

PROJEKTOWANIE NASYPÓW KOMUNIKACYJNYCH ZBROJONYCH GEOSYNTETYKAMI ZGODNIE Z EUROKODEM 7

Konrad Rola-Wawrzecki

Geosyntetyki NAUE Sp. z o.o., Warszawa

Streszczenie. Prawo nakłada obowiązek sprawdzenia stateczności nasypów komunikacyjnych wyższych niż 3,0 m [Rozporządzenie 2012]. Efektywną kosztowo metodą wzmacniania nasypów o niewystarczającej stateczności jest zbrojenie z geosiatek. Narzucony Rozporządzeniem Ministra [1999] sposób sprawdzania stateczności metodą globalnego współczynnika bezpieczeństwa jest niezgodny z obowiązującą polską normą Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne [PN-EN 1997-1:2008]. W artykule przedstawiono sposób obliczenia stateczności nasypu metodą częściowych współczynników bezpieczeństwa oraz doboru wartości parametrów obliczeniowych i zbrojenia z georusztów dla nasypu komunikacyjnego zaprojektowanego zgodnie z PN-EN EC-7, a także sposób wyznaczania częściowych współczynników redukcyjnych i wymaganej wytrzymałości długoterminowej zbrojenia geosyntetycznego. W części obliczeniowej porównano wyniki obliczeń stateczności nasypu przeprowadzone zgodnie z Rozporządzeniem [1999] oraz Eurokodem 7 [PN-EN 1997-1:2008]. Wyznaczono potencjalne mechanizmy zniszczenia metodą Bishopsa w stanie granicznym nośności, w różnej kombinacji współczynników częściowych (DA-1, DA-3) i porównano uzyskane wyniki.

Słowa kluczowe: geosiatka, zbrojenie nasypu, wytrzymałość długoterminowa, stateczność nasypu, współczynniki redukcyjne

WSTĘP

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych [2012] nakłada obowiązek sprawdzenia stateczności nasypów komunikacyjnych wyższych niż 3,0 m, ponieważ są to konstrukcje zaliczane do drugiej kategorii geotechnicznej. Popularną i ekonomicznie uzasadnioną metodą zbrojenia nasypów o niewystarczającej stateczności jest wykorzystanie do tego celu geosyntetyków, w tym geosiatek. Niniejsza praca przed-

stawia sposób wykonania obliczeń wysokiego nasypu drogowego zbrojonego geosyntetykami, zgodnie z zaleceniami PN-EN 1997-1: 2008 Eurokod-7. Projektowanie geotechniczne. Część 1 – Zasady ogólne, oraz porównanie wyników tej metody z metodą globalnego współczynnika bezpieczeństwa zalecaną przez Rozporządzenie [2012].

MATERIAŁ BADAWCZY

Jako przykład do analizy wybrano nasyp o wysokości maksymalnej $h_{\max} = 8,39$ m nad poziomem terenu, na którym znajduje się droga z ruchem ciężkim (KR5) oraz chodnik dla pieszych. Nasyp jest zlokalizowany na Mazowszu, a opisane warunki gruntowo-wodne wystąpiły w rzeczywistości. Zgodnie z Rozporządzeniem [2012] taki nasyp należy zaliczyć do drugiej kategorii geotechnicznej i na jego potrzeby należy wykonać projekt geotechniczny zgodnie z Eurokod-7 [PN-EN 1997-1:2008].

GEOSYNTETYKI – WIADOMOŚCI OGÓLNE

Zgodnie z definicją zaproponowaną przez Wesolowskiego i innych [2000], geosyntetyki to materiały przemysłu tekstylnego używane w kontakcie z gruntami oraz skałami. W EBGeo [2011], będącym w Niemczech oficjalnym załącznikiem do EC-7 [PN-EN 1997-1:2008], rozróżnienie typów geosyntetyków bazuje na różnicy w strukturze produktu. Wyróżnia się tu:

- geotekstyli (np. geotkaniny, geowłókniny i geodzianiny),
- geosiatki (ekstrudowane, tkane, raszlowane, łączone innymi metodami),
- geokompozyty,
- wyroby pokrewne (np. maty przeciweerozyjne).

Zasady doboru geosyntetyków do funkcji zbrojeniowych opierają się na wartościach sił, jakie mogą być przenoszone przez określony produkt, przy zakładanym czasie pracy materiału w gruncie (długowieczność), oraz na wartościach odkształceń, jakim dany produkt podlega w czasie swojej pracy w gruncie (sztywność). Od geosyntetyków pracujących jako zbrojenie wymaga się następujących właściwości:

- odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie, z uwzględnieniem wydłużenia produktu,
- przenoszenia sił pomiędzy geosyntetykiem a otaczającym gruntem, na drodze odpowiedniego tarcia,
- odporności na uszkodzenia podczas transportu i instalacji,
- odpowiedniej wodoprzepuszczalności, żeby nie dopuścić do tworzenia się w konstrukcji gruntowej soczewek wody zawieszonych,
- odporności na degradację chemiczną i biologiczną,
- odpowiedniej odporności na warunki pogodowe i promieniowanie UV.

Jako że geosyntetyki, także te o funkcji zbrojenia (R), wykonane są z polimerów chemicznych, wykazują zachowanie jak ciało plastyczne. Pod obciążeniem w krótkim okresie pojawiają się deformacje elastyczne, a po długim – również nieodwracalne odkształcenia związane z pełzaniem. Skutkiem długotrwałego obciążenia jest utrata wytrzymałości materiału na rozciąganie oraz większe wydłużenia materiału w porównaniu z ba-

daniami krótkookresowymi. Dlatego parametrem niezbędnym do wyznaczenia wartości charakterystycznych i obliczeniowych zbrojenia geosyntetycznego w stanie granicznym nośności (ULS) jest pełzanie przy zerwaniu (*creep rupture*). Proces pełzania jest funkcją rodzaju polimeru, z którego wykonano geosyntetyk, procesu produkcji, wielkości oddziaływań, czasu działania obciążeń oraz temperatury. Do wyznaczenia charakterystycznej wytrzymałości długoterminowej należy skorzystać z następującej zależności [EBGEO 2011]:

$$F_k = F_0 / (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) \quad (1)$$

gdzie: F_k – wytrzymałość charakterystyczna długoterminowa (np. 120 lat),

F_0 – wytrzymałość początkowa (z 95-procentowym poziomem ufności),

A_1 – współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejsza wytrzymałości na skutek pełzania,

A_2 – współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości na skutek uszkodzeń w trakcie transportu i wbudowywania,

A_3 – współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości na skutek wykonywania połączeń w kierunku pracy zbrojenia; w praktyce takich połączeń się nie wykonuje, więc $A_3 = 1,00$,

A_4 – współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości na skutek oddziaływania czynników środowiskowych,

A_5 – współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości na skutek bardzo silnego oddziaływania cyklicznych obciążeń dynamicznych; w typowych konstrukcjach inżynierskich $A_5 = 1,00$.

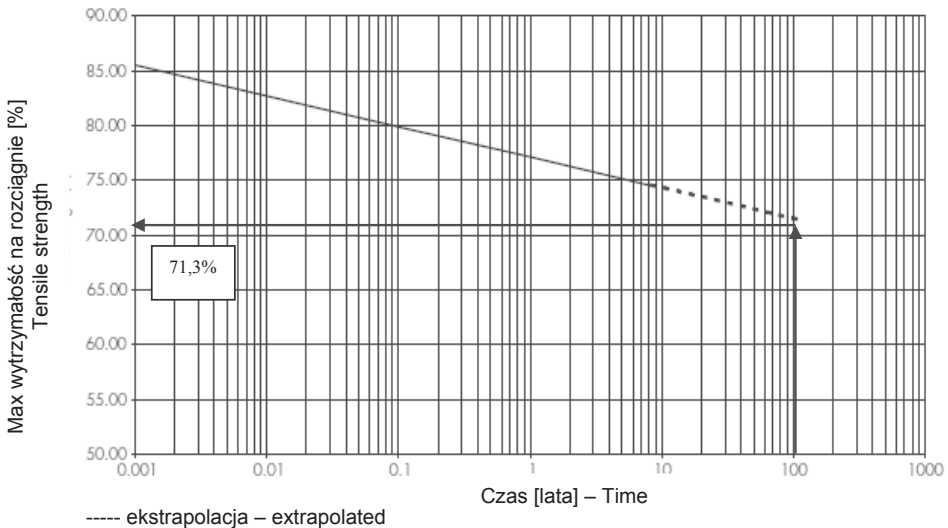
W przypadku nasypu, którego projekt jest przedmiotem niniejszej pracy, jako zbrojenie wybrano jednokierunkowy georuszt poliestrowy typu Secugrid R6. Producent tego geosyntetyku udostępnił dokumentację umożliwiającą odpowiedni dobór wartości parametrów do obliczeń.

Współczynnik A_1 , konieczny do sprawdzenia stanu granicznego użyteczności, wyznacza się podczas badań zrywania próbek geosyntetyku, trwających minimum 10 000 godzin w określonych warunkach [PN-EN ISO 13431]. Na podstawie wyników badań wykreśla się krzywą regresji i odczytuje wartość współczynnika redukcyjnego A_1 . Dla georusztu Secugrid R6, zgodnie z Europejską Aprobata Techniczną [2010], krzywa ta przyjmuje postać przedstawioną na rysunku 1. Dla 120 lat wartość wytrzymałości na zrywanie wynosi 71,3% wytrzymałości początkowej (F_0), więc $A_1 = 1 / 0,713 = 1,40$.

Wartość współczynnika A_2 należy określać w czasie badań terenowych, polegających na zasypywaniu geosyntetyku różnymi rodzajami kruszywa i badaniu procentowej straty wytrzymałości na skutek uszkodzeń mechanicznych w stosunku do produktu fabrycznie nowego. Dla geosiatki Secugrid R6 wartości współczynnika redukcyjnego A_2 , uzyskane w badaniach terenowych, przedstawiono w tabeli 1 [Europejska Aprobata... 2010].

Współczynnik materiałowy A_3 ma wartość $A_3 = 1,00$, ponieważ nie przewiduje się wykonywania połączeń pasm geosyntetyku wzdłuż działania sił rozciągających.

Ostatni rozpatrywany współczynnik materiałowy A_4 zależy od pH gruntu, w którym zainstalowano geosyntetyk. Grunty obojętne (pH od 4,1 do 8,9) nie wywołują dodatkowych strat wytrzymałości geosyntetyków. Na materiały poliestrowe (PES/PET) degra-



Rys. 1. Krzywa zależności czas – wydłużenie

Fig. 1. Time to rupture

Tabela 1. Wartości współczynnika A_2 dla materiału Secugrid® Q6/R6Table 1. Partial safety factor – installation damage (A_2)

Typ produktu Product type	Kruszywo łamane Coarse gravel $\leq 35 \text{ mm}^a$	Pospółka Sandy gravel $\leq 8 \text{ mm}^a$	Piasek Sand $\leq 2 \text{ mm}^a$
30/30 Q6, 40/40 Q6, 40/20 R6	1,09	1,08	1,06
60/60 Q6, 60/20 R6	1,08	1,05	1,02
80/80 Q6, 80/20 R6	1,05	1,03	1,01
120/40 R6, 200/40 R6, 400/40 R6	1,05	1,02	1,00

^aZawartość ziaren o średnicy D_{90} .
 D_{90} particle size.

dująco działają roztwory o pH wyższym niż 11, ponieważ wywołują zasadową hydrolizę polimeru. Zestaw współczynników A_4 dla geosiatki Secugrid R6 przedstawiono w tabeli 2 [Europejska Aprobata... 2010]:

Efekt wzmocnienia gruntu zależy od współpracy i przenoszenia sił pomiędzy geosyntetykiem a otoczeniem gruntowym. Związek ten jest opisany jako szczepność zbrojenia z gruntem i określany jako współczynnik tarcia (f_{ik}). Określa się go, wykonując w aparacie skrzynkowym test *pull-out* z użyciem przewidzianego rodzaju zbrojenia i materiału gruntowego.

Tabela 2. Wartości współczynnika A_4 w zależności od pH gruntu

Table 2. Partial safety factor – environmental effects

pH gruntu Soil pH level	Współczynnik redukcyjny Safety factor A_4
2,0–4,0	1,10
4,1–8,9	1,00
9,0–10,0	< 1,10
10,1–11,0	1,06 ^a , 1,10 ^b
11,1–12,5	1,14 ^a , 1,20 ^b

^aWytrzymałość obliczeniowa na 60 lat – 60y design life.^bWytrzymałość obliczeniowa na 120 lat – 120y design life.

Współczynnik tarcia określa się z zależności:

$$f_{tk} = \mu \cdot \tan \varphi_k \quad (2)$$

gdzie: $\mu = \tan \delta / \tan \varphi$

$\tan \varphi_k$ – tangens charakterystycznej wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu, we współpracy z którym jest badany geosyntetyk,

$\tan \delta$ – zmierzony składnik współczynnika tarcia na powierzchni grunt/geosyntetyk,

$\tan \varphi$ – zmierzony w badaniu składnik współczynnika tarcia od gruntu.

Dla geosiatek typu Secugrid wartość współczynnika μ określona została jako $\mu = 0,9$ [Ruegger i Hufenus 2003].

Charakterystyczną wytrzymałość na wrywanie z gruntu (*pull-out resistance*) należy wyliczyć ze wzoru [EBGEO 2011]:

$$F_{k,pull-out} = n \cdot \sigma_{v,k} \cdot L_a \cdot f_{tk} \text{ [kN} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3)$$

gdzie: n – liczba powierzchni wziętych pod uwagę (liczba $n = 2$ tarcie na górnej i dolnej powierzchni geosyntetyku),

$\sigma_{v,k}$ – naprężenie normalne charakterystyczne w płaszczyźnie geosyntetyku,

L_a – długość zakotwienia geosyntetyku poza analizowaną płaszczyzną poślizgu,

f_{tk} – wartość współczynnika tarcia zbrojenia o grunt określony w badaniach *pull-out* (lub wartość z literatury).

ZASADY SPRAWDZANIA STANÓW GRANICZNYCH NOŚNOŚCI

Na potrzeby porównania wyników uzyskanych różnymi metodami obliczeniowymi sprawdzono stan graniczny nośności (ULS), co polega na sprawdzeniu utraty stateczności zewnętrznej oraz wewnętrznej konstrukcji z gruntu zbrojonego. Przeprowadzenie obliczeń sprawdzających stany graniczne utraty stateczności zewnętrznej przeprowadza się jak dla podobnych obiektów o tradycyjnej konstrukcji, gdzie konstrukcje z gruntu zbrojonego traktuje się jak „ciało sztywne”. Sprawdzenie stateczności wewnętrznej polega na wykazaniu, że dla najbardziej prawdopodobnej linii poślizgu, wydzielony tą linią fragment nie utraci równowagi pod działaniem obliczeniowych obciążeń przy oblicze-

niowych wartościach parametrów wytrzymałościowych gruntu i zbrojenia na linii poślizgu. Warunek niewystąpienia stanu granicznego przyjmuje się ogólnie w postaci:

$$E_d < R_{ds} + R_{dg} \quad (4)$$

gdzie: E_d – siła (efekt oddziaływań) działająca na linii poślizgu, destabilizująca dany fragment,

R_{ds} – opór graniczny konstrukcji, składowa wynikająca z wytrzymałości gruntu,

R_{dg} – opór graniczny konstrukcji, składowa wynikająca z wytrzymałości zbrojenia.

Przy ustalaniu oporu granicznego wynikającego ze składowej wytrzymałości zbrojenia (R_{dg}) można uznać, że we wszystkich pasmach zbrojenia na linii poślizgu w stanie równowagi granicznej siły w zbrojeniu są równe mniejszej z sił wynikających z wytrzymałości zbrojenia na rozciąganie (F_k) oraz na wrywanie zbrojenia z gruntu ($F_{k,pull-out}$). Obie te wartości muszą zostać zmniejszone o częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla parametrów wytrzymałościowych zbrojenia. Dla LC1 (przypadek obciążenia I – stan użyteczności konstrukcji) wartość tych współczynników wynosi $\gamma_g = 1,40$ oraz $\gamma_{pull-out} = 1,40$ [EBGE 2011]. Obliczenia sprawdzające można wykonywać metodą klasyczną, bazującą na sprawdzeniu stateczności ogólnej (np. metoda Bishopa). W obu przypadkach przy analizowaniu określonego fragmentu konstrukcji uwzględnia się siły działające w zbrojeniu jako siły utrzymujące konstrukcję. W praktyce, ze względu na skomplikowanie obliczeń, do sprawdzania stateczności nasypów używa się programów komputerowych. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano program GGU-Stability, który umożliwia jednoczesne wyznaczenie stabilności zewnętrznej i wewnętrznej metodą Bishopa.

PROJEKT NASYPU KOMUNIKACYJNEGO ZBROJONEGO GEOSYNTETYKIEM

Zgodnie z Opinią geotechniczną [Grzybińska 2011] grunty podłoża podzielone zostały na 9 warstw geotechnicznych, z przypisaniem każdej z nich charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych. Głębokość zwierciadła wody gruntowej określono na 1,60 m poniżej powierzchni terenu. Wartości charakterystyczne określone w Opinii geotechnicznej [Grzybińska 2011] przyjęto do obliczeń i zobrazowano na wydrukach z programu obliczeniowego.

METODYKA BADAŃ

Jako grunt do budowy nasypu przyjęto piasek średnioziarnisty o kącie tarcia wewnętrznego $\varphi = 34^\circ$, spójności $c = 0$ kPa i gęstości objętościowej $\gamma = 18,5$ T·m⁻³. Współczynnik filtracji piasku przewidywanego do wbudowania ($k = 5,6$ m·d⁻¹) spełnia wymagania normowe BN-76/8950-03 $k > 5,2$ m·d⁻¹ i dlatego nie zastosowano żadnych specjalnych rozwiązań odwodnienia materiału gruntowego w nasypie. Podane w Opinii geotechnicznej [Grzybińska 2011] wartości parametrów gruntu są wartościami charakterystycznymi,

a przeliczenie ich do wartości obliczeniowych jest wykonywane w programie GGU-Stability.

Zastosowane współczynniki częściowe, zgodnie z podejściem obliczeniowym DA-3 stosowanym na przykład w Polsce i w Niemczech, to zestaw: A2 + M2 + R3. W Wielkiej Brytanii i na przykład we Włoszech do obliczania stateczności nasypów stosuje się podejście obliczeniowe DA-1 (z kombinacją 1 i 2, wybierając – jako decydującą – wartość mniejszą), czyli DA-1_1: A1 + M1 + R1 oraz DA-1_2: A2 + M2 + R1. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę redukcję wartości odporności geosyntetyku na wyrywanie:

$$\gamma_{(pull-out)} = 1,40$$

Wielkości poszczególnych współczynników redukcyjnych, zgodnie z EC-7 [PN-EN 1997-1:2008], przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Współczynniki częściowe do stanów granicznych (EC-7)

Table 3. Partial safety factors limit states (EC-7)

Oddziaływania – Actions		Symbol Symbol	Zestaw – Action factors		
			A1	A2	
Stałe Permanent	niekorzystne – unfavourable	γ_G	1,35	1,0	
	korzystne – favourable		1,0	1,0	
Zmienne Variable	niekorzystne – unfavourable	γ_Q	1,5	1,3	
	korzystne – favourable		0	0	
Parametr gruntu – Soil parameters		Symbol Symbol	Zestaw – Material factors		
			M1	M2	
Kąt tarcia wewnętrznego ^a – Shear resistance ^a		γ_φ	1,0	1,25	
Spójność efektywna – Effective cohesion		γ_c	1,0	1,25	
Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu Undrained shear strength		γ_{cu}	1,0	1,4	
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe Unconfined compressive strength		γ_{qu}	1,0	1,4	
Ciężar objętościowy – Weight density		γ_g	1,0	1,0	
Nośność – Resistance		Symbol Symbol	Zestaw – Resistance factors		
			R1	R2	R3
Nośność podłoża – Bearing resistance		$\gamma_{R:v}$	1,0	1,4	1,0
Przesunięcie (poślizg) – Sliding resistance		$\gamma_{R:h}$	1,0	1,1	1,0

^aWspółczynnik ten stosuje się do wartości $\tan\varphi'$ – Factor for $\tan\varphi'$ value.

OBLICZENIA STATECZNOŚCI

Obliczenia stateczności projektowanego nasypu w stanie granicznym nośności (ULS) polegały na sprawdzeniu stanów granicznego STR, GEO oraz EQU. Jako wynik obliczeń uzyskano wskaźnik wykorzystania konstrukcji (*utilization factor*) μ , będący stosunkiem

sił niszczących (E) do sił utrzymujących (R). Obliczenia są zweryfikowane prawidłowo, kiedy stosunek sił $E/R \leq 1,00$, czyli $\mu \leq 1,00$ dla wszystkich przeprowadzonych obliczeniami modeli zniszczenia konstrukcji.

W pierwszym kroku, po wprowadzeniu do programu modelu badanego nasypu, sprawdza się metodą Bishopa stateczność zewnętrzną i wewnętrzną nasypu bez zbrojenia. Analiza wskaźnika wykorzystania konstrukcji wskazuje na wartość $\mu = 1,16$ i uwidocznia typową dla piasków płaszczyznę poślizgu przechodzącą blisko powierzchni skarpy.

W następnym kroku metodą kolejnych prób i przybliżeń ustala się następujące parametry:

- optymalny pionowy odstęp między warstwami zbrojenia,
- optymalną długość poszczególnych wkładek zbrojących nasypu,
- wymaganą wytrzymałość długoterminową zbrojenia geosyntetycznego.

Proces uznaje się za zakończony, kiedy udaje się uzyskać wartości $\mu \leq 1,00$. Im bliżej tej wartości, tym projekt jest lepiej zoptymalizowany. W przypadku nasypu komunikacyjnego, będącego przedmiotem niniejszego artykułu, za optymalną uznano wartość $\mu_{\min} = 0,99$. Z przeprowadzonej analizy wynika, że żaden z badanych stanów granicznych nośności nie został przekroczony, więc zastosowane rozwiązanie projektowe jest poprawne.

WYMIAROWANIE ZBROJENIA GEOSYNTETYCZNEGO

Wymiarowanie zbrojenia geosyntetycznego przeprowadzono zgodnie z wytycznymi EBGEO [2011], przyjmując następujące założenia:

- współczynnik redukcyjny $A_1 = 1,40$ (zgodnie z Europejską Aprobata... [2010]),
- współczynnik redukcyjny $A_2 = 1,00$ lub $1,06$ (dla piasku $d_{\max} < 2,0$ mm zgodnie z Europejską Aprobata... [2010]),
- współczynnik redukcyjny $A_3 = 1,00$ (brak zakładów w kierunku działania sił rozciągających),
- współczynnik redukcyjny $A_4 = 1,00$ (neutralne pH gruntu w zakresie od 4,1 do 8,9 (zgodnie z Europejską Aprobata... [2010]),
- wytrzymałość charakterystyczna długoterminowa geosyntetyku do zbrojenia skarpy nasypu:

$$F_{k40} = 40 / (1,40 \cdot 1,06 \cdot 1,00 \cdot 1,00) = 26,95 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

Wartość współczynnika bezpieczeństwa materiałowego (γ_m) przyjęto zgodnie z EBGEO [2011] jako $\gamma = 1,40$ (dla LC1).

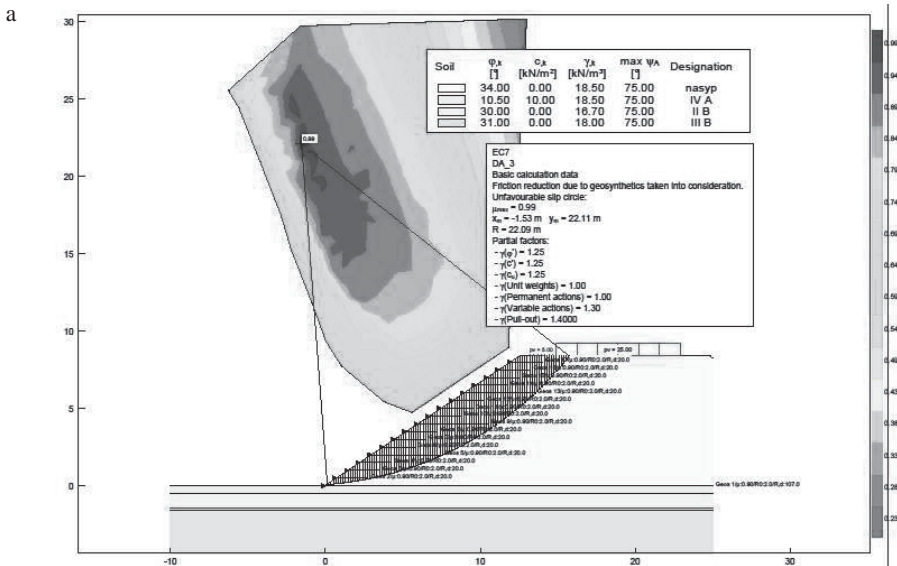
Wartość obliczeniowa georusztu Secugrid R6 40/20:

$$F_{d40} = 26,95 / 1,40 = 19,25 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

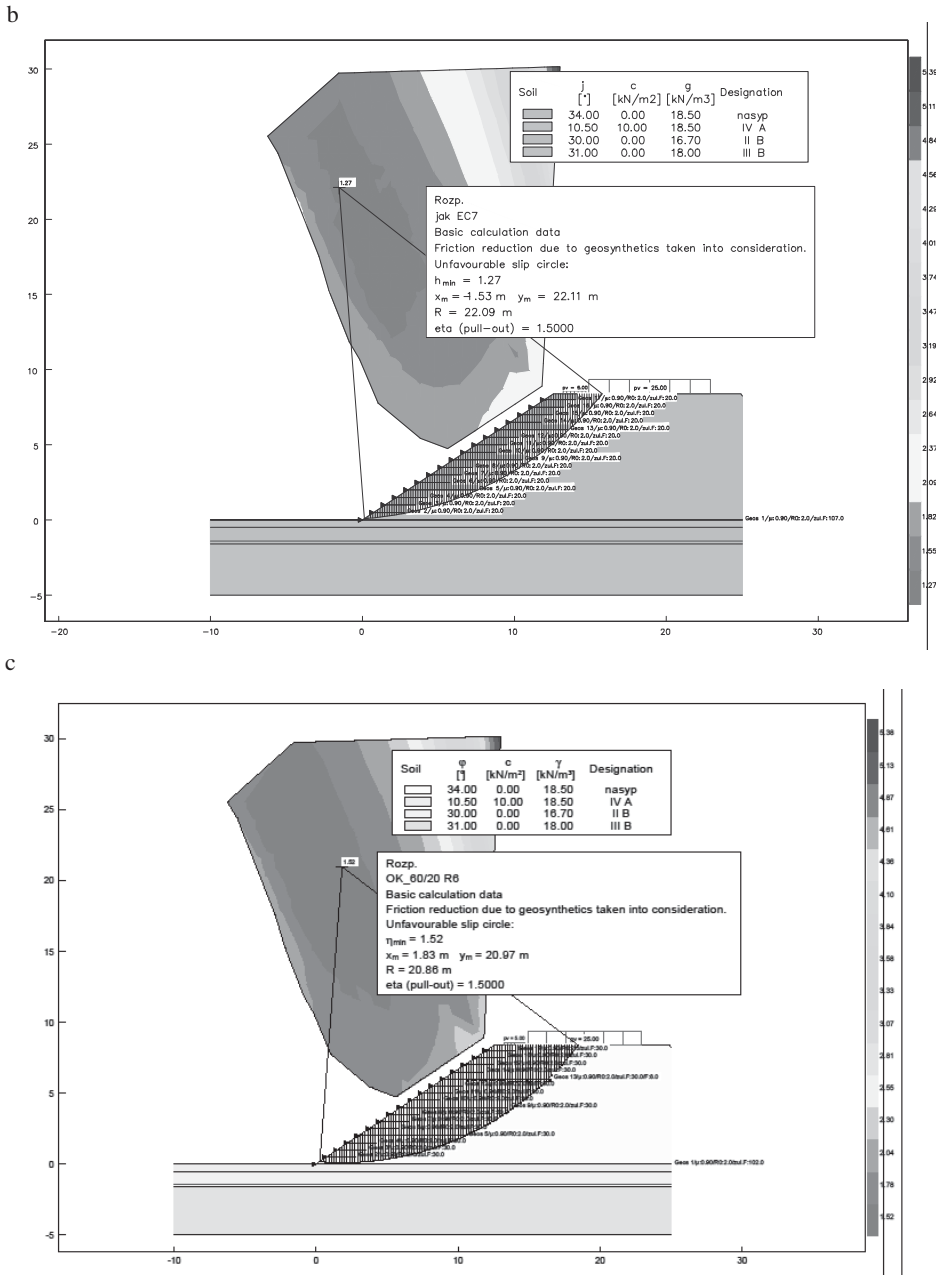
PODSUMOWANIE

W rzeczywistych warunkach gruntowych i przy zakładanym przepisami obciążeniu projektowany nasyp komunikacyjny nie miał wystarczającej stateczności. W toku analizy określono rodzaj geosyntetyków (georuszty), długość elementów zbrojeniowych, ich rozmieszczenie w nasypie oraz zweryfikowano wymaganą wytrzymałość na zerwanie dla zakładanego czasu pracy konstrukcji, wynoszącego 120 lat (rys. 2). Za pomocą oprogramowania komputerowego GGU-Stability sprawdzono stany graniczne: stateczności zewnętrznej (GEO) i stateczności wewnętrznej (STR), analizę siły połączenia elementów zbrojących z obliczaniem konstrukcji, dalej – zsuwu elementu konstrukcji po zbrojeniu (STR), wywrócenia konstrukcji poza zasięgiem zbrojenia (EQU) oraz sprawdzenia nośności podłoża pod konstrukcją (STR). Weryfikacja potwierdziła skuteczność proponowanego rozwiązania, ponieważ dla wszystkich rozpatrywanych mechanizmów zniszczenia wartość wskaźnika wykorzystania konstrukcji (*utilization factor*) wynosiła $\mu \leq 1,00$. Podsumowanie przeprowadzonych obliczeń przedstawia tabela 4.

Z przeprowadzonego porównania różnych metod obliczeniowych wynika, że metoda globalnego współczynnika bezpieczeństwa jest najbardziej konserwatywna, a rozwiązania projektowe wykonane zgodnie z nią są najdroższe i przewymiarowane, co znajduje odzwierciedlenie w opinii praktyków budownictwa. Zarówno wymagana długość wkładek zbrojenia, jak i wytrzymałość są znacznie większe niż w obliczeniach wykonanych metodą częściowych współczynników bezpieczeństwa. Metoda obliczeń według Eurokodu 7, podejście DA-1, jest liberalna, szczególnie w kwestii wyznaczenia wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku. Metoda EC-7, podejście DA-3, zdaje się być optymalna ze względu na kwestie bezpieczeństwa oraz ekonomikę kosztową konstrukcji, a w celu ujednolicenia sposobu wykonywania obliczeń stateczności nasypów na potrzeby praktyczna powinna być implementowana do poprawionego Rozporządzenia [1999].



cd. rys. 2 na stronie 82



Rys. 2. Porównanie wybranych wyników obliczeń stateczności nasypu metodami globalnego współczynnika bezpieczeństwa (η) oraz częściowych współczynników bezpieczeństwa zgodnie z EC-7, DA-3: a – EC-7, DA-3, $\mu = 0,99$, b – $\eta = 1,27$, c – $\eta = 1,52$ *

Fig. 2. Comparison of selected calculation results stability factor acc. to Global Safety Stability Factor (η) and Partial Factors (EC-7), Design Approach 3: a – EC-7, DA-3, $\mu = 0.99$, b – $\eta = 1.27$, c – $\eta = 1.52$

*Rys. 2 w kolorze na wkładce po stronie 184.

Tabela 4. Zestawienie wartości współczynników bezpieczeństwa uzyskanych w obliczeniach
 Table 4. Safety factors calculation results comparison

Parametr / Metoda obliczeniowa Parameter / Calculation method	EC7- DA3 Metoda częściowych współczynników bezpieczeństwa Partial Safety Factor Method	EC7- DA1 Metoda częściowych współczynników bezpieczeństwa Partial Safety Factor method	Metoda globalnego współczynnika bezpieczeństwa Global Safety Factor method	Metoda globalnego współczynnika bezpieczeństwa spełnione $\eta > 1,5$ Global Safety Factor method (meets $\eta > 1,5$)
F_d dla geosiatki Secugrid R6 40/20 F_d geogrid Secugrid R6 40/20	20 kN·m ⁻¹	26,6kN·m ⁻¹	20 kN·m ⁻¹	wymagane 30 kN·m ⁻¹ (konieczne mocniejsze zbrojenie niż wg EC-7) required 30 kN·m ⁻¹ (stronger reinforcement then EC-7 requirement)
Wskaźnik wykorzystania konstrukcji μ / Współczynnik bezpieczeństwa η Utilization factor μ / Global Safety Factor η	0,99	0,99	1,27	1,52
Wymagana długość zbrojenia ^a Required reinforcement elements length ^a	4,5 m	4,5 m	4,5 m	7,5 m (konieczne dłuższe zbrojenie niż wg EC-7) (required longer reinforcement elements then EC-7 requirement)

^aW rzeczywistości Instrukcja [2008] zaleca jako minimalną długość zbrojenia $l_{\min} > 0,7 h_{\text{nasypu}} > 2,5 \text{ m}$ – Required minimum length of reinforcement as $l_{\min} > 0,7 h_{\text{embankment}} > 2.5 \text{ m}$.

PIŚMIENNICTWO

- BN-76/8950-03 Badania hydrologiczne. Obliczanie współczynnika filtracji gruntów sypkich na podstawie uziarnienia i porowatości.
- Grzybińska Z., 2011. Opinia geotechniczna dotycząca warunków gruntowo-wodnych występujących wzdłuż projektowanego nasypu i drogi dojazdowej stanowiącej element wiaduktu drogowego w km 29,042 linii kolejowej E-65 Warszawa – Gdynia w ciąg ulicy Partyzantów w Chotomowie. Drog-Bud, Warszawa.
- EBGEO – Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, 2011. Niemiecki Komitet Geotechniki (wersja angielska), Berlin.
- Europejska Aprobata Techniczna, 2010. BBA 04/R141 Secugrid Geogrids, Secugrid PET Geogrids for reinforcement soil embankments, British Board of Agreement, Watford.
- Instrukcja ITB 429, 2008. Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. L. Wysokiński, W. Kotlicki, Warszawa.
- PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1 – Zasady ogólne.
- PN-EN ISO 10319 Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek.
- PN-EN ISO 13431 Geotekstylii i wyroby pokrewne. Wyznaczanie pełzania podczas rozciągania i zniszczenia przy pełzaniu.
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 25 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz.U. z 1999 r. nr 43, poz. 430.

- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. z 2012 r. poz. 463.
- Ruegger R., Hufenus R., 2003. Bauen mit geokunststoffen. Ein handbuch fur den Geokunststoff-Anwender. Szwajcarskie Stowarzyszenie Geotechniczne SVG.
- Wesolowski A., Krzywosz Z., Brandyk T., 2000. Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. SGGW, Warszawa.

REINFORCED ROAD EMBANKMENT DESIGN ACCORDING TO EUROCODE 7

Abstract. According to existing law regulations the safety factor of road embankment higher than 3.0 m should be calculated. One of the most popular and cost effective method is geosynthetics reinforcement with geogrids. Polish government regulations [1999] referred to global stability safety factor does not meet Polish-European Standard Eurocode 7 "Geotechnical design". The thesis shows the calculation's way according to PN-EN Eurocode 7 with partial safety factors option and the geogrid reinforcement selection and describes calculation of reduction factors and long term strength of the geosynthetic reinforcement, too. In the calculation part, with slip circle Bishop's method, comparison of calculation results safety factor (acc. to polish government regulations) and utilization factor (acc. to EC-7 Design Approach 3 and EC-7 Design Approach 1) was done.

Key words: geogrid, embankment reinforcement, long term strength, stability, reduction factors

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.07.2013