

# Dobór wyrobów geosyntetycznych do zbrojenia gruntu

Dr inż. Angelika Duszyńska, prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Technologia gruntu zbrojonego geotekstyliami i wyrobami pokrewnymi może z powodzeniem zastąpić konstruowanie klasycznych murów oporowych, których przeznaczeniem jest przejmowanie i przekazywanie na podłoże parcia gruntu.

Poza klasyczną konstrukcją oporową pod pojęciem gruntu zbrojonego kryje się znaczenie więcej różnych rozwiązań polegających na odpowiednim wbudowaniu w budowlę ziemną wkładek zbrojeniowych przenoszących rozciąganie w celu poprawienia właściwości wytrzymałościowych gruntu. Rozwiązania te są ciągle doskonalone. Warto podkreślić, że tego rodzaju konstrukcje, oprócz dużej elastyczności i podatności na deformacje (co jest szczególnie ważne na terenach górniczych i narażonych na występowanie deformacji nieciągłych), charakteryzują się dość dużą swobodą w ich kształtowaniu geometrycznym oraz skróceniem czasu budowy i w konsekwencji obniżeniem kosztów realizacji inwestycji.

Szczegółowy opis rodzajów geosyntetyków dostępnych na polskim rynku i ich funkcji w budowlach ziemnych zamieszczono między innymi w [2]. W niniejszym artykule skupiono się głównie na doborze wyrobów geosyntetycznych do pełnienia w konstrukcji funkcji wzmacniającej.

W Polsce brakuje norm krajowych dotyczących projektowania konstrukcji ziemnych z zastosowaniem geosyntetyków, dlatego też polscy projektanci zmuszeni są do korzystania z zaleceń zagranicznych. Najczęściej stosowane są wytyczne Niemieckiego Komitetu Geotechniki – EBGeo 2010 [4] oraz norma brytyjska 8006:2010 [1]. Opracowania te stworzono na podstawie EC 7-1 oraz odpowiednich norm krajowych DIN i PD.

## MECHANIZM DZIAŁANIA WZMOCNIENIA GEOSYNTETYCZNEGO

### Grunt zbrojony – skarpy nasypów i ściany oporowe

Zastosowanie gruntu zbrojonego do budowy skarpy daje możliwość kształtowania ich z nachyleniem większym niż nachylenie wynikające z wytrzymałości materiału zasypowego na ścinanie. Okazuje się, że ściany oporowe zbrojone, w stosunku do klasycznych monolitycznych konstrukcji z żelbetu, są rozwiązaniem bardziej ekonomicznym, a biorąc pod uwagę róż-

norodność oblicowań stają się również bardziej atrakcyjne pod względem architektonicznym i proekologicznym.

Konstrukcje z gruntu zbrojonego poddawane są stałemu obciążeniu, w całym okresie użytkowania budowli, które w konsekwencji działa również na geosyntetyki zbrojące (rys. 1). W przypadku, gdy wymagane jest utrzymywanie stałej siły w zbrojeniu przez długi okres, tak jak w przypadku skarpy, na wybór zbrojenia istotny wpływ ma charakterystyka pełzania materiału zbrojącego.

Pełzanie zależy bezpośrednio od polimeru oraz procesu produkcji geosyntetyku, dlatego też jest konieczne, aby wpływ pełzania oceniać na podstawie badań konkretnego wyrobu. W projektowaniu należy uwzględnić również możliwość uszkodzeń geosyntetyku podczas wbudowania oraz negatywne oddziaływania środowiskowe (przede wszystkim promieniowanie UV, utlenianie i agresywność chemiczną). To wszystko bierze się pod uwagę, stosując odpowiednie współczynniki częściowe redukujące wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie.

W przypadku zbrojenia konstrukcji oporowych i stromych skarpy nasypów wykorzystuje się wyroby jednokierunkowe charakteryzujące się większą wytrzymałością na rozciąganie w jednym kierunku (jest to tzw. kierunek roboczy zbrojenia).

### Geosyntetyk jako zbrojenie podstawy nasypu

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu zapewnia stateczność nasypu głównie w czasie budowy i konsolidacji słabego podłoża gruntowego oraz umożliwia lepsze rozłożenie nacisków na podłoże, co w konsekwencji skutkuje bardziej równomiernymi osiadaniami.

W przypadku posadawiania nasypów na słabym podłożu gruntowym, konieczność wbudowania w podstawę nasypu zbrojenia geosyntetycznego wynika głównie z potrzeby wzmocnienia podłoża w okresie jego konsolidacji. Po jej zakończeniu rola geosyntetyku jest niewielka, a współczynniki bezpieczeństwa są podobne jak w przypadku, gdyby geosyntetyku nie było (rys. 2). Rozważając wymaganą wartość wytrzymałości na rozciąganie geosyntetyku należy zwrócić uwagę, że w wartości tej trzeba uwzględnić parametry słabego podłoża gruntowego oraz wpływ konsolidacji.



Rys. 1. Zbrojone strome skarpy i konstrukcje oporowe [5]



Rys. 2. Nasyp na słabym podłożu gruntowym ze zbrojeniem w podstawie [5]



Rys. 3. Stabilizacja podłoża (obciążenia zmienne) [5]

W celu prawidłowego spełniania funkcji zbrojenia w podstawie nasypu, geosyntetyk powinien charakteryzować się, podobnie jak w przypadku zbrojenia skarp i konstrukcji oporowych, odpowiednią wytrzymałością na rozciąganie i trwałością. Analizując odporność chemiczną, należy uwzględnić właściwości materiałów, z którymi zbrojenie geosyntetyczne będzie w kontakcie, w szczególności odczyn pH. Jeżeli wartość pH gruntu wykracza poza przedział od 4 do 9 (dochodzi do tego np. przy stabilizacji podłoża spoiwem hydraulicznym), należy ten fakt uwzględnić, dobierając wyrób z odpowiedniego polimeru.

W przypadku zastosowań zbrojeń geosyntetycznych do wzmocnienia podstawy nasypu i podobnych (np. place składowe), tam gdzie ich charakter pracy jest wielokierunkowy, należy stosować wyroby, które cechują się jednakową wytrzymałością na rozciąganie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach lub zbrojenie trójosiowe (charakteryzujące się odpowiednią sztywnością i wytrzymałością).

### Geosyntetyk w funkcji stabilizacyjnej

Zastosowanie zbrojenia geosyntetycznego do stabilizacji podłoża zalicza się do aplikacji, w których obciążenie, głównie prostopadłe do płaszczyzny zbrojenia, jest zmienne w czasie (rys. 3). Zbrojenie warstw kruszywa przy zastosowaniu geosyntetyków skutkuje wydłużeniem okresu eksploatacji drogi spowodowanym lepszym rozkładem obciążenia, zmniejszeniem grubości warstwy kruszywa oraz polepszeniem nośności podłoża gruntowego.

Współpraca geosyntetyku z wzmocnianą warstwą oraz zdolności do przejścia przez geosyntetyk naprężenia rozciągającego wynikającego z przyłożonego obciążenia są głównymi czynnikami odpowiadającymi za efektywność wzmocnienia. Stabilizacja (wzmocnienie), np. warstwy kruszywa, wystąpi tylko wtedy, gdy nie dojdzie do poślizgu między kruszywem a geosyntetykiem.

### Geosyntetyki jako warstwa separacyjna

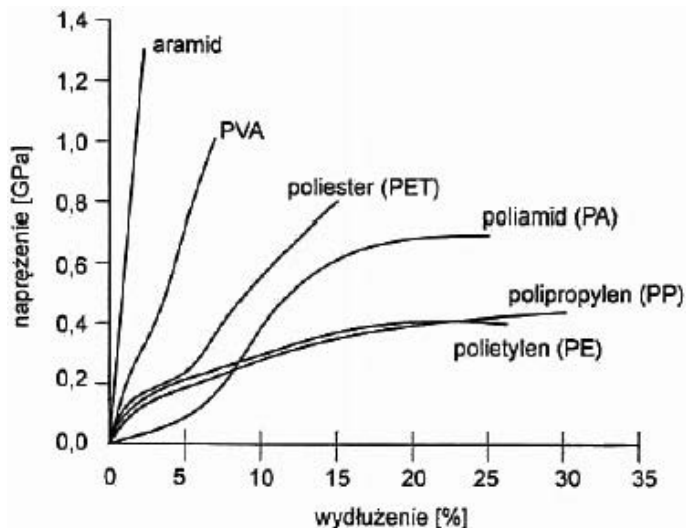
Separacja jest to oddzielenie dwóch materiałów o różnych właściwościach w celu niedopuszczenia do ich mieszania się (bez utrudnienia przepływu wody), np. warstwy podbudowy z kruszywa i podłoża gruntowego. Można to osiągnąć poprzez ułożenie na styku dwóch materiałów odpowiednio dobranego geosyntetyku. Często funkcję oddzielającą łączy się z funkcją filtracyjną lub wzmacniającą. W tym celu stosuje się geotekstylia: geowłókniny i geotkaniny – pierwsze najczęściej są powiązane z filtracją i drenażem, natomiast drugie ze zbrojeniem.

Warstwa separacyjna będzie właściwie spełniała swoją rolę tylko wtedy, gdy będzie odpowiednio dobrana (zaprojektowana) i nie ulegnie uszkodzeniom w czasie jej wbudowywania oraz eksploatacji obiektu. Separator powinien wykazywać odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie i na przebicie, która zależy między innymi od: kruszywa (wielkość i ostrokrawędzistość ziaren), metody wbudowania i rodzaju stosowanego sprzętu, jak również podatności podłoża, na którym jest ułożony separator.

### GEOTEKSTYLIA I WYROBY POKREWNE STOSOWANE DO WZMACNIANIA BUDOWLI ZIEMNYCH

Zgodnie z normą PN-EN ISO 10318:2007 [7] pod pojęciem geosyntetyk kryje się wyrób, którego przynajmniej jeden składnik wytworzono z polimeru, mający postać arkusza, paska lub formy przestrzennej, stosowany w kontakcie z gruntem.

Najczęściej obecnie stosowanymi polimerami do produkcji geosyntetyków są: polietylen wysokiej gęstości (HDPE), polipropylen (PP) i poliester (politereftalan etylenu PET). Stosuje się również poliamid (PA) oraz specjalne materiały o odpowiednio wysokich parametrach, między innymi: dużej sztywności na rozciąganie, odporności na oddziaływania chemiczne oraz charakteryzujące się małym pełzaniem, takie jak: poliwinylol-



Rys. 4. Zależność naprężenie – wydłużenie przy zastosowaniu różnych rodzajów włókien polimerowych [8]

alkohol (PVA) i aramid (A). Na rys. 4 zamieszczono wykres przedstawiający zależność naprężenie – wydłużenie przy zastosowaniu różnych rodzajów włókien polimerowych.

Należy zauważyć, że z szerokiej gamy wyrobów geosyntetycznych, tylko niektóre są odpowiednie do pełnienia funkcji zbrojenia gruntu. Są to przede wszystkim geotkaniny i geosiatki. Grupę tę uzupełniają: geokompozyty, geotaśmy i geosyntetyki komórkowe.

### Geotkaniny

Do produkcji geotkanin najczęściej wykorzystuje się poliester i polipropylen. Wyroby te wytwarzane są tradycyjną metodą tkacką z wyróżnieniem dwóch podstawowych kierunków: osnowa, czyli kierunek produkcji materiału, wzdłuż długości tkaniny oraz wątek, kierunek do niej prostopadły. W procesie produkcji wykorzystane mogą być włókna/przędze: tasiemkowe, monofilowe lub multifilowe. Należy zauważyć, że gotowy produkt nie zawsze musi składać się z jednego rodzaju włókien. Wykonywane są modyfikacje w produkcji materiału polegające na połączeniu włókien monofilowych z multihilowymi, bądź też z tasiemkowymi. Tego rodzaju połączenia mają na celu dostosowanie materiału do konkretnych wymagań, jakie stawiane są produktowi.

Geotkaniny wykonywane są przy zastosowaniu różnych rodzajów splotu. Do najczęściej stosowanych należą: splot płócienny, atlasowy i diagonalny.

Geotkaniny stosowane w funkcji zbrojącej lub wzmacniającej najlepiej spełniają swoje funkcje, jeżeli przy ich produkcji zastosowano splot płócienny. Ten rodzaj splotu zapewnia największą wytrzymałość struktury materiału oraz najbardziej niezmienną wielkość oczek pod wpływem obciążenia zewnętrznego. W przypadku, gdy są istotne właściwości hydrauliczne wyrobu, z bardzo dobrym rezultatem można zastosować splot diagonalny, cechujący się dużą porowatością.

Zgodnie z definicją normową [7] „geosiatka jest to płaski wyrób polimerowy stanowiący regularny układ o otwartej strukturze, z trwale połączonych elementów rozciąganych, które mogą być łączone w procesie wytłaczania, spajania lub przeplatania, w których otwory są większe niż elementy nośne”.

Do produkcji geosiatek najczęściej wykorzystuje się polipropylen, polietylen wysokiej gęstości oraz poliester. Do rzadziej stosowanych składników zaliczyć można włókna poliwinylalkoholowe, szklane, bazaltowe i węglowe.

Wśród obecnie stosowanych technologii wyróżnić można kilka odmiennych metod produkcji geosiatek. W zależności od zastosowanej technologii uzyskuje się produkt końcowy o zróżnicowanych parametrach mechanicznych i cechach fizycznych.

Pierwsza metoda produkcji – wytłaczanie – polega na wykorzystaniu płaskiego arkusza z tworzywa sztucznego, najczęściej polietylenu wysokiej gęstości lub polipropylenu. Podlega on wytłoczeniu oczek (otworów) według określonego wzoru, a następnie rozciąganiu w dwóch prostopadłych kierunkach, w odpowiednio dobranej temperaturze. W ten sposób powstaje wyrób geosyntetyczny, którego węzły są monolityczne (sztywne), nazywany geosiatką lub georusztem.

W drugiej metodzie produkcji geosiatek – tkanie – stosuje się przędzę poliestrową lub polipropylenową o odpowiednio wysokiej wytrzymałości, składającej się zazwyczaj z pojedynczych, skręconych włókien. Następnie w procesie tkania lub dziania pasemek włókien tworzoną jest struktura geosiatki o elastycznych węzłach.

Trzecia metoda produkcji – spawanie – polega na ekstrudowaniu, czyli poddaniu tworzywa sztucznego obróbce plastycznej oraz wyciskaniu go przez odpowiednio wykonane otwory/szczeliny urządzenia. W przypadku produkcji geosiatek, z procesu ekstruzji uzyskuje się płaskie żebra (taśmy), wykonane najczęściej z poliestru lub polipropylenu. Następnie, taśmy są przeciągane przez zestaw rolek wirujących z różnymi prędkościami nadającymi żebram kształt i dużą wytrzymałość. W ostatnim etapie produkcji żebra łączy się z sobą prostopadle, tworząc siatkę o wymaganej wielkości oczek. Proces ten zachodzi w urządzeniach zgrzewających, które łączą siatkę w miejscach przecięć żeber – węzłach, które w gotowym produkcie są bardzo sztywne.

Proces produkcji geosiatki wpływa na rodzaj węzłów, jaki występuje w wyrobie, oraz charakter współpracy zbrojenia z otaczającym gruntem. W przypadku zastosowania geosiatek z węzłami sztywnymi dużo efektywniej wykorzystuje się zjawisko ząbienia i klinowania się kruszywa w oczkach geosiatki. Ziarna kruszywa lub gruntu przechodzą przez oczka siatki, a częściowo w nie wnikają, ulegając zaklinowaniu w przestrzeniach pomiędzy żebrami. Wytrzymałość i sztywność żeber uniemożliwia przemieszczanie się ośrodka gruntowego na boki. Należy jednak zauważyć, że taki efekt, który zdecydowanie poprawia współpracę zbrojenia z gruntem, jest możliwy do uzyskania jedynie w przypadku zastosowania kruszywa o odpowiednio dopasowanej frakcji.

Poza tradycyjnymi geosiatkami jedno- i dwuosioowymi, kilka lat temu na rynku wyrobów geosyntetycznych pojawił się nowy produkt – georuszt trójosiowy. Cechą odróżniającą ten produkt od wyrobów jedno- i dwukierunkowych jest zmiana w konstrukcji georusztu, polegająca na modyfikacji kształtu oczka z prostokątnego na trójkątne. Poza główną modyfikacją kształtu geosiatki, czyli zastosowaniu oczek trójkątnych, zwiększono grubość żeber i zastosowano sztywniejsze węzły. Producent zapewnia, że dzięki odmiennej od klasycznych rozwiązań strukturze geosiatki zapewniona jest większa sztywność i wytrzymałość we wszystkich kierunkach, niż oferuje jakikolwiek inny georuszt.

### Geosyntetyk komórkowy

Geosyntetyk komórkowy jest to polimerowy (syntetyczny lub naturalny) wyrób o przestrzennej, przepuszczalnej strukturze w formie plastra miodu lub podobnej strukturze komórkowej, wytworzony z połączonych z sobą taśm geosyntetyków [7]. Nazwa geosyntetyk komórkowy funkcjonuje w praktycznym zastosowaniu niezwykle rzadko. Zarówno w literaturze, jak i w katalogach producentów, tego rodzaju wyroby nazywane są zazwyczaj geokratami lub geosiatkami komórkowymi.

Surowiec stosowany do produkcji geosyntetyków komórkowych to polietylen wysokiej gęstości, z którego produkowane są taśmy o określonej szerokości (zazwyczaj z przedziału  $50 \div 250$  mm). Są one łączone punktowo w procesie zgrzewania za pomocą ultradźwięków. Gotowa sekcja wyrobu po rozciągnięciu i wbudowaniu w teren wyglądem swojej struktury przypomina plaster miodu. Jej wysokość jest uzależniona od szerokości taśm, z których ją wykonano.

Taśmy będące elementami geosyntetyku komórkowego mogą być pełne, perforowane (co umożliwia swobodny spływ wody w płaszczyźnie wyrobu) lub nacinane (w celu zwiększania efektu kotwienia na skarpie). Przestrzenie pomiędzy taśmami, nazywane komórkami, wypełnia się kruszywem, który w połączeniu z geosyntetykiem tworzy przestrzenny kompozyt.

Geosyntetyki komórkowe są stosowane głównie w celu zabezpieczeń przeciwerozrywnych powierzchni skarp. Wykorzystuje się je także do wzmocnienia słabonośnego podłoża gruntowego oraz do budowy dróg tymczasowych i podatnych murów oporowych.

Należy zauważyć, że wielkość pojedynczej komórki, wysokość produktu oraz rodzaj taśm (pełne/perforowane lub nacinane) jest uzależniona od funkcji, jaką ma pełnić geosyntetyk komórkowy.

### Geotaśmy (GST)

Geotaśmy są to polimerowe wyroby w formie pasków o szerokości nie większej niż 200 mm, stosowane w kontakcie z gruntem i/lub innymi materiałami, w geotechnice i budownictwie [7].

Geotaśmy są używane do produkcji innych wyrobów geosyntetycznych, między innymi geosyntetyków komórkowych. Jako samodzielny produkt mogą być wykorzystane w geotechnice i bu-

downictwie, jako zbrojenie gruntu zasypowego stromych skarp, zboczy lub murów oporowych. W tych zastosowaniach, charakter współpracy geosyntetycznych taśm z gruntem zasypowym jest zbliżony do stałowych taśm zbrojących. Rozstaw, długość oraz wymiary poprzeczne (grubość i szerokość) geotaśmy dobiera się w zależności od parametrów technicznych konstrukcji, której zbrojenie mają stanowić, takich jak wysokość, oddziałujące obciążenia itp., oraz od parametrów gruntowych podłoża i zasypki.

### Geokompozyty (GCO)

Geokompozyty stanowią oddzielną grupę wyrobów o bardzo zróżnicowanych parametrach i pełnionych funkcjach w kontakcie z gruntem. Geokompozyt ma właściwości poszczególnych elementów wchodzących w jego skład. Dzięki połączeniu kilku różnych materiałów, które pełnią odrębne funkcje, uzyskuje się kompozyty wielofunkcyjne. Na rynek wprowadzono między innymi kompozyty będące połączeniem elementów zbrojących z innymi składnikami, poprawiającymi współpracę gruntu ze zbrojeniem lub też stanowiącymi warstwy separacyjne.

### ZALECENIA EBGEO DOTYCZĄCE WYMIAROWANIA ZBROJENIA GEOSYNTETYCZNEGO

Właściwe zastosowanie geosyntetyków w gruncie prowadzi do zwiększenia jego nośności i wydłuża okres użytkowania konstrukcji. Jest to spowodowane przekazywaniem naprężenia między gruntem a rozciągającym zbrojeniem geosyntetycznym. Naprężenie jest przenoszone dzięki mechanizmowi tarcia, klinowania się i/lub przyczepności między zbrojeniem a gruntem. Właściwościami decydującymi o współpracy gruntu i zbrojenia geosyntetycznego są [3, 4]:

- efektywna wytrzymałość na ścinanie między geosyntetykiem i gruntem zasypowym nasypu,
- wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie,
- sztywność osiowa geosyntetyku w gruncie.

### Odporność strukturalna (wytrzymałość) geosyntetyku

Określenie „odporność strukturalna geosyntetyku” odnosi się do jego wytrzymałości na rozciąganie  $R_{B,d}$ . Wyznaczana jest na podstawie krzywej obciążenie – odkształcenie z badania geosyntetyku na rozciąganie jednoosiowe. Wytrzymałość krótkoterminowa  $R_{B,k0}$  jest określana na podstawie maksymalnej siły rozciągającej (w odniesieniu do 1 m szerokości) osiągniętej w badaniu rozciągania danego wyrobu. Określając charakterystyczną wartość wytrzymałości na rozciąganie  $R_{B,k0}$ , uwzględnia się pięcioprocentową tolerancję (95% poziom ufności). Wytrzymałość długoterminową  $R_{B,k}$  uzyskuje się, dzieląc wytrzymałość krótkoterminową  $R_{B,k0}$  przez współczynniki redukujące  $A_1 \div A_5$ . Współczynniki te uwzględniają wpływy: pełzania ( $A_1$ ), uszkodzeń podczas transportu i wbudowywania ( $A_2$ ), szwów i połączeń ( $A_3$ ), środowiska ( $A_4$ ) oraz oddziaływań dynamicznych ( $A_5$ ).

$$R_{B,k} = \frac{R_{B,k0}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5} \quad (1)$$

gdzie:

- $R_{B,k}$  – charakterystyczna wartość wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku,
- $R_{B,k0}$  – charakterystyczna wartość wytrzymałości krótkoterminowej geosyntetyku (5% tolerancji),
- $A_1$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający odkształcenie podczas pelzania oraz zniszczenie przy pelzaniu,
- $A_2$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający uszkodzenia podczas transportu, układania oraz zagęszczania,
- $A_3$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ szwów, złączy i połączeń,
- $A_4$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ środowiska (odporność na starzenie się w warunkach atmosferycznych, odporność chemiczną, mikrobiologiczną oraz przeciw zwierzętom),
- $A_5$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający oddziaływania dynamiczne.

Projektową (obliczeniową) wartość wytrzymałości długoterminowej  $R_{B,d}$  oblicza się, dzieląc wartość charakterystyczną wytrzymałości długoterminowej  $R_{B,k}$  przez częściowy współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_M$  związany z wytrzymałością strukturalną, tzw. współczynnik bezpieczeństwa materiałowego. Współczynnik ten uwzględnia wszelkie odchyłki w geometrii konstrukcji, a także w wartościach charakterystycznych geosyntetyku w porównaniu z tymi, które zidentyfikowano w laboratorium.

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k}}{\gamma_M} \quad (2)$$

gdzie:

- $R_{B,k}$  – charakterystyczna wartość wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku,
- $R_{B,d}$  – projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia,
- $\gamma_M$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa materiałowego dla konstrukcji z gruntu zbrojonego elementami odkształcalnymi.

Wymagane parametry wyrobu i współczynniki redukcyjne powinny być podane przez producenta w postaci raportów z badań przeprowadzonych w niezależnych instytutach z wyspecjalizowaną kadrą i specjalistycznym sprzętem do badań, lub danych z aprobat technicznych. W przypadku braku takich danych, można zastosować wartości współczynników redukcyjnych podane w zaleceniach EBGeo [4].

Jeżeli kombinacja współczynników redukcyjnych spowoduje, że w konstrukcji trwale obciążonej wystąpi warunek  $R_{B,d} \leq 0,1 \cdot R_{B,k0}$ , można wziąć pod uwagę różne opcje, aby uniknąć wątpliwości dotyczących zniszczenia konstrukcji jako całości. Stosując odpowiednie pomiary inżynierskie oraz dokonując doboru geosyntetyku i materiału zasypowego, jest możliwe osiągnięcie technicznie poprawnego i ekonomicznego rozwiązania problemu, np. poprzez:

- dobór surowców (ze względu na A1),
- zastosowanie warstw osłonowych (ze względu na A2),
- zastosowanie geokompozytu (ze względu na A1 i A2),
- zmianę materiału zasypowego (ze względu na A2 i A4).

Należy wybrać właściwe rozwiązanie, odpowiednie do konkretnego zastosowania.

## Osiowa sztywność geosyntetyku w stanie granicznym użyteczności

Sztywność geosyntetyku, będąca miarą zachowania się zbrojenia podczas obciążenia osiowego, jest określona jako konserwatywna, charakterystyczna wartość odczytana z krzywej obciążenie – wydłużenie geosyntetyku lub z izochron geosyntetyku (bez uwzględniania kontaktu z gruntem). Izochrony umożliwiają określenie długoterminowej osiowej sztywności wyrobu  $J_{a-b,k,t}$ .

Krótkoterminową wartość osiowej sztywności geosyntetyku można określić na podstawie badania na rozciąganie, zgodnie z normą EN ISO 10319, z którego uzyskuje się reprezentatywną krzywą obciążenie krótkoterminowe – wydłużenie. Przyjmuje się, że sztywność osiowa geosyntetyku jest równa modułowi siecznemu  $J$ .

$$J_{a-b,k,0} = \frac{F_b - F_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (3)$$

gdzie:

- $J_{a-b,k,0}$  – charakterystyczna krótkoterminowa sztywność osiowa geosyntetyku w zakresie od  $\epsilon_a$  do  $\epsilon_b$ ,
- $F$  – naprężenie przy danym odkształceniu,
- $\epsilon_a, \epsilon_b$  – odkształcenia.

## ZALECENIA BS 8006 DOTYCZĄCE DOBORU ZBROJENIA GEOSYNTETYCZNEGO

W przypadku ścian, skarp, nasypów posadowionych na palach, oszacowana projektowa wartość obciążenia jest stała podczas okresu, na który zaprojektowano zbrojenie. Zatem projektowa wytrzymałość zbrojenia powinna być określona na bazie wytrzymałości, którą w rzeczywistości uzyskuje się na końcu projektowanego okresu użytkowania. W zbrojeniu poddanym odkształceniom wywołanym pelzaniem, projektowa wytrzymałość może bardziej wynikać z warunków użyteczności niż zerwania w wyniku pelzania. W nasypach posadowionych na słabym podłożu gruntowym, obciążenie przejęte przez zbrojenie może zmaleć z czasem, a zatem wytrzymałość zbrojenia w trakcie albo pod koniec budowy może być wartością krytyczną. Wytrzymałość tę można określić na podstawie krzywych izochronicznych obciążenie/odkształcenie (pelzanie).

Według BS 8006 [1] w celu uzyskania projektowej wytrzymałości  $T_D$  należy zredukować wartość charakterystyczną zbrojenia  $T_B$ , wykorzystując współczynnik materiałowy  $f_m$ :

$$T_D = \frac{T_B}{f_m} \quad (4)$$

$$f_m = RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s$$

gdzie:

- $f_m$  – materiałowy współczynnik bezpieczeństwa,
- $RF_{ID}$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający uszkodzenia podczas wbudowywania,
- $RF_W$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający starzenie się w warunkach atmosferycznych,
- $RF_{CH}$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ oddziaływań chemicznych/środowiskowych,
- $f_s$  – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ekstrapolację danych.

Wszystkie cząstkowe współczynniki redukcyjne oraz globalny współczynnik bezpieczeństwa powinny być określone zgodnie z metodami przedstawionymi w PD ISO/TR 20432 [6].

Projektowa wartość wytrzymałości może wynikać z warunków stanu granicznego nośności lub stanu granicznego użyteczności. Zauważalne są wyraźne różnice pomiędzy zbrojeniem podstawy nasypu posadowionym na słabym podłożu gruntowym a zbrojeniem ścian i zboczy. W nasypach posadowionych na słabym podłożu gruntowym maksymalne projektowe obciążenia występują na końcu budowy pod warunkiem, że w trakcie budowy nie dojdzie do konsolidacji podłoża gruntowego. Jeżeli po zakończeniu budowy nastąpi konsolidacja, to projektowe obciążenie będzie maleć w czasie. Oznacza to, że w każdym momencie projektowa wartość wytrzymałości będzie równa bądź większa od projektowych obciążeń.

W przypadku ścian i zboczy przyjmuje się, że projektowa wartość obciążenia jest stała w całym projektowanym okresie użytkowania. Projektowa wartość wytrzymałości zdefiniowana jest dla końca okresu użytkowania ścian lub zboczy. To podejście jest zbyt zachowawcze do projektowania zbrojenia podstawy nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym, ponieważ w tym przypadku projektowe obciążenia maleją z czasem, po zakończeniu budowy.

W przypadkach, w których projektowany okres użytkowania przekracza czas trwania badań wykorzystywanych do określenia zależności  $T_B$  od czasu, jest konieczne określenie  $T_B$  na podstawie ekstrapolacji posiadanych wyników badań. W stalowych zbrojeniach ekstrapolacja dotyczy oszacowania zmiany wymiarów zbrojenia w czasie spowodowanej korozją elektrochemiczną.

W zbrojeniach polimerowych, które wykazują pełzanie, współczynnik  $f_m$  określa się na podstawie ekstrapolacji charakterystycznych dla produktu odkształceń wynikających z pełzania, wyników badań zerwania na skutek pełzania, z uwzględnieniem warunków środowiskowych.

Podstawowa wytrzymałość zbrojenia  $T_B$  powinna być zgodna z poniższymi wytycznymi:

- a) W stanie granicznym nośności podstawową wytrzymałością jest  $T_{CR}$ , czyli wytrzymałość na zerwanie w wyniku pełzania w określonym czasie oraz temperaturze.

$$T_B = T_{CR} = \frac{T_{char}}{RF_{CR}} \quad (5)$$

gdzie:

$T_{char}$  – charakterystyczna krótkoterminowa wytrzymałość,  
 $RF_{CR}$  – współczynnik redukcyjny uwzględniający pełzanie.

Projektową wytrzymałość w stanie granicznym nośności oblicza się z wzoru:

$$T_D = \frac{T_{CR}}{f_m} \quad (6)$$

- b) W stanie granicznym użyteczności podstawową wytrzymałością jest  $T_{CS}$ , która powoduje ograniczenie odkształceń w zbrojeniu różnych konstrukcji.

Projektową wartość wytrzymałości w stanie granicznym użyteczności oblicza się z wzoru:

$$T_D = \frac{T_{CS}}{f_m} \quad (7)$$

zawartego w pracy [1].

## PODSUMOWANIE

Prawidłowe zaprojektowanie konstrukcji z gruntu zbrojonego geosyntetykiem wymaga szczegółowych informacji dotyczących zbrojenia. Należą do nich przede wszystkim:

- wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie z uwzględnieniem pełzania w okresie projektowym, określona w odpowiedniej temperaturze, odpowiadającej warunkom pracy w konstrukcji,
- wpływ uszkodzeń w trakcie wbudowania zbrojenia i zagęszczania gruntu (kruszywa),
- wpływ oddziaływań środowiskowych,
- wpływ sposobu produkcji geosyntetyku i ekstrapolacji wyników badania pełzania.

Niezależnie od zaleceń projektowych i przyjętej metody, zasadniczo analiza stateczności konstrukcji jest podzielona na dwie części – analizę stateczności zewnętrznej oraz analizę stateczności wewnętrznej. Analiza stateczności zewnętrznej prowadzi do ustalenia minimalnej długości zbrojenia, wykluczającej możliwość poślizgu, utraty nośności podłoża, wywrócenia lub utraty stateczności konstrukcji jako całości. W wyniku analizy stateczności wewnętrznej konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego geosyntetykami określa się: wymaganą długoterminową wytrzymałość, rozstaw i długość zbrojenia, które gwarantują zachowanie integralności konstrukcji i bezpieczną współpracę zbrojenia i gruntu w projektowanym okresie użyteczności.

## LITERATURA

1. BS 8006:2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
2. Duszyńska A.: Co warto wiedzieć o geosyntetykach. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2010.
3. Duszyńska A.: Wykorzystanie badań geotekstyliów w projektowaniu budowli ziemnych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2012.
4. EBGEO: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements. Ernst W. & Sohn Verlag, 2011.
5. Jewell R. A.: Soil reinforcement with geotextiles, CIRCA Special Publication 123, Thomas Telford Ed, London 1996.
6. PD ISO/TR 20432: 2007. Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.
7. PN-EN ISO 10318:2007. Geosyntetyki. Terminy i definicje.
8. Wysokiński L., Kotlicki W.: Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. Seria Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB. Nr 429/2007.