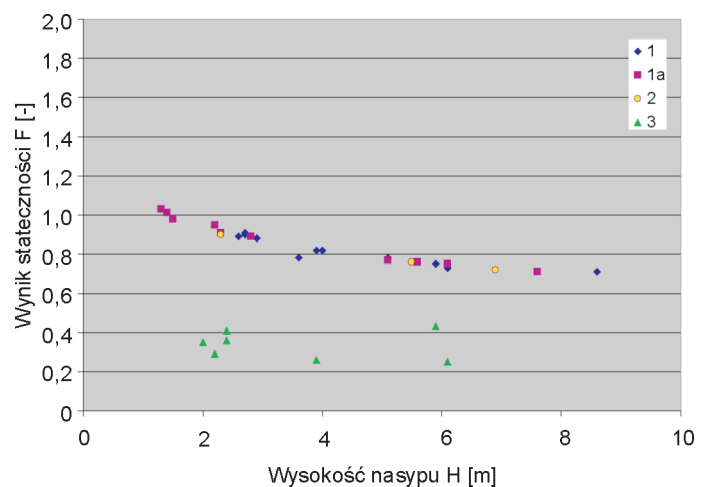
Stateczność skarp nasypów posadowionych na podłożu słabonośnym (typ podłoża 3) zależy od miąższości warstwy słabej i jej parametrów wytrzymałościowych. Wyniki na wykresie układają się w sposób chaotyczny. Głównym problemem przy projektowaniu nasypów w tych przekrojach jest zapewnienie nośności podłoża.



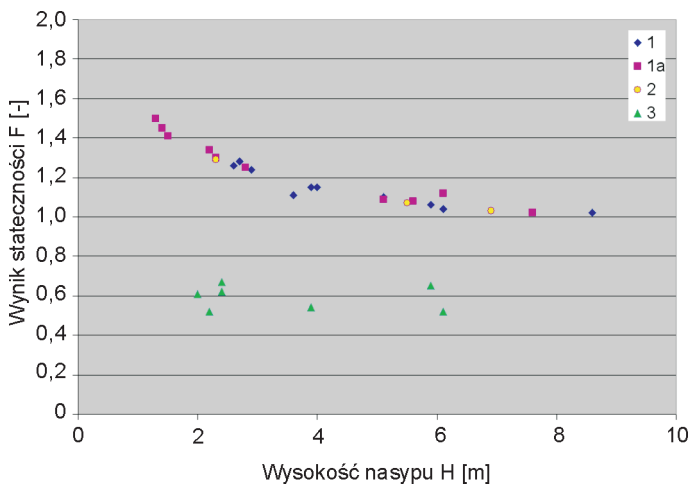
Rys. 5. Wyniki oceny stateczności według podejścia obliczeniowego 1 kombinacji 1 (DA 1-1) na poszczególnych typach podłoża (1 – grunty spoiwe twardoplastyczne, 1a – grunty spoiwe plastyczne i rzadziej twardoplastyczne, 2 – grunty niespoiste, 3 – nienośne grunty organiczne)



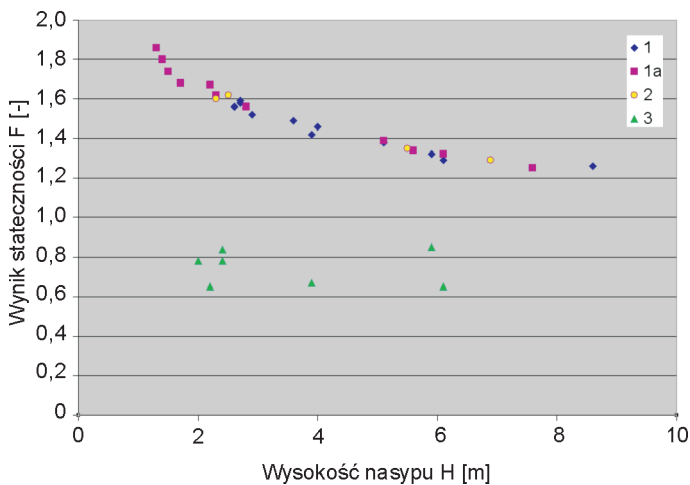
Rys. 6. Wyniki oceny stateczności podejścia obliczeniowego 1 kombinacji 2 (DA1-2) na poszczególnych typach podłoża



Rys. 7. Wyniki oceny stateczności podejścia obliczeniowego 2 (DA2) na poszczególnych typach podłoża



Rys. 8. Wyniki oceny stateczności podejścia obliczeniowego 3 (DA3) na poszczególnych typach podłoża



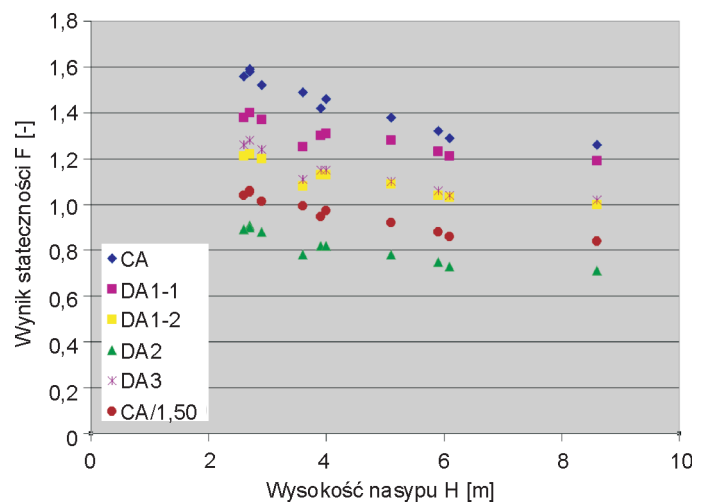
Rys. 9. Wyniki oceny stateczności podejścia tradycyjnego na poszczególnych typach podłoża

Na kolejnych wykresach (rys. 10–12) zestawiono, jako porównywalne, wyniki uwzględniające wydzielone typy podłoża. W poszczególnych seriach zamieszczono wyniki uzyskane w analizowanych podejściach obliczeniowych oraz w podejściu tradycyjnym. Porównywanie wyników podejść obliczeniowych Eurokodu 7 oraz tradycyjnego może okazać się mylące, z uwagi na zróżnicowane wymagania odnośnie do zapasów stateczności nasypów. Podejścia obliczeniowe Eurokodu 7 wymagają, aby wartość minimalnego wskaźnika stateczności była większa od jedności, natomiast wymagany zapas stateczności podejścia tradycyjnego wynika z przedmiotowych przepisów. W Polsce, przy nasypach drogowych o wysokości powyżej 5,0 m wymagana przepisami wartość wskaźnika stateczności wynosi  $F_{dop} = 1,50$ . W innych krajach europejskich wartość ta zawiera się w przedziale  $F_{dop} = 1,30 \div 1,50$ . Z powyższego względu, w podejściu tradycyjnym określa się dodatkowo wartość pomocniczego wskaźnika stateczności, zwanego współczynnikiem przeprojektowania  $ODF$  (over-design factor), zgodnie z zależnością:

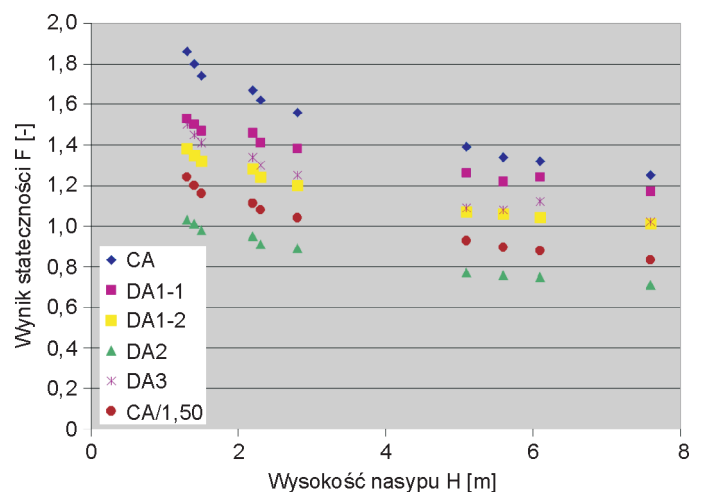
$$ODF = \frac{F_{min}}{F_{dop}}$$

Wartości  $ODF > 1$  oznaczają wyższy od wymaganego zapas stateczności. Na wykresach (rys. 10–11) serie wyników  $ODF$  podejścia tradycyjnego oznaczono symbolem CA/1,50.

Porównanie uzyskanych wyników wskazuje wyraźnie, że w przypadku analizy stateczności skarp nasypów drogowych poszczególne podejścia obliczeniowe nie są równoważne, pomiędzy skrajnymi wynikami uzyskanymi w podejściu DA1 C1 i podejściu DA2 – maksymalne różnice wynoszą około 60% wartości wyliczonych wg podejścia DA2. Zatem dobór podejścia obliczeniowego w konkretnym zadaniu powinien być poprzedzony dogłębną analizą uwarunkowań geotechnicznych, uwzględniających m.in. kategorię geotechniczną zadania, stopień złożoności warunków geotechnicznych i stopień rozpoznania podłoża gruntowego.

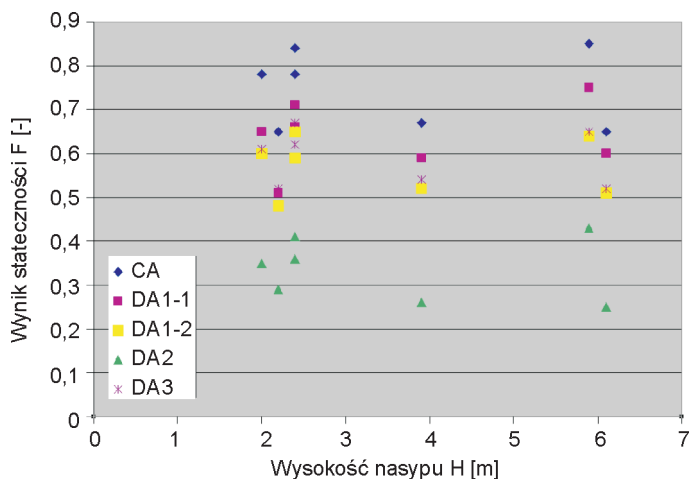


Rys. 10. Porównanie wyników obliczeń stateczności w przekrojach nasypu projektowanego na gruncie spoiwym twardoplastycznym (typ 1 podłoża) w poszczególnych podejściach obliczeniowych oraz przy podejściu tradycyjnym (CA – Classical Approach)



Rys. 11. Porównanie wyników obliczeń stateczności w przekrojach nasypu projektowanego na gruncie spoiwym plastycznym (typ 1a) w analizowanych podejściach obliczeniowych

Najbezpieczniejsze jest podejście DA2, w którym uzyskuje się najmniejsze wartości wskaźnika stateczności. Zatem powinno być ono stosowane w przypadkach bardzo słabego rozpoznania warunków podłoża, przy dużej zmienności gruntów występujących w analizowanym masywie gruntowym, bądź przy występowaniu nasypów niekontrolowanych. Również to podejście jest właściwe w przypadku ustalania wartości parametrów wytrzymałości metodami pośrednimi (na przykład wyłącznie na podstawie zależności korelacyjnych).



Rys. 12. Porównanie wyników obliczeń stateczności w przekrojach nasypu projektowanego na gruncie nienośnym organicznym (typ 3) w analizowanych podejściach obliczeniowych

Pośrednie wyniki, bardzo do siebie zbliżone, przynoszą podejście DA1-2 oraz DA3. Należy je zatem stosować do analizy stateczności skarp, których warunki geotechniczne zostały rozpoznane w stopniu średnim, a wartości parametrów wytrzymałości zostały po części wyznaczone za pomocą badań (na przykład w aparacie bezpośredniego ścinania). Podejścia DA1-2 oraz DA3 różnią się jedynie sposobem traktowania obciążeń zewnętrznych. Podejście DA3 jest właściwsze do stosowania w przypadkach, w których obciążenia zewnętrzne są stałe, bądź zmieniają się w długim okresie czasu (na przykład w zboczach końcowych wyrobisk lub zwałowisk). Z kolei podejście DA1-2 jest bardziej poprawne w przypadku występowania zmiennych obciążeń o stosunkowo znacznej wartości (na przykład przy analizach stateczności skarp nasypów kolejowych).

Najwyższe wartości wskaźników stateczności daje podejście DA1-1, w którym co bardzo istotne, analizę stateczności przeprowadza się z uwzględnieniem tylko charakterystycznych wartości parametrów wytrzymałościowych. To podejście powinno być wybierane tylko w przypadku, gdy wartości parametrów wytrzymałości gruntów zostały wyznaczone metodami laboratoryjnymi i polowymi, zapewniającymi wysoki stopień rozpoznania warunków geotechnicznych całego analizowanego masywu gruntowego.

W celach porównawczych, na wykresach (rys. 10–12) podano wartości wskaźników stateczności określone zgodnie z podejściem tradycyjnym (CA), uwzględniającym charakterystyczne wartości wszystkich parametrów geotechnicznych

oraz obciążeń. Wyniki są oczywiście większe, od uzyskanych z podejść obliczeniowych Eurokodu 7. Istotne są różnice wartości wskaźników stateczności uzyskane w tych podejściach, bowiem ilustrują one, jak duży zapas stateczności powoduje dana kombinacja częściowych współczynników zalecanych w danym podejściu.

Należy również przeanalizować wyniki ocen stateczności Eurokodu 7 pod kątem zgodności z kryteriami dotychczas stosowanymi w praktyce inżynierskiej, wynikającymi z wymaganego przez krajowe przepisy zapasu stateczności  $F_{dop} = 1,50$ . W tym celu podano na wykresach (rys. 10, 11) wartości współczynnika przeprojektowania ODS, obliczone w podejściu tradycyjnym (oznaczone symbolem CA/1.5). Mogą one stanowić odniesienie do wartości wskaźników stateczności określonych w poszczególnych podejściach obliczeniowych, w których wartość wymagana wskaźnika stateczności wynosi  $F_{dop} = 1,00$ . Z porównania wynika spostrzeżenie, że jedynie podejście obliczeniowe DA2 pozwala na uzyskanie wartości wskaźników stateczności nie większych (czyli bezpieczniejszych) od wartości ODS, zatem tylko podejście obliczeniowe 2 (DA2) spełnia wymagania dotyczące stateczności wysokich nasypów drogowych w świetle polskich przepisów.

## Podsumowanie

Ocena stateczności skarp i zboczy w budownictwie drogowym jest jednym z głównych zagadnień w procesie projektowania, zapewniającym bezpieczeństwo eksploatacji dróg. Wskaźnik stateczności  $F$ , stosowany jako podstawowy parametr do oceny zapasu stateczności, może przyjmować różne wartości w zależności od zastosowanej metody obliczeniowej oraz przyjętego podejścia obliczeniowego. Eurokod 7 wprowadza nowe podejścia do problematyki rozwiązywania zagadnień inżynierskich z zakresu geotechniki. W artykule zawarto analizę i dyskusję tych podejść obliczeniowych, na podstawie przykładów pochodzących z praktyki inżynierskiej. Wykazano, że poszczególne podejścia nie są równoważne, a ich wybór musi być powiązany z programem badań geotechnicznych przewidzianym do danej inwestycji, przekładającym się na stopień rozpoznania warunków geotechnicznych.

## Bibliografia

- [1] Batog A., Stilger-Szydło E.: *Stateczność skarp nasypów drogowych w ujęciu Eurokodu 7*, „Drogownictwo” 1/2010
- [2] Bond A., Harris A., *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis Group, London, 2008
- [3] Frank R. et al., *Designers' guide to EN 1997-1: Eurocode 7*. Thomas Telford, London, 2004
- [4] Simpson B., Driscoll R., *Eurocode 7 a commentary*. CRC Ltd., London, 1998
- [5] PN-EN 1997-1: 2008/AC: 2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne
- [6] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. z dnia 14 maja 1999 r. nr 43, poz. 430